

ตัวเก็บประจุ (Capacitor หรือ Condenser) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ได้หลายอย่างในวงจรไฟฟ้า เช่น ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ในการแยกไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับออกจากกัน โดยตัวเก็บประจุจะปล่อยให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านตัวมันไปได้ แต่จะไม่ปล่อยให้ไฟฟ้ากระแสตรงให้ผ่านไป และที่สำคัญตัวเก็บประจุมักทำหน้าที่ในการเก็บพลังงานไว้ในตัวเองได้อีกด้วย<sup>(11)</sup>

### 2.1 ลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุ (Capacitor Characteristics)

โดยทั่วไปแล้วตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่นประกบอยู่กับสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสารไดอิเล็กตริกนี้เองที่บ่งชี้ให้เห็นถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุ

สารไดอิเล็กตริกคือฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ทำหน้าที่คั่นระหว่างอิเล็กโทรด เพื่อกันหรือให้ทนแรงดันได้สูงขึ้นกว่าก๊าซรวมทั้งอากาศด้วยเช่น คั่นระหว่างแผ่นตัวนำของตัวเก็บประจุ คั่นระหว่างตัวนำในกับตัวนำนอกของเคเบิล คั่นระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กในหม้อแปลง เป็นต้น<sup>(12)</sup>

สารไดอิเล็กตริกที่สมบูรณ์แบบจะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้น ถ้าหากได้รับไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งก็คือ มีค่าความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วสารไดอิเล็กตริกที่ใช้กันอยู่มักจะนำกระแสได้แต่มีค่าน้อยมาก นั้นแสดงว่าสารไดอิเล็กตริกมีความต้านทานไฟฟ้าไม่สูงเป็นอนันต์ กระแสที่ไหลผ่านน้อยๆ นั้นเรียกว่า กระแสรั่ว (leakage current) ซึ่งยังแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อในของสารไดอิเล็กตริก ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวของสารไดอิเล็กตริก อันเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของสิ่งปนเปื้อนและความชื้น

เราสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริกได้ โดยถ้าเราทราบว่าสารไดอิเล็กตริกมีความต้านทาน  $R$  ถ้าพิจารณากรณีตัวเก็บประจุแผ่นขนานซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  และความหนาของสารไดอิเล็กตริกเป็น  $d$  ดังนั้น

$$\rho = R \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\rho$  คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริก (Resistivity)

ลักษณะสำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติและคุณภาพของตัวเก็บประจุมี 5 ประการคือ<sup>(13)</sup>

1. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) เป็นตัววัดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของกระบวนการทางโพลาริเซชัน (Polarization Process)
2. ค่าแฟกเตอร์ความสูญเสีย (Dissipation Factor) เป็นตัววัดความไม่สมบูรณ์ของกระบวนการทางโพลาริเซชัน
3. ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) เป็นตัววัดถึงประสิทธิภาพการกักไฟฟ้ากระแสตรง
4. ความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้า (Breakdown Voltage) เป็นตัวชี้ถึงประสิทธิภาพการทำงานที่ความต่างศักย์สูงสุด
5. การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ดังกล่าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความถี่ และความชื้นของสนามไฟฟ้า

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก หรือบางทีเรียกว่า ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity :  $\epsilon$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง เป็นตัวชี้บอกความสามารถในการสร้างตัวเก็บประจุของสารไดอิเล็กตริกนั้น หรือกล่าวง่ายๆ ก็คือเป็นตัวเลขที่บอกให้ทราบว่าค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้สารไดอิเล็กตริกนั้นๆ จะเพิ่มขึ้นเป็นกี่เท่าของตัวเก็บประจุสุญญากาศ<sup>(13)</sup> นั่นคือ

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.2)$$

เมื่อ

$C_0$  เป็นค่าความจุของตัวเก็บประจุสุญญากาศ

$C$  เป็นค่าความจุของตัวเก็บประจุ ที่มีสารไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็น  $\epsilon$



โดยปกติแล้วค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแสดงเป็นค่าสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) เทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ ( $\epsilon_0$ ) คือ

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.3)$$

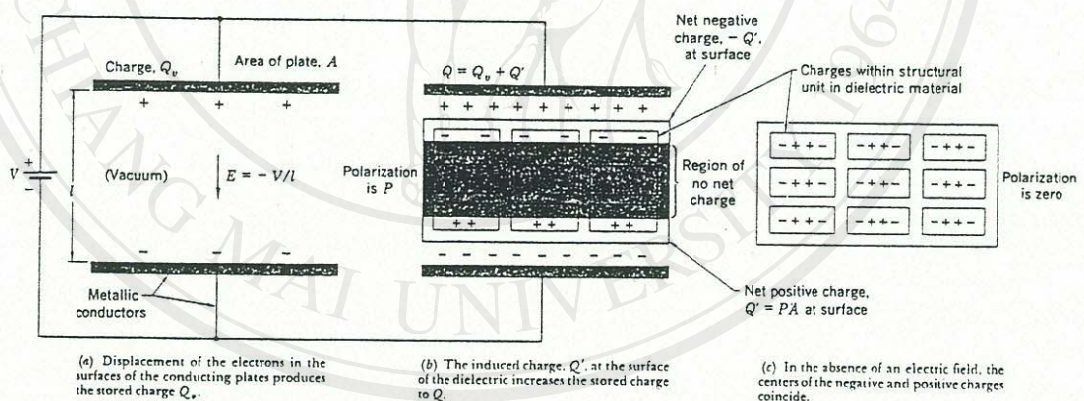
โดยที่  $\epsilon_0$  มีค่า  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m  
และจากความสัมพันธ์  $C = Q/V$  จะได้ว่า

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.4)$$

เมื่อ

A เป็น พื้นที่หน้าตัดของแผ่นอิเล็กโทรด

d เป็น ความหนาของสารไดอิเล็กตริก



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบประจุบนตัวเก็บประจุ (14)

ในตัวเก็บประจุสุญญากาศที่มีค่าความจุ  $C_0$  จะมีกระแสไหลผ่านเป็น (12)

$$i(t) = C_0 \frac{d}{dt} v(t) \quad (2.5)$$

$$\text{หรือ} \quad I = j\omega C_0 V \quad (2.6)$$

โดยจะเห็นว่าเครื่องหมาย  $j$  แสดงว่ากระแสหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา ส่วนตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กตริก ค่าความจุ  $C$  จะไม่เท่ากับ  $C_0$  นอกจากนี้ในทางปฏิบัติแล้ว มุมระหว่างความต่างศักย์กับกระแสจะน้อยกว่า 90 องศา เพราะมีพลังงานสูญเสียในลักษณะของความต้านทาน เราจึงอาจจะเขียนค่าความจุในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งรวมอยู่ในค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือ

$$C = \vec{\epsilon}_r C_0 \quad (2.7)$$

โดยที่  $\vec{\epsilon}_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.8)$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะเป็น

$$\begin{aligned} I &= j\omega CV \\ &= j\omega(\epsilon' - j\epsilon'')C_0 V \\ &= j\omega\epsilon'C_0 V + \omega\epsilon''C_0 V \end{aligned} \quad (2.9)$$

เทอมแรกของทางขวามือเป็นกระแสตัวเก็บประจุ ( $I_c$ ) ส่วนเทอมหลังเป็นกระแสพลังงานสูญเสีย ( $I_r$ ) นั่นคือ

$$I = I_c + I_r \quad (2.10)$$

การที่สารไดอิเล็กตริกมีพลังงานสูญเสียและสามารถเก็บประจุไว้ในตัวเก็บประจุ

เราอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2.2

วงจรขนาน :  $C_p = \epsilon' C_0$   
 $R_p = 1/(\omega\epsilon''C_0) \quad (2.11)$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$



วงจรอันดับ : 
$$C_s = \frac{|\vec{\epsilon}_r|}{\epsilon'} C_0$$

$$R_s = \frac{\epsilon''}{\omega |\vec{\epsilon}_r|^2 C_0} \quad (2.12)$$

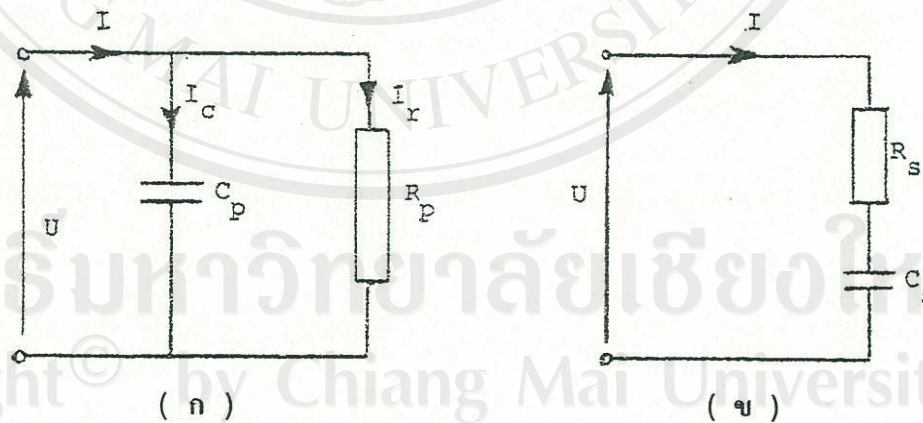
$$\tan \delta = \omega R_s C_s = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

มุม  $\delta$  นี้เรียกว่า มุมพลังงานสูญเสีย (loss angle)

จากสมการที่ (2.11) และ (2.12) จะเห็นว่า ถ้ากรณี  $\epsilon'' \ll \epsilon'$  จะได้  $C_p = C_s$  นั้นแสดงได้ว่า

$$\vec{\epsilon}_r \longrightarrow \epsilon_r = \epsilon' \quad (2.13)$$

เราจึงใช้ค่า  $\epsilon'$  เพื่อเปรียบเทียบเป็นค่า  $\epsilon_r$  ได้



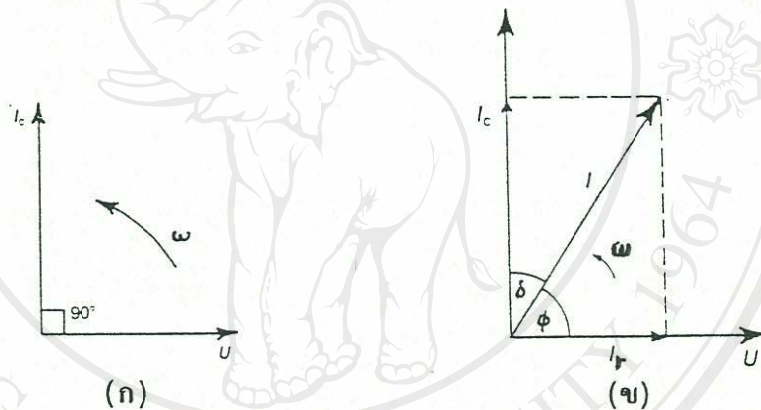
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของสารไดอิเล็กตริก<sup>(12)</sup>

ก. วงจรขนาน

ข. วงจรอันดับ

พลังงานที่สูญเสียในสารไดอิเล็กตริกอาจแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากการนำไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริกที่ความต้านทานไม่ถึงอนันต์ และอีกส่วนหนึ่งเป็นพลังงานสูญเสียเนื่องจากโพลาไรเซชันของสารไดอิเล็กตริก

ถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้าของกระแสสลับให้กับตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กตริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เสมือนมีกระแสไหลผ่านตัวต้านทานเกิดขึ้น จึงทำให้กระแสผลรวมมีเฟสหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงเฟสของกระแสในตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์และในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.3 ลักษณะมุมเฟสในตัวเก็บประจุ<sup>(11)</sup>

ก. สำหรับตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์

ข. สำหรับตัวเก็บประจุในทางปฏิบัติ

จากรูปที่ 2.3 (ข) สามารถหา  $\tan \delta$  ได้คือ<sup>(11)</sup>

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad \text{สำหรับวงจรขนาน} \\ &= \omega C_s R_s \quad \text{สำหรับวงจรอันดับ} \end{aligned} \quad (2.14)$$



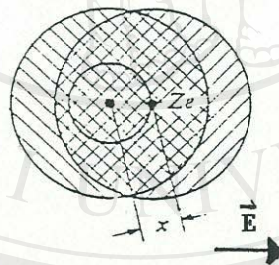
ดังนั้นพลังงานสูญเสียเฉลี่ยจะเป็น<sup>(11)</sup>

$$P_d = \frac{1}{2}(V I_c \tan \delta) = \frac{1}{2} V^2 \omega C \tan \delta \quad (2.15)$$

โดยที่  $\tan \delta$  เรียกว่า แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dissipation Factor)

## 2.2 สมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Properties)

สารทุกชนิดประกอบด้วยส่วนย่อย คือโมเลกุล โมเลกุลปกติประกอบด้วยกลุ่มโปรตอนและกลุ่มอิเล็กตรอน มีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกันและอยู่ภายใต้แรงยึดของโมเลกุลและแรงยึดของอะตอม เมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้ามากระทำกับ โมเลกุลจะทำให้กลุ่มประจุบวกถูกผลักไปในทิศทางของสนาม และกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นโมเลกุลทุกโมเลกุลของสารต่างก็ก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) เล็กๆ ขึ้นในทิศทางเดียวกัน สารไดอิเล็กตริกประเภทนี้เป็นสารประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (non-polar molecule) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ ไดอิเล็กตริกที่เป็นสารไม่มีขั้ว<sup>(15)</sup>

เมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้เกิด dipole moment

สาร ไดอิเล็กตริกบางชนิดที่ โมเลกุลของมันก่อตัวเป็นขั้วคู่อยู่แล้ว แต่ทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole) ขึ้นทิศทางที่ไม่เป็นระเบียบ (random) ดังรูปที่ 2.5 และเมื่อแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่อมัน จะทำให้ขั้วคู่เล็กๆ เหล่านี้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ เราเรียกโมเลกุลประเภทนี้ว่าโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) และเรียกขั้วคู่ของโมเลกุลประเภทนี้ว่าขั้วคู่ถาวร (permanent dipole)<sup>(16)</sup>

มีสารบางชนิดที่ขั้วคู่ของโมเลกุลเรียงตัวกันได้เอง โดยไม่ต้องใช้สนามจากภายนอก ดังนั้นสารชนิดนี้จึงแสดงอำนาจไฟฟ้าด้วยตัวของมันเอง เราเรียกสารชนิดนี้ว่าสารไฟฟ้าเฟอร์โร (ferroelectric materials) เช่น แบเรียมไททาเนต ( $\text{BaTiO}_3$ ) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะของโมเลกุลมีขั้วที่วางตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (16)

ลักษณะของการที่โมเลกุลของสารไดอิเล็กตริกก่อตัวเป็นคู่เล็กๆ แล้วจัดเรียงตัวกันในสนามไฟฟ้า เรียกว่า โพลาไรเซชัน (polarization) โดยกำหนดให้โพลาไรเซชันเป็นจำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ต่อหน่วยปริมาตร ถ้า  $N$  เป็นจำนวนโมเลกุลต่อหน่วยปริมาตรและทุกๆ โมเลกุลมีโมเมนต์ขั้วคู่เป็น  $p$  ดังนั้นจะได้โพลาไรเซชัน ( $\vec{P}$ ) คือ (17)

$$\vec{P} = N\vec{p} \quad (2.16)$$

และเมื่อสารไดอิเล็กตริกถูกโพลาไรซ์ คุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.17)$$

โดยที่  $\vec{D}$  คือ Electric displacement vector

$\vec{E}$  คือ สนามไฟฟ้าในตัวกลาง

$\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศมีค่า  $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



แต่ว่า  $\vec{D}$  จะขึ้นอยู่กับสนามภายนอกเท่านั้น ถ้าให้สนามไฟฟ้าภายนอกเป็น  $\vec{E}_0$  ดังนั้นสนามไดอิเล็กตริกจะเป็น

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0 \quad (2.18)$$

สมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารไดอิเล็กตริกคือ มีสภาพอ่อนไหวทางไฟฟ้าหรือ ความซ่านซึมทางไฟฟ้า  $\chi$  (electric susceptibility) กำหนดได้ด้วยสมการ<sup>(16)</sup>

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (2.19)$$

ในสุญญากาศไม่เกิดโพลาไรเซชัน ( $\vec{P} = 0$ ) ดังนั้น  $\chi$  เป็นศูนย์ด้วย ซึ่งจะได้ว่า  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$  ด้วย ดังนั้นสามารถเขียน สมการที่ (2.17) ใหม่ ได้เป็น

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E} \\ &= \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \\ &= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \end{aligned} \quad (2.20)$$

เราเรียกเทอม  $(1 + \chi)$  หรือ  $\epsilon_r$  ว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant) เราอาจเขียนสมการที่ (2.20) ใหม่ได้เป็น

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (2.21)$$

โดยที่  $\epsilon$  เรียกว่าค่า permittivity ของสารไดอิเล็กตริก

### 2.2.1 สนามไฟฟ้าเฉพาะที่และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Local Field and Dielectric Constant)

เมื่อสนามภายนอกทำให้เกิดการเรียงตัวของโมเมนต์ของโมเลกุลภายในเนื้อสาร เป็นไปได้ที่จะสมมติว่า โมเมนต์ของโมเลกุลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนาม  $\vec{E}$  เราอาจเขียนได้ว่า<sup>(18)</sup>

$$\vec{p} = \alpha \vec{E} \quad (2.22)$$

เมื่อค่าคงที่  $\alpha$  เรียกว่า การทำให้เป็นขั้ว (polarizability) ของโมเลกุล เป็น  
การสมมติที่ใช้ได้ดี เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าไม่มากเกินไปนัก เมื่อแทนที่สมการที่ (2.22) ลงใน  
สมการที่ (2.16) จะได้ว่า

$$\vec{P} = N\alpha \vec{E} \quad (2.23)$$

ดังนั้นทำให้ได้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \left[ 1 + \left( N \frac{\alpha}{\epsilon_0} \right) \right] \vec{E} \quad (2.24)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.20) จะทำให้ได้ว่า

$$\epsilon_r = 1 + \frac{N\alpha}{\epsilon_0} \quad (2.25)$$

ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับการทำให้เป็นขั้ว ( $\alpha$ ) นอกจากนี้ถ้า  
เขียนในเทอมของความหนาแน่น  $\rho$  ของตัวกลาง โดยการแทนปริมาณ  $N = \rho N_A / M$  เมื่อ  $M$   
เป็นมวลของสาร 1 โมล และ  $N_A$  เป็นเลขอะโวกาโดร จะได้

$$\epsilon_r = 1 + \left( \rho \frac{N_A}{\epsilon_0 M} \right) \alpha \quad (2.26)$$

ซึ่งจะเห็นว่า  $\epsilon_r$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นแบบเส้นตรงและเป็นสมการที่ใช้ได้ดี  
กับสถานะแก๊ส เพราะว่าแก๊สมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นได้มาก



แต่ในทางปฏิบัติแล้ว สมการที่ (2.25) หรือ (2.26) ใช้ได้ไม่ดัดนักในระบบทางกายภาพที่มีความหนาแน่นสูงเช่น ของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเราจึงค้นหาสมการสำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมมาใช้แทนสำหรับของแข็ง

ถ้ามีสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  มากกระทำต่อสาร จะทำให้เกิดโพลาไรเซชันที่อะตอมในเนื้อสาร ทำให้สนามสุทธิมีค่าต่างจาก  $\vec{E}$  ดังนั้นเราเขียนสมการที่ (2.22) ได้ใหม่เป็น

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}_{loc} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $\vec{E}_{loc}$  เรียกว่า สนามเฉพาะที่ (Local Field) ซึ่งเป็นสนามโพลาไรซ์ (polarized field) หรือ สนามโมเลกุล (Molecular field)

ในการหาค่า  $\vec{E}_{loc}$  เราต้องคำนวณสนามรวมทั้งกระทำบนตัวคู่ทั้งหมด ซึ่งสนามทั้งหมดนี้ประกอบด้วยสนามจากภายนอก และสนามจากทุกตัวคู่ในระบบ ดังนั้น

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\vec{E}_0$  คือ สนามภายนอก  
 $\vec{E}_1$  คือ depolarization field เนื่องจากความหนาแน่นประจุที่ผิวของเนื้อสาร  
 $\vec{E}_2$  คือ สนามเนื่องจากประจุโพลาไรเซชันที่อยู่บนพื้นผิวทรงกลมของลอเรนซ์ (Lorentz Cavity)  
 $\vec{E}_3$  คือ สนามเนื่องจากตัวคู่อื่นๆ ภายในทรงกลมกลวง

ซึ่งแยกพิจารณาสนามต่างๆ ตามลำดับ ได้ดังนี้

สนาม  $\vec{E}_1$  ; เป็นสนามลดการเป็นขั้ว (depolarization field) ซึ่งเกิดจากประจุโพลาไรเซชันที่อยู่บนผิวภายนอกของสารไดอิเล็กตริก ค่าของสนามนี้ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวภายนอก สำหรับกรณีง่ายๆ ของสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นแผ่นยาว (infinite slab) จะได้

$$\vec{E}_1 = - \left( \frac{1}{\epsilon_0} \right) \vec{P} \quad (2.29)$$

สนาม  $\vec{E}_2$  ; เป็นสนามที่เกิดจากประจุโพลาไรเซชันที่อยู่บนพื้นผิวของโพรงลอเรนซ์ (Lorentz Cavity) ซึ่งจะได้สนามไฟฟ้าที่จุดศูนย์กลางบนทรงกลมรัศมี R เป็น

$$\begin{aligned} \vec{E}_2 &= \int_0^\pi \left( - \vec{P} \cos \theta / 4\pi\epsilon_0 R^2 \right) \cos \theta (2\pi R^2 \sin \theta d\theta) \\ &= \frac{1}{3\epsilon_0} \vec{P} \end{aligned} \quad (2.30)$$

สนาม  $\vec{E}_3$  ; เป็นสนามที่เกิดจากขั้วคู่ (dipoles) อื่นๆ ภายในโพรงทรงกลม หาได้โดยการรวมสนามของไดโพลทั้งหมด จาก

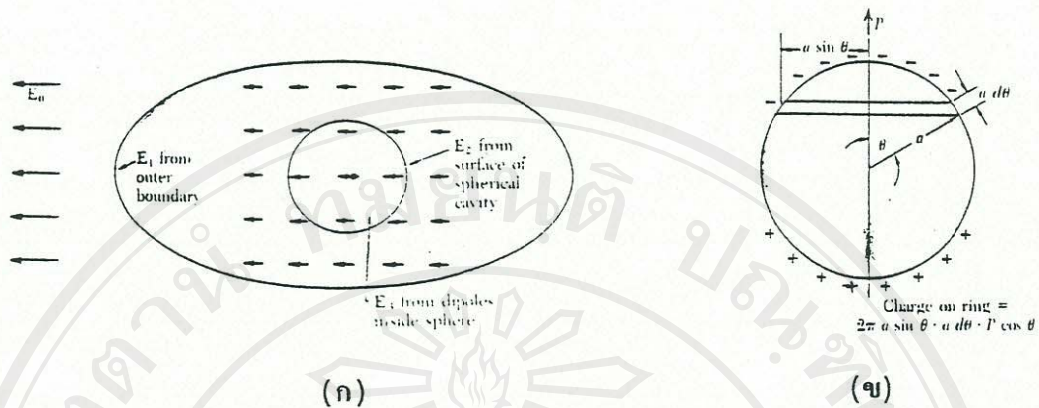
$$\vec{E}_3 = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) [ 3(\vec{p} \cdot \vec{r})\vec{r} - r^2\vec{p} ] / r^5 \quad (2.31)$$

ซึ่งค่าจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างผลึก ในกรณีที่พิจารณาเป็น Cubic Structure จะได้

$$\vec{E}_3 = 0 \quad (2.32)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved





รูปที่ 2.6 ก. การคำนวณหาสนามไฟฟ้าเฉพาะที่ (Local Field)<sup>(19)</sup>

ข. ลักษณะการคำนวณ  $E_2$  ในช่องว่าง

นำค่าสนามทั้งหมดแทนในสมการที่ (2.28) จะได้

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E}_0 - \frac{2}{3\epsilon_0} \vec{P} \quad (2.33)$$

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของสนามเฉพาะที่ (local field) กับสนามภายนอกและโพลาไรเซชัน เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.17) และ (2.18) จะได้ว่า

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \frac{1}{\epsilon_0} \vec{P} \quad (2.34)$$

ดังนั้นจะได้

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E} + \frac{1}{3\epsilon_0} \vec{P} \quad (2.35)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.35) เรียกว่า Lorentz relation ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสนาม  $\vec{E}_{loc}$  มีค่ามากกว่า  $\vec{E}$  ตามที่คาดหวังไว้ในตอนแรก

ถ้าพิจารณาค่า  $\alpha$  จะพบว่า เป็นสมบัติของแต่ละอะตอมหรือโมเลกุล แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะขึ้นกับลักษณะที่อะตอมหรือโมเลกุลที่รวมกันเป็นผลึก ดังนั้นโพลาริเซชันของผลึกจะมีค่าเป็น

$$\vec{P} = \sum N_j \vec{p}_j = \sum N_j \alpha_j \vec{E}_{loc(j)} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $N_j$  คือ จำนวนอะตอมที่  $j$  ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร  
 $\alpha_j$  คือ ค่าของการทำให้เป็นขั้วของอะตอมที่  $j$   
 $\vec{E}_{loc(j)}$  คือ สนามเฉพาะที่ ณ ตำแหน่งอะตอมที่  $j$

ถ้าสนามเฉพาะที่สัมพันธ์ตามสมการที่ (2.35) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \vec{P} &= \sum N_j \alpha_j \left[ \vec{E} + \frac{1}{3\epsilon_0} \vec{P} \right] \\ &= (\sum N_j \alpha_j \vec{E}) / [1 - (\sum N_j \alpha_j / 3\epsilon_0)] \end{aligned} \quad (2.37)$$

พิจารณาจากสมการที่ (2.19) และจาก  $\epsilon_r = 1 + \chi$  จะทำให้ได้

$$\epsilon_r = [1 + \frac{2}{3\epsilon_0} \sum N_j \alpha_j] / [1 - \frac{1}{3\epsilon_0} \sum N_j \alpha_j] \quad (2.38)$$

ถ้าจัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\sum N_j \alpha_j}{3\epsilon_0} \quad (2.39)$$

สมการที่ (2.39) จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) กับค่าของการทำให้เป็นขั้ว (polarizability) ซึ่งเรียกว่า Clausius-Mosotti relation



จากสมการที่ (2.39) จะเห็นว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกขึ้นกับค่าของการทำให้เป็นขั้ว  $\alpha$  (polarizability) ซึ่งในผลึกจริง ๆ นั้นประกอบขึ้นกับด้วย อะตอมและโมเลกุลเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดกระบวนการในการเกิดขั้ว (polarized) ได้หลายรูปแบบ ซึ่งเราจะพิจารณาให้ค่าผลรวมของค่าการทำให้เป็นขั้ว ( $\alpha$ ) ประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ดังนี้ (20)

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_i \quad (2.40)$$

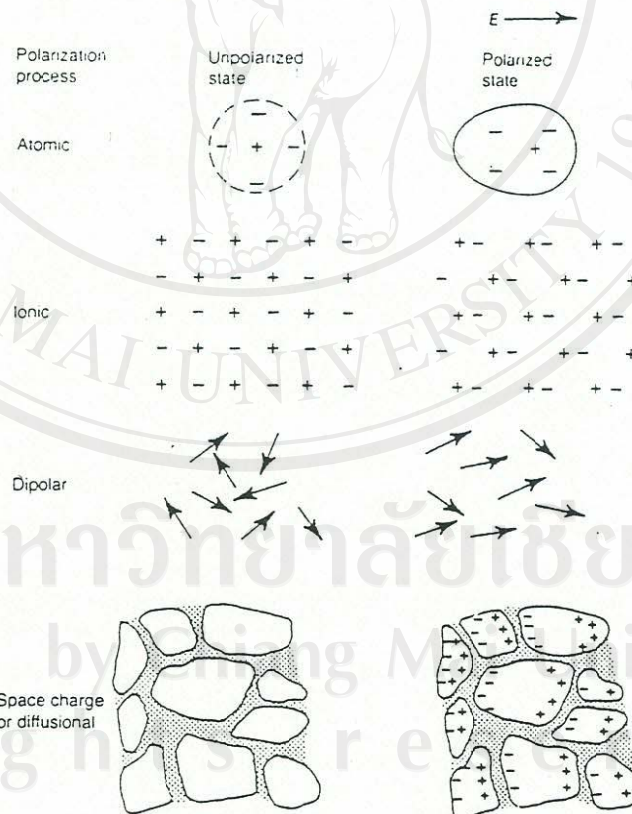
โดยที่

$\alpha_e$  คือ Electronic polarizability

$\alpha_a$  คือ Atomic polarizability

$\alpha_d$  คือ Orientation polarizability

$\alpha_i$  คือ Interfacial polarizability

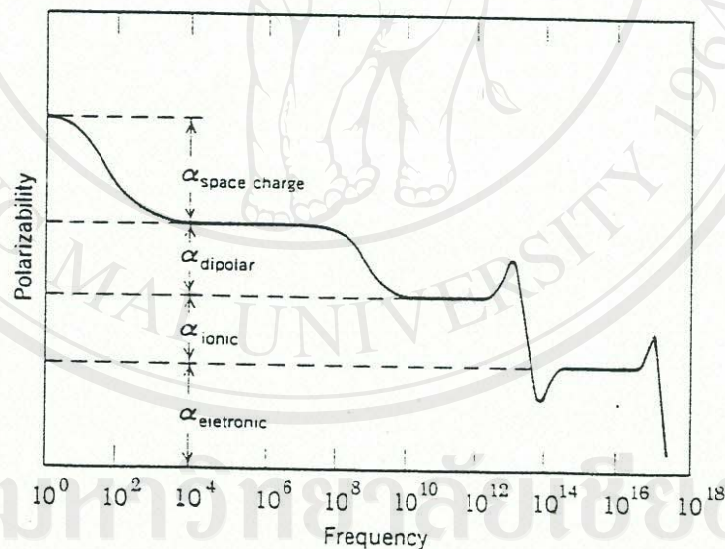


รูปที่ 2.7 การเกิด polarization แบบต่างๆ<sup>(11)</sup>

ซึ่งค่าการทำให้เป็นขั้วแต่ละชนิดเหล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงในสนามไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปและแตกต่างกันในสาร ไดอิเล็กตริกแต่ละประเภท กล่าวคือ

1. สารไดอิเล็กตริกประเภทไม่มีขั้ว (Non-polar) จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าการทำให้เป็นขั้วในช่วงความถี่ในย่านแสง
2. สารไดอิเล็กตริกประเภทมีขั้ว (polar) จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าการทำให้เป็นขั้วในช่วงความถี่ในย่านแสงและย่านอินฟราเรด
3. สารไดอิเล็กตริกประเภทขั้วคู่ (Dipolar) จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าการทำให้เป็นขั้วในช่วงความถี่ในย่านแสงและย่านอินฟราเรด และมี Orientation polarization เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

การที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการทำให้เป็นขั้ว ( $\alpha$ ) ทำให้มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับความถี่ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.8 ค่า Polarizability เทียบกับความถี่<sup>(14)</sup>



### 2.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแพกเตอร์ความเสี่ยงของไดอิเล็กตริก

ในการอธิบายผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้น สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนได้ในกรณีเฉพาะที่อยู่ในย่านที่สารไดอิเล็กตริก มีสถานะเป็น paraelectric เท่านั้น โดยใช้ทฤษฎี Catastrophe อย่างง่าย โดยสมมติว่า สนามไฟฟ้าเฉพาะมีค่าดังสมการที่ (2.35) คือ<sup>(18)</sup>

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E} + \frac{1}{3\epsilon_0} \vec{P} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.20) ซึ่ง  $\epsilon_r = 1 + X$  และสมการที่ (2.19) โดย  $X = P/(\epsilon_0 \vec{E})$  จะได้

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\vec{P}}{\epsilon_0 \vec{E}} \quad (2.41)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.37) จะได้

$$\epsilon_r = [1 + \frac{2}{3\epsilon_0} \sum N_j \alpha_j] / [1 - \frac{1}{3\epsilon_0} \sum N_j \alpha_j] \quad (2.42)$$

จะเห็นได้จากสมการที่ (2.42) ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) จะมีค่าเป็นอนันต์เมื่อ

$$\sum N_j \alpha_j = 3\epsilon_0 \quad (2.43)$$

แต่ในความเป็นจริง  $\epsilon_r$  ไม่ได้มีค่าเป็นอนันต์ เพียงแต่มีค่าสูงมาก เราจึงให้

$$\frac{1}{3\epsilon_0} \sum N_j \alpha_j = 1 - \Delta \quad (2.44)$$

โดยถ้า  $\Delta \ll 1$  ทำให้ได้ว่า

$$\epsilon_r \approx 3/\Delta \quad (2.45)$$

แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะบริเวณใกล้ๆ อุณหภูมิวิกฤติ ( $T_c$ ) หรือเรียกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature) นั้นจะได้ว่า  $\Delta$  ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังสมการ

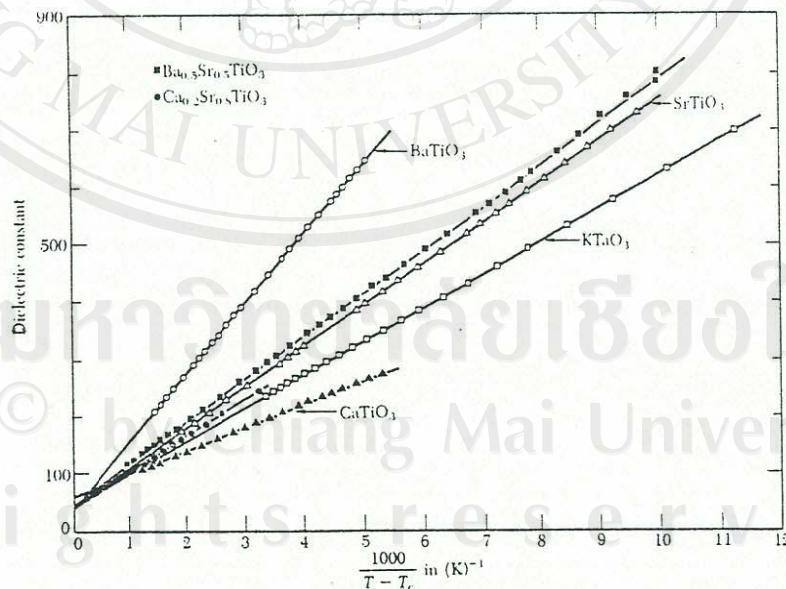
$$\Delta \approx 3(T - T_c)/C \quad (2.46)$$

ทำให้ได้ว่า

$$\epsilon_r = \frac{C}{T - T_c} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $C$  เป็นค่าคงที่

สมการที่ (2.47) นี้เรียกว่า Curie-Weiss law ซึ่งใช้อธิบายผลของอุณหภูมิต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสภาวะ paraelectric



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของ  $\epsilon_r$  กับ  $1/(T - T_c)$  ในสถานะ paraelectric<sup>(19)</sup>

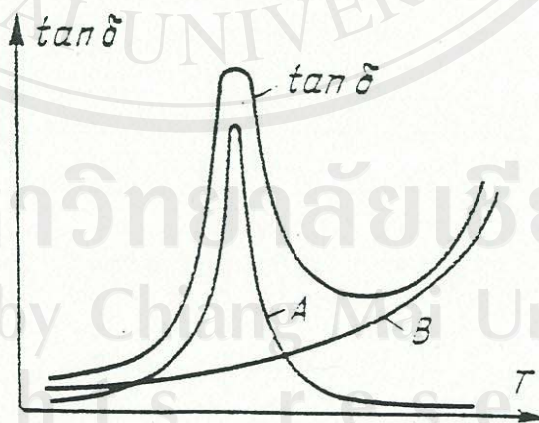


เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อค่าแฟกเตอร์ความสูญเสีย ( $\tan \delta$ ) โดยทั่วไปแล้ว ค่า  $\tan \delta$  ควรจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ  $\tan \delta$  นั้นเกิดมาจากสาเหตุ การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่ว ( $I_L$ ) นั่นก็คือการลดลงของค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริกด้วย แต่ ในความเป็นจริงแล้วการสูญเสียในสาร ไดอิเล็กตริกไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่ากระแสรั่วเพียงอย่างเดียว แต่มีสาเหตุที่เกี่ยวข้องทั้งหมดคือ (14)

1. การสูญเสียเนื่องจากความต้านทานไม่ถึงอนันต์
2. การสูญเสียเนื่องจาก dipole relaxation
3. การสูญเสียเนื่องจาก electron polarization
4. การสูญเสียเนื่องจากการสั่นของไอออน

สาเหตุในข้อ 3 และ 4 นั้นจะเกิดขึ้นในย่านความถี่สูงๆ เท่านั้น และสาเหตุ สำคัญที่เกิดความสูญเสียในช่วงความถี่ต่างๆ จะมาจากข้อ 1 และข้อ 2 เป็นส่วนใหญ่

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่า  $\tan \delta$  เมื่อเทียบกับอุณหภูมิจะขึ้นกับประเภทของ สารไดอิเล็กตริก ในสารประเภทมีขั้ว (Polar) นั้นจะมีการสูญเสียเนื่องจาก dipole relaxation และการนำไฟฟ้า ซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึง ผลของทั้ง 2 สาเหตุ โดย A แสดงผลเนื่องจาก dipole relaxation และ B แสดงถึงผล ของการนำไฟฟ้า (21)



รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิต่อค่า  $\tan \delta$  ของสารไดอิเล็กตริกประเภทมีขั้ว (21)



### 2.2.3 ผลของความถี่ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียของไดอิเล็กตริก

เมื่อใส่สนามไฟฟ้ากระแสสลับให้กับสารไดอิเล็กตริกกระบวนการเกิดโพลาไรเซชันจะเกิดการตอบสนองต่อสนามและเนื่องจากความเฉื่อยของการโพลาไรซ์ จะทำให้เกิด relaxation ขึ้น แต่กระบวนการ relaxation นั้นขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้า เพราะว่า polarization ประกอบด้วยกระบวนการต่างๆ ซึ่งขึ้นกับความถี่ดังได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งกระบวนการ relaxation สามารถอธิบายได้โดยสมการของ Debye<sup>(20)</sup>

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ Polarization Relaxation โดยเทียบกับความถี่ โดยถ้าให้  $\epsilon_s$  (static dielectric constant) และ  $\epsilon_\infty$  (Optical dielectric constant) เป็นค่า relative dielectric constant เมื่อสนามความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของการโพลาไรซ์มากๆ ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของ dielectric constant และค่า dissipation factor อาจจะสามารถอธิบายได้ในรูปของ

$$\text{เมื่อ } \epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + f(\omega) \quad (2.48)$$

เมื่อ  $\omega \rightarrow 0$  จะได้ว่า

$$f(0) = \epsilon_s - \epsilon_\infty \quad (2.49)$$

สมมติว่า ถ้าใส่สนามสม่ำเสมอให้กับสารไดอิเล็กตริก แล้วเอาสนามออกทันที การโพลาไรซ์ในสารจะลดลงแบบ exponential ด้วยค่าคงที่เวลา  $\tau$  ซึ่งเป็นสมบัติเกี่ยวกับ relaxation time ของโมเลกุล

$$P(t) = P_0 \exp(-t/\tau) \quad (2.50)$$



ถ้า  $f(\omega)$  เป็นสเปกตรัมของความถี่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาของ  
โพลาริเซชัน ดังนั้นจะได้ว่าจาก Fourier Transform

$$\begin{aligned} f(\omega) &= \int_0^{\infty} P(t) e^{i\omega t} dt \\ &= \frac{P_0}{-i\omega + (1/\tau)} \end{aligned} \quad (2.51)$$

ดังนั้นที่  $\omega = 0$  จะได้ว่า

$$f(0) = \tau P_0 \quad (2.52)$$

และพิจารณาสมการที่ (2.49) และ (2.51) จะได้

$$f(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 - i\omega\tau} \quad (2.53)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.48) จะได้ความสัมพันธ์

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 - i\omega\tau} \quad (2.54)$$

แต่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีการสูญเสียเกิดขึ้นสามารถเขียน  $\epsilon(\omega)$  ในรูปของ  
จำนวนเชิงซ้อน คือ

$$\begin{aligned} \epsilon(\omega) &= \epsilon' - i\epsilon'' \\ &= \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 - i\omega\tau} \end{aligned} \quad (2.55)$$

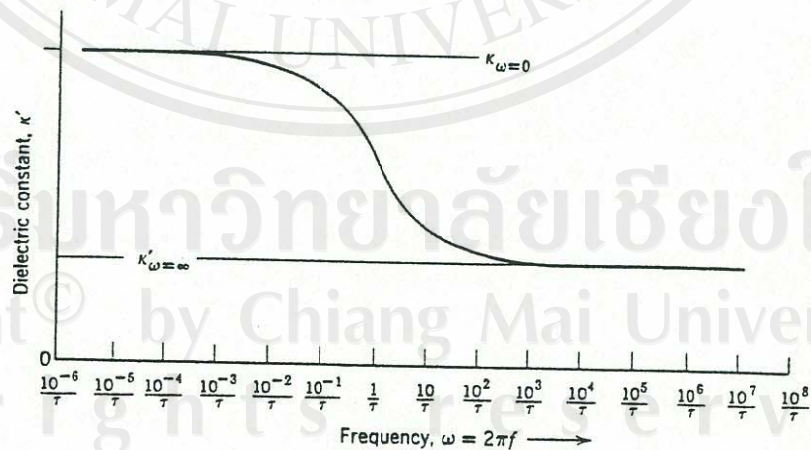
ทำให้ได้

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.56)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.57)$$

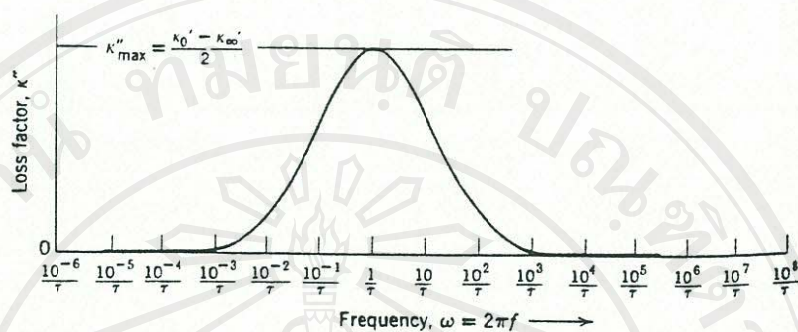
$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \omega \tau}{\epsilon_s + \epsilon_{\infty} + \omega^2 \tau^2 (\epsilon_s - \epsilon_{\infty})} \quad (2.58)$$

สมการที่ (2.56) - (2.58) เรียกว่า สมการ Debye โดยเทอม  $\epsilon'$  จะเกี่ยวข้องกับค่า Dielectric Constant และ  $\tan \delta$  เกี่ยวข้องกับค่า Dissipation factor



รูปที่ 2.11 ผลของ Debye Relaxation<sup>(14)</sup>





รูปที่ 2.11 (ต่อ) ผลของ Debye Relaxation<sup>(14)</sup>

ในกรณีแรกที่กำลังกล่าวผ่านมาจะเกี่ยวข้องกับ Orientation Polarizability แต่ถ้าเป็นสารไดอิเล็กตริกที่เกี่ยวข้องกับ Ionic และ Atomic Polarizability ซึ่งตอบสนองในช่วงความถี่สูงกว่า ซึ่งในกระบวนการทั้ง 2 อย่างหลังนี้ จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการ resonance absorption ซึ่งมีการเลื่อนของเฟสในการสั่นของไดโพลด้วย ซึ่งจะต้องมีการเพิ่มแฟกเตอร์อื่นเข้าไปในสมการที่ (2.50) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Frohlich จะได้<sup>(20)</sup>

$$P(t) = P_0 \exp(-t/\tau) \cos(\omega_0 t + \phi) \quad (2.59)$$

โดยการกระทำเช่นเดียวกัน จะได้

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon}{2} \left( \frac{1 + \omega_0(\omega + \omega_0)\tau^2}{1 + (\omega + \omega_0)^2\tau^2} + \frac{1 - \omega_0(\omega - \omega_0)\tau^2}{1 + (\omega - \omega_0)^2\tau^2} \right) \quad (2.60)$$

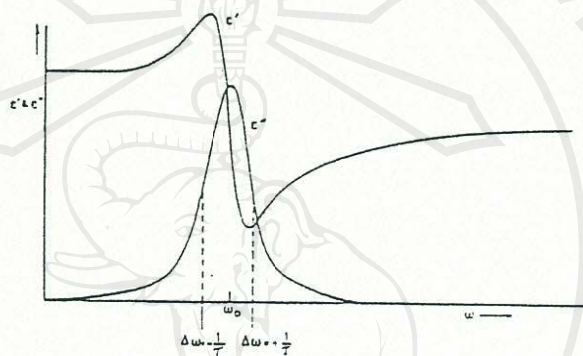
$$\epsilon'' = \frac{\Delta\epsilon}{2} \left( \frac{\omega\tau}{1 + (\omega + \omega_0)^2\tau^2} + \frac{\omega\tau}{1 + (\omega - \omega_0)^2\tau^2} \right) \quad (2.61)$$

ซึ่ง  $\Delta\epsilon$  เป็นความแตกต่างของ  $\epsilon'$  ในช่วงความถี่ของการ resonance

ถ้าพิจารณาในกรณี  $\omega_0 \tau \gg 1$  และ  $\omega \approx \omega_0$  และ  $(\omega - \omega_0) = \pm \Delta\omega$

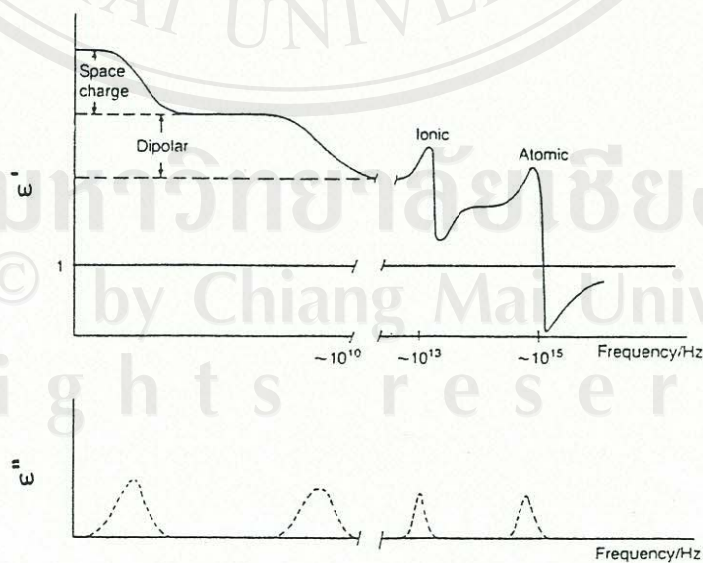
$$\epsilon' = \epsilon_\infty \pm \frac{\Delta\epsilon}{2} \left( \frac{\omega_0 \Delta\omega}{(1/\tau^2) + (\Delta\omega)^2} \right) \quad (2.62)$$

$$\epsilon'' = \frac{\Delta\epsilon}{2} \frac{\omega_0/\tau}{(1/\tau^2) + (\Delta\omega)^2} \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ resonance absorption (20)

จะเห็นได้ว่าการอธิบายผลของความถี่ต่อสมบัติไดอิเล็กตริกนั้น จะต้องพิจารณาในแต่ละช่วงความถี่ โดยเกี่ยวข้องกับกระบวนการทาง Polarization relaxation



รูปที่ 2.13 ผลของความถี่ต่อ  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  (11)



#### 2.2.4 ความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าและกลไกการเบรคดาวน์ในสารไดอิเล็กตริกของแข็ง (Breakdown Voltage and Breakdown Mechanism in Solid Dielectric)

ความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้า (Breakdown Voltage) คือความต่างศักย์สูงสุด ที่ค่าไดอิเล็กตริกคงสภาพอยู่ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรคดาวน์หรือทำให้เสื่อมสภาพ ซึ่งค่านี้เป็นตัวชี้บอกว่าสารไดอิเล็กตริกสามารถทนต่อความต่างศักย์สูงสุดเท่าใด หาได้โดยการป้อนสนามไฟฟ้าจนเกิดการเบรคดาวน์ของสารไดอิเล็กตริก ค่าความคงทนต่อความต่างศักย์ขึ้นกับชนิดของสารที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน สารประเภทที่มีโครงสร้างเป็นผลึกมักจะเกิดการเบรคดาวน์ตามแนวที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมน้อยที่สุด ซึ่งมักจะสังเกตได้ว่าร่องรอยการเบรคดาวน์ไม่เป็นแนวเส้นตรง โดยปกติแล้วสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นของแข็ง จะมีค่าความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าสารไดอิเล็กตริกของเหลว แต่สารไดอิเล็กตริกของเหลวจะสามารถกลับสู่สภาพปกติได้หลังจากการเบรคดาวน์ผ่านไป แล้ว ซึ่งแตกต่างจากสารไดอิเล็กตริกของแข็งซึ่งจะสูญเสียสภาพต้านทานไฟฟ้า หลังจากเกิดการเบรคดาวน์ผ่านไป แล้ว อย่างไรก็ตาม สารไดอิเล็กตริกจะมีค่าความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงเมื่อมีสิ่งเจือปน (12)

กลไกการเบรคดาวน์ในสารไดอิเล็กตริกของแข็งค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขและกระบวนการป้อนความต่างศักย์ และที่สำคัญคือ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาคงอยู่ของสนามไฟฟ้าที่ป้อน การเกิดการเบรคดาวน์ในสารไดอิเล็กตริกแข็ง อาจแบ่งได้เป็น

1. เบรคดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)
2. เบรคดาวน์จากแรงกลไฟฟ้า (Electro-mechanical Breakdown)
3. เบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)
4. เบรคดาวน์แบบเทอร์มัล (Thermal Breakdown)
5. เบรคดาวน์เนื่องจากการดิสชาร์จภายใน (Discharge Breakdown)
6. เบรคดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking Breakdown)

ซึ่งแยกเป็นประเภทได้ดังนี้



### 1. เบรคดาวน์แบบแท้จริง (Intrinsic Breakdown)

เบรคดาวน์ที่แท้จริงคือ การเกิดเบรคดาวน์จากการป้อนสนามไฟฟ้าช่วงระยะเวลาอันสั้นมาก คือราว 0.01 ไมโครวินาที ต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงมาก และถือเป็นความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารไดอิเล็กตริกแบบแท้จริง การทดลองในการนี้ต้องช้ชุดแพคเกจเดออื่น ๆ ให้หมด ซึ่งยากต่อการปฏิบัติและถือว่าการนี้เป็นค่าในอุดมคติ การเบรคดาวน์แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากในสารไดอิเล็กตริก ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากพอที่จะข้ามช่องแถบพลังงาน ต้องห้าม ไปสู่แถบการนำงานมากพอที่จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ในที่สุด

### 2. เบรคดาวน์จากแรงกลไฟฟ้า (Electro-mechanical Breakdown)

สารไดอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่ป้อน จะมีประจุอยู่ที่ผิวของสารทั้งสองด้าน จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างสองผิว ทำให้เนื้อสารได้รับแรงอัดบีบได้ และถ้าหากแรงนี้มากเกินไปกว่าที่สารจะทนได้ ก็จะทำให้เกิดการเบรคดาวน์ได้

### 3. เบรคดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer Breakdown)

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เบรคดาวน์อาจเกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่เคลื่อนในแถบนำ (conduction band) ซึ่งเคลื่อนที่เข้าหาอะโนดได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อยๆ ถ้าพลังงานที่ได้รับนี้มากเกินไปพลังงานไอออไนเซชันของโครงสร้างผลึก (lattice ionizing energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโครงสร้างผลึก ซึ่งการเบรคดาวน์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้มากจนถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง

### 4. เบรคดาวน์แบบเทอร์มัล (Thermal Breakdown)

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับสาร ไดอิเล็กตริก จะมีกระแสไหลผ่านสารไดอิเล็กตริกแต่มีค่าน้อยมาก กระแสนี้จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนก็จะแผ่กระจายออกไปสู่ตัวกลางรอบๆ สารไดอิเล็กตริกจะคงสภาพอยู่ได้ ถ้าหากการระบายความร้อนออกสู่ตัวกลางรอบๆ ได้ทันโดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดของสารนั้น



ความร้อนที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากระแสตรง ได้จาก

$$W_g = \sigma E^2 \quad (2.64)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของสาร  
 $E$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า

ความร้อนที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ได้จาก

$$W_g = (\omega \epsilon \tan \delta) E^2 \quad (2.65)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่ของสนามไฟฟ้า  
 $\tan \delta$  คือ แฟกเตอร์พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริก

ความร้อนที่ระบายออกไป ได้จากสมการ

$$W_d = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div} (k \text{ grad } T) \quad (2.66)$$

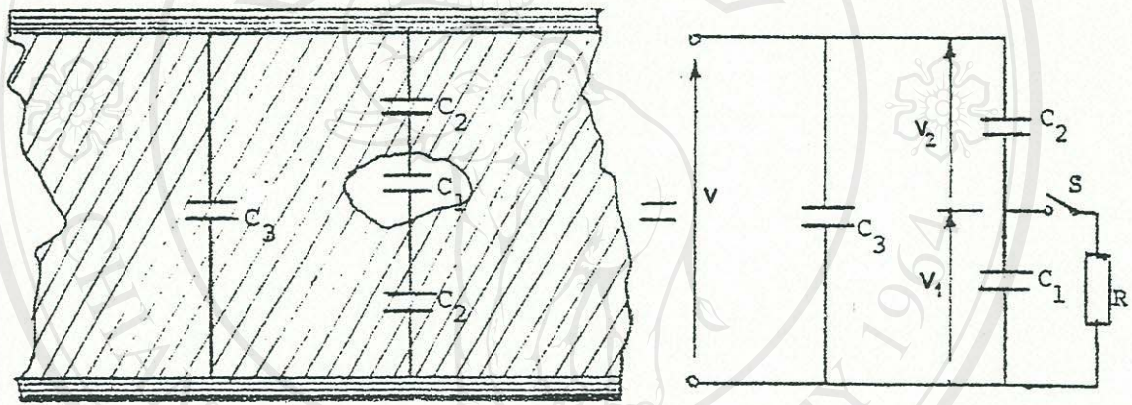
เมื่อ  $C_v$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของสาร  
 $k$  คือ สภาพนำความร้อนของสาร

ดังนั้นการเบรคดาวน์แบบเทอร์มัลมักจะเกิดขึ้นถ้า

$$W_g \gg W_d \quad (2.67)$$

### 5. เบรคดาวน์เนื่องจากการดีสชาร์จภายใน (Discharge Breakdown)

การดีสชาร์จภายในเกิดจากภายในสารไดอิเล็กตริก มีสารไดอิเล็กตริกที่มีความคงทนต่อความต่างศักย์ต่ำกว่าปนอยู่ เช่น มีฟองหรือโพรงก๊าซในเนื้อสารไดอิเล็กตริก สารเจือปนเหล่านี้จะเกิดการเบรคดาวน์ที่ความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำกว่าเนื้อสารไดอิเล็กตริก เพราะว่ปกติเนื้อสารเจือปนในฟองหรือโพรงจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำกว่าเนื้อสารไดอิเล็กตริก ดังนั้นความเข้มสนามไฟฟ้าในโพรงนั้นจะสูงกว่าเนื้อสารไดอิเล็กตริก จึงเกิดการเบรคดาวน์ในโพรงก่อน



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของสารไดอิเล็กตริกที่มีโพรงภายใน<sup>(12)</sup>

ในรูป  $C_1$  แทนคาปาซิแตนซ์ของโพรง,  $C_2$  แทนคาปาซิแตนซ์ของสารไดอิเล็กตริกที่ต่ออนุกรมกับโพรง,  $C_3$  แทนคาปาซิแตนซ์ส่วนที่เหลือ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้า  $V$  ระหว่างสารไดอิเล็กตริกนี้จะได้ว่า

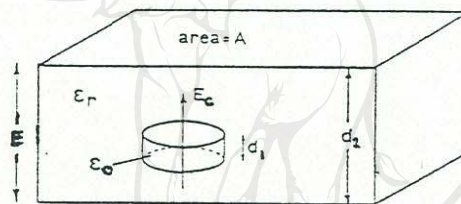
$$V_1 = V \cdot \epsilon_r \frac{d_1}{d_2} \quad (2.68)$$



- เมื่อ  $V_1$  คือ ความต่างศักย์ต่อคร่อมไฟรั้ง  
 $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารไดอิเล็กตริก  
 $d_1$  คือ ความหนาของไฟรั้ง  
 $d_2$  คือ ความหนาของสารไดอิเล็กตริก ;  $d_1 \ll d_2$

เมื่อแก๊สในไฟรั้งเกิดการแตกตัวเกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกในไฟรั้ง เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงผนังของไฟรั้ง ถ้าพลังงานมากพอจะทำให้พันธะทางเคมีแตกสลาย และเกิดความร้อนขึ้น สภาพนำไฟฟ้ามากขึ้น นำไปสู่การเบรคดาวน์ในที่สุด

ถ้าพิจารณาในรูปแบบของไฟรั้ง ที่อยู่ในสารไดอิเล็กตริกจะได้ว่า จากรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะของไฟรั้งในสารไดอิเล็กตริก (20)

ถ้าไฟรั้งที่อยู่ในสารไดอิเล็กตริกมีลักษณะเป็นทรงกลมทำให้ได้ (20)

$$E_c = \frac{3\epsilon_r E}{\epsilon_0 + 2\epsilon_r}$$

$$= \frac{3}{2} E \quad \text{เมื่อ } \epsilon_r \gg \epsilon_0 \quad (2.69)$$

- โดยที่  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารไดอิเล็กตริก  
 $\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของไฟรั้ง



## 6. เบรคดาวน์เนื่องจากร่องรอยนำไฟฟ้าที่ผิว (Tracking Breakdown)

ร่องรอยการนำไฟฟ้าที่ผิวของสาร ไดอิเล็กตริก ซึ่งอาจจะเกิดจากการเสื่อมสภาพของสารหรือความสกปรกและความชื้นบนผิวของสาร ไดอิเล็กตริก และจะเกิดการสปาร์คที่บริเวณที่ผิวซึ่งขาดหายไป ซึ่งทำให้ผิวของสารเสียหาย และนำมาซึ่งการเบรคดาวน์ได้

### 2.3 ความพรุนของวัสดุ (Porosity of Materials)

ขนาดของอนุภาค (particle size) ของสารตั้งต้นในสารเซรามิกส์ มีส่วนในการเกิดช่องว่าง (voids) และรูพรุน (pores) ในเนื้อสาร การคัดเลือกส่วนผสมและขนาดของอนุภาคของสารตั้งต้น สามารถลดหรือเพิ่มความพรุนของสารเซรามิกส์ แต่ไม่สามารถทำให้เนื้อสารเซรามิกส์ปราศจากรูพรุนได้เลย ดังนั้นจึงมีส่วนหนึ่งของปริมาตรทั้งหมดของเนื้อสาร เป็นรูพรุน หรือช่องว่าง<sup>(22)</sup>

ความพรุนของวัสดุกำหนดเอาจากช่องว่างอากาศ (air space) ทั้งหมดที่อยู่ระหว่างอนุภาคที่ประกอบเป็นเนื้อสารเซรามิกส์ ซึ่งเราสามารถจำแนกลักษณะของรูพรุนได้เป็น 6 แบบ ดังนี้<sup>(22)</sup>

1. รูพรุนชนิดปิด (Closed or sealed pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเป็นช่องว่าง หรือโพรงที่ไม่ติดต่อกับรูพรุนอื่นๆ
2. รูพรุนชนิดเป็นช่อง (Channel pores) รูพรุนชนิดนี้มีลักษณะเชื่อมต่อระหว่างรูพรุนชนิดหนึ่งกับอีกรูพรุนหนึ่ง หรือกับผิวของสาร มีลักษณะเป็นท่อหรือช่องเล็กๆ
3. รูพรุนชนิดช่องตัน (Blind alley pores) รูพรุนชนิดนี้เป็นช่องตันลงไป ในผิวมีปลายข้างหนึ่งไหลบนผิว
4. รูพรุนชนิดเป็นวงบรรจบ (Loop pores) รูพรุนชนิดนี้จะต่อเชื่อมกับรูพรุนอื่นๆ
5. รูพรุนชนิดเป็นปล่อง (Pocket pores) รูพรุนชนิดนี้มีส่วนหนึ่งติดต่อกับพื้นผิวของสาร โดยมีรูติดต่อกับผิวเป็นคอแคบๆ
6. รูพรุนขนาดเล็กมาก (Micropores) รูพรุนชนิดนี้เล็กมากจนกระทั่งน้ำหรือของเหลวอื่นๆ ไม่สามารถเข้าไปได้ในระหว่างการดูดซึมปกติ



จากลักษณะของรูพรุนชนิดต่างๆ เหล่านี้ ทำให้กำหนดค่าความพรุนของวัตถุเป็น 2 แบบคือ

- (ก) ความพรุนจริง (True porosity)
- (ข) ความพรุนปรากฏ (Apparent porosity)

ความพรุนจริง เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างทั้งหมด ทั้งรูพรุนชนิดเปิด และชนิดปิด ในสารชิ้นนั้นต่อปริมาตรทั้งหมดของสารชิ้นนั้น

ความพรุนปรากฏเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของน้ำ หรือของเหลวที่สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในสารชิ้นนั้นต่อปริมาตรทั้งหมดของเนื้อสาร ในการคำนวณค่าความพรุนปรากฏ การหาปริมาตรรูพรุนนอกจากจะไม่รวมปริมาตรของรูพรุนชนิดปิดแล้ว ยังจะไม่รวมเอารูพรุนชนิดเปิด ซึ่งเล็กมากจนของเหลวซึมเข้าไม่ได้

ทั้งความพรุนจริงและความพรุนปรากฏ แสดงค่าได้เป็น

- (1) เป็นร้อยละของน้ำหนัก
- (2) เป็นร้อยละของปริมาตร

โดยปกติทั่วไปนิยมบอกค่าความพรุนเป็นร้อยละของปริมาตรซึ่งชี้ให้เห็นปริมาตรของรูพรุนต่อปริมาตรทั้งหมดของสาร

อนุภาคแต่ละอนุภาคในวัตถุมีความพรุนของมันเอง ดังนั้นวัตถุทั่วไปจึงมีความพรุนสูงกว่าวัตถุที่เกิดจากการผสมของอนุภาคที่ไม่มี ความพรุน จึงกล่าวได้ว่าความพรุนของวัตถุซึ่งเกิดจากการรวมของสารตั้งต้นต่างๆ ส่วนหนึ่งนั้นเป็นความพรุนของบรรดาอนุภาคที่ประกอบขึ้นเป็นเนื้อสาร

ในทางปฏิบัติแล้วถ้าจะนำสารเซรามิกส์ไปใช้ในทางไฟฟ้านั้น สารเซรามิกส์จะต้องมีความพรุนน้อยที่สุด โดยจะต้องอยู่ในช่วงน้อยกว่า 5-10 % แต่อย่างไรก็ตามยังมีสารบางชนิดที่ต้องการให้มีความพรุน ซึ่งสามารถที่จะควบคุมความพรุนของสารเซรามิกส์ได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้<sup>(11)</sup>

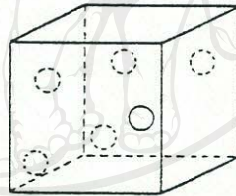
1. การแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ขนาดอนุภาคมีขนาดใหญ่เมื่อนำไปขึ้นรูปแล้วเผาซินเตอร์จะได้ สารที่มีความพรุนสม่ำเสมอ



2. โดยการผสมสารอินทรีย์เข้าไป โดยสารที่ผสมเข้าไปจะต้องมีขนาดมากกว่า  $20\ \mu\text{m}$  ซึ่งหลังจากการเผาซินเตอร์แล้วจะเหลือโพรงที่มีขนาดเท่ากับขนาดสารอินทรีย์เหลืออยู่ วิธีการนี้ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางการเผาใด ๆ
3. ความพรุนสูงๆ ของสารทำได้โดยเติมสาร binder จำนวนมากเข้าไปในสาร ซึ่งสาร binder จะถูกเผาออกไปทำให้เกิดความพรุนในสารเซรามิกส์

คุณสมบัติทางกายภาพของสารเซรามิกส์ซึ่งประกอบด้วยสารอื่นที่เติมลงไปทำให้เกิดความพรุนนั้น อาจจะอธิบายได้โดยทฤษฎีของ composite materials ซึ่งจะอธิบายสมบัติทางกายภาพของสารที่ประกอบด้วยหลายสารผสมกันอยู่ โดยใช้สมบัติของแต่ละสาร, ปริมาตรที่ครอบครอง และลักษณะทางรูปร่างของสารที่เติมเข้าไป<sup>(23)</sup>

สำหรับกรณีนี้จะพิจารณาการเติมสาร ไดอิเล็กตริกที่มีรูปร่างเป็นทรงกลมเข้าไปในสาร ไดอิเล็กตริกอื่นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การกระจายตัวของโพรงในสารไดอิเล็กตริก<sup>(23)</sup>

ในกรณีนี้ James Clerk Maxwell ได้แสดงให้เห็นถึงค่า  $\epsilon_r$  ของสารที่ประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริกทรงกลมซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็น  $\epsilon_1$  ผสมอยู่ในสารไดอิเล็กตริก  $\epsilon_2$  ได้ว่า

$$\epsilon_r = \epsilon_2 \left\{ 1 + \frac{3 V_f (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2 - V_f (\epsilon_1 - \epsilon_2)} \right\} \quad (2.70)$$

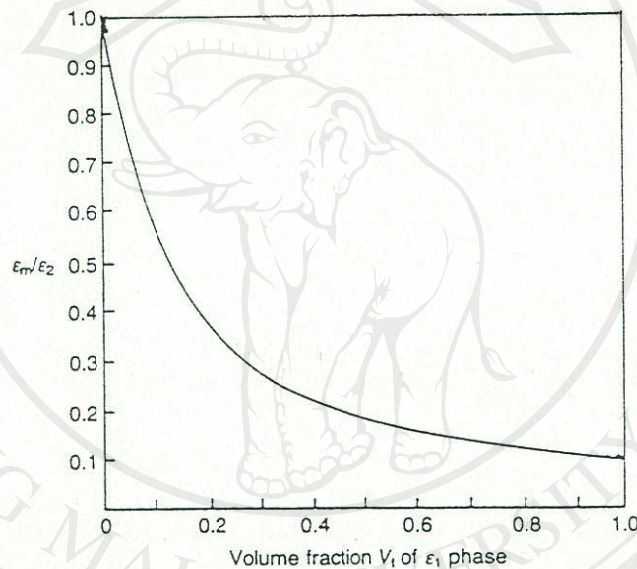
โดยที่  $V_f$  เป็นปริมาตรที่ถูกครอบครองโดยสารไดอิเล็กตริก  $\epsilon_1$



และถ้าพิจารณาว่า  $\epsilon_2 \gg \epsilon_1$  และ  $V_f \leq 0.1$  จะได้ว่า

$$\epsilon_r \approx \epsilon_2 \left( \frac{1 - 3V_f}{2} \right) \quad (2.71)$$

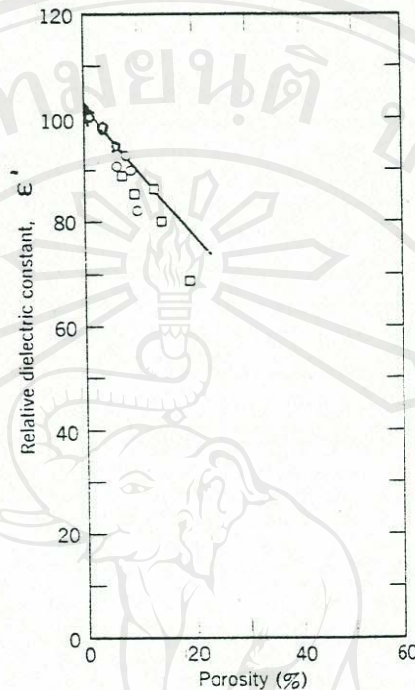
จะเห็นได้ว่า ถ้ามีการเติมสารไดอิเล็กตริก  $\epsilon_1$  เข้ามามากก็ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารผสม ( $\epsilon_r$ ) ลดลงดังในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลของการเติมสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่อ ( $\epsilon_1$ )

เข้าไปในสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ( $\epsilon_2$ )

ความพรุนซึ่งเกิดในสารเซรามิกส์อาจจะกล่าวได้ว่าเป็นกรณีที่มีการผสมสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำเข้าไปในสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ในรูปที่ 2.18 จะแสดงให้เห็นถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร  $\text{TiO}_2$  ซึ่งลดลงเมื่อความพรุนมากขึ้น<sup>(14)</sup>

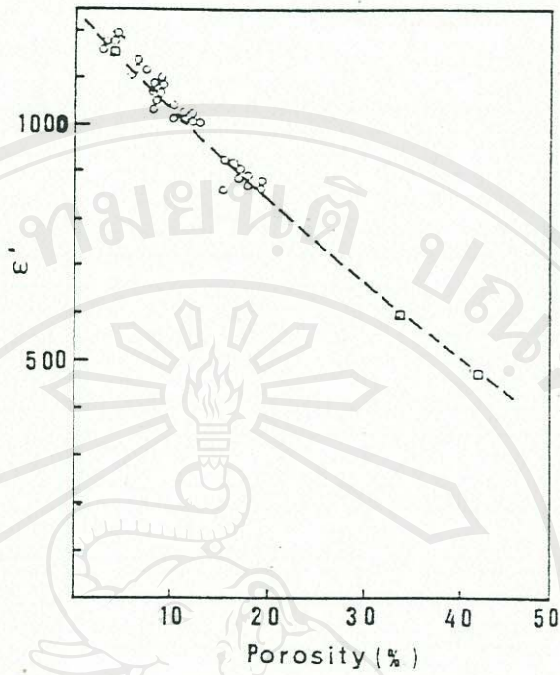


รูปที่ 2.18 ผลของความพรุน (Porosity) ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ  $\text{TiO}_2$  <sup>(14)</sup>

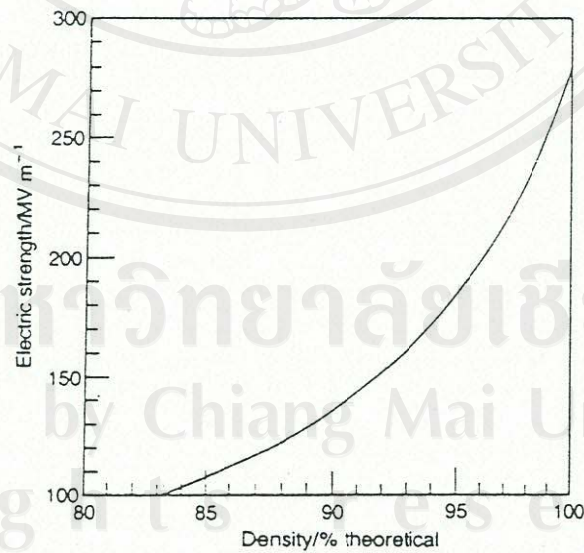
ในสารชนิดอื่นก็ได้มีการทดลองที่สอดคล้องกันคือในการทดลองของ Hayashi และคณะ<sup>(7)</sup> ซึ่งพบว่าเมื่อค่า Porosity มากขึ้นทำให้ค่า Dielectric Constant ของ PZT ลดลง ดังรูปที่ 2.19

นอกจากนี้ความพรุนยังส่งผลทำให้ค่าความคงทนต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงด้วย ซึ่งเห็นได้จากการทดลองบนสารอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งค่าความคงทนต่อศักย์ไฟฟ้าที่ลดลงนั้น เนื่องมาจากการเพิ่มของความพรุนขึ้นเอง (รูปที่ 2.20) <sup>(11)</sup>





รูปที่ 2.19 ผลของความพรุน (Porosity) ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ PZT<sup>(7)</sup>

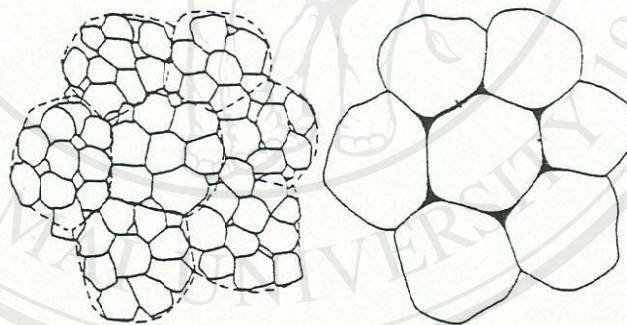


รูปที่ 2.20 ผลของความหนาแน่นต่อค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้า<sup>(11)</sup>

## 2.4 โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)

ในภาวะที่เรียกว่าของแข็งผลึก (Crystalline Solid) นั้นจะมีโครงสร้างภายในแน่นอน เป็นระเบียบตลอดทั้งเนื้อของแข็งนั้น ในการแข็งตัวของสาร เมื่อสารเย็นตัวต่ำกว่าอุณหภูมิสมดุลจะเกิดผลึกเล็กๆ ขึ้นจำนวนมาก ตอนแรกผลึกเหล่านี้จะมีรูปร่างทรงเรขาคณิตอย่างสมบูรณ์ เมื่อแต่ละผลึกเติบโตจนชนซึ่งกันและกัน รูปร่างเดิมจะหายไป ด้านที่ผลึกชนกันจะหยุดการเติบโต ส่วนด้านที่มีช่องเหลือจะเติบโตต่อไปจนกว่าจะชนกับผลึกอื่น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อนุภาคภายในผลึกเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ แม้ว่าภายนอกผลึกจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ แต่ละส่วนที่มีทิศทางการเรียงตัวต่างกันนั้นเรียกว่า เกรน (Grain)<sup>(16)</sup>

ในสารพวกเซรามิกส์จะมีผลึกเรียงตัวกันไม่เป็นระเบียบและภายในแต่ละผลึกมีทิศทางการเรียงตัวแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแต่ละผลึกมาพบกัน จึงเชื่อมต่อกันไม่สนิท และเกิดเป็นรอยต่อชัดเจน เรียกว่า ขอบเกรน (Grain boundary)<sup>(16)</sup>



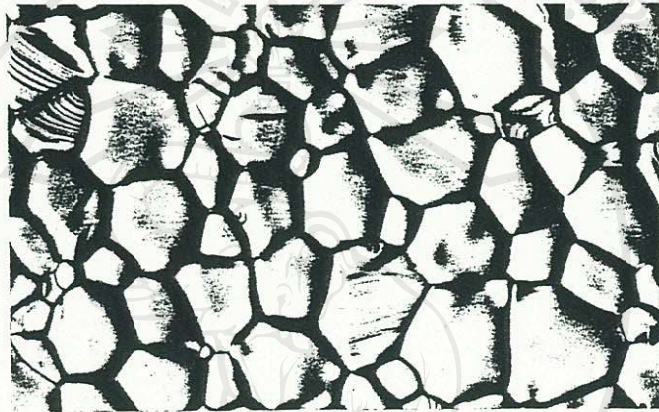
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของเกรนของสารเซรามิกส์<sup>(11, 14, 16, 24)</sup>

บริเวณขอบเกรนซึ่งมีอะตอมเรียงตัวอยู่ในสภาพไม่เป็นระเบียบอาจจะเรียกว่าอยู่ในสภาพอสัณฐาน (amorphous) และเป็นแนวตัดต่อระหว่างผลึกที่มีการวางตัวของแต่ละกลุ่มต่างกัน ดังนั้นขอบเกรนจึงมีสมบัติที่แตกต่างจากเกรนมาก เพราะว่าบริเวณนี้อะตอมเรียงตัวกันอย่างอิสระ และมีสารเจือปน (impurities) อยู่ในบริเวณนี้ ทำให้มีผลต่อสมบัติของสาร อีกประการหนึ่งอะตอมในบริเวณนี้จะมีพลังงานมากกว่าอะตอมภายในเกรน จึงมีความไวต่อปฏิกิริยามากกว่า



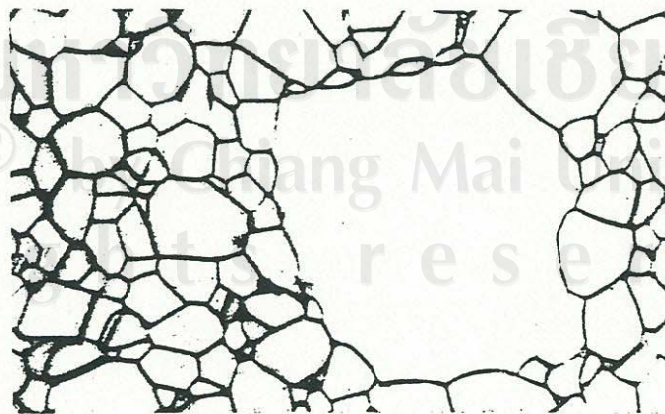
บริเวณอื่น โครงสร้างของเกรนที่มองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์เรียกว่า โครงสร้างจุลภาค (Microstructure)<sup>(25)</sup>

ในกระบวนการทางเซรามิกส์นั้น สิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้นก็คือการควบคุมลักษณะทางโครงสร้างของสารนั้นๆ เพื่อให้ได้สารที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งถ้าหากกระบวนการที่สมบูรณ์จะต้องได้สารที่มีลักษณะสารที่มีขนาดเกรนใกล้เคียงกันดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ลักษณะของเกรนปกติ<sup>(26)</sup>

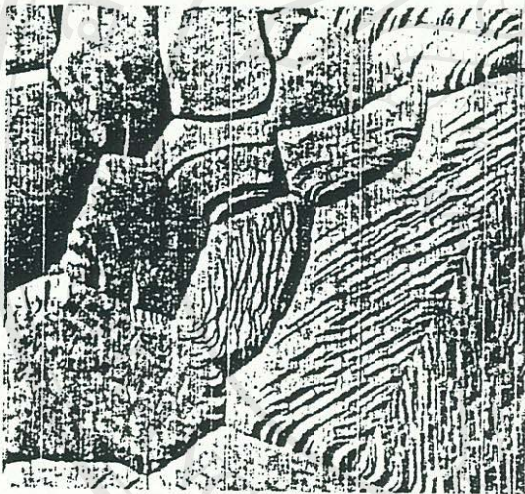
แต่ในบางครั้งอาจเกิดการเติบโตของเกรนมากผิดปกติ ซึ่งมีสาเหตุหลายประการ อาจเป็นเพราะมีสารเจือปนที่เพิ่มอัตราการเติบโตของเกรนนั่นให้มากผิดปกติ ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งลักษณะของการเติบโตของเกรนที่ผิดปกติ อาจจะทำให้คุณสมบัติของสารไม่เป็นไปตามที่ต้องการ



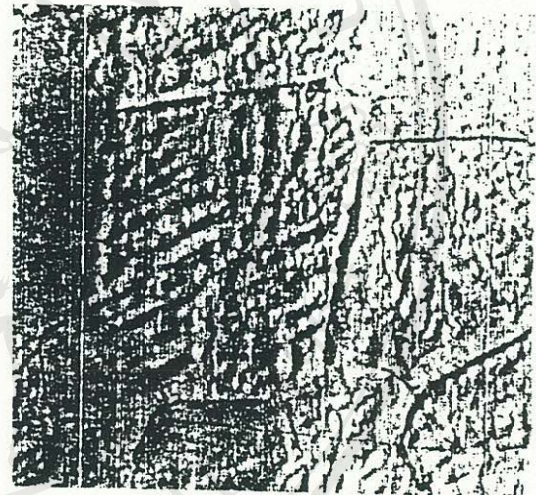
รูปที่ 2.23 ลักษณะของเกรนที่มีการเติบโตอย่างผิดปกติ<sup>(26)</sup>



การศึกษารูปร่างและขนาดตลอดจนการเรียงตัวของเกรน ทำได้โดยนำชิ้นงานนั้นไปขัดเป็ยด้วยกระดาษทราย เพื่อขจัดรอยลึกบนผิวให้ออกไป แล้วนำไปขัดมันเพื่อให้ผิวของสารมีลักษณะเรียบเป็นเงากระจก และจะต้องไม่ทำให้เกิดโครงสร้างอื่นๆ ผิวของสารที่ผ่านการขัดมันจะสะท้อนแสงได้ใกล้เคียงกัน จึงมองเห็นเป็นพื้นเรียบสว่างตลอดผิวขัด และอาจมองเห็นรอยแตกร้าว, หลุม หรือรูพรุน และอาจจะมองเห็นโครงสร้างของเกรนได้บ้าง แต่จะต้องนำสารไปทำปฏิกิริยาต่อไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ขอบเกรน ซึ่งจะทำให้เห็นโครงสร้างของเกรนมากขึ้น โดยนำสารที่ผ่านการขัดมันไปทำการกัด (Etching) อาจจะโดยใช้ความร้อน (Thermal Etching) หรือใช้กรด (Chemical Etching) ก็ได้<sup>(25)</sup>



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.24 ก. ลักษณะของเกรนจาก Thermally Etching<sup>(27)</sup>

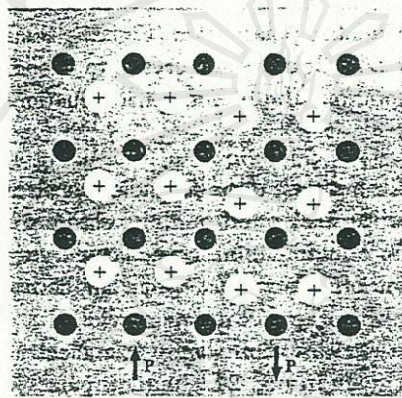
ข. ลักษณะของเกรนจาก Chemically Etching<sup>27</sup>

## 2.5 ผลึกเฟอร์ไรต์เลคตริก (Ferroelectric Crystal)

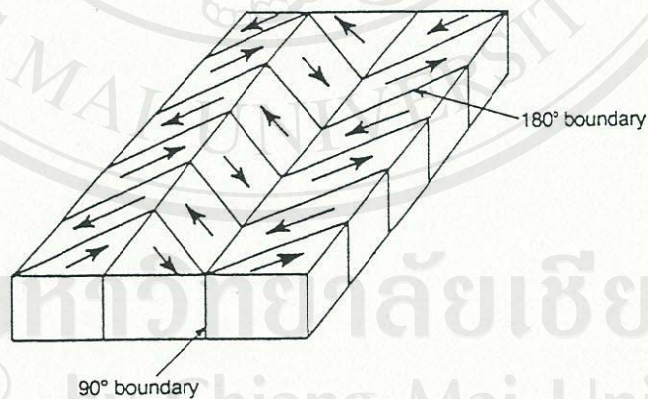
เฟอร์ไรต์เลคตริก เป็นผลึกประเภทไม่มีศูนย์กลางของสมมาตร (Non-centrosymmetry) ในผลึก 32 คลาส (Class) มี 21 คลาส เป็นพวก non-centrosymmetry โดยมี 10 คลาสเป็นเฟอร์ไรต์เลคตริก



เนื่องจากลักษณะของ non-centrosymmetry ทำให้ผลึก Ferroelectric มี Spontaneous polarization อยู่แล้วในลักษณะที่ไดโพลโมเมนต์ถาวร มีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเป็นหย่อมๆ ส่วนที่เรียงตัวในทิศทางเดียวกันเราเรียกว่า โดเมน (Domain) ดังนั้นในผลึกจะมีโดเมนไฟฟ้าอยู่มากมาย ขอบของแต่ละโดเมนเรียกว่า โดเมนวอลล์ (Domain Wall) หรือ โดเมนบันดาวิ (Domain Boundary)



(ก)

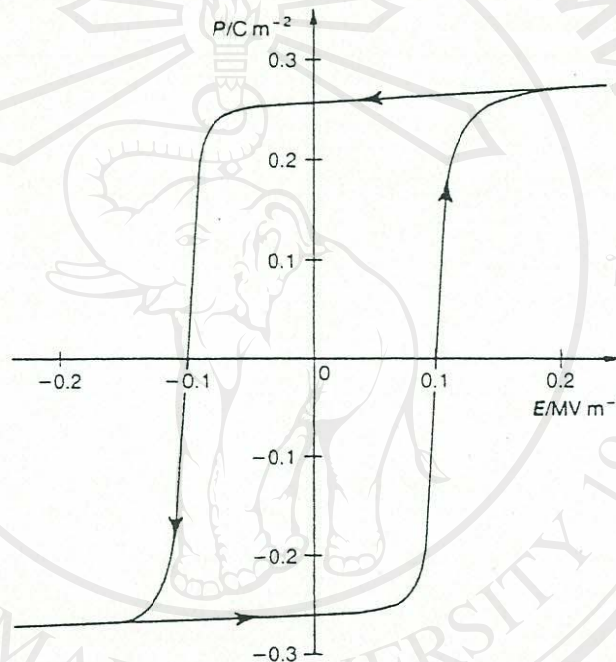


(ข)

- รูปที่ 2.25 ก. ลักษณะการเกิด Ferroelectric Domain<sup>(19)</sup>  
 ข. ลักษณะของ 90° และ 180° Domain Boundary<sup>(11)</sup>



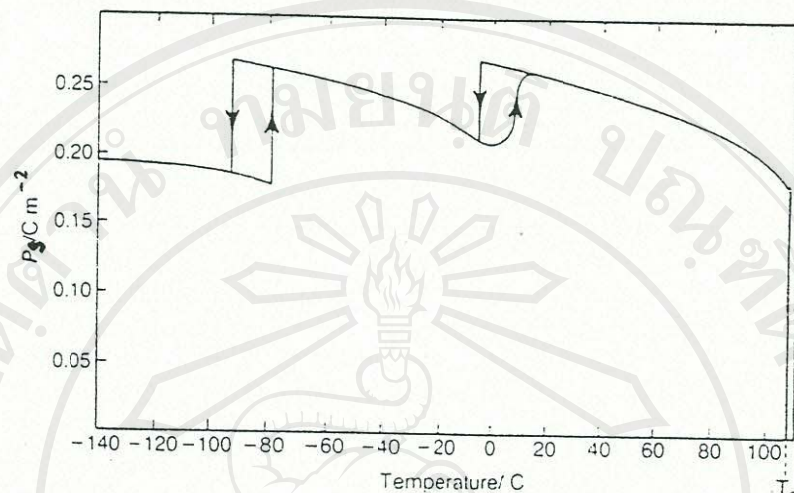
เมื่อเราเอาสารไดอิเล็กตริก มาวางในสนามไฟฟ้าจะเกิด polarization ขึ้นภายในสารนั้น และเมื่อลดสนามไฟฟ้าที่ให้อยู่เป็นศูนย์แล้ว polarization ก็จะเป็นศูนย์ทันที แต่สารเฟอร์โรอิเล็กตริกเมื่อลดสนามลงเป็นศูนย์แล้ว polarization จะไม่เป็นศูนย์เหมือนในสารไดอิเล็กตริกทั่วไป แต่จะเป็นศูนย์เมื่อ  $E = E_c$  ดังรูปที่ 2.26 ทำให้เกิด Hysteresis loop ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารเฟอร์โรอิเล็กตริก<sup>(11)</sup>



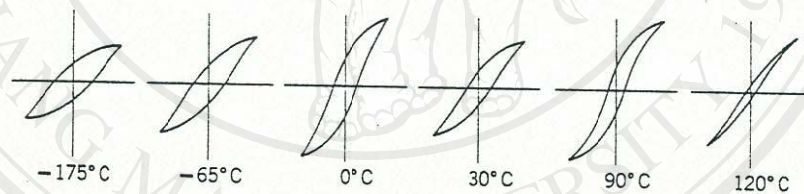
รูปที่ 2.26 ลักษณะของ Hysteresis Loop ในเฟอร์โรอิเล็กตริก<sup>(11)</sup>

จะเห็นได้ว่าสารเฟอร์โรอิเล็กตริกมี dipole moment ถาวรอยู่แล้ว ดังนั้นเราจะทำให้สารบางชนิดแสดงสภาวะ ferroelectric ได้โดยไม่ต้องใช้สนามภายนอกเลย แต่ใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลึกแทน เพราะอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับ polarization ของสารไดอิเล็กตริก โดยปกติแล้วสภาวะ ferroelectric จะไม่ปรากฏที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature :  $T_c$ ) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $T_c$  แล้วผลึกจะอยู่ในสภาวะ paraelectric ดังนั้นที่  $T_c$  ผลึกจะมีการเปลี่ยนสถานะ (phase transition)<sup>(11)</sup>





(ก)



(ข)

รูปที่ 2.27 ก. ความสัมพันธ์ของ Spontaneous Polarization ( $P_s$ ) กับอุณหภูมิ เมื่อ  $T < T_c$  (28)

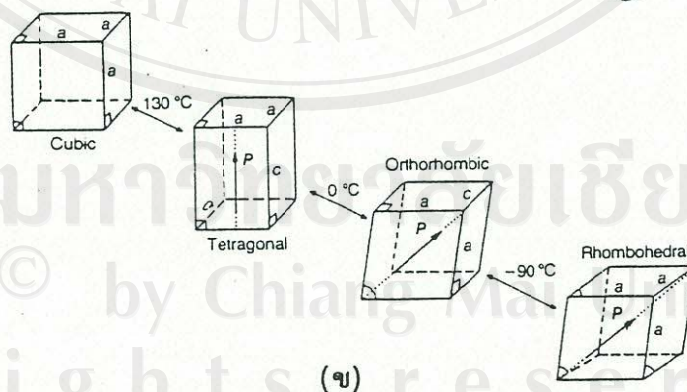
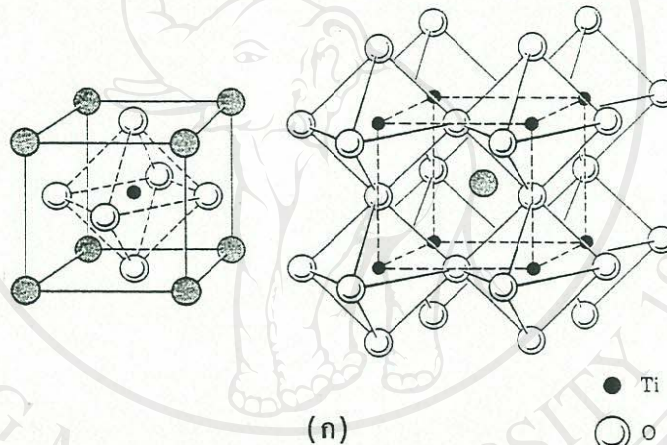
ข. ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะของ Hysteresis Loop (14)

## 2.6 โครงสร้างผลึกของสารแบเรียมไททาเนต

โครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนตขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมาก จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่า แบเรียมไททาเนตมีโครงสร้าง 4 รูปแบบคือ Rhombohedral, Orthorhombic, Tetragonal และ Cubic ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ดังตารางที่ (2.1)

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของ  $\text{BaTiO}_3$  ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ<sup>(10)</sup>

| อุณหภูมิ (°C) | โครงสร้างผลึก |
|---------------|---------------|
| $< -90$       | Rhombohedral  |
| $-90$ ถึง $5$ | Orthorhombic  |
| $5$ ถึง $120$ | Tetragonal    |
| $> 120$       | Cubic         |



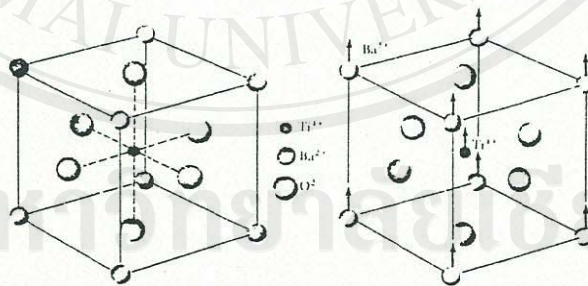
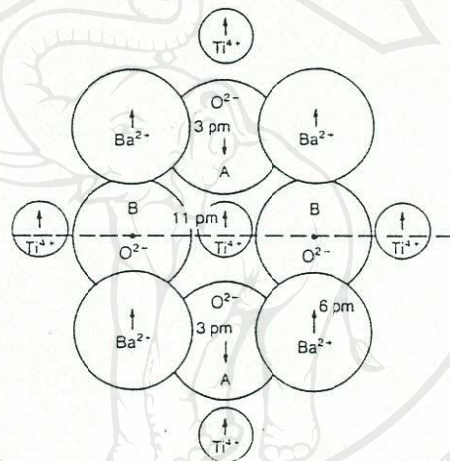
รูปที่ 2.28 ก. ลักษณะโครงสร้าง  $\text{BaTiO}_3$  <sup>(14)</sup>

ข. การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง  $\text{BaTiO}_3$  เทียบกับอุณหภูมิ<sup>(11)</sup>



ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  แบเรียมไททาเนตมีโครงสร้างแบบ Perovskites คือ มีโครงสร้างผลึกเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ โดยมี  $\text{Ba}^{2+}$  เป็นไอออนอยู่ตามมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และมี  $\text{O}^{2-}$  อยู่ที่ Face Centre ส่วน  $\text{Ti}^{4+}$  อยู่ที่ Body Centre ซึ่งลักษณะแบบนี้จะทำให้ spontaneous polarization เป็นศูนย์ จึงไม่แสดงลักษณะของเฟอร์โรอิเล็กตริก แต่ผลึกจะอยู่ในสภาวะพาราอิเล็กตริก (paraelectric) (10)

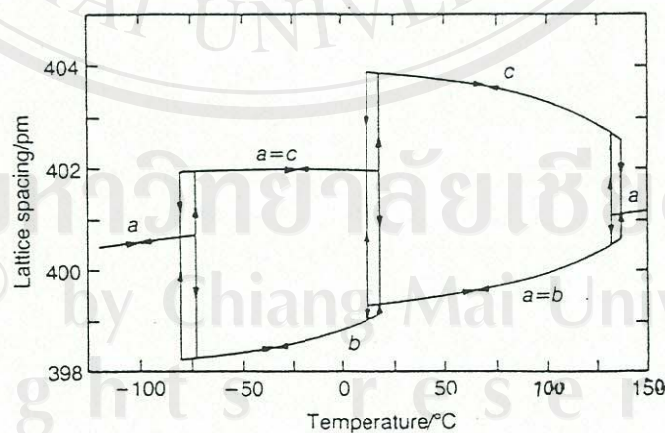
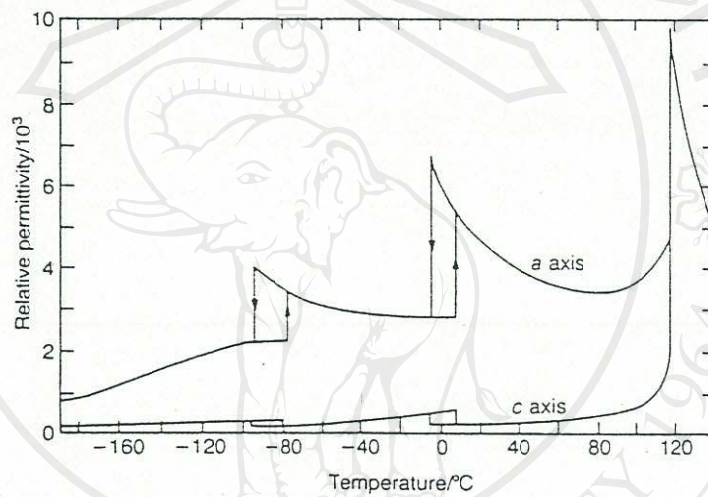
ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไป โดยมี  $\text{Ba}^{2+}$  และ  $\text{Ti}^{4+}$  เลื่อนที่ไปเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ  $\text{O}^{2-}$  หรืออาจกล่าวได้ว่าอะตอมของออกซิเจนทั้งหมดเคลื่อนที่ลง



รูปที่ 2.29 การเลื่อนตำแหน่งของอะตอมใน  $\text{BaTiO}_3$  (11,19)

## 2.7 การพัฒนาสมบัติของไดอิเล็กตริกของแบบเวียมิตาเนด

คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของสาร  $\text{BaTiO}_3$  เทียบกับอุณหภูมิ, ความถี่, สนามไฟฟ้า และเวลา ขึ้นอยู่กับการเติมสารตัวอื่นเข้าไปแทนที่ Ba หรือ Ti อย่างมาก ในทางปฏิบัติแล้วสาร  $\text{BaTiO}_3$  มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วง 1000-4500 ซึ่งขึ้นกับวิธีการเตรียม โดยพิจารณาแล้วพบว่า การลดการสั่นของ domain wall จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น นอกจากนี้ค่า  $\tan \delta$  ก็จะลดลงด้วย ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของ domain ก็จะช่วยให้ความรู้คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกของสารได้มากขึ้น<sup>(11)</sup>



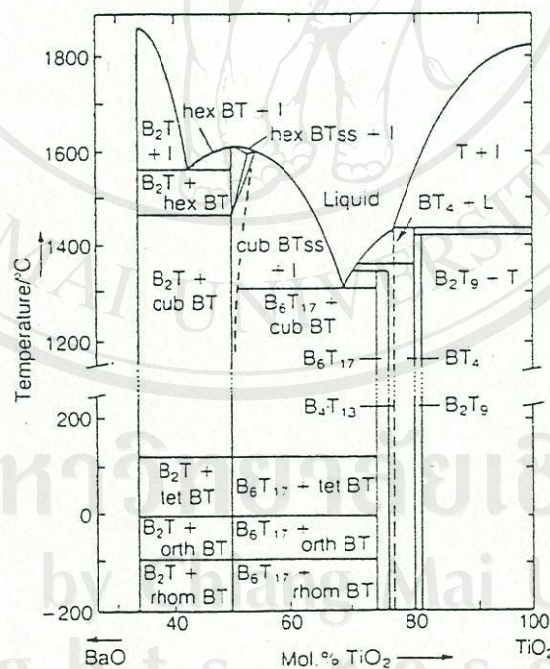
รูปที่ 2.30 คุณสมบัติของ  $\text{BaTiO}_3$  เทียบกับอุณหภูมิ<sup>(14)</sup>



ในการพัฒนาสมบัติทางไดอิเล็กตริกของสาร  $\text{BaTiO}_3$  นั้นสิ่งที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้ (11)

### 1. อัตราส่วน $\text{AO}/\text{BO}_2$

กรณีนี้เป็นการพิจารณาจำนวนรวมของไอออนในตำแหน่งของ Ba ต่อจำนวนของไอออนในตำแหน่งของ Ti จากรูปที่ 2.31 ซึ่งเป็นการศึกษาเฟสของระบบ  $\text{BaO}-\text{TiO}_2$  พบว่ากรณีที่  $\text{AO} < \text{BO}_2$  จะทำให้เกิดสาร  $\text{Ba}_6\text{Ti}_{17}\text{O}_{40}$  ซึ่งจะหลอมที่อุณหภูมิ  $1320^\circ\text{C}$  ซึ่งจะทำให้สามารถเผาซินเตอร์สารได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า  $1350^\circ\text{C}$  โดยมีขนาดของเกรนอยู่ในช่วง  $5-50\ \mu\text{m}$  แต่ในกรณีที่  $\text{AO} > \text{BO}_2$  จะเกิดสาร  $\text{Ba}_2\text{TiO}_4$  ซึ่งหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $1563^\circ\text{C}$  ซึ่งจะมีผลในการยับยั้งการเกิดเกรนของ  $\text{BaTiO}_3$  ซึ่งมีขนาดของเกรนอยู่ในช่วง  $1-5\ \mu\text{m}$



รูปที่ 2.31 ระบบ  $\text{BaO}-\text{TiO}_2$  (11)

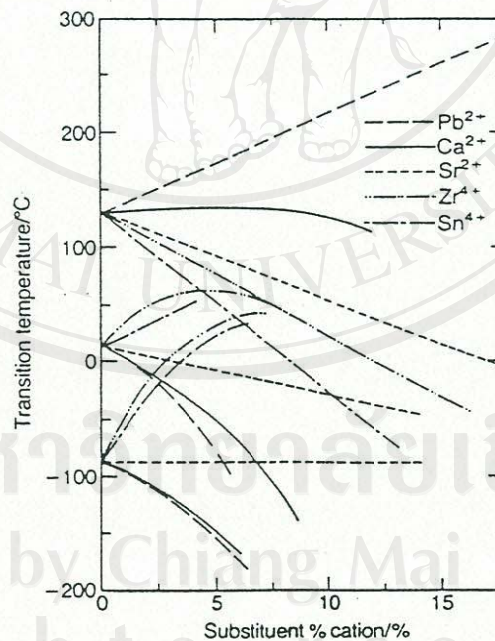
## 2. การเติมสารอื่นเข้าไปในสาร $\text{BaTiO}_3$

การเติมสารอื่นเข้าไปในสาร  $\text{BaTiO}_3$  นั้นก็เพื่อที่จะควบคุมลักษณะทางสมบัติไดอิเล็กตริกของสาร ซึ่งผลของการเติมนั้น มีหลายรูปแบบ คือ

1. การเลื่อนจุด Curie เพื่อการใช้งาน
2. การยับยั้งการเคลื่อนที่ของ domain wall
3. เพื่อทำให้สารอีกเฟสหนึ่งปนอยู่ หรือทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวของสาร
4. ควบคุมขนาดเกรน
5. ควบคุมปริมาณออกซิเจนหรือวาเลนซ์ของ Ti

โดยที่จะกล่าวถึงผลที่สำคัญดังนี้

1. การเลื่อนจุด Curie เพื่อให้อุณหภูมินั้นเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การเติม  $\text{Sr}^{2+}$  แทนที่ใน  $\text{Ba}^{2+}$  ใน  $\text{BaTiO}_3$  จะลดอุณหภูมิคูรีซึ่งตรงข้ามกับการเติม  $\text{Pb}^{2+}$  (ดังรูปที่ 2.32)



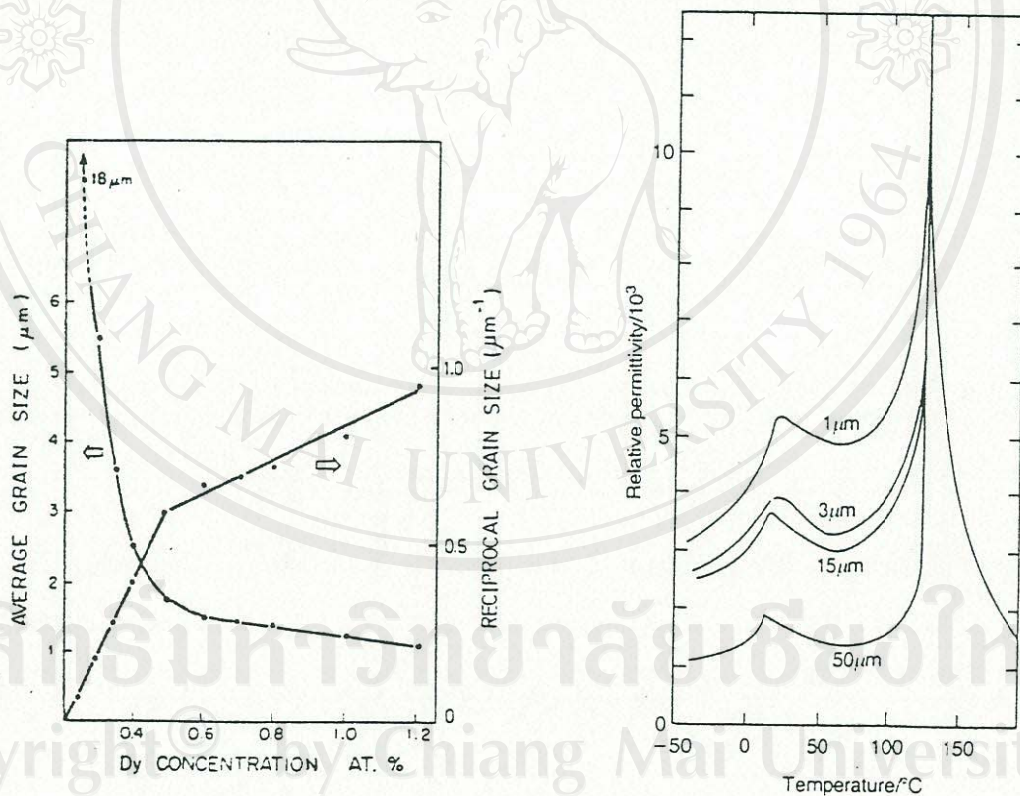
รูปที่ 2.32 ผลของการเติมสารอื่นใน  $\text{BaTiO}_3$  ต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส<sup>(11)</sup>



2. การเติมสารพวกทรานซิชัน ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ) ซึ่งไปแทนตำแหน่ง  $\text{Ti}^{4+}$  จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของ domain wall ซึ่งจะลดค่าแฟกเตอร์ความสูญเสียในไดอิเล็กตริก

3. การเติมสารเซรามิกส์บางชนิดลงไปผสมกับ  $\text{BaTiO}_3$  เช่นเติม  $\text{CaZrO}_3$  จะทำให้เกิดการ Broadening ของ Peak ที่จุดคูรี ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เกิดสารที่ประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบก็มีจุดคูรีแตกต่างกันไป จึงเกิดการ Broadening ขึ้น

4. การเติมสารที่มีวาเลนซ์มากกว่าสารที่ถูกแทนที่ เช่น  $\text{Dy}^{3+}$  ใน  $\text{Ba}^{2+}$  หรือ  $\text{Nb}^{5+}$  ใน  $\text{Ti}^{4+}$  จะทำให้เกิดการยับยั้งการเติบโตของเกรน ซึ่งทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.33



(ก) (ข)  
รูปที่ 2.33 ก. ผลของปริมาณ  $\text{Dy}^{3+}$  ต่อขนาดของเกรน<sup>(5)</sup>

ข. ผลของขนาดของเกรนต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก<sup>(11)</sup>