หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ไดอิเล็กตริกเซรามิกส์

ไดอิเล็กตริก คือ สารฉนวนไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานสูง ทำหน้าที่คั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน โดยทั่วไปการใช้ไดอิเล็กตริกนี้เพื่อวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ ใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนรองรับตัวนำไฟฟ้า และอีกประการหนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นฉนวนไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.1 คุณสมบัติของไดอิเล็กตริก

ลักษณะที่สำคัญที่เป็นตัวชี้บอกถึงคุณสมบัติ และคุณภาพของสารไดอิเล็กตริกมี 4 ประการ คือ[17)]

1) ความต้านทาน
2) ค่าเปอร์มิตติวิตี้ หรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
3) แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก
4) ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

2.1.1 ความต้านทานของไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริกหรือฉนวนไฟฟ้าที่สมบูรณ์แล้ว จะต้องไม่นำกระแสเลยทั้งสิ้น ถ้าหากได้รับแรงดันกระแสตรง นั่นคือจะไม่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่เลย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ สารฉนวนนั้นมีความต้านทานสูงเป็นอนันต์ แต่ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในทางปฏิบัตินั้นมักจะนำกระแส แต่มีค่าน้อยมากเมื่อป้อนแรงดันกระแสตรง นั่นแสดงว่าสารฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไม่สูงเป็นอนันต์ หากแต่มีค่าสูงที่วัดได้ ค่าความต้านทานยิ่งสูงก็แสดงว่าฉนวนนั้นมีคุณภาพการฉนวนยิ่งดี

เมื่อนำฉนวนไปคั่นระหว่างอิเล็กโทรดที่ป้อนแรงดันกระแสตรงเป็นเวลานานจนกระทั่งอยู่ตัว จะมีกระแสไหลผ่านแนวนั้นแต่น้อย เรียกว่ากระแสรั่ว หรือกระแสค้าง

กระแสรั่วที่ไหลผ่านฉนวนนี้แบ่งออกเป็นสองทาง คือ ทางหนึ่งไหลผ่านเนื้อฉนวนในเนื่องจากฉนวนมีสภาพนำอยู่บ้างดังกล่าวแล้ว ส่วนอีกทางหนึ่งไหลผ่านตามผิวฉนวน จึงแยกเป็นความต้านทานเชิงปริมาตร (volume resistance) และความต้านทานเชิงผิว (surface resistance) ค่าความต้านทานของไดอิเล็กตริก อาจคำนวณหรือวัดได้เช่นเดียวกับความต้านทานของตัวนำ ถ้าทราบความต้านทานเฉพาะ ρ ความหนา d พื้นที่ภาคตัด A ของไดอิเล็กตริก ความต้านทานของฉนวนจะหาได้จากสมการ

$$R = \rho \frac{d}{A}$$

2.1.2 <u>ค่าเปอร์มิตติวิตี้</u> บางทีเรียกว่า ค่าความคงตัวของไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญประการหนึ่ง ซึ่งเป็นตัวชี้บอกลักษณะของไดอิเล็กตริก หรือสารฉนวนไฟฟ้าที่กำหนดความสามารถ ในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ ϵ เป็นตัวเลขบอกให้ทราบว่า ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มเป็นกี่เท่า ของค่าความจุไฟฟ้าของสุญญากาศ เมื่อใส่ไดอิเล็กตริกที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ ϵ เข้าไปแทนที่นั่นคือ

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}$$

โดยที่ C_o เป็นค่าความจุไฟฟ้าเมื่อไดอิเล็กตริกเป็นสุญญากาศ

C เป็นค่าความจุไฟฟ้าเมื่อใส่ตัวไดอิเล็กตริกที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้เท่ากับ

โดยทั่วไปค่าเปอร์มิตติวิตี้จะแสดงเป็นค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (relative permittivity) ϵ_r ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าเปอร์มิตติวิตี้ ของไดอิเล็กตริกเทียบกับสุญญากาศ นั่นคือ

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_o}$$

โดยที่ ϵ_o เป็นค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศมีค่า = 8.854×10^{-12} F/m.

2.1.3 <u>แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก</u>

พลังงานสูญเสียในไดอิเล็กตริกอาจแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานสูญเสียเนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก ที่ความต้านทานไม่ถึงค่าอนันต์ และอีกส่วนหนึ่ง

เป็นพลังงานสูญเสีย เนื่องจากโพลาไรเซชั่นของไดอิเล็กตริก จัดเป็นพลังงานสูญเปล่าทางกลไฟฟ้า เพราะโมเลกุลของไดอิเล็กตริกต้องกลับขั้ว ไปตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า เช่น แรงดันกระแสสลับ

ถ้าป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับตัวเก็บประจุที่สมบูรณ์ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุจะมีเฟสนำหน้าแรงดันเป็นมุม 90 องศา

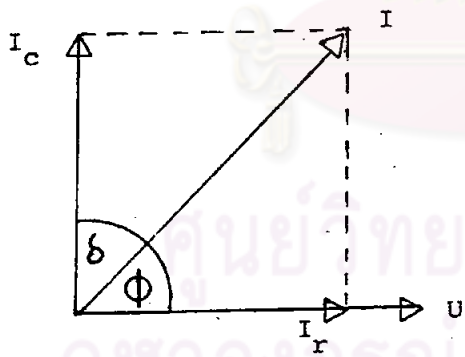
ถ้าให้ $u = U_m \sin \omega t$

$i = \omega C U_m \cos \omega t$

$I = \omega C U$

เมื่อ U = เป็นค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันที่ป้อน

ในทางปฏิบัติกระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุ จะนำหน้าแรงดันน้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.1 เป็นมุมเฟสของตัวเก็บประจุ ดังนั้นพาวเวอร์แฟคเตอร์ = $\cos \phi$ หรืออีกทางหนึ่ง = $\sin \delta$



ฉะนั้นกำลังงานสูญเปล่าในตัวเก็บประจุที่ไม่สมบูรณ์

คือ $Ui \cos \phi$

หรือ $Ui \sin$

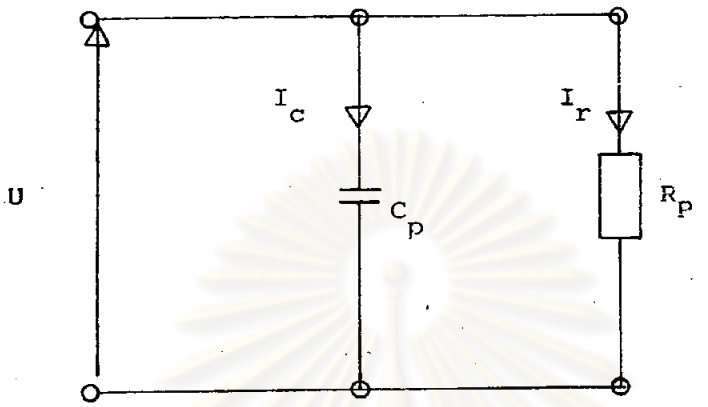
แต่ $\delta = 90^\circ - \phi$

δ = มุมหลังงานสูญเปล่าไดอิเล็กตริก

$t_g \delta$ = แฟคเตอร์พลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริก

รูปที่ 2.1 แสดงเวคเตอร์ไดอะเกรมกระแสและแรงดันไฟฟ้าของตัวไดอิเล็กตริก

ไดอิเล็กตริกมีพลังงานสูญเสีย และสามารถเก็บประจุไว้ได้ ตัวเก็บประจุจึงอาจเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของไดอิเล็กตริก

ในรูป 2.1 และเฟสเซอร์รูป 2.2

$$\tan\delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p} = \frac{I}{\omega C_p R_p}$$

ฉะนั้นพลังงานสูญเสีย

$$P_d = \frac{U^2}{R_p} = U^2 \omega C_p \tan\delta$$

หรือ $P'_d = E^2 \omega \epsilon \tan\delta$

เมื่อ P'_d เป็นพลังงานสูญเสียต่อปริมาตร

E เป็นความเครียดสนามไฟฟ้า

ถ้า C เป็นความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด

U เป็นแรงดันที่ป้อนอัดประจุมีหน่วยเป็นโวลท์

จะได้ P_d เป็นวัตต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ไดอิเล็กตริก สามารถทนอยู่ได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการเป็นฉนวน เราเรียกค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดัน ให้กับไดอิเล็กตริกนั้นว่า ความคงทนของไดอิเล็กตริกต่อแรงดันไฟฟ้า

ซึ่งค่าความคงทนของไดอิเล็กตริกนี้ หาได้จากการป้อนแรงดันให้กับไดอิเล็กตริกที่วางอยู่ระหว่าง อิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จนกระทั่งเกิดเบรก-ดาวน์ นั่นคือ

$$E_b = \frac{U_b}{d}$$

พลสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ E_b เป็นความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

U_b เป็นค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน์

d เป็นระยะห่างของอิเล็กโทรด

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก มีหน่วยวัดเป็นโวลท์/มิลลิเมตร กิโลโวลท์/มิลลิเมตร หรือกิโลโวลท์/เซ็นติเมตร

ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของไดอิเล็กตริกแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความหนา ความบริสุทธิ์ของสารไดอิเล็กตริก อุณหภูมิ ความชื้น อัตราการเพิ่มของแรงดันและสภาพของอิเล็กโทรด

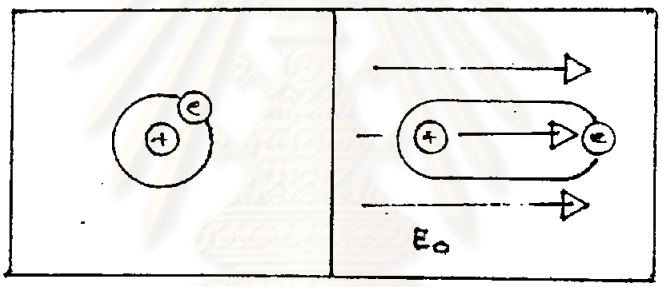
2.2 กลไกการเกิดโพลาเรเซชั่นในสารไดอิเล็กตริก

ในสารไดอิเล็กตริกทั่วไป จะประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ โมเลกุลแบบโพลาร์ (polar) และโมเลกุลแบบนอนโพลาร์ (nonpolar)[19] โมเลกุลแบบโพลาร์ หมายถึงโมเลกุลซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอน ซึ่งอยู่ห่างกันในสภาวะธรรมชาติ โมเลกุลเหล่านี้จะอยู่ในลักษณะที่ไม่เป็นระเบียบ แต่ถ้าโมเลกุลเหล่านี้อยู่ในสนามไฟฟ้า จะทำให้โมเลกุลเกิดการเรียงตัว ตามแนวทิศทางสนามไฟฟ้า ส่วนโมเลกุลชนิดนอนโพลาร์

หมายถึง โมเลกุลที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอน ที่มีจุดศูนย์ถ่วงร่วมกัน ในสภาวะธรรมชาติจะอยู่ในลักษณะไม่เป็นระเบียบ เช่นเดียวกัน แต่ถ้าโมเลกุลนี้อยู่ในสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนและโปรตอนแยกตัวห่างกัน และเรียงตัวไปตามแนวทิศทางสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับโมเลกุลชนิดโพลาร์ การเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลทั้งสองชนิดดังกล่าวเรียกว่าเกิดการโพลาไรเซชั่น

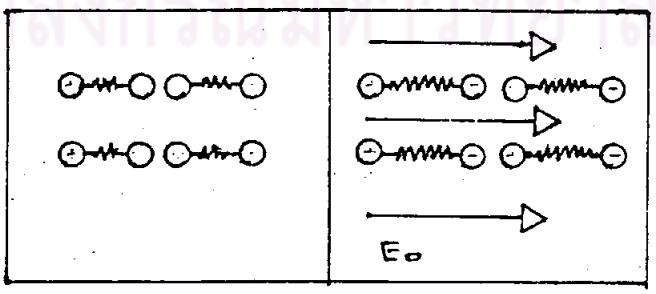
การเกิดโพลาไรเซชั่น ในสารไดอิเล็กตริก อาจแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ[4] คือ

1) อิเล็กทรอนนิกส์โพลาไรเซชั่น P_e เป็นการเกิดการโพลาไรเซชั่นในสารไดอิเล็กตริก อันเนื่องจากสนามไฟฟ้าทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนรอบ ๆ นิวเคลียสเคลื่อนตัวห่างออกไปจากจุดศูนย์ถ่วงเดิมดังรูป 2.3



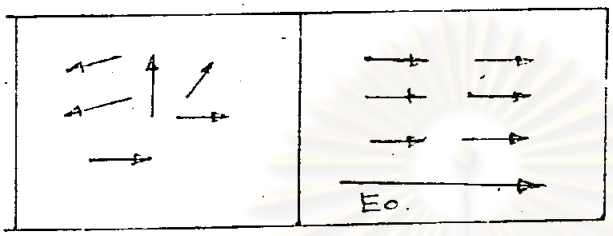
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดอิเล็กทรอนิกส์โพลาไรเซชั่น

2) ไอออนิกส์โพลาไรเซชั่น P_i เป็นการเกิดโพลาไรเซชั่น ในสารไดอิเล็กตริก อันเนื่องจากสนามไฟฟ้าทำให้การวางตัวของโมเลกุลแบบไอออนิกส์ ซึ่งในสภาวะตามธรรมชาติวางตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เกิดการเรียงตัวไปตามแนวทิศทางสนามไฟฟ้า



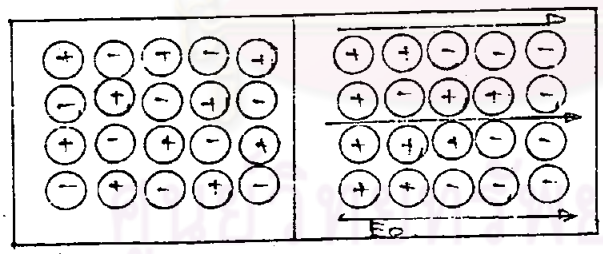
รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดไอออนิกส์โพลาไรเซชั่น

3) ออเรียนเตชั่นโพลาร์ไรเซชั่น P_o เป็นการเกิดโพลาไรเซชั่นในสารไดอิเล็กตริกอันเนื่องจากสนามไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลชนิดโพลาร์ที่อยู่ในสภาวะไม่เป็นระเบียบ มาอยู่ในลักษณะเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ



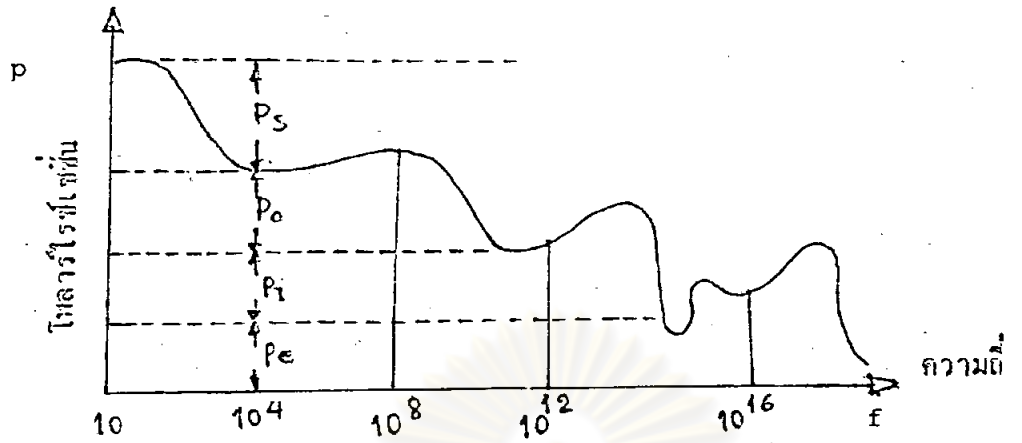
รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดออเรียนเตชั่นโพลาร์ไรเซชั่น

4) การเกิดโพลาไรเซชั่น แบบประจุค้าง P_s เป็นการเกิดโพลาไรเซชั่นเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ทำให้ประจุที่เคลื่อนตัวอย่างอิสระ เรียงตัวไปในทิศทางตามแนวสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดโพลาไรเซชั่น แบบประจุค้าง

การเกิดโพลาไรเซชั่น แบบต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วข้างต้น จะมีความแตกต่างกันในเชิงเวลา เช่น การเกิดโพลาไรเซชั่น แบบอิเล็กทรอนิกส์ จะเกิดเร็วกว่าแบบไอออนิกส์ และแบบไอออนิกส์จะเกิดเร็วกว่าแบบออเรียนเตชั่น เป็นต้น จึงอาจกล่าวได้ว่าการเกิดโพลาไรเซชั่น แบบต่าง ๆ ในสารไดอิเล็กตริก ขึ้นอยู่กับความถี่ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดโพลาไรเซชั่น กับความถี่

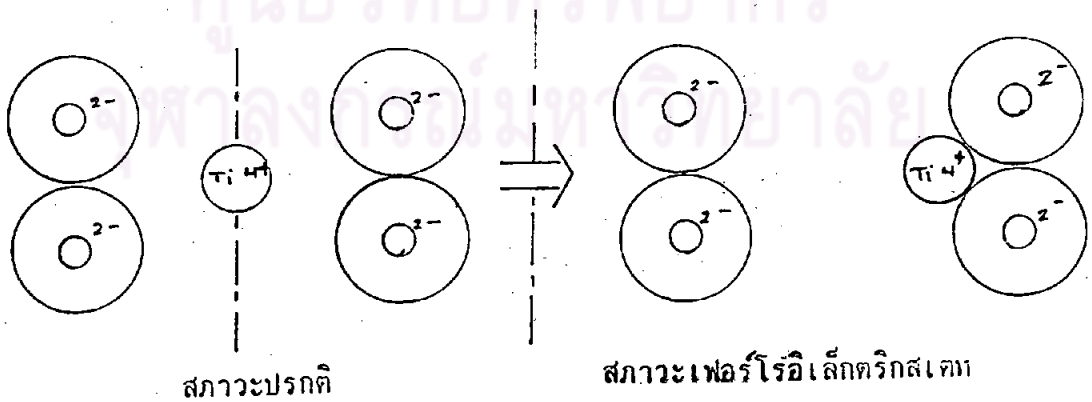
จากรูปจะเห็นว่าการเกิดโพลาไรเซชั่น แบบอิเล็กทรอนิกส์ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเท่ากับความถี่ของสนามไฟฟ้า ที่ป้อนจนกระทั่งถึงความถี่ของแสง ส่วนการเกิดโพลาไรเซชั่น แบบไอออนิกส์นั้น จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ตามความถี่ของสนามไฟฟ้า และอาจสูงถึงย่านความถี่อินฟาเรด ส่วนการเกิดโพลาไรเซชั่น แบบออเรียนเตชั่นและแบบประจุค้างนั้น จะเกิดได้รวดเร็วเท่ากับความถี่ต่ำ

สารไดอิเล็กตริกที่มีคุณสมบัติดอบสนอง ต่อการเกิดโพลาไรเซชั่น ดังกล่าวข้างต้น จะเป็นสารประเภทเฟอร์โรอิเล็กตริก ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้ หรือค่าไดอิเล็กตริกคงตัวมีค่าสูงต่ำต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 คุณสมบัติของสารเฟอร์โรอิเล็กตริก

ดังได้กล่าวแล้วตั้งแต่ต้นถึงปรากฏการณ์ การเกิดโพลาไรเซชั่นในเนื้อสารไดอิเล็กตริก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ค่าเปอร์มิตติวิตี้นี้จะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า โดยทั่ว ๆ ไป อะตอมของสารเฟอร์โรอิเล็กตริก จะมีคุณสมบัติเป็นอิเล็กตริกไดโปลประจำตัวอยู่แล้ว แม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำก็ตาม การเกิดอิเล็กตริกไดโปลของอะตอมต่าง ๆ นั้น จะเกิดอย่างไม่มีระเบียบ เมื่ออะตอมต่าง ๆ นั้นได้รับสนามไฟฟ้ามากระทำ จะเกิดการตอบสนองโดยทันทีทันใด โดยเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบตามแนวทิศทางสนามไฟฟ้า ในบรรดาสารเฟอร์โรอิเล็กตริกต่าง ๆ ความสามารถที่จะเกิดการโพลาไรเซชั่น อย่างทันทีทันใดนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เช่น สารเฟอร์โรอิเล็กตริกบางอย่าง ต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง จนกระทั่งบางครั้งอาจใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงถึงขนาดทำให้เกิดการเบรกดาวน์ ถึงจะเกิดการโพลาไรเซชั่นเพียงเล็กน้อย เราเรียกสารต่าง ๆ เหล่านั้นว่ามีแรงเกาะยึดกันระหว่างอะตอมสูงมาก แสดงว่าสารดังกล่าวนั้นมีคุณสมบัติไม่เหมาะสม ที่จะนำมาใช้ทำเป็นตัวไดอิเล็กตริกสำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้า สำหรับสารเฟอร์โรอิเล็กตริกที่ให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง โดยทั่วไปแล้วแรงเกาะยึดระหว่างอะตอมจะต่ำ จึงสามารถตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มต่ำได้ดี[1] คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของสารเฟอร์โรอิเล็กตริก ก็คือสารเฟอร์โรอิเล็กตริกเมื่ออยู่ในสภาพเฟอร์โรอิเล็กตริกสเตท อะตอมของมันจะไม่อยู่ที่จุดศูนย์กลางของการสมมาตรกัน[3] ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงอะตอมของสารเฟอร์โรอิเล็กตริกอยู่ในสภาวะเฟอร์โรอิเล็กตริกสเตท

อย่างไรก็ดีเมื่อสารนี้ได้รับความร้อน หรืออุณหภูมิสูงขึ้นจากปรกติโครงสร้างของผลึกจะเปลี่ยนไป ในกรณีที่สารเฟอร์โรอิเล็กตริกเกิดการโพลาไรเซชั่นอยู่แล้ว และเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้คุณสมบัติ ของการเกิดโพลาไรเซชั่นสูญเสียไปจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้ลดลงอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่ทำให้เกิดกผลกระทบดังกล่าวข้างต้นนี้ เราเรียกว่าอุณหภูมิ คูรี่[1] (Curie temperature) ซึ่งค่าของอุณหภูมิคูรี่ของสารเฟอร์โรอิเล็กตริกแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน การทราบค่าอุณหภูมิคูรี่ของสารไดอิเล็กตริกจะมีความสำคัญมาก เพราะว่าเราจะสามารถทราบค่าอุณหภูมิใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เราผลิตออกมา หรือการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม หรือถูกต้อง

กลุ่มของสารเฟอร์โรอิเล็กตริกที่น่าสนใจ สำหรับใช้ในการนำมาเป็นฉนวนไดอิเล็กตริก คั่นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ที่นิยมใช้กันได้แก่ สารแบเรี่ยมติตาเนต และสารติตาเนียมไดอ็อกไซด์[4] เป็นต้น สารเฟอร์โรอิเล็กตริกดังกล่าวข้างต้นมีรูปแบบของโครงสร้างของผลึกที่มีโครงสร้างเหมือนกับผลึกของสารเฟอร์โรอิเล็กตริก

2.3.1 สารติตาเนตเซรามิกส์

ในทรรศนะที่เกี่ยวกับการนำสารไดอิเล็กตริก ไปใช้งานในรูปแบบของ การฉนวนอนินทรีย์ (inorganic insulations) แบบต่าง ๆ รูปร่างของไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ จะมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับการใช้งานที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับสารติตาเนตเซรามิกส์ ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าจะเป็นที่รู้จักกันเกี่ยวกับงานการออกแบบสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าโดยมุ่งหวังไปในจุดของค่าเปอร์มิตติวิตี้ สารติตาเนตเซรามิกส์ จะมีคุณสมบัติในการเป็นตัวฉนวนไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยจะให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูงมากเมื่อเทียบกับค่าเปอร์มิตติวิตี้ของอากาศ

วัสดุที่นำมาประกอบเป็นสารติตาเนตเซรามิกส์ มีการออกแบบเหมือนกับ สารเฟอร์โรอิเล็กตริกเซรามิกส์ อันจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง และสำคัญสองประการ[5] คือ คุณสมบัติที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของการเกิดไดอิเล็กตริกและแมกเนติก ในสารเฟอร์โรอิเล็กตริกต่าง ๆ เหล่านี้สารเฟอร์โรอิเล็กตริกเซรามิกส์ จะแสดงพฤติกรรมของการเกิดไดอิเล็กตริกฟลักซ์ ซึ่งมีจำนวนมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากระทำต่อเนื้อสาร อันเป็นผลทำให้เกิดค่าเปอร์มิตติวิตี้มากหรือน้อย

013404

ตามไปด้วย นอกจากนี้ค่าของอุณหภูมิยังจะมีผลต่อค่าของเปอร์มิตติวิตี้ จะพบว่าค่าของเปอร์มิตติวิตี้จะมีค่าไม่คงที่แน่นอน ที่ช่วงเหนืออุณหภูมิกูรี่

สารติตาเนตเซรามิกส์ที่มีบทบาทสำคัญในงานทางวิศวกรรมไฟฟ้านั้นมีมากมาย เช่น ติตาเนียมไดอ๊อกไซด์ (TiO_2) แบเรียมติตาเนต ($Ba\ TiO_3$) ลีดติตาเนท ($Pb\ TiO_3$) สตรอนเทียมติตาเนท ($Sr\ TiO_3$) รวมทั้งสารผสมของแบเรี่ยมติตาเนท กับสตรอนเทียมติตาเนต

2.3.1.1 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์มิตติวิตี้กับค่าอุณหภูมิ</u>

ในการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ต่าง ๆ ไปใช้งานเราจะพบว่าค่าของเปอร์มิตติวิตตี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลง ของค่าอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เป็นเรื่องสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า องค์ประกอบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์มิตติวิตี้ ของสารติตาเนตเซรามิกส์ ม มี 3 ประการ[5] คือ

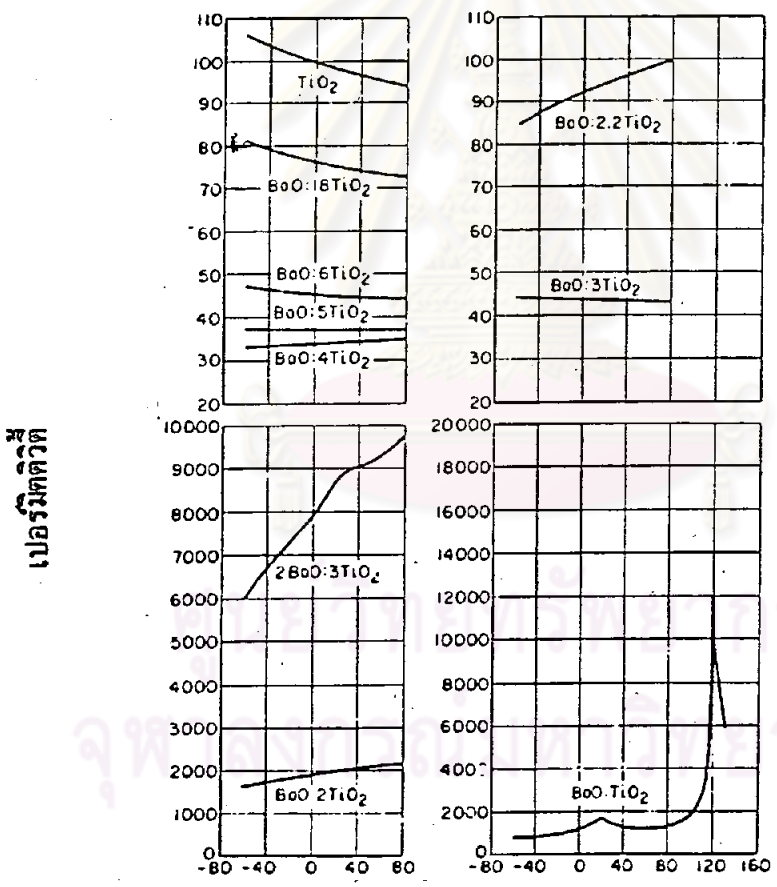
1) องค์ประกอบที่กำหนดคุณลักษณะของค่าเปอร์มิตติวิตี้ โดยสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงในทางบวกของอุณหภูมิ

2) องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าของเปอร์มิตติวิตี้อันเนื่องจากสัมประสิทธิ์ การเปลี่ยนแปลงในทางลบของอุณหภูมิ

3) องค์ประกอบที่ไม่แสดงอาการเปลี่ยนแปลงของค่าใด ๆ ที่เกี่ยวกับค่าเปอร์-มิตติวิตี้ ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ

เป็นการยากที่จะกำหนด จัดหรือแบ่งประเภทของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้งในทางบวกหรือทางลบ ที่มีผลต่อค่าของเปอร์มิตติวิตี้ แต่มีพื้นฐานอย่างหนึ่งจะเป็นกำหนดค่าเปอร์มิตติวิตี้ คือ องค์ประกอบของส่วนผสมแบเรี่ยมติตาเนต ($Ba\ TiO_3 = BaO + TiO_2$) จากส่วนผสมในสมการเราจะพบว่าอัตราส่วนผสมของสารประกอบเป็น

1 : 1 จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางด้านค่าเปอร์มิตติวิตี้ โดยมีอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ จะพบว่าค่าเปอร์มิตติวิตี้เปลี่ยนแปลงค่าไป เมื่อสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปในทางบวกมาก ๆ และในทางตรงกันข้าม หากอัตราส่วนผสมของแบเรียมติตาเนต (BaO, TiO_2) เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะ TiO_2 มากกว่า Bao เช่น ($Bao.18\ TiO_2$) จะเห็นว่าอัตราส่วนผสมของ TiO_2 มากกว่า 18 เท่า จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางค่าเปอร์มิตติวิตี้ โดยมีอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ พบว่าค่าเปอร์มิตติวิตี้เปลี่ยนแปลงค่าไปเมื่อสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลี่ยนไปในทางลบมาก ๆ ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กตริก ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ดังแสดงในรูป 2.9 และในตาราง 2.1



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารประเภท BaO, TiO_2 [5]

ตาราง 2.1 คุณสมบัติของสารติตาเนตเซรามิกส์[5)]

Principal Ingredient	Softening Point (°C)	Coefficient of Linear Expansion (x 10^6)	Density (gr/cc)	Bending Strength (kg/cm² x 10^{-3})	Heat Conductivity (w/cm/°C)	Dielectric Constant (25°C)	Temperature Coefficient of Dielectric Constant	Dissipation Factor, 25°C (tan δ x 10^4) 60 Cycles	Dissipation Factor, 25°C (tan δ x 10^4) 10^6 Cycles	Resistivity, 25°C (ohm-cm)
Barium Titanate	1400-1430	—	5.0	—	—	1000-10000	(Figure 60)	56.0	10.5	10^{11}-10^{13}
Magnesium Titanate	—	—	—	—	—	13-14	—	1.5	0.4	—
Calcium Titanate	1510	7.5	4.0	1-1.3	0.003	150-160	−1400	6.0	0.2	10^{12}-10^{14}
Strontium Titanate	1510	—	—	—	—	232	—	—	0.2	10^{12}-10^{14}
Titanium Dioxide	—	7.5	3.9	1-1.3	0.003	75-80	−700	—	0.3	10^{12}-10^{13}
Titanium Dioxide *	—	7.5	3.8	1-1.2	0.003	55-60	−600	—	—	10^{12}-10^{13}
Titania-Alumina **	—	5.8	3.0	1-1.2	0.003	12-14	−40	—	—	10^{13}
Zirconia-Magnesia-Titania **	—	5.8	4.0	1-1.2	0.0035	20-25	−50	—	—	10^{13}
Lithium Titanate	—	—	—	—	—	234	—	2.1	—	—

* Contains clay

** Exact composition is not known

2.3.1.2 ความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกกับแรงกดดันในการขึ้นรูปชิ้นงาน

ขบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ เพื่อให้มีค่าคุณสมบัติเป็นตัวไดอิเล็กตริกที่ดี โดยการใช้ความกดดันของของเหลว จะมีผลกระทบต่อค่าของเปอร์มิตติวิตี้ และค่าของอุณหภูมิคูรี่ลดลง ในบางโอกาสของการใช้งานเราต้องการที่จะลดค่าของอุณหภูมิคูรี่ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์มิตติวิตี้ อันเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิขณะการใช้งานของผลิตภัณฑ์ไดอิเล็กตริก แบเรียมติตาเนตเซรามิกส์ ในขณะที่ทำการขึ้นรูปโดยการอัดเนื้อดินในแบบอัด ที่แรงอัดดัน 300 – 1,000 บรรยากาศจะเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนค่าเปอร์มิตติวิตี้

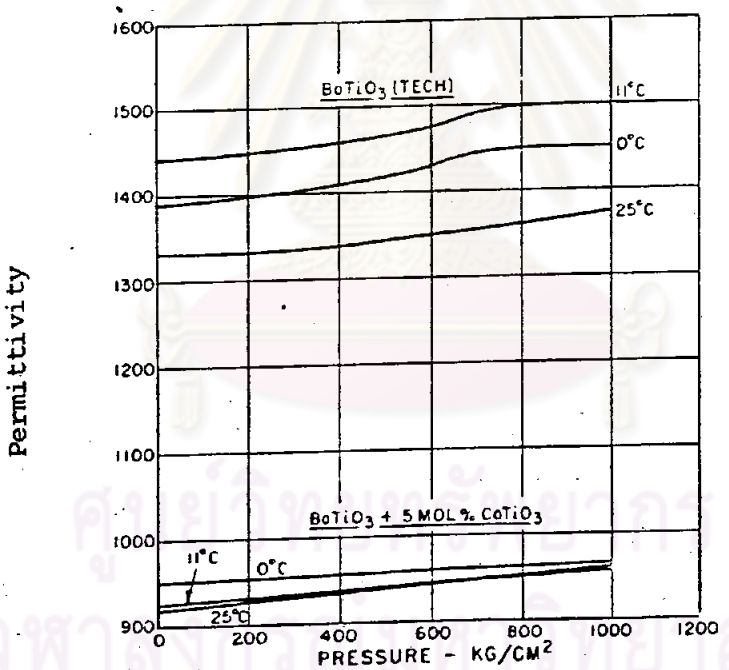
ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบเรี่ยมติตาเนตเซรามิกส์ โดยวิธีไฮโดรสแตติคเพรส จะมีผลกระทบต่อไดอิเล็กตริกดังนี้

1) ความสัมพันธ์ของแรงกดดันอย่างสม่ำเสมอ และราบเรียบจะส่งผลต่ออัตราการเพิ่มของค่าเปอร์มิตติวิตี้

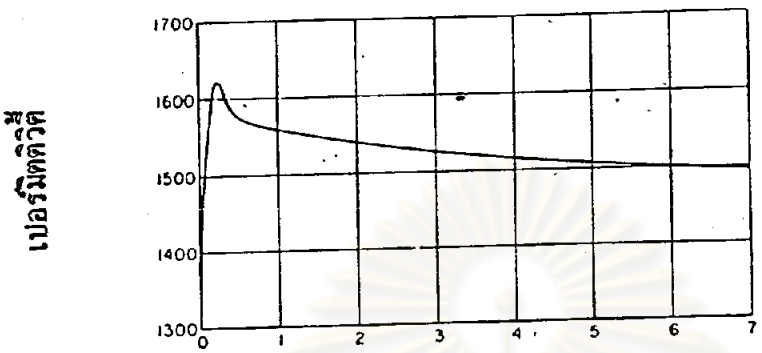
2) การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบเรี่ยมติตาเนต ($BaTiO_3$) และแคลเซี่ยมติตาเนต ($CaTiO_3$) ไดอิเล็กตริก มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์มิตติวิตี้ ดังรูป 2.10

3) ส่วนผสมของเนื้อสารเซรามิกส์ไดอิเล็กตริก ประเภทแบเรี่ยมติตาเนต ($BaTiO_3$) หากเติมสารแคลเซี่ยมติตาเนต ($CaTiO_3$) หรือ เลดติตาเนต ($PbTiO_3$) จะช่วยลดแรงอัดคันลง

4) ในการลดปริมาณแรงอัดคันขึ้นงานในทันทีทันใด หลังจากอัดเสร็จแล้ว จะช่วยให้เพิ่มค่าไดอิเล็กตริกได้ถึง 20 % ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์มิตติวิตี้กับค่าความกดคันของสารแบเรี่ยมติตาเนตเซรามิกส์[5]



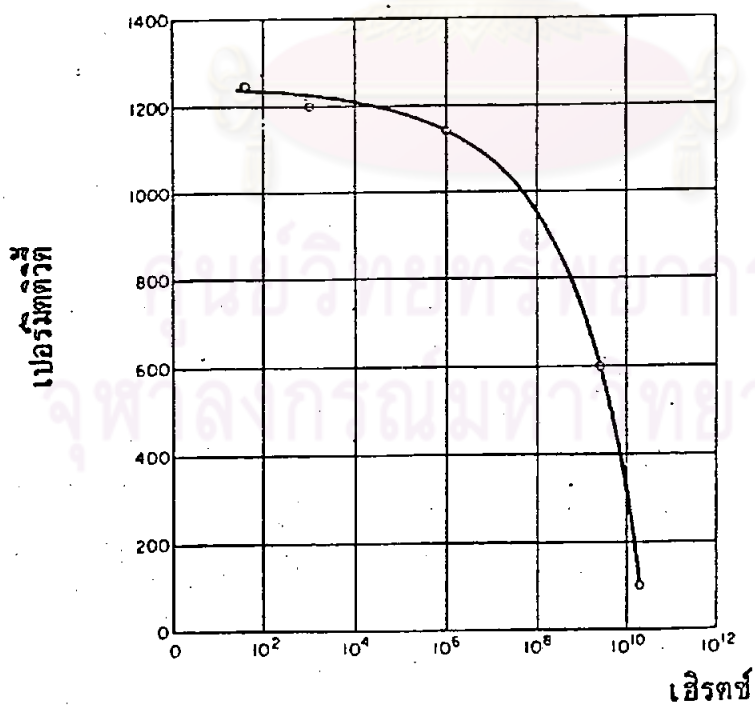
รูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารแบเรี่ยมติตาเนต หลังจากปลดปล่อยแรงอัดดัน

2.3.1.3 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์มิตติวิตี้กับค่าความถี่

ส่วนผสมของติตาเนตเซรามิกส์ ที่ให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง จะพบว่าความถี่ที่ทำการทดสอบเกือบจะไม่มีผลกระทบต่อค่าของเปอร์มิตติวิตี้ ของสารติตาเนตเซรามิกส์ ความถี่ที่ทำการทดสอบมีค่าตั้งแต่ 60 เฮิร์ตซ์ถึง 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิ 25 °C ดังแสดงในตาราง 2.2 และเส้นกราฟในรูปที่ 2.12

ตารางที่ 2.2 ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารผสมติตาเนต ในช่วงความถี่ 60 เฮิรตซ์ ถึง 1,000 กิโลเฮิรตซ์

Materials	Permittivity	
	60 Hz	1,000 kHz
Strontium titanate	233.5	232
Magnesium titanate	14.-	13.9
Calcium titanate	168	167.7
Barium titanate	1,250	1,143
Titanium Dioxide	100	100

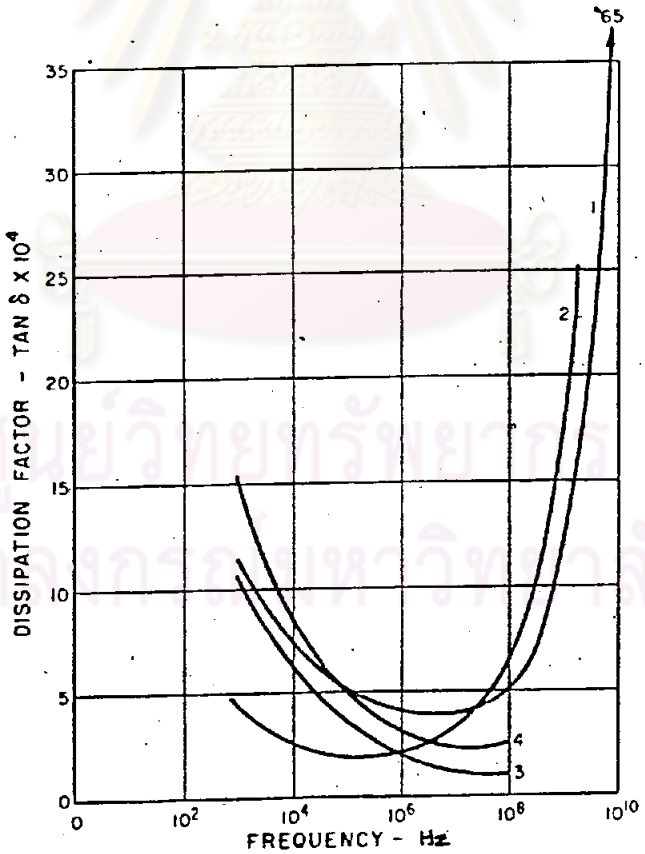


รูปที่ 2.12 ผลของความถี่ที่มีต่อค่าเปอร์มิตติวิตี

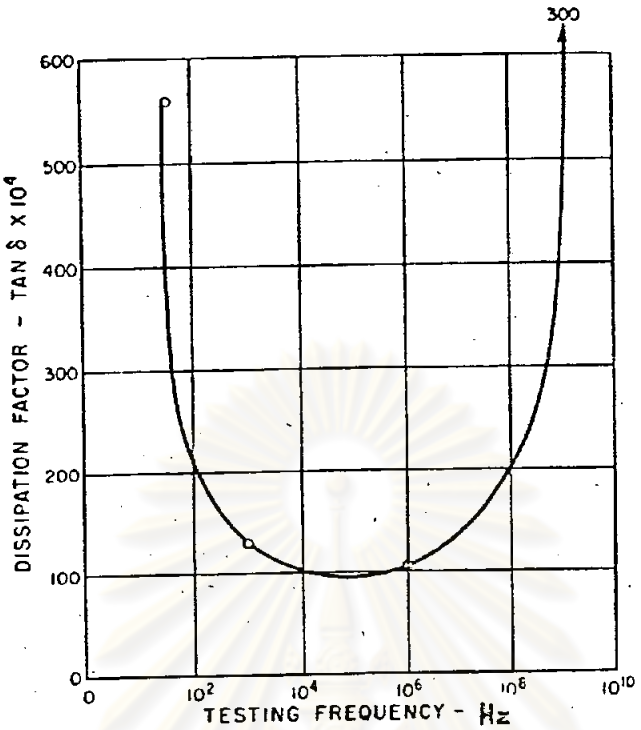
จากกราฟในรูป 2.16 จะแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความถี่สูงที่มีค่าสูงมากกว่า 10^6 Hz ที่ทำการทดสอบต่อสารแบเรี่ยมติตาเนตไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ ปรากฏผลคือ ที่ความถี่มากกว่า 10^6 Hz ค่าเปอร์มิตติวิตี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

2.3.1.4 ผลกระทบของค่าความถี่ต่อปริมาณความสูญเสียในเนื้อไดอิเล็กตริก

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ต่อปริมาณการสูญเสียภายในเนื้อสารติตาเนตเซรามิกส์ชนิดต่าง ๆ พบว่าปริมาณการสูญเสียในเนื้อไดอิเล็กตริกของติตาเนียมไดอ๊อกไซด์ จากที่ความถี่ต่ำ 10^2 Hz และลดลงต่ำสุดที่ความถี่ประมาณ $10^6 - 10^8$ Hz ณ อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 2.13 ส่วนสารแบเรี่ยมติตาเนตจะมีค่าสูญเสียต่ำสุดในช่วงความถี่ประมาณ $10^4 - 10^6$ Hz ดังรูป 2.14 และถ้าเปรียบเทียบค่าแฟคเตอร์พลังงานสูญเสียของสารไดอิเล็กตริกทั้งสอง จะพบว่าของสารแบเรียมติตาเนตจะมีค่าสูญเสียสูงกว่า ดังที่ได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ในตาราง 2.1



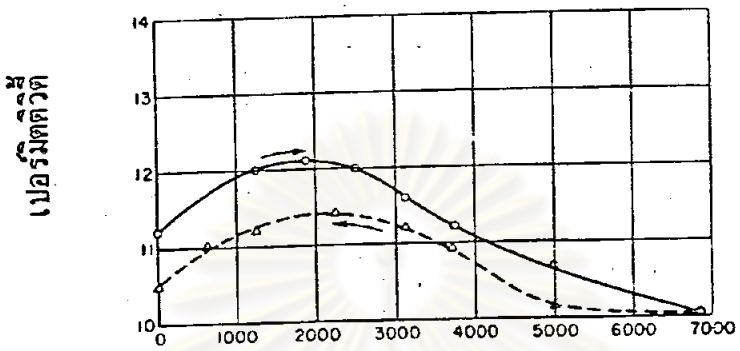
รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียในไดอิเล็กตริกกับค่าความถี่



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียในตัวไดอิเล็กตริกแบเรี่ยมติตาเนตกับค่าความถี่ 5)

2.3.1.5 ผลกระทบจากความเครียดสนามไฟฟ้าต่อค่าเปอร์มิตติวิตี้

ค่าของเปอร์มิตติวิตี้และค่าของการสูญเสีย ในเนื้อสารติตาเนียมไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหากค่าของความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทดสอบมีค่าสูงขึ้น ในรูปกราฟที่ 2.15 เป็นการแสดงให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นต่อค่าความเครียดสนามไฟฟ้า ของผลิตภัณฑ์แบเรียมติตาเนตสตรอนเทียมติตาเนต ($Ba\ TiO_3$ - $Sr\ TiO_3$) เซรามิกส์ ถ้าพิจารณาถึงค่าเปอร์มิตติวิตี้ ต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของความเครียดสนามไฟฟ้า พบว่าที่ความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ ๆ ค่าเปอร์มิตติวิตี้จะเปลี่ยนแปลงจากค่าระดับปกติ และมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 8 % ที่ความเครียดสนามไฟฟ้า 2,000 V และต่อจากนั้น ค่าเปอร์มิตติวิตี้จะลดลงประมาณ 17 % จนกระทั่งถึงความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นถึง 7,000 - 10,000 Volt/mil



รูปที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารแบเรี่ยมติตาเนต 69 % สตรอนเทียมติตาเนต 31 % ในเทอมของความเครียดสนามไฟฟ้ากระแสตรง[5)]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

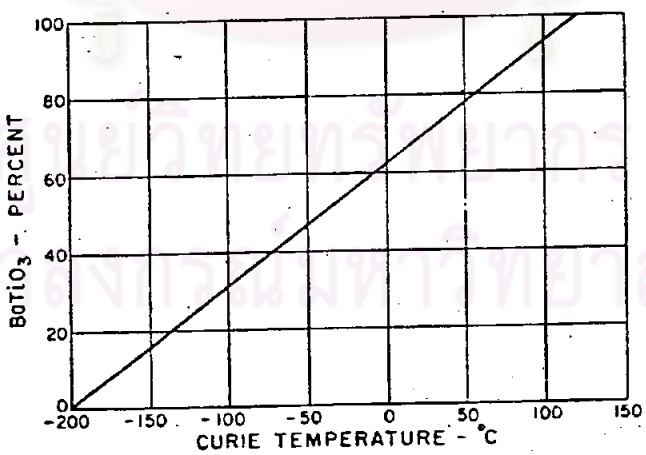
2.3.1.6 อุณหภูมิคูรี่

อุณหภูมิคูรี่หมายถึง ค่าอุณหภูมิจุดหนึ่งที่เป็นการกำหนดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารดิตาเนตเซรามิกส์ คือ ค่าของเปอร์มิตติวิตี้ โดยปกติแล้วค่าของเปอร์มิตติวิตี้ของสารดิตาเนตเซรามิกส์ จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และส่วนผสมของสารประกอบ อุณหภูมิคูรี่เป็นค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่สภาพคุณสมบัติของโมเลกุลหรือไดโปล มีการเรียงตัวอย่างสมบูรณ์[1] หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือเป็นค่าอุณหภูมิที่ให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูงสุด

โดยทั่วไปค่าอุณหภูมิคูรี่ของสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ แต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน และอาจจะมีค่าเป็นบวก (+) หรือลบ (-) ก็ได้ ซึ่งแล้วแต่ส่วนผสมของสารประกอบที่นำมาผสมกันเป็นสารเซรามิกส์[5]

อุณหภูมิคูรี่ของแบเรียมติตาเนต = + 120° และของสตรอนเทียมติตาเนต = - 200°

สารแบเรี่ยมติตาเนต + สตรอนเทียมติตาเนต จะให้ค่าอุณหภูมิคูรี่เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามปริมาณของสารประกอบแบเรี่ยมติตาเนตดังแสดงในรูปกราฟที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณ $BaTiO_3$ ต่อค่าอุณหภูมิคูรี่ของสารแบเรี่ยมสตรอนเทียมติตาเนต[5]

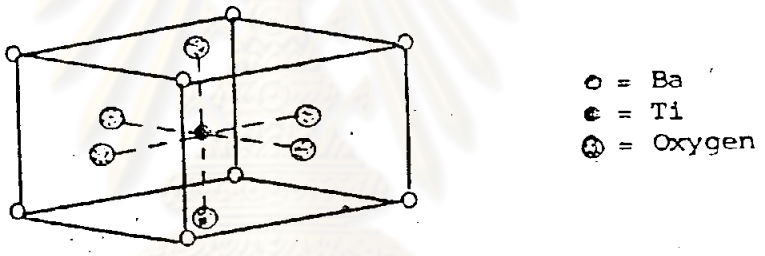
2.3.2 สารแบเรี่ยมติตาเนต

สารแบเรี่ยมติตาเนต ($BaTiO_3$) เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กตริกที่สำคัญ ซึ่งมีคุณสมบัติและมีคุณภาพสูง เกี่ยวกับการเกิดโพลาไรเซชั่นอย่างทันทีทันใด ดังนั้นสารนี้จึงให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูงมาก อย่างไรก็ดีคุณสมบัติที่ดีดังกล่าว ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความดัน ความถี่และความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติที่ดีเปลี่ยนไป

เพื่อให้มีความเข้าใจในคุณสมบัติของสารแบเรี่ยมติตาเนต สมควรที่จะต้องทราบถึงโครงสร้างภายในของสารนี้อย่างละเอียด เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของผลึกว่าเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกหลายผลึก และขนาดของเกรน

1) ลักษณะโครงสร้างของผลึก

ลักษณะโครงสร้างผลึกของสารแบเรี่ยมติตาเนต เป็นโครงสร้างของผลึกแบบเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite crystal)[1] ดังรูป 2.17

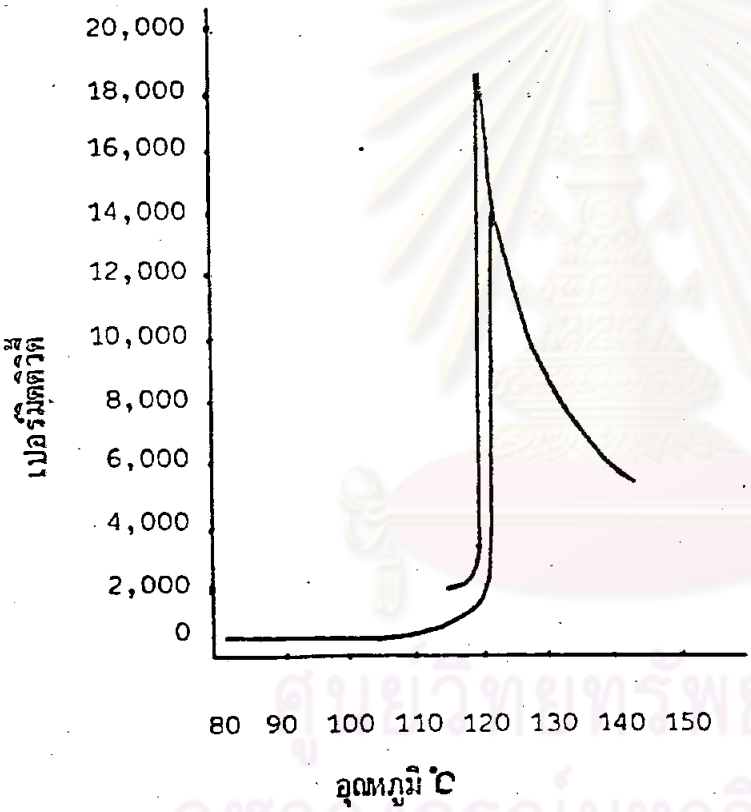


รูปที่ 2.17 โครงสร้างผลึกเพอร์อฟสไกต์ของสารแบเรี่ยมติตาเนต

โครงสร้างของผลึกจะมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ จะมีไอออน Ba++ อยู่ตรงมุมของผลึก ไอออน $O^{=}$ อยู่ตรงผนังของผลึกทั้งหกด้าน และไอออน Ti^{+4} จะอยู่ตรงบริเวณตรงกลางของผลึกลูกบาศก์ โครงสร้างของผลึกแบบเพอร์อฟสไกต์ขณะผลึกอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี่ รูปร่างของผลึกจะเปลี่ยนไป คือรูปแบบของผลึกจะเป็นแบบเตตระกอนัล สำหรับในสภาวะที่ใช้งานแล้ว รูปแบบของผลึกจะอยู่ในรูปแบบเพอร์อฟสไกต์ ซึ่งไอออนของติตาเนียมนั้นจะมีอิทธิพลต่อ ความสามารถในการเกิดโพลาไรเซชั่น

2) ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ

จากข้อมูลดังกล่าวในตอนต้น พบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง โครงสร้างผลึกของสารแบเรี่ยมติตาเนต ($BaTiO_3$) จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นอกจากนี้อุณหภูมิยังส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยว (coercive force) ของอะตอมลดลง จากผลกระทบของอุณหภูมิดังกล่าว จะทำให้มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของสารแบเรี่ยมติตาเนต โดยมีผลกระทบต่อค่าความจุไฟฟ้า และค่าความสูญเสียภายในเนื้อสารไดอิเล็กตริกด้วย จากการวัดค่าเปอร์มิตติวิตี้ ของสารแบเรี่ยมติตาเนต ณ ที่อุณหภูมิห้องจะได้กราฟดังรูป 2.18 [1]



รูปที่ 2.18 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่อค่าอุณหภูมิของสารแบเรียมติตาเนต

จากรูปกราฟค่าของเปอร์มิตติวิตี้ วัดที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 2,000 และมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10,000 เมื่อวัดที่อุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิกูรี่ และที่ค่าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกูรี่ ค่าเปอร์มิตติวิตี้จะลดลงตามค่าความสัมพันธ์ ดังสมการ[1)]

$$\epsilon = \frac{C}{T-Tc} + \epsilon_o$$

เมื่อ T = ค่าอุณหภูมิ

T_C = ค่าอุณหภูมิกูรี่

C = ค่าคงที่

ϵ_o = ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ

ϵ = ค่าเปอร์มิตติวิตี้

3) ความสัมพันธ์เกี่ยวกับความถี่และขนาดความเข้มสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าความถี่พลังงาน จะมีผลกระทบต่อค่าเปอร์มิตติวิตี้ ทั้งนี้เพราะว่าจะมีผลต่อโครงสร้างของโดเมน นอกจากนี้สนามไฟฟ้าระบบความถี่พลังงานยังมีผลต่อการเพิ่มของปรากฏการณ์การเรียงตัว ของไดโปลในเนื้อสารจนกระทั่งอิ่มตัว และที่ความถี่ของสนามไฟฟ้าค่าสูงมากกว่า 10^4 Hz ค่าของเปอร์มิตติวิตี้ จะตกลงทั้งนี้เพราะว่าความสามารถในการกลับตัวของโดเมน นั้นช้าเกินไปที่จะติดตาม หรือกลับตัวได้ทันกับความถี่สูง ๆ ขนาดนี้ได้ ในกรณีสนามไฟฟ้าเป็นระบบไฟตรงนั้น จะมีผลแตกต่างกัน คือชี้ความสามารถในการที่ทำให้เกิดการโพลาไรเซชั่น เกิดได้น้อยกว่าสนามไฟฟ้าระบบความถี่ ทำให้ค่าของเปอร์มิตติวิตี้มีค่าน้อยกว่า ที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้าเท่ากัน

4) ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเวลา

เป็นที่สังเกตุได้ว่าค่าพลังงานคงสภาพ (strain energy) ในเนื้อสาร $Ba\ TiO_3$ ขณะเย็นหรือลดระดับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิกูรี่ ผลจะทำให้โดเมนเกิดการกลับตัวอีกครั้ง จากผลของการที่โดเมนกลับตัวอีกครั้ง หลังจากที่ได้หมุนตัวเองไปตามแนวทิศทางสนามไฟฟ้า ในครั้งแรกจะมีผลทำให้ค่าการโพลาไรเซชั่นทันทีทันใดลดลง ซึ่งในการวัดค่าของเปอร์มิตติวิตี้นั้น จะต้องมีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องดังสมการ

$$\epsilon = \epsilon_i + m \log t$$

เมื่อ ϵ_i = ค่าของเปอร์มิตติวิตี้ที่วัดทันทีทันใด หลังจากที่ความร้อนลดต่ำลงจนกระทั่งค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี่

t = เวลาใด ๆ

m อัตราการหน่วงเวลา

จากผลของค่าพลังงานคงสภาพในเนื้อสารไดอิเล็กตริก ส่งผลกระทบต่อค่าของการเกิดโพลาไรเซชั่นอันเนื่องจาก การกลับตัวอีกครั้งของโดเมนจากสภาพการเรียงตัวในแนวทิศทางสนามไฟฟ้า จากปรากฏการณ์นี้เราสามารถแก้ไขได้ โดยการใช้ขบวนการให้ความร้อนกับเนื้อสารไดอิเล็กตริกอีกครั้ง เพื่อแก้ผลกระทบดังกล่าวข้างต้น ซึ่งทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้เพิ่มขึ้นจากที่สูญเสียไป วิธีการนี้เรียกว่าขบวนการปรับปรุงคุณภาพค่าเปอร์มิตติวิตี้ โดยกรรมวิธีการทำ Aging โดยความร้อน [1)]

5) <u>ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับความกดกัน หรือแรงกดดันทางกล</u>

ความกดดันหรือแรงอัดจากจะมีผลต่อค่าเปอร์มิตติวิตี้

ในกรณีสารแบเรี่ยมติตาเนต หากเราใช้ระบบความกดดันทางกลในการขึ้นรูป ค่าเปอร์มิตติวิตี้จะเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มค่าความกดดันที่กระทำต่อเนื้อสารที่มีความโตของขนาดเกรน 1 ไมครอนในการอัดขึ้นรูปและจะมีผลในภาวะตรงกันข้ามหากขนาดเกรนโตกว่า 15 ไมครอน และที่ค่าขนาดเกรนปานกลาง 1 - 15 ไมครอน จะไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อค่าเปอร์มิตติวิตี้

6) <u>สารผลึกเดี่ยว</u>

สารผลึกเดี่ยวจะมีโดเมนขนาดใหญ่เพียงโดเมนเดียว ส่วนสารผลึกหลายผลึกจะมีจำนวนโดเมนหลายโดเมน ในการสร้างส่วนผสมของสารไดอิเล็กตริกของตัวเก็บประจุไฟฟ้า วัสดุที่นำมาผลิตส่วนมากจะเป็นสารเซรามิกส์ ประเภทผลึกหลายผลึก เพราะสารผลึกเดี่ยวมีโดเมนขนาดใหญ่ มีค่าของแรงยึดเหนี่ยวสูง การที่จะบังคับให้โดเมนขนาดใหญ่นี้เกิดการเรียงตัว ตามแนวทิศทางของสนามไฟฟ้า ต้องใช้แรงจากสนามไฟฟ้าที่มีค่าในทิศทางตรงกันข้าม มากระทำจึงจะทำให้โดเมน หรือไดโปลขนาดใหญ่กลับตัวได้

7) สารผลึกหลายผลึก

สารผลึกหลายผลึก ภายในผลึกจะประกอบไปด้วยโดเมนที่มีลักษณะทวีกูณรวมตัวกันอยู่ในผลึก จากเหตุผลของการที่สารแบบนี้มีจำนวนโดเมนมากมาย ซึ่งโดเมนแต่ละตัวก็จะมีขนาดเล็ก ดังนั้นแรงเกาะยึดกันระหว่างโดเมนจะมีน้อย จึงเป็นการง่ายที่จะใช้แรงสนามไฟฟ้า จำนวนน้อยในการที่จะทำให้เกิดการเรียงตัวของไดโปล ตามแนวของสนามไฟฟ้าที่ป้อนและจะมีจำนวนไดโปลกลับตัวสู่สภาพเดิมน้อยเมื่อเราเลิกป้อนสนามไฟฟ้า พฤติกรรมการเกิดโพลาไรเซชั่นภายในเนื้อสาร จะสามารถพิจารณาได้รูปกราฟฮิสเตอร์รีซีสลูปทั่ว ๆ ไป ซึ่งค่าของเปอร์มิตติวิตี้ของสารผลึกหลายผลึกจะมีค่าน้อยกว่าสารผลึกเดี่ยว สำหรับค่าความสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในเนื้อสารจะมีน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าค่าของแรงเกาะยึดระหว่างไดโปลนั้นมีค่าน้อยมาก จึงเป็นการง่ายในการใช้แรงสนามไฟฟ้าจำนวนน้อยก็สามารถบังคับให้ไดโปลเกิดการเรียงตัว หรือกลับตัวได้ง่าย แต่มีผลเสียอยู่บ้างเหมือนกัน ในกรณีที่แรงเกาะยึดระหว่างไดโปลมีค่าน้อย อาจเป็นเหตุให้ไดโปลเกิดการกลับตัวสู่สภาพเดิมจำนวนหนึ่ง ทำให้ค่าการเรียงตัวตกค้างมีค่าน้อยกว่าแบบผลึกเดี่ยว

หากจะเปรียบเทียบค่าความสูญเสีย อันเนื่องจากการเกิดโพลาไรเซชั่นระหว่างสารผลึกเดี่ยว และสารผลึกหลายผลึกจะพบว่า สารผลึกหลายผลึกมีค่าความสูญเสียน้อยกว่าถึง - 2,000 เท่า เมื่อเทียบกับสารผึกเดี่ยว[1)]

8) ขนาดของเกรน

สิ่งหนึ่งซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเกี่ยวกับการผลิตตัวไดอิเล็กตริกเซรามิกส์จากสารแบเรี่ยมติตาเนต จะต้องคำนึงถึง คือ ขนาดความโตของเกรนของเนื้อสารที่จะต้องผ่านกระบวนการบดให้มีขนาดเล็กมากที่สุด คือ ความโตของเกรนประมาณ 1 โมครอน ที่ค่าความโตของเกรนสารขนาดนี้ จะมีผลทำให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมาให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง

นอกจากนี้ขนาดความโตของเกรน ยังมีผลต่อความสูญเสียในตัวไดอิเล็กตริก เกรนขนาดเล็กเกิดความสูญเสียน้อยกว่าเนื้อสารที่มีขนาดเกรนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามขนาดเกรนของเนื้อสารไม่ควรที่จะมีขนาดเล็กหรือใหญ่เกินไป ทั้งนี้เพราะหากเกรนมีขนาดเล็กเกินไปเกรนต่าง ๆ เหล่านั้น หลังจากที่เกิดการเรียงตัวแล้ว เมื่อตัดสนามไฟฟ้าออก เกรนหรือไดโปลจะหมุนกลับตัวตามเดิมได้ง่าย แต่ถ้าหากเกรนขนาดใหญ่เกินไป ก็เป็นการยากหรือต้องใช้สนามไฟฟ้า ที่มีความเข้มสูงในการทำให้เกิดการเรียงตัวของไดโปล และทำให้มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำ ค่าแฟคเตอร์ความสูญเสียในเนื้อไดอิเล็กตริกสูง

ฉะนั้นขนาดความโตของเกรนของสารจะต้องมีขนาดที่พอเหมาะ หรืออาจกล่าวได้ว่าขนาดเกรนที่พอเหมาะของสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ ก่อนจะทำการเผาควรมีขนาดโต 1 - 2 ไมครอน ซึ่งจะทำให้ค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง และค่าความสูญเสียของไดอิเล็กตริกต่ำ

ในการทำวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ โดยการใช้สารแบเรี่ยมอ็อกไซด์ หรือแบเรี่ยมคาร์บอเนต และสารติตาเนียมไดอ็อกไซด์ ได้ยึดถือข้อกำหนดของ Mc. Quarrie and Kingery[1] ซึ่งกล่าวไว้ว่า

- ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของไดอิเล็กตริก จะมีค่าสูงมากน้อยขึ้นอยู่กับการเตรียมตัวอย่างในเรื่อง ส่วนผสมของเนื้อสาร ความบริสุทธิ์ของเนื้อสาร ความเครียดสนามไฟฟ้าและเวลา

- ขบวนการทำไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ผลึกหลายผลึก ขนาดของเกรนมีผลมากต่อการกลับตัว การเรียงตัวของไดโปล โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของความบริสุทธิ์ของเนื้อสาร ความพรุนที่เกิดภายในเนื้อสาร ซึ่งจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโดเมน เพื่อที่จะทำให้เกิดการเรียงตัวเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

ในการทำตัวไดอิเล็กตริกให้มีค่าเปอร์มิตติวิตี้สูงจึงต้องกวดขันในเรื่อง

- ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำ
- ขบวนการต่าง ๆ ในการเตรียมผงเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์
- ขบวนการเผาเพื่อให้ได้ความหนาแน่นของเนื้อสาร

2.4 กระบวนการทั่วไปในการผลิตเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์

กระบวนการทั่วไปในการผลิตเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ เพื่อทำเป็นฉนวนไดอิเล็กตริกสำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 ประการ คือ

- กระบวนการทำส่วนผสมในเชิงปฏิกริยาให้เป็นของแข็ง เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้า
- กระบวนการขึ้นรูปของตัวไดอิเล็กตริกเพื่อใช้ทดสอบ
- กระบวนการผนึกตัวสร้างความหนาแน่นในเนื้อสารเซรามิกส์โดยการเผา

2.4.1 กระบวนการทำส่วนผสม

กระบวนการทำส่วนผสมในเชิงปฏิกริยาให้เป็นของแข็งเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางไฟฟ้า ประกอบด้วยกรรมวิธีการดังต่อไปนี้ คือ

1) การเตรียมผงเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์

การเตรียมเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์มีวิธีการทำตามลำดับดังนี้ คือ

(1) การชั่งน้ำหนักสารวัตถุดิบ

(2) การผสมสารวัตถุดิบและบดเข้าด้วยกัน โดยวิธีการบดเปียกหรือการบดแบบบดแห้ง

(3) การแยกเอาสารโลหะที่ไม่ต้องการออก

(4) การกรองขนาดของสารผสมขั้นต้น

(5) การตกตะกอนเนื้อสาร หากใช้วิธีการบดเปียก

(6) การแยกน้ำออกจากเนื้อสาร

2) <u>การเตรียมเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ก่อนการเผา</u>

การเตรียมเนื้อสารก่อนที่จะทำการเผามีดังนี้

(1) การบดเนื้อสารจากสภาพก้อนผลึกหลังจากการอบแห้ง เพื่อให้กลายสภาพเป็นผงฝุ่นโดยโกร่งบด

(2) การอัดผงเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ก่อนการแคลไซน์

(3) การอบแห้งก่อนการแคลไซน์

(4) การทำแคลไซน์ ทำโดยการนำเอาผงเนื้อสารเซรามิกส์จากขั้นตอนต่าง ๆ ข้างต้น ไปเผาเพื่อให้อะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดเกิดการรวมตัวกันเชิงปฏิกริยาเคมี จนเป็นสารผสมตัวใหม่อย่างสมบูรณ์ ตามที่ต้องการโดยใช้ความร้อน 1,000 °C / 4 ช.ม.[8)]

3) <u>กระบวนการเตรียมผงเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ก่อนการขึ้นรูปจริง</u>

หลังจากที่ได้ทำแคลไซน์แล้ว จะได้สารที่อยู่ในลักษณะเป็นก้อนแข็ง จึงต้องมาทำการเตรียมเนื้อสารเพื่อการขึ้นรูปต่อไป ซึ่งประกอบด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

(1) การบดละเอียดผงเนื้อสารเซรามิกส์ขั้นสุดท้าย โดยใช้โกร่งบดหรือโดยการใช้เครื่องบดบอลล์มิล์ล หรือไวเบรทอรี่มิล์ล

(2) การแยกสารโลหะที่ไม่ต้องการออกขั้นสุดท้าย ด้วยวิธีอำนาจแม่เหล็ก

(3) การเตรียมสารละลายเสริมการผนึกตัวของโมเลกุล ของสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ ซึ่งเราเรียกโดยทั่วไปว่าสารไบน์เดอร์ หรือสารเหนียว ซึ่งใช้ประกอบในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ ประเภทติตาเนตเซรามิกส์ สารไบน์เดอร์ที่นิยมใช้ คือ โพลีไวนีลอัลกอฮอล์ลไบน์เดอร์ ได้มากจากการผสมของสาร

- โพลีไวนีลอัลกอฮอล์ล (polyvinyl alcohol) 1. % - 6. %
- กลีเซอร์รีน (glycerine) 2. % - 10.%
- น้ำบริสุทธิ์ (distilled water) 8. % - 25. %

ปริมาณของสารละลายเสริมการผนึกตัวของโมเลกุลของสารติตาเนตไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ จะใช้ประมาณ 1. - 10. % ของปริมาณน้ำหนักรวมของเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ 7)

2.4.2 กระบวนการขึ้นรูปตัวไดอิเล็กตริกเซรามิกส์

กระบวนการขึ้นรูปตัวไดอิเล็กตริกประกอบด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

1) การใส่สารละลายเสริมการผนึกตัวของสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ เพื่อช่วยในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไดอิเล็กตริกเซรามิกส์

2) การอัดขึ้นรูปผงสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ เพื่อใช้ทำเป็นตัวไดอิเล็กตริก

การอัดขึ้นรูปผงสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ เพื่อใช้ทำตัวไดอิเล็กตริกอาจทำโดยวิธีการอัดแบบแห้ง หรือการอัดพร้อม ๆ กับใช้ความร้อนช่วยในการขึ้นรูป หรือการอัดโดยไอโซสแตติคเพรสชิ่ง หรือการฉีดน้ำดินลงในแบบหรือวิธีการเอกซ์ทรูชั่น

2.4.3 กระบวนการผนึกตัวสร้างความหนาแน่นในเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์โดยวิธีทางความร้อน หรือการเผา

กระบวนการผนึกตัวสร้างความหนาแน่นของผลึก เกิดขึ้นได้ใน 3 สภาวะ คือ

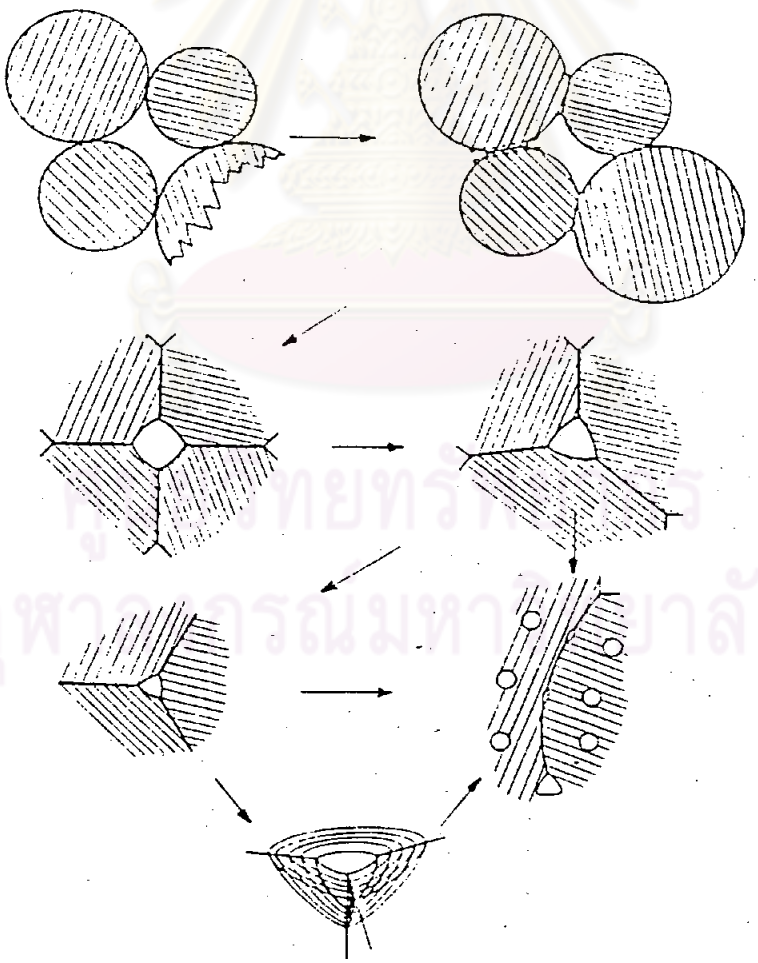
1) สภาวะเริ่มต้น การเกิดปรากฏการณ์ผลึกตัวสร้างความหนาแน่นในเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์ ซึ่งมีลักษณะเป็นอะตอมเล็ก ๆ ที่มีรูปทรงทางเรขาคณิตจะสามารถเกาะยึดหรือผนึกตัวติดเข้าด้วยกัน ระหว่างผิวของอะตอมหนึ่งกับผิวของอีกอะตอมหนึ่งเมื่อได้รับของความร้อนจากเตาเผา สภาวะตอนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่อง สภาพการขยายตัวของเกรน จะยังคงไม่เกิดขึ้นในสภาวะนี้

2) สภาวะตอนกลาง สภาวะในช่วงระยะตอนกลางของการผนึกตัวสร้างความหนาแน่นนี้ เป็นสภาวะการรวมตัวเข้าด้วยกัน ของอะตอมต่อจากสภาวะดังกล่าวข้างต้น ในสภาวะนี้จะพบว่าความหนาแน่นของอะตอมที่รวมตัวเข้าด้วยกัน จะมีความหนาแน่นประมาณ 60 % ของค่าตามทฤษฎี เกรนจะเริ่มโตขึ้น

โครงสร้างของเนื้อสารไดอิเล็กตริกเซรามิกส์จะมีรูพรุน ซึ่งเป็นช่องว่างจากการรวมตัวระหว่างอะตอม สภาพความหนาแน่นภายในเนื้อสาร จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นไปตามเวลาล็อกริทึม การเกิดการขยายตัวของเกรนจะมีมากขึ้น ดูเหมือนว่าตอนนี้อะตอมแต่ละอะตอมหลอมตัวติดเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์ ความหนาแน่นขณะนี้จะมีประมาณ 95 % ของค่าตามทฤษฎี แต่สภาพรูพรุนยังคงมีอยู่[8]

3) <u>สภาวะตอนสุดท้าย</u> ในสภาวะการเผาให้ความร้อนตอนท้ายนี้ สภาพการขยายตัวของเกรนยังคงมีอยู่ รูพรุนจะมีปริมาณน้อยลง และมีขนาดเล็กลงมากจนเกือบจะหาไปหมด ในทางปฏิบัติเราควรหยุดการเผา หรือให้ความร้อนได้แล้ว

จากสภาวะทั้งสามในกระบวนการผนึกตัวสร้างความหนาแน่น ในเนื้อสารสามารถสังเกตุปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลง ภายในของโครงสร้างของเนื้อสารดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอะตอมของสารเซรามิกส์ขณะทำการเผา

1180693X4