

บทที่ 2

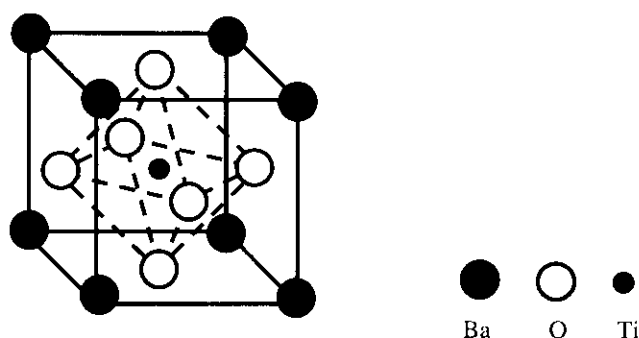
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ BaTiO_3 และ วัสดุ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่รายงานในบทนี้ประกอบด้วย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 และ วัสดุ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ในส่วนแรกของบทกล่าวถึงวัสดุ BaTiO_3 ในรายละเอียดประกอบด้วย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี ผลการสังเคราะห์วัสดุ BaTiO_3 ด้วยวิธีทางเคมีต่างๆ ผลของอุณหภูมิและความดัน ที่มีต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริก หลังจากนั้นจะกล่าวถึงวัสดุ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ในรายละเอียดประกอบด้วย ผลของอุณหภูมิ, ผลของความถี่, ผลของขนาดอนุภาค, ผลของขนาดเกรน, ผลของความดัน และผลของการเจือเหล็ก ที่มีต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ในหัวข้อสุดท้ายของบทนี้คือการประยุกต์ใช้งานของวัสดุไดอิเล็กทริกเซรามิก

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างและสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างของ BaTiO_3 (Moulson, Herbert, 2003)

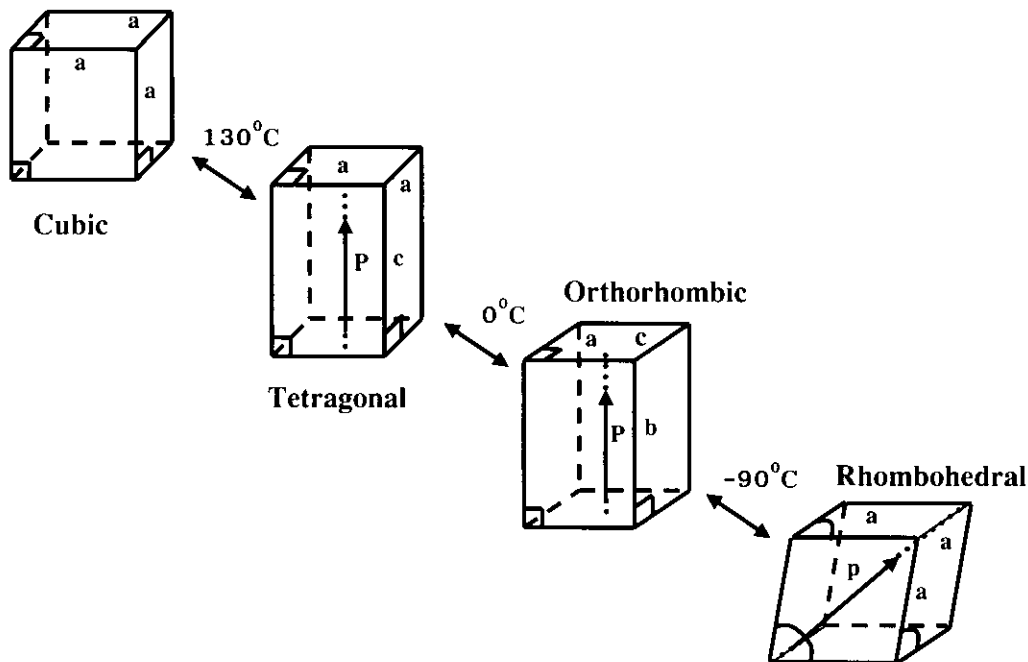
แบเรียมไททาเนต (BaTiO_3) เป็นสารประกอบประเภทไททาเนตที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite structure) มีอุณหภูมิคูรี (Curie temperature, T_c)¹ เท่ากับ 130°C มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงที่อุณหภูมิห้อง ($\epsilon_r \sim 3000$) (Cernea et al., 2005) และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี BaTiO_3 มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (cubic) โดยมีแบเรียมไอออน (Ba^{2+}) อยู่ตามมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) อยู่ที่ตรงกลางของแต่ละหน้าของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ (face center) ส่วนไททาเนตไอออน (Ti^{4+}) อยู่ที่ตรงกลางของลูกบาศก์ (body center) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ของ BaTiO_3 ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ (Moulson, Herbert, 2003)

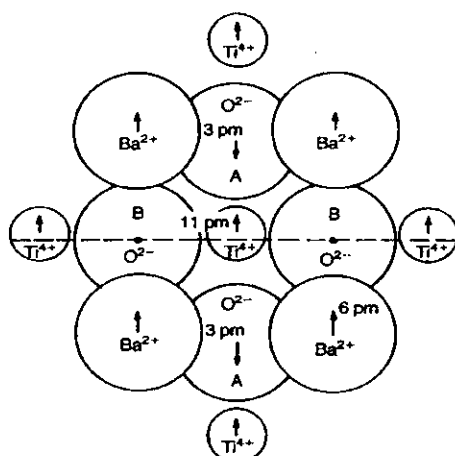
¹ อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) หรือ T_c คือค่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากเฟร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก

โครงสร้างของ BaTiO_3 มีอยู่ 4 รูปแบบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สามารถแสดงดังภาพที่ 2.2 กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -90°C โครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 จะมีโครงสร้างผลึกแบบบอโรฮีดรอล (rhombohedral) ที่อุณหภูมิในช่วง -90°C ถึง 5°C โครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 มีโครงสร้างผลึกแบบอโรธอมบิค (orthorhombic) ที่อุณหภูมิในช่วง 5°C ถึง 130°C โครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) และที่อุณหภูมิสูงกว่า 130°C โครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ (cubic)



ภาพที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ BaTiO_3 เทียบกับอุณหภูมิ (ดัดแปลงจาก Moulson, Herbert, 2003)

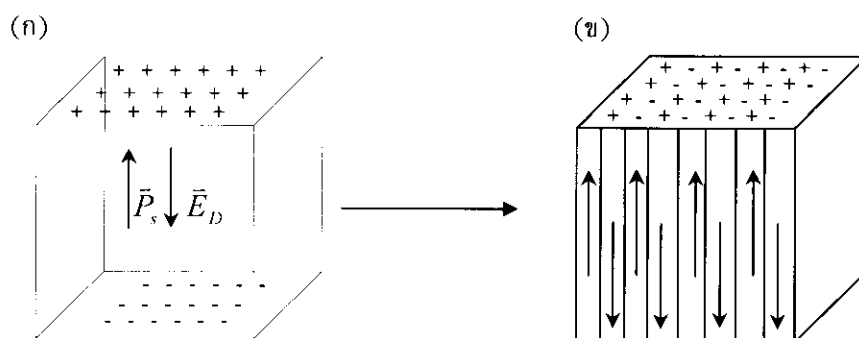
เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าวัสดุ BaTiO_3 สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ที่อุณหภูมิห้องโดยทั่วไป BaTiO_3 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเทตระโกนัล ซึ่งโครงสร้างแบบเทตระโกนัลนี้ไม่มีความสมมาตรที่จุดศูนย์กลาง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ BaTiO_3 เกิดจาก Ba^{2+} และ Ti^{4+} มีการเคลื่อนที่ไปเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ O^{2-} ซึ่งทำให้เกิดโพลาไรเซชันได้เองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง (spontaneous polarization) หรืออาจจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า อะตอมของออกซิเจนทั้งหมดเคลื่อนที่ลง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ดังนั้น BaTiO_3 จึงถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก



ภาพที่ 2.3 แสดงการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมในผลึก BaTiO_3 (Moulson, Herbert, 2003)

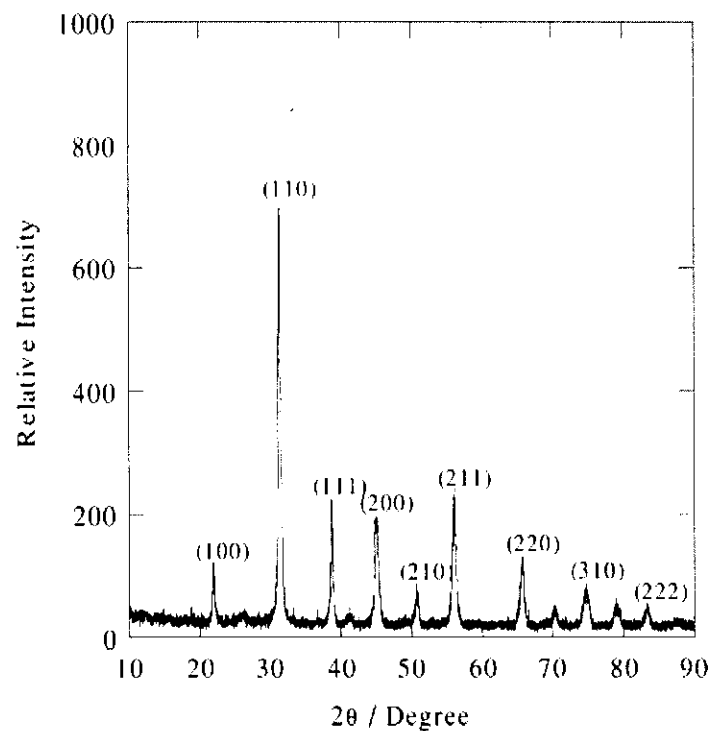
วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric material) เป็นวัสดุที่มีผลึกประเภทไม่มีศูนย์กลางของสมมาตร (non-centrosymmetry) เนื่องจากลักษณะของผลึกประเภทไม่มีศูนย์กลางของสมมาตรนี้จะมีโพลาไรเซชันได้เองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง ในลักษณะที่ไดโพลโมเมนต์ถาวรมีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเป็นหย่อมๆ ไดโพลโมเมนต์ถาวรที่เรียงตัวในทิศทางเดียวกันเรียกว่า โดเมน (domain) ดังนั้นในผลึกจะมีโดเมนไฟฟ้าอยู่มากมาย และขอบของแต่ละโดเมนจะเรียกว่า ผนังโดเมน (domain wall)

จากการพิจารณาโพลาไรเซชันได้เองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องภายในผลึกพบว่ามีความหนาแน่นประจุอยู่ที่บริเวณผิว และเมื่อให้สนามไฟฟ้า $\vec{E}_D$ (สนามไฟฟ้าที่ทำให้ไม่เกิดการโพลาไรเซชัน) เข้าไปดังภาพที่ 2.4 (ก) จะทำให้ผลึกถูกแบ่งให้มีการโพลาไรซ์ในทิศตรงข้ามกัน ดังภาพที่ 2.4 (ข) ซึ่งขอบเขตที่ถูกแบ่งนี้เป็นโดเมนซึ่งมีทิศทำมุม 180° จึงทำให้ที่บริเวณผิวมีประจุต่างชนิดกันซึ่งเกิดจากผลของการลด $\vec{E}_D$ และ พลังงานศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ลง

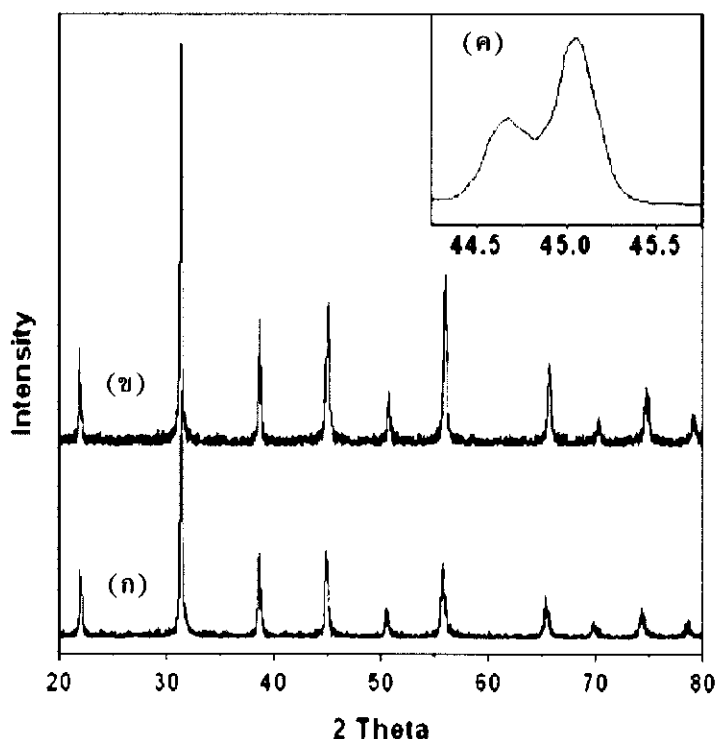


ภาพที่ 2.4 แสดงโพลาไรเซชันได้เองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องภายในผลึก (ก) เมื่อให้สนามไฟฟ้า $\vec{E}_D$ เข้าไปในผลึก (ข) หลังจากให้สนามไฟฟ้า $\vec{E}_D$ เข้าไปในผลึกจะถูกแบ่งให้มีการโพลาไรซ์ในทิศตรงข้ามกัน (Moulson, Herbert, 2003)

Peng et al. (2003) ได้รายงานการเตรียมวัสดุผง BaTiO_3 เตรียมโดยใช้สารละลายของเหลว (aqueous solutions) ทำการศึกษาโครงสร้างของวัสดุผง BaTiO_3 โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง BaTiO_3 สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐานการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (JCPDS card) ที่มีโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบลูกบาศก์ (cubic perovskite structure) ที่อุณหภูมิแคลไซน์ต่ำกว่า 1000°C ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Lee et al. (2006) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และเมื่อวัสดุผง BaTiO_3 ผ่านการแคลไซน์หรือผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000°C วัสดุผง BaTiO_3 หรือวัสดุ BaTiO_3 จะมีการเปลี่ยนโครงสร้างแบบลูกบาศก์ไปเป็นโครงสร้างแบบเทตระโกนัล ซึ่งการเปลี่ยนเฟสของวัสดุนี้เกิดจากการบิดเบี้ยวของโครงสร้าง Ti เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุผง BaTiO_3 ที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 260°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแบบลูกบาศก์ (cubic phase) (Peng et al., 2003)



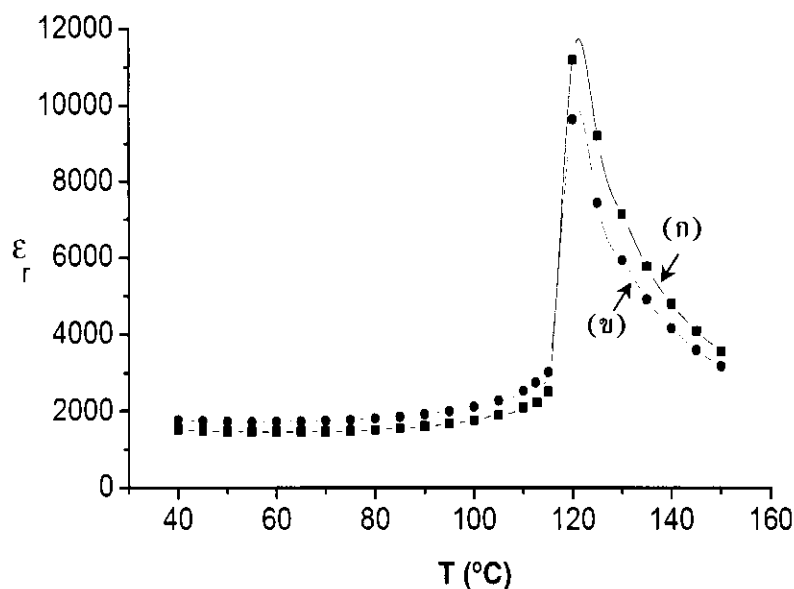
ภาพที่ 2.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในวัสดุ BaTiO_3 (ก) ก่อนผ่านการ anneal ที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีเฟสเป็นลูกบาศก์ (ข) หลังผ่านการ anneal ที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีเฟสเป็นเทตระโกนัล (ค) ภาพแทรกขยายยอดกราฟ รูป (ข) ที่มีระนาบเลี้ยวเบนที่แตกต่างจากรูป (ก) (Lee et al., 2006)

2.1.2 การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกต่าง ๆ นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสมบัติทางไดอิเล็กทริก เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan\delta$) ของวัสดุเซรามิกใดๆ เป็นตัวกำหนดความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เนื่องจากวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแปรตามอุณหภูมิจัดเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุไดอิเล็กทริกประดิษฐ์เป็นชั้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่วัสดุที่ใช้ต้องมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่เสถียรต่อความร้อน ถ้าใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแปรตามอุณหภูมิแล้วอาจทำให้วงจรไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ดังกล่าวนี้เป็นส่วนประกอบเกิดความเสียหายได้ (ประสิทธิ์, 2549)

Boulos et al. (2005) ได้รายงานการวิจัยการสังเคราะห์ BaTiO_3 โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลจากผลการสังเคราะห์พบว่าวัสดุ BaTiO_3 ที่เตรียมมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3 ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 และ 20 ชั่วโมงในอากาศ ทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3 ที่ช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 115 ถึง $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

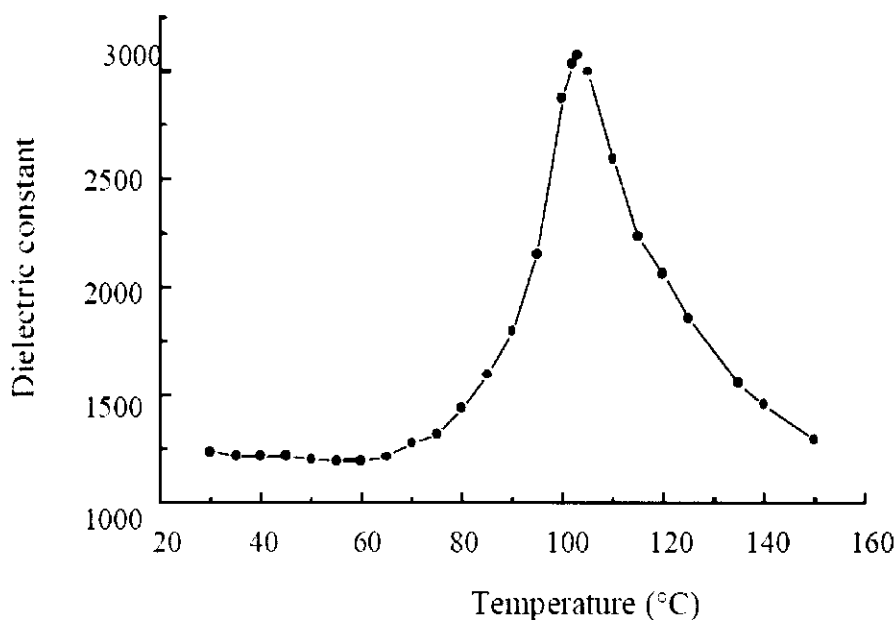
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและที่อุณหภูมิ 135 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงสุดประมาณ 12,000 ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO₃ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C เป็นเวลา (ก) 10

ชั่วโมง (ข) 20 ชั่วโมง โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 150 °C (ดัดแปลงจาก Boulos et al., 2005)

Cernea et al. (2005) ได้รายงานการวิจัยการสังเคราะห์ BaTiO₃ โดยวิธีโซลเจล จากผลการสังเคราะห์พบว่าวัสดุผง BaTiO₃ ที่เตรียมได้เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงมีเฟสเป็นเทอร์โกนัลและผลการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO₃ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1275 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงในอากาศ ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 150 °C พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO₃ ที่ช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 80 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ที่ช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 104 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนเฟสของวัสดุจากเทอร์โกนัลไปเป็นลูกบาศก์ (ที่อุณหภูมิคูรีนั่นเอง) ที่อุณหภูมิ 104 °C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงสุดประมาณ 3020 ดังแสดงในภาพที่ 2.8

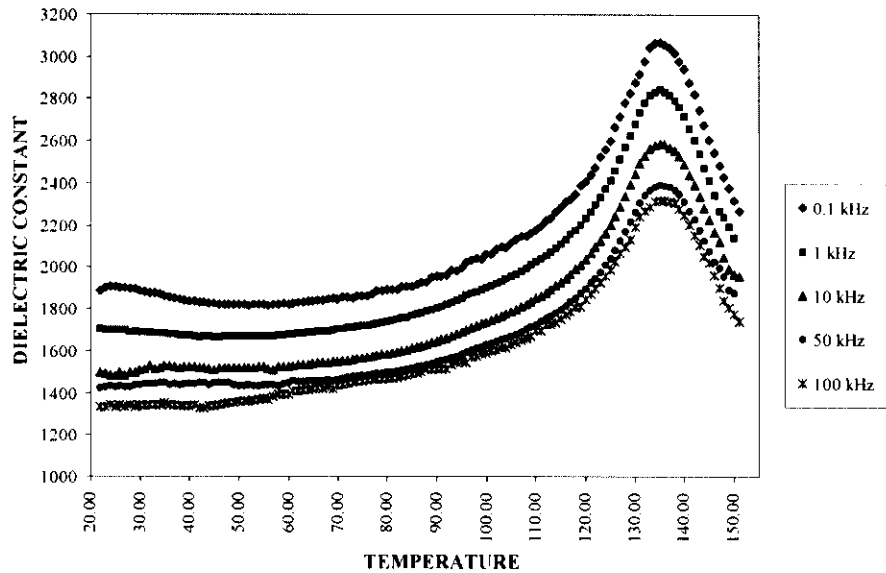


ภาพที่ 2.8 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 150 °C (Cerne et al., 2005)

2.1.3 ผลของความถี่ต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ของสนามที่ให้เข้าไปมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากที่ความถี่ต่ำการโพลาไรเซชันของวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัสดุอยู่ในสนามที่มีความถี่สูงๆโพลาไรเซชันของวัสดุจะลดลง ซึ่งส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาศึกษาผลของความถี่ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งานต่อไป

Vinothini et al. (2006) ได้รายงานการวิจัยการสังเคราะห์ BaTiO_3 โดยวิธี Polymeric procedure method จากผลการสังเคราะห์พบว่าวัสดุผง BaTiO_3 ที่เตรียมได้เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 ถึง 900 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงมีเฟสเป็นแบบลูกบาศก์ และมีขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร จากผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิห้องค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3 ที่ความถี่ 1 kHz และที่อุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 1700 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3 ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมียุ่ค่าประมาณ 2840 ที่อุณหภูมิ 20 ถึง 150 °C และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 โดยทำการศึกษาในช่วงความถี่ 0.1 kHz ถึง 100 kHz และทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 20 ถึง 150 °C (Vinothini et al., 2006)

2.2 การพัฒนาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3

ในการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้น เช่น ขนาดอนุภาคของวัสดุผง, ขนาดเกรนของวัสดุเซรามิก วิธีการสังเคราะห์วัสดุผง ผลของการเจือสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 ตลอดจนผลของความเค้น ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

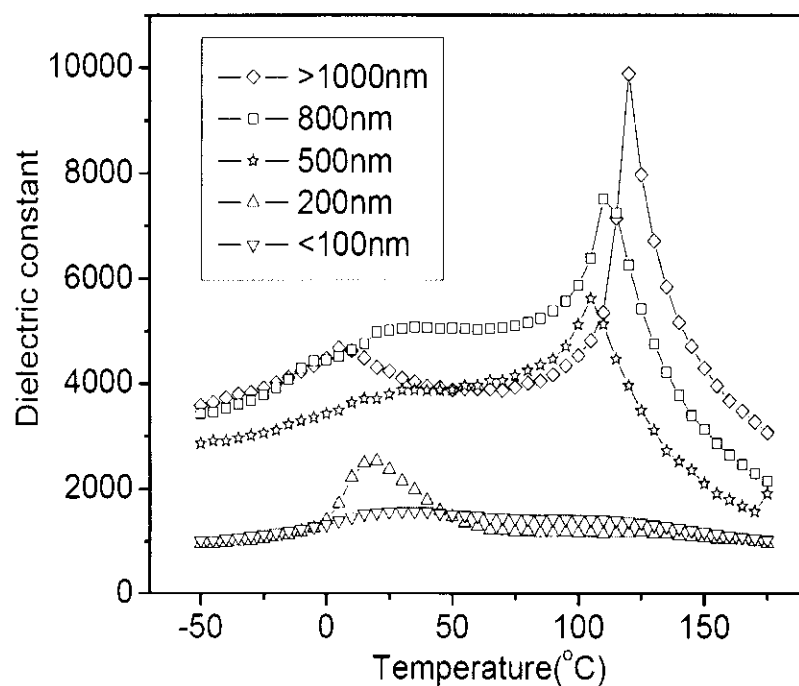
2.2.1 ผลของขนาดอนุภาคและขนาดเกรนของวัสดุผงต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3

จากการศึกษาผลของขนาดเกรนที่มีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นผลเนื่องจากความเค้นภายในเกรน ถ้าขนาดเกรนของวัสดุมีขนาดใหญ่จะมีความเค้นภายในเกรนมากกว่าขนาดเกรนที่มีขนาดเล็ก ความเค้นภายในเกรนนี้จะยับยั้งการจัดเรียงโดเมนในทิศ 90° ซึ่งส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในวัสดุมีค่าลดลงด้วย (Moulson, Herbert, 2003)

Li et al. (2004) ได้รายงานการเตรียมวัสดุเซรามิก BaTiO_3 โดยวิธี spark-plasma-sintering (SPS) ขนาดอนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้มีขนาด 20 นาโนเมตร หลังจากผ่านกระบวนการเผาผนึกแล้ววัสดุ BaTiO_3 มีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 80 นาโนเมตร ถึง ระดับไมโครเมตร เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับขนาดของเกรนพบว่า วัสดุ BaTiO_3 ที่มีขนาดเกรนเล็กกว่า 800 นาโนเมตร รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีเฟสเป็นลูกบาศก์ ส่วนวัสดุ BaTiO_3 ที่มีขนาดเกรนใหญ่กว่า 1 ไมโครเมตร รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มีเฟสเป็นเพอร์โรไทต์ ซึ่งสมบัติทางไดอิเล็กทริกจะเกิดจากความเค้นภายในที่ทำให้เฟสของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงจากลูกบาศก์ไปเป็นเพอร์โรไทต์ เนื่องจากโดเมนในทิศ 90° สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเค้นเล็กน้อยภายในผลึกเกิดขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนเฟสจากลูกบาศก์ไปเป็นเพอร์โรไทต์ และ

เปลี่ยนแปลงความเค้นเล็กน้อยภายในผลึกเกิดขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนเฟสจากลูกบาศก์ไปเป็นเทตระโกนัล และจากรายงานการวิจัยนี้พบว่าโดเมนในทิศ 90° จะหายไปเมื่อขนาดของเกรนมีค่าน้อยกว่า 400 นาโนเมตร ดังนั้นเมื่อขนาดของเกรนค่อยๆเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงเฟสจากลูกบาศก์ไปเป็นเทตระโกนัลจะค่อยๆเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Tsurumi et al., (2006) ซึ่งได้ทำการสังเคราะห์ BaTiO_3 และทำการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกพบว่า เมื่ออัตราส่วน c/a มีค่าเพิ่มขึ้น (แสดงว่าความเป็นเทตระโกนัลเฟสเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณของโพลาไรเซชันภายในวัสดุมีค่าเพิ่มมากขึ้น) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ต่อมา Cernea et al. (2005) ได้รายงานการวิจัยการสังเคราะห์ BaTiO_3 โดยวิธีโซลเจล วัสดุ BaTiO_3 ที่เตรียมได้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้ประมาณ 3020 ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 150°C และ อุณหภูมิคูรี (T_c) ประมาณ 104°C และ พบว่าอุณหภูมิคูรีลดลงเมื่อขนาดเกรนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Zhang et al., (2006) ที่ทำการสังเคราะห์ BaTiO_3 โดยวิธี Thermal decomposition ขนาดอนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 22.5 นาโนเมตร พบว่าอุณหภูมิคูรีลดลงเมื่อขนาดเกรนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Li et al. (2004) ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ดังนั้นวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันจะมีอุณหภูมิคูรีแตกต่างกันด้วย และยังพบว่าที่อุณหภูมิ 0 ถึง 25°C มีการเปลี่ยนเฟสของวัสดุเซรามิกที่มีขนาดอนุภาค 200 nm และ มากกว่า 1000 nm จากเทตระโกนัลเฟสไปเป็นรอมโบฮีดรอลเฟสอีกด้วย



ภาพที่ 2.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ที่มีขนาดของเกรนที่แตกต่างกันโดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 180°C ที่ความถี่ 1 kHz (Li et al., 2003)

2.2.2 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 แบบต่างๆ

ในการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 กระบวนการสังเคราะห์วัสดุผงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์วัสดุผงมีผลต่อขนาดอนุภาคของวัสดุผง ซึ่งขนาดอนุภาคของวัสดุผงมีผลต่อขนาดเกรนของวัสดุและขนาดเกรนของวัสดุมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ (Moulson, Herbert, 2003) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริกในวัสดุ BaTiO_3 ขึ้น โดยการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 ด้วยวิธีการสังเคราะห์วัสดุด้วยวิธีต่างๆ เช่น การสังเคราะห์วัสดุ BaTiO_3 ด้วยวิธีปฏิกิริยาของแข็ง การสังเคราะห์วัสดุ BaTiO_3 ด้วยวิธีปฏิกิริยาโซลเจล และการสังเคราะห์วัสดุ BaTiO_3 ด้วยวิธีปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล จากวิธีการเตรียมวัสดุผง BaTiO_3 ที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีข้อดี - ข้อเสีย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดี-ข้อเสีย ของวิธีการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 โดยวิธีการสังเคราะห์แบบต่างๆ

วิธีการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3	ข้อดี-ข้อเสีย ที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แบบต่างๆ
วิธีปฏิกิริยาของแข็ง (Solid - State Reaction)	- ใช้ต้นทุนในการสังเคราะห์วัสดุผงสูง - อนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ - วัสดุผงที่เตรียมได้มีความบริสุทธิ์ต่ำ - ขนาดอนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคในระดับไมโครเมตร
วิธีโซลเจล (Sol - gel)	- อนุภาคของวัสดุผงที่เตรียมได้มีขนาดเล็ก(อยู่ในระดับนาโนเมตร) - ง่ายต่อการควบคุมการเกิดกระบวนการรวมตัว - ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ - ใช้เวลาในการสังเคราะห์มาก - ใช้ต้นทุนในการสังเคราะห์สูง
วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal)	- วัสดุผงที่เตรียมได้จะมีความเป็นผลึกสูง - มีความบริสุทธิ์สูง - มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง - มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตร - ใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ - ใช้ต้นทุนในการสังเคราะห์สูง - สังเคราะห์วัสดุผงได้ในปริมาณที่น้อย

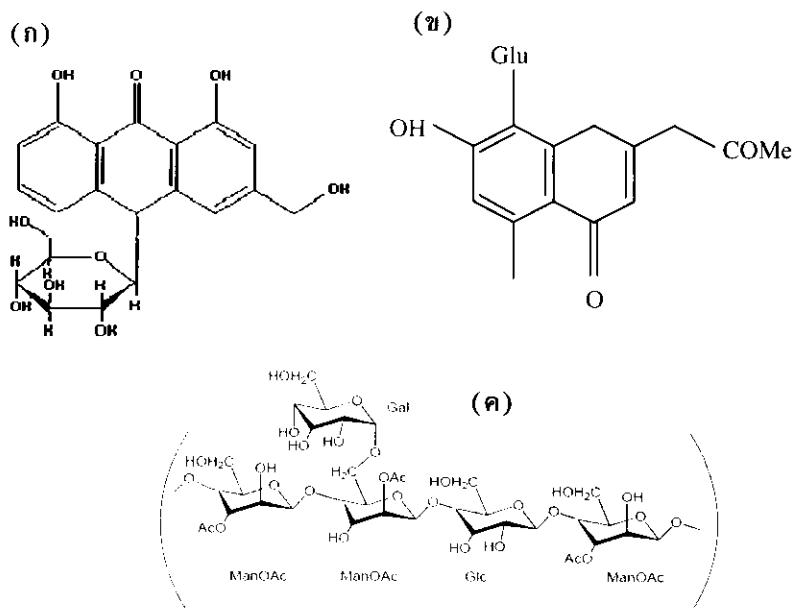
(Zhang et al., 2006)

จากที่มีรายงานการวิจัยการเตรียมวัสดุผสม BaTiO_3 ด้วยวิธีการเตรียมทางเคมีแบบต่าง ๆ เช่น เตรียมโดยวิธีการเตรียมแบบดั้งเดิม เตรียมโดยวิธีโซลเจล หรือแม้กระทั่งเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล นั้นพบว่าในขั้นตอนการเตรียมเพื่อให้ได้อนุภาคผสม BaTiO_3 ทุกวิธีนั้นใช้พอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น เอธิลีนไกลคอล เป็นตัวกลางในการละลาย Ba และ Ti และยังไม่มียางานการวิจัย การเตรียมวัสดุผสม BaTiO_3 โดยใช้พอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น สารละลายเจลวุ้นหางจระเข้ เป็นตัวกลางในการละลาย Ba และ Ti ดังนั้น วุ้นหางจระเข้ (Aloe vera) จึงเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่ได้รับความสนใจนำไปใช้เป็นตัวกลางในการละลาย Ba และ Ti แทนพอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากสารละลายเจลวุ้นหางจระเข้เตรียมง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษ

2.2.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างของวุ้นหางจระเข้ (Aloe vera)

(วุ้นหางจระเข้, ม.ป.ป.)

วุ้นหางจระเข้มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Aloe barbadensis* Mill. อยู่ในวงศ์ Liliaceae มีลักษณะใบคล้ายกับหางของจระเข้ ใบมีสีเขียว ภายในใบของวุ้นหางจระเข้มีเจลวุ้นสีขาวซึ่งเจลวุ้นหางจระเข้นั้นเป็นไบโอพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural biopolymer) ที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ เจลวุ้นสีขาวของวุ้นหางจระเข้ประกอบไปด้วยสารเคมีอยู่หลายชนิด เช่น สารอะโลมิดิน (Aloe-cmidin) สารอะโลอิน (Aloin) และ สารอะโลซิน (Aloesin) ซึ่งสารประกอบที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นสารประกอบประเภทไกลโคโปรตีน โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบภายในเจลวุ้นหางจระเข้ (ก) โครงสร้างทางเคมีของสารอะโลอิน (ข) โครงสร้างทางเคมีของสารอะโลซิน (ค) โครงสร้างหลักของวุ้นหางจระเข้ (AloeStructure, n.d.)

Shih et al. 2006 ได้รายงานการเตรียมฟิล์มบางของ LiMn_2O_4 โดยการนำไคโตซาน (chitosan)² ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ธรรมชาติมาใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางของ LiMn_2O_4 โดยที่ไคโตซานมีความสามารถในการเกิดเป็นเจลและยังทำปฏิกิริยาอย่างว่องไวกับอนุภาคประจุบวกของโลหะที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายได้เป็นอย่างดี โดยอนุภาคประจุบวกของโลหะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนที่อยู่ในหมู่อะมิโน (NH_2) ของไคโตซาน จึงทำให้เกิดพันธะเชิงซ้อนขึ้น ส่งผลให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และจากสมบัติของไคโตซานในการมีประจุบวกที่สูง พบว่าไคโตซานสามารถช่วยทำให้สารละลายมีความเสถียร (stability) ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่อ และลดการตกตะกอนของอนุภาคได้เป็นอย่างดี เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติเป็นโพลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ มีสายโซ่ที่ยาว และสามารถสร้างโครงร่างตาข่ายที่มีขนาดใหญ่ยึดจับไอออนของโลหะ ไอออนของสารประกอบของน้ำ ไอออนของไนเตรต และ คาร์บอนไว้ จึงทำให้การสลายตัวของสารเหล่านี้เกิดได้ยากขึ้น

ดังนั้นในการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ในงานวิจัยจึงนี้ได้อาศัยกระบวนการทางพอลิเมอร์ คือ ละลายสารตั้งต้นของโลหะไนเตรตในสารละลายเจลวานทางจระเข้ที่มีสมบัติช่วยให้อนุภาคของสารตั้งต้นนี้มีการกระจายตัวไปทั่วสารละลายเจลวานทางจระเข้ อย่างสม่ำเสมอ โดยอนุภาคประจุบวกของโลหะไนเตรตจะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนที่อยู่ในหมู่อะมิโน NH_2 เช่น กลูตามีน (Glutamine, Glu) ที่อยู่ในโครงสร้างของสารละลายเจลวานทางจระเข้ จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโดยการให้ความร้อนเพื่อระเหยของเหลวในสารละลายเจลวานทางจระเข้บางส่วนออกไป เพื่อทำให้เกิดการสร้างพันธะที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายต่อเนื่อง ซึ่งทำให้สารละลายมีความหนืดมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดเป็นเจล ซึ่งกระบวนการเกิดเจลอนี้เป็นกลไกสำคัญที่ควบคุมการยึดเกาะกันขององค์ประกอบทางเคมีให้มีความสม่ำเสมอและเมื่อทำการระเหย (dehydration) ของเหลวที่อยู่ในตัวเจลออกไป โดยที่ความแข็งแรงของเจลจะช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมย้ายตำแหน่งหรือหลุดแยกออกไปจากกันในช่วงที่มีการทำให้เจลแห้ง จึงสามารถรักษาความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเมกุลให้คงอยู่ได้ ซึ่งในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุผง BaTiO_3 และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) กระบวนการแคลไซน์วัสดุผงตั้งต้นเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีโครงสร้างและองค์ประกอบของ BaTiO_3 และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ตามที่ต้องการนั้นใช้อุณหภูมิแคลไซน์สูงกว่า 600°C (Vinothini et al., 2006) ดังนั้น สารประกอบประเภทไกลโคโปรตีนในสารละลายเจลวานทางจระเข้ได้ถูกกำจัดออกไปจนหมดและไม่เหลือสารประกอบอื่นที่ไม่ต้องการตกค้างอยู่ในวัสดุผง BaTiO_3 และ วัสดุผง $\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_x\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$)

² ไคโตซาน(chitosan)เป็นไบโอโพลิเมอร์ธรรมชาติที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในเปลือกนอกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปู แมลง และ เชื้อรา

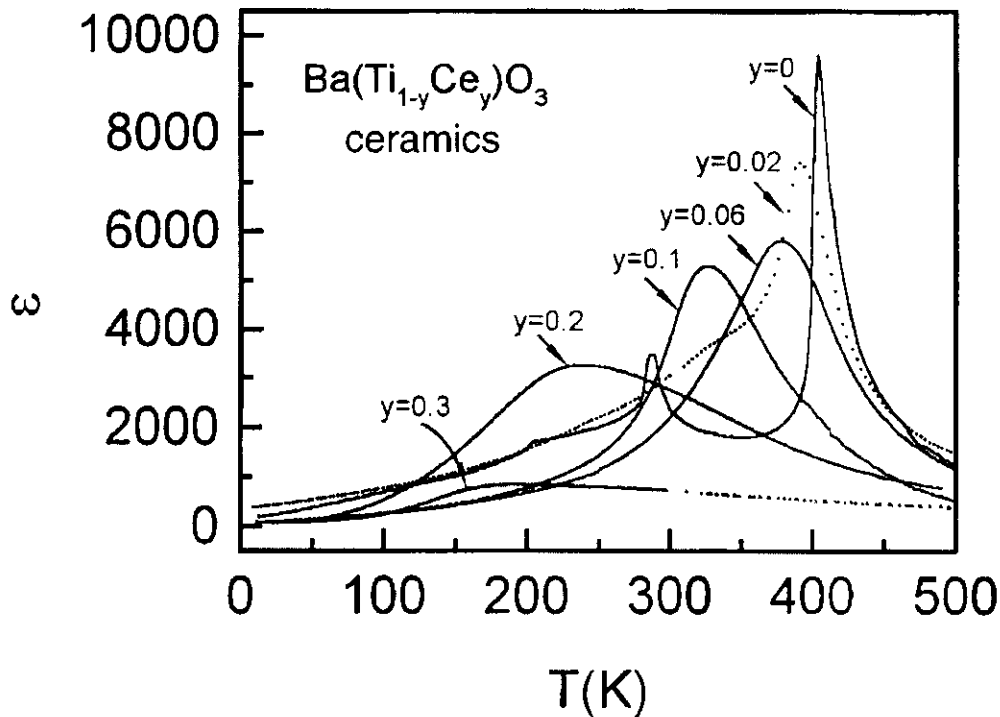
2.2.3 ผลของการเจือสารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงเข้าไปในวัสดุ BaTiO_3

(Moulson, Herbert, 2003)

การพัฒนาและปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริกในวัสดุ BaTiO_3 ให้สูงขึ้นนั้นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก หนึ่งในวิธีที่สามารถปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุให้ดีขึ้นนั้นคือ การเจือวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงเข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 ซึ่งสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ ความถี่ สนามไฟฟ้า และ เวลา นั้นจะขึ้นอยู่กับ การเติมสารตัวอื่นเข้าไปแทนที่ Ba หรือ Ti ซึ่งผลของการเติมนั้นมีหลายรูปแบบ คือ

- ช่วยเลื่อนจุดคูรีเพื่อให้ได้อุณหภูมิเหมาะสมกับการใช้งาน เช่นการเติม Sr^{2+} แทนที่ Ba^{2+} ใน BaTiO_3 ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิคูรี หรือ เติม Pb^{2+} แทนที่ Ba^{2+} ใน BaTiO_3 ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มอุณหภูมิคูรี
- ช่วยการยับยั้งการเคลื่อนของผนังโดเมนโดยการเติมธาตุทรานซิชัน (Fe^{3+} , Ni^{2+} , Co^{3+}) เข้าไปซึ่งธาตุทรานซิชันที่เติมเข้าไปในนั้นจะเข้าไปแทนตำแหน่งของ Ti^{4+}
- ช่วยยับยั้งการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน ซึ่งจะช่วยลดค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก
- ช่วยทำให้เกิดเฟสที่สองหรือทำให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวของสารซึ่งการเติมสารเซรามิกบางชนิดลงไปผสมกับ BaTiO_3 เช่นการเติม CaZrO_3 จะทำให้เกิดการขยายตัว (Broadening) ของยอดกราฟฐานกว้างที่จุดคูรีซึ่งเป็นผลมาจากการที่เกิดสารประกอบด้วยหลายองค์ประกอบที่มีจุดคูรีแตกต่างกันออกไปจึงเกิดการขยายตัวขึ้น
- ช่วยควบคุมขนาดของเกรน และ ช่วยควบคุมปริมาณออกซิเจนหรือวาเลนซ์ของ Ti ด้วยการเติมสารที่มีวาเลนซ์มากกว่าสารที่ถูกแทนที่ เช่น Dy^{3+} ใน Ba^{2+} หรือ Nb^{5+} ใน Ti^{4+} จะทำให้ช่วยยับยั้งการเติบโตของเกรนซึ่งทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น

Ang et al. (2002) ได้รายงานผลของการเติม Ce เข้าไปใน BaTiO_3 เพื่อปรับปรุงให้มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่สูงขึ้นโดยมีเงื่อนไขการเติมคือ $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-y}\text{Ce}_y)\text{O}_3$ โดยที่ $0 \leq y \leq 0.3$ เตรียมวัสดุผงด้วยวิธี mix oxide method จากการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 10 kHz ที่ช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 500 K พบว่าแต่ละเงื่อนไขของการเติม Ce เข้าไปใน BaTiO_3 ทำให้อุณหภูมิ T_c ลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุ BaTiO_3 ที่ไม่ได้เติม Ce ส่วนวัสดุที่เติม Ce จะมีอุณหภูมิ T_c ที่แตกต่างกันออกไป เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟสจากคิวบิกเฟสไปเป็นเททราโกนัลเฟส และพบว่าเมื่อเจือ Ce ในปริมาณเท่ากับ 0.06 mol.% จะทำให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกแรกเซอร์



ภาพที่ 2.12 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-y}\text{Ce}_y)\text{O}_3$ โดยที่ $0 \leq y \leq 0.3$ โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 500 K ที่ความถี่ 10 kHz (Ang et al., 2002)

เนื่องจากขนาดอนุภาคและขนาดเกรนมีผลต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ดังนั้นการควบคุมขนาดอนุภาคและขนาดเกรนจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เช่น Botcher et al. (2000) ได้ศึกษาผลของการควบคุมขนาดเกรนของวัสดุ BaTiO_3 โดยเจือ Mn เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่เตรียมได้มีขนาดเกรนอยู่ในช่วง 15 ถึง 155 นาโนเมตร และจากผลการเจือ Mn เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 นั้นทำให้อุณหภูมิคูรีลดลง แต่การตอบสนองทาง IR เพิ่มสูงขึ้น ต่อมา Qi et al. (2003) ได้ศึกษาผลของการควบคุมขนาดอนุภาคและขนาดเกรนโดยเจือ CdO เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 และในปีเดียวกัน Stojanovic et al. (2003) ได้ศึกษาผลของการควบคุมขนาดอนุภาคของวัสดุ BaTiO_3 โดยเจือ Nb เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าวัสดุผงที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร

Brzozowski et al. (2005) ได้ทำการศึกษามูลของการควบคุมขนาดเกรนโดยการเติม Nb_2O_5 (Fluka A.G., Buchs S.G.,) ในปริมาณเท่ากับ 0.15 mol% เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 (BaCO_3 , Lennox Lab. Inc.) เตรียมวัสดุผงด้วยวิธีการเตรียมแบบดั้งเดิม โดยมีเงื่อนไขการใช้วัสดุผง TiO_2 จากบริษัทผลิต 2 บริษัทที่แตกต่างกัน (Degussa P25 และ Baker Chem. Co.,) รายละเอียดและเงื่อนไขของการเตรียมวัสดุผงสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 และวัสดุผงที่เตรียมได้ถูกนำมาเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดและเงื่อนไขของการเตรียมวัสดุผง และ วัสดุ BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5

วัสดุผง	เวลาในการบดย่อย BaCO_3 (ชั่วโมง)	TiO_2 (บริษัทผู้ผลิต)	Nb_2O_5 (mol.%)	วัสดุเซรามิกที่ผ่าน การเผาผนึก
P1	4	Degussa P25	0.15	S1
P2	10	Degussa P25	0.15	S2
P3	4	Baker Chem. Co.,	0.15	S3

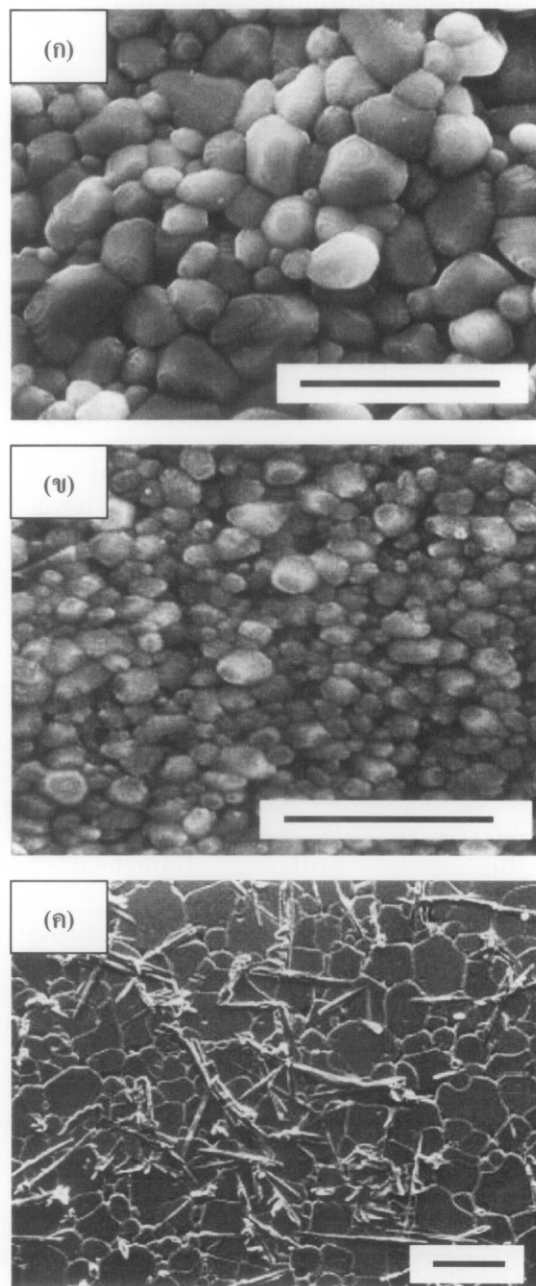
(ดัดแปลงจาก Brzozowski et al., 2005)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุ BaTiO_3 เจือด้วย Nb_2O_5 ที่ตรวจพบ

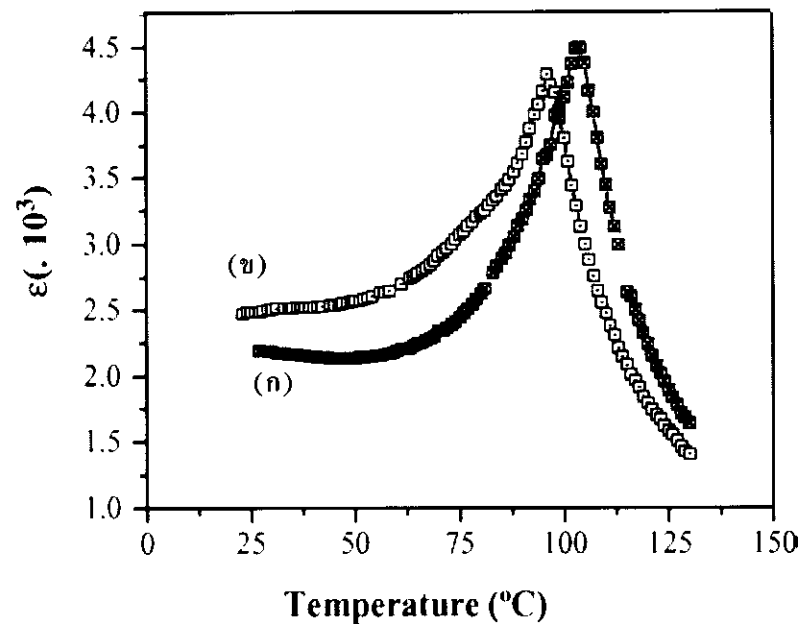
วัสดุเซรามิก	ความหนาแน่น (%)	ขนาดเกรน (μm)	โครงสร้าง (เฟส)	ϵ_r	$\tan \delta$ (%)
S1	81	5	Pseudocubic	2200	1.6
S2	94	2	Pseudocubic	2500	3.2
S3	95	> 50	Tetragonal	30000	25

(ดัดแปลงจาก Brzozowski et al., 2005)

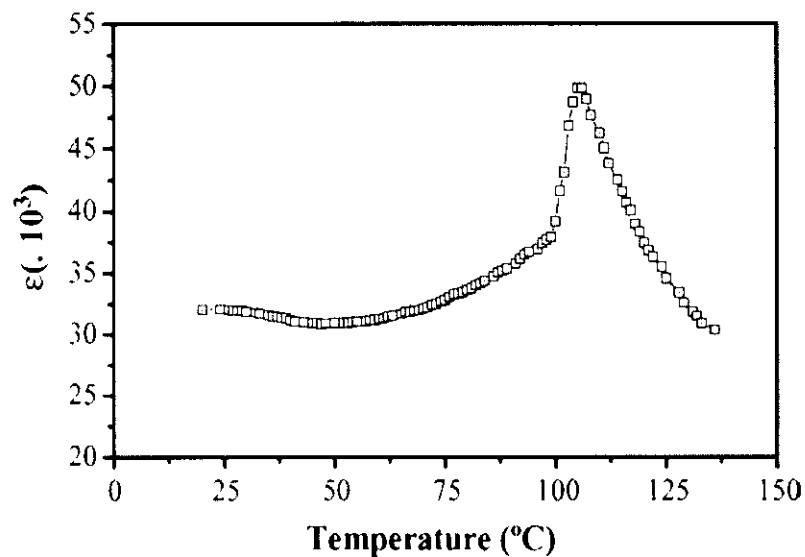
จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุ BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 พบว่า ในวัสดุ S3 ตรวจพบเฟสที่สอง โดยเฟสที่สองที่พบนั้นมีลักษณะเป็นรูปเข็ม (needle-shaped) ซึ่งไม่พบในวัสดุ S1 และ S2 ถึงแม้ว่าขนาดเกรนของวัสดุ S1 และ S2 จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดเกรนของวัสดุ S3 ดังแสดงในภาพที่ 2.13 แต่จากการตรวจสอบหาปริมาณสารภายในเกรนของวัสดุโดยเทคนิค EDS พบว่า ภายในเกรนของวัสดุ S1 และ S2 มีปริมาณ TiO_2 มากกว่าในวัสดุ S3 ซึ่งส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 1 kHz ในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 140 °C ของวัสดุ S3 สูงกว่าวัสดุ S1 และ S2 ดังแสดงในภาพที่ 2.14 และ 2.15



ภาพที่ 2.13 ภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 ที่ผ่านการเผาผนึกที่ $1,350^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) วัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลาในการบดย่อย BaCO_3 4 ชั่วโมง (ข) วัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลาในการบดย่อย BaCO_3 10 ชั่วโมง (ค) วัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Baker Chem. Co., ใช้เวลาในการบดย่อย BaCO_3 4 ชั่วโมง (Brzozowski et al., 2005)

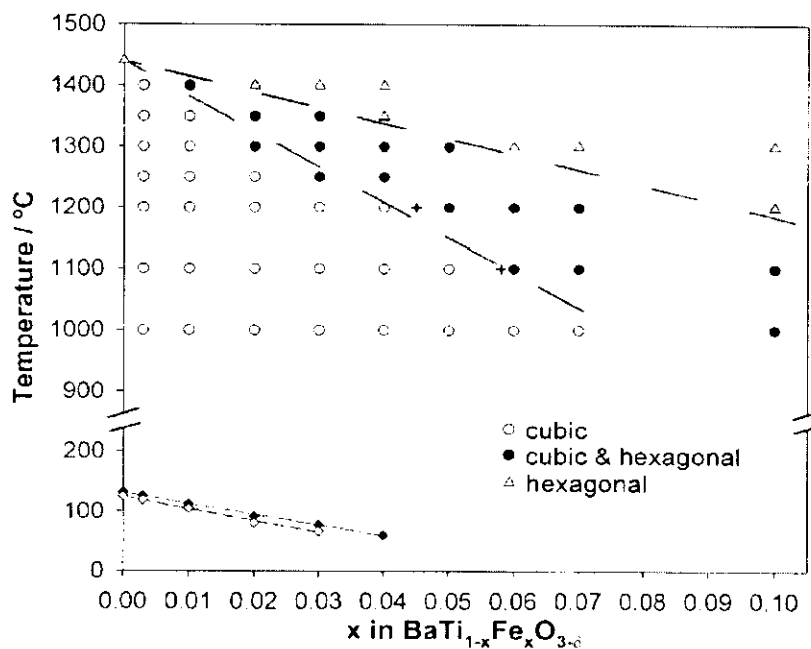


ภาพที่ 2.14 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ที่ความถี่ 1 kHz เจือด้วย (ก) วัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลาในการบดย่อย BaCO_3 4 ชั่วโมง (ข) วัสดุเซรามิก BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Degussa P25 ใช้เวลาในการบดย่อย BaCO_3 10 ชั่วโมง (Brzozowski et al., 2005)

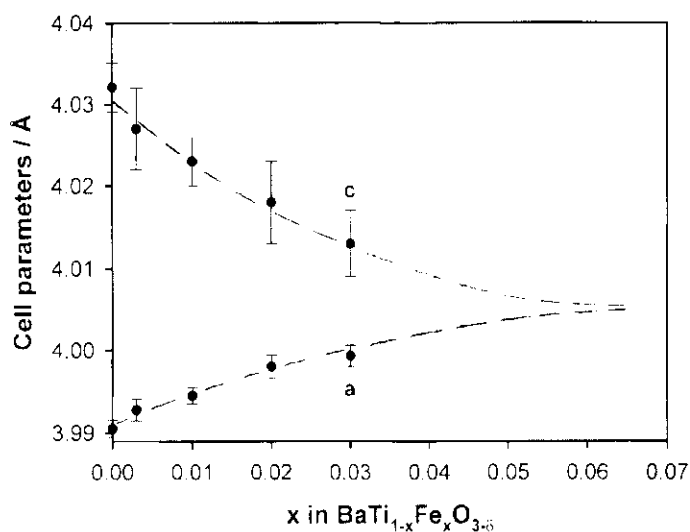


ภาพที่ 2.15 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ที่เจือด้วย Nb_2O_5 โดยบริษัทผู้ผลิต TiO_2 คือ Baker Chem. Co., ใช้เวลาในการบดย่อย BaCO_3 4 ชั่วโมง (Brzozowski et al., 2005)

Maso et al. (2006) ได้รายงานการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กทริกของ BaTiO_3 เพื่อให้มีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นชนิดพี (p-type) โดยการเจือเหล็กซึ่งเตรียมวัสดุผงโดยวิธีโซเจล โดยใช้เงื่อนไขการเตรียมคือ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ ($x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07$ และ 0.10) จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุที่เจือด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000°C ถึง 1400°C มีเฟสเป็นลูกบาศก์ เทตระโกนัล และเฮกซะกอนอล ซึ่งการเปลี่ยนเฟสนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผาผนึก ดังแสดงในภาพที่ 2.16 วัสดุที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อวัดค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของวัสดุที่อุณหภูมิห้อง วัสดุที่เจือด้วยเหล็กด้วยเงื่อนไข $x \geq 0.06$ มีความเป็นลูกบาศก์เฟสสูงกว่าวัสดุที่เจือเหล็กด้วยเงื่อนไข $x \leq 0.06$ ดังแสดงในภาพที่ 2.17 แต่เมื่อเผาผนึกวัสดุที่เจือเหล็กด้วยเงื่อนไข $x \leq 0.02$ ที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 1250°C จะมีรูปแบบการเปลี่ยนเฟสจากลูกบาศก์ไปเป็นเฮกซะกอนอล และไม่พบการเปลี่ยนเฟสในลักษณะเช่นเดียวกันที่เงื่อนไขการเจือ $x \geq 0.03$ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Roth et al. ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเจือเหล็กเข้าไปในวัสดุ $\text{BaTiO}_3 - \text{BaFe}_{0.25}$ พบการเปลี่ยนเฟสจากลูกบาศก์ไปเป็นเทตระโกนัลที่อุณหภูมิเผาผนึกที่สูงซึ่งการเปลี่ยนเฟสนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ O_2 ที่อยู่ภายในโครงสร้างของวัสดุทำให้เกิดการออกซิเดชันของ Fe^{3+} ไปเป็น Fe^{4+}

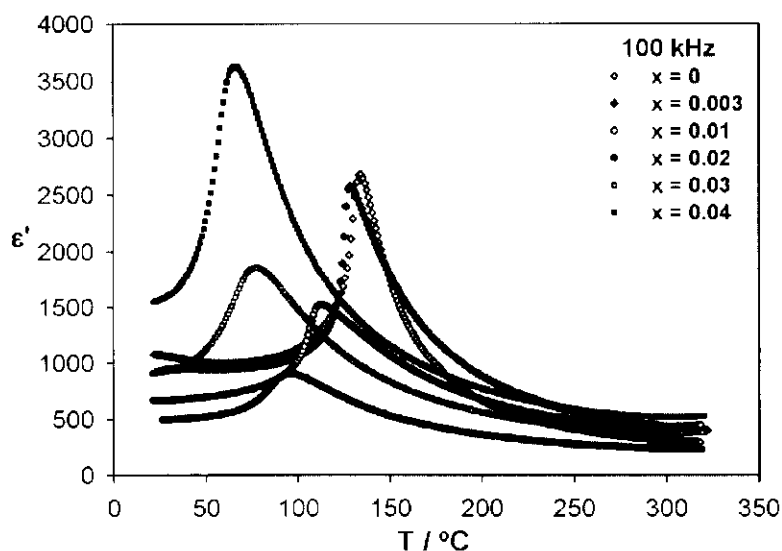


ภาพที่ 2.16 แสดงค่าการเกิดเฟสของวัสดุ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ ($x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ และ 0.06) เผาผนึกที่อุณหภูมิ $1,000$ ถึง $1,400^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Maso et al., 2006)

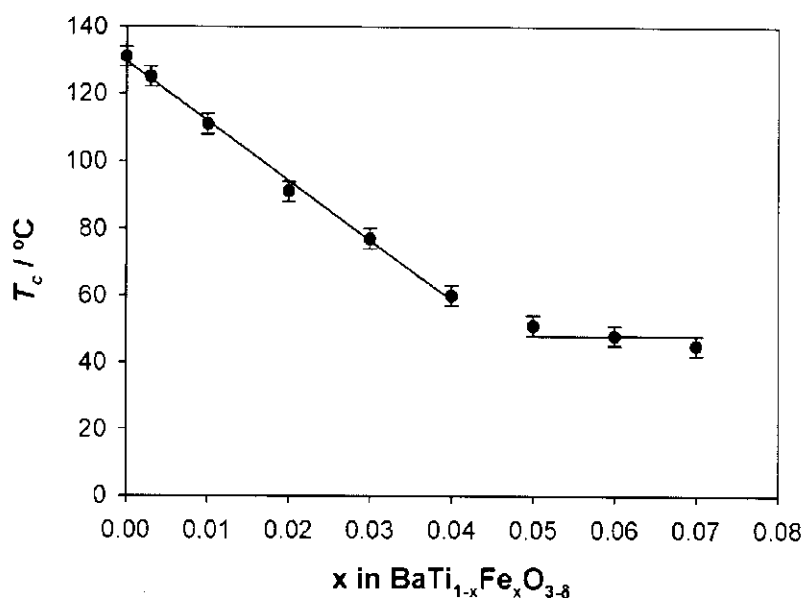


ภาพที่ 2.17 แสดงค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของวัสดุ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ ($x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ และ 0.06) เผาที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ดัดแปลงจาก Maso et al., 2006)

จากการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ เมื่อ $x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03$ และ 0.04 ที่เผาที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่ความถี่ 100 kHz ช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 325°C พบว่าอุณหภูมิคูรีของวัสดุมีค่าลดลงเมื่อเงื่อนไขการเจือมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.18 และ ภาพที่ 2.19 ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิคูรีนั้นเกิดจากการเปลี่ยนเฟสของวัสดุนั่นเอง



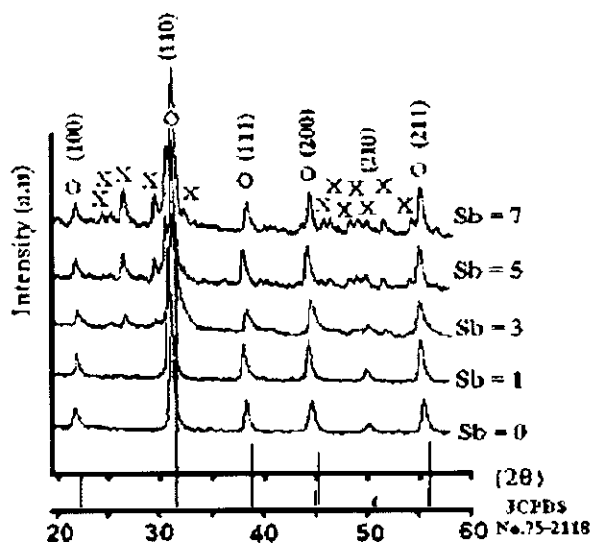
ภาพที่ 2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ ($x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03$ และ 0.04) เผาที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำการศึกษาที่ความถี่ 100 kHz ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 325°C (Maso et al., 2006)



ภาพที่ 2.19 แสดงค่าอุณหภูมิคูรีของวัสดุ $\text{BaTi}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ เมื่อ $0 < x < 0.1$ ($x = 0, 0.003, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06$ และ 0.07) เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (Maso et al., 2006)

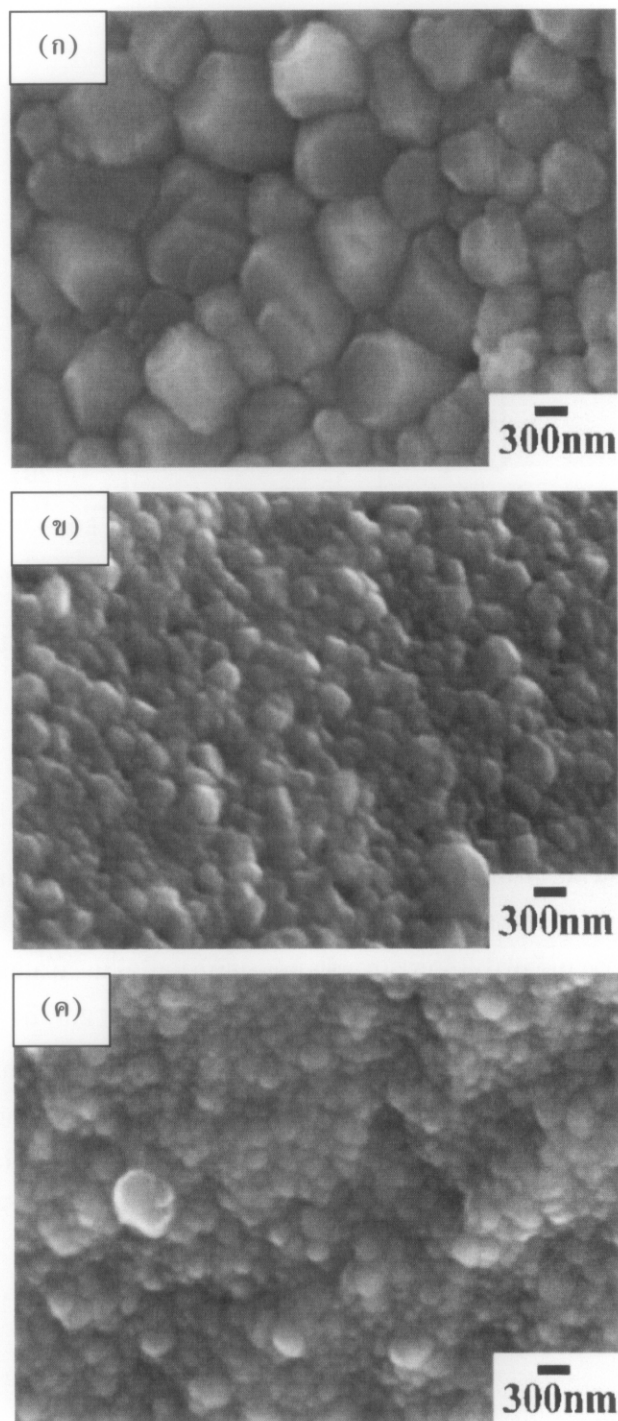
Cheng et al. (2007) ได้รายงานการเติม Sr และ Ca เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 เพื่อเพิ่มโพลาไรเซชันตัวเองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง (spontaneous polarization) ให้มีค่าสูงขึ้นโดยใช้เงื่อนไข การเติม Sr และ Ca คือ $(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})_{0.77}\text{Ca}_{0.23}\text{TiO}_3$ เมื่อ $x = 0.7, 0.8, 0.9$ และ 1.0 จากผลการเติม Sr และ Ca เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากลูกบาศก์ไปเป็นเทตระโกนัล และเกิดการบิดเบี้ยวของแลตทิซขึ้นส่งผลให้อัตราส่วน c/a มีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณโพลาไรเซชันตัวเองโดยไม่มีสนามไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องมีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุที่เตรียมได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น

จากผลการเจือสารต่างๆ เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 นั้น ทำให้ Tangjuank et al. (2007) มีความสนใจที่จะควบคุมขนาดเกรนของวัสดุ BaTiO_3 โดยการเจือ Sb_2O_3 เข้าไปในวัสดุ BaTiO_3 โดยเงื่อนไขการเจือคือ ใช้ Sb_2O_3 เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% จากผลการเจือพบว่าวัสดุผงที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร และได้อนุภาคผงที่มีสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกโดยใช้อุณหภูมิในการเตรียมที่ต่ำ วัสดุผงที่เจือด้วยเงื่อนไขต่างๆ ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบเฟสเดี่ยวเกิดขึ้นที่เงื่อนไขการเจือ 0 และ 1 wt.% ส่วนเงื่อนไขการเจือที่มากกว่า 3 wt.% พบเฟสที่สอง (second phase) ดังแสดงในภาพที่ 2.20

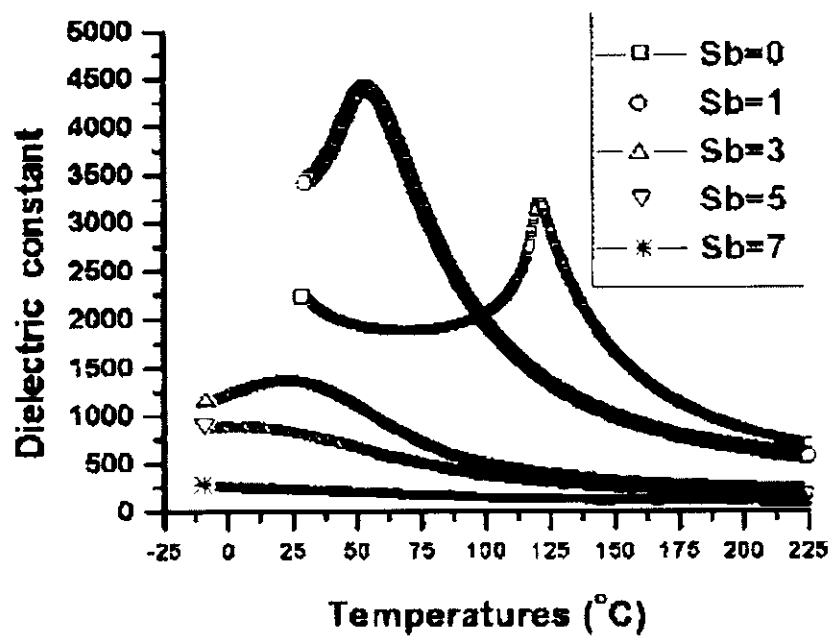


ภาพที่ 2.20 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุผง BaTiO₃ ที่เจือด้วย Sb₂O₃ ด้วยเงื่อนไขการเจือโดยใช้ Sb₂O₃ เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% ที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 1200 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (Tangjuank et al., 2007)

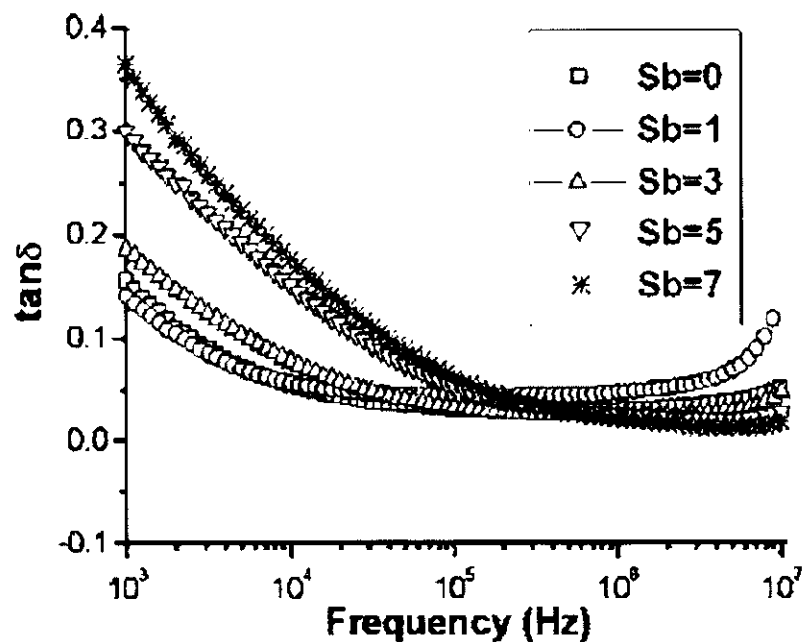
ขนาดอนุภาคของวัสดุผงที่เจือด้วยเงินไซ 1 และ 3 wt.% มีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของวัสดุผงที่ไม่ได้เจือ ซึ่งอาจจะเกิดจากกรดอะซิติกที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุผงทำให้อนุภาคของวัสดุผงที่เจือด้วย Sb₂O₃ เกิดการรวมตัวทำให้เกิดการเกาะตัวกันของอนุภาคเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.21 จากผลการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ความถี่ 10 kHz ในช่วงอุณหภูมิ -12.5 ถึง 225 °C ของวัสดุที่เจือด้วยเงินไซต่างๆ พบว่า เงินไซการเจือ Sb₂O₃ เท่ากับ 1 wt.% มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง ($\epsilon_r \sim 4500$) และสูงกว่าวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการเจือ Sb₂O₃ แต่อุณหภูมิคูรีมีค่าลดลง ($T_c \sim 52$ °C) ดังแสดงในภาพที่ 2.22 และจากการศึกษาค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan\delta$) ของวัสดุ ที่ช่วงความถี่ 1 kHz ถึง 10 MHz ที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.21 ภาพถ่ายพื้นผิวของวัสดุผง BaTiO_3 ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ผ่านการแคลไซน์ที่ 1200°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ก) วัสดุผง BaTiO_3 ที่ไม่เจือ Sb_2O_3 (ข) วัสดุผง BaTiO_3 ที่เจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 1 wt.% (ค) วัสดุผง BaTiO_3 ที่เจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 3 wt.% (Tangjuank et al., 2007)



ภาพที่ 2.22 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ด้วยเงื่อนไขการเจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% ในช่วงอุณหภูมิ -12.5°C ถึง 225°C ที่ความถี่ 10 kHz (Tangjuank et al., 2007)

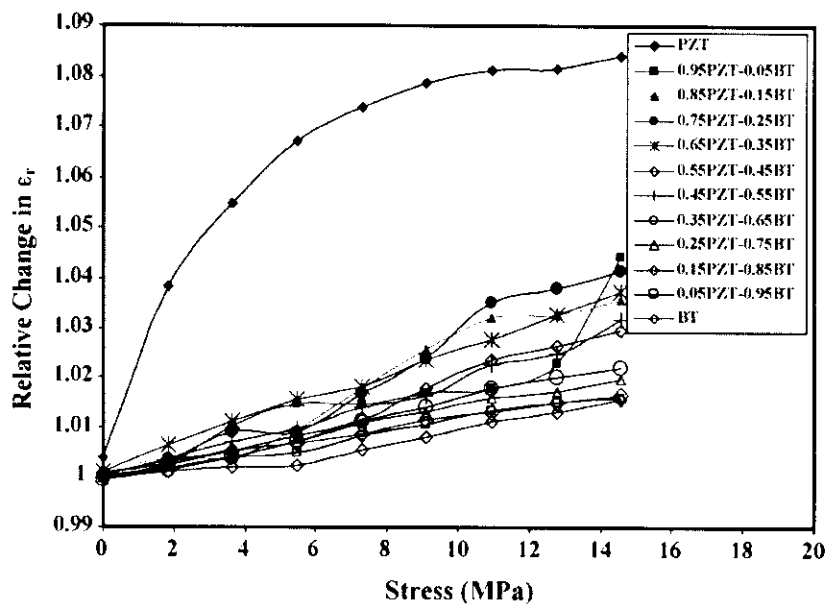


ภาพที่ 2.23 ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3 ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ด้วยเงื่อนไขการเจือ Sb_2O_3 เท่ากับ 1, 3, 5 และ 7 wt.% ในช่วงอุณหภูมิ -12.5°C ถึง 225°C ที่ช่วงความถี่ 1 kHz ถึง 10 MHz (Tangjuank et al., 2007)

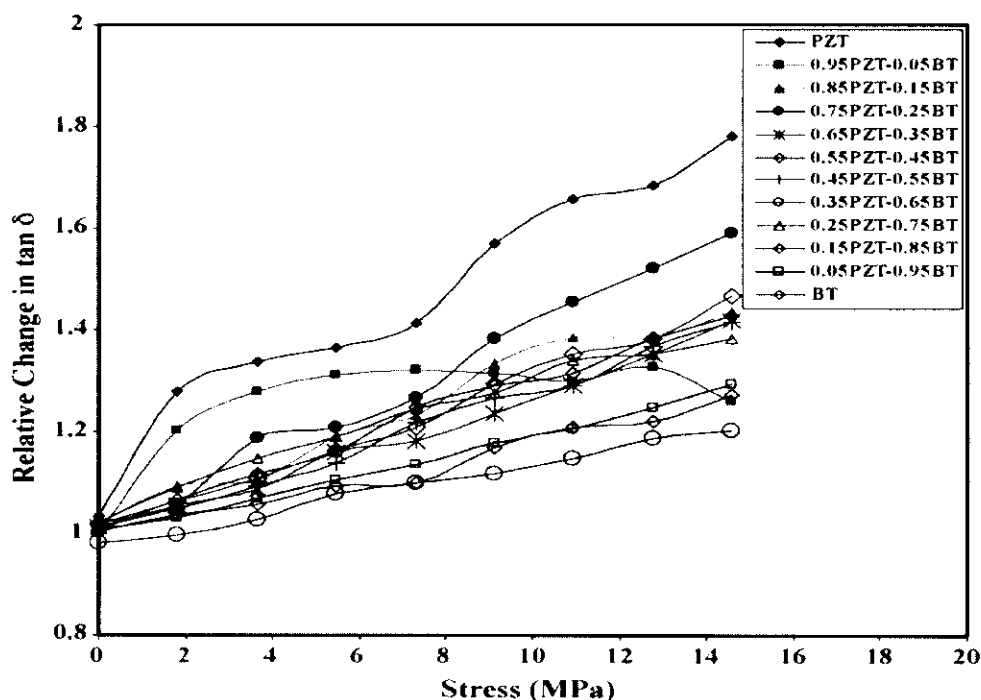
2.2.4 ผลของความเค้นต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุ BaTiO_3

วัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกเซรามิกจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไดอิเล็กทริกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าโพลาไรเซชัน ทำให้เกิดกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมน (domain-reorientation process) ผนังโดเมนเกิดการเคลื่อนที่ (Zhang et al., 1997) โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงแตกต่างกันภายใต้ความเค้นที่ต่างกัน และขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเซรามิก การศึกษาถึงผลของความเค้นแบบแกนเดียวต่อสมบัติทางไดอิเล็กทริกในวัสดุจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของผนังโดเมน และจะเป็นส่วนที่ช่วยให้เข้าใจโครงสร้างของโดเมนได้ดีขึ้น

Yimnirun et al. (2006) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไดอิเล็กทริกของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนต-แบเรียมไททานเนต $((1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-(x)\text{BaTiO}_3)$ ภายใต้ความเค้นแบบแกนเดียว ทำการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุในช่วงความเค้น 0 ถึง 15 MPa ที่อุณหภูมิห้องดังแสดงในภาพที่ 2.24 และ 2.25 พบว่า วัสดุที่มี BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลักจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่อนข้างคงที่ คือมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ซึ่งเกิดจากการให้ความเค้นแบบแกนเดียวในทิศที่ขนานกับทิศทางการทำซ้ำ ความเค้นที่ให้เข้าไปนั้นจะเปลี่ยนแปลงทิศทางของโพลาไรเซชันให้เคลื่อนที่ออกจากทิศทางการทำซ้ำ โดยที่การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโดเมนทำให้มีความหนาแน่นของผนังโดเมนที่ไม่ได้ห้ามุมกันในทิศ 180° เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้น ส่วนการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้น การที่เกิดการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนเพิ่มขึ้นจะช่วยทำให้ค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นในบางองค์ประกอบ



ภาพที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเค้นของวัสดุเมื่อเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก่อนให้ความเค้น $((1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-(x)\text{BaTiO}_3)$ ในช่วงความเค้น 0 ถึง 15 MPa (Yimnirun et al., 2006)



ภาพที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเค้นของวัสดุเมื่อเทียบกับค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกก่อนให้ความเค้น $((1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3-(x)\text{BaTiO}_3)$ ในช่วงความเค้น 0 ถึง 15 MPa (Yimnirun et al., 2006)

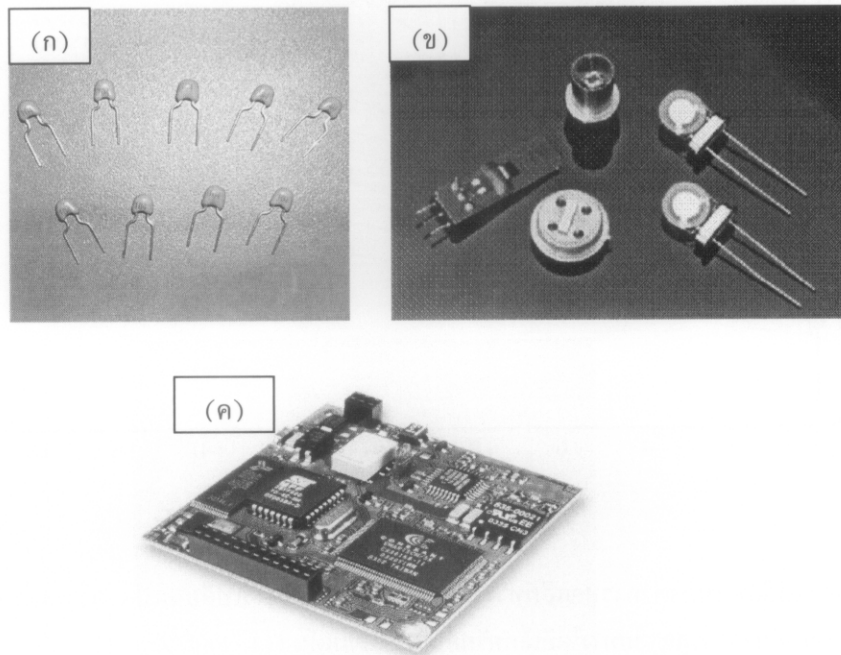
2.3 การประยุกต์ใช้งานวัสดุเซรามิกไดอิเล็กทริก

วัสดุไดอิเล็กทริกหรือฉนวนเป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำไฟฟ้าหรือมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สูงมาก จากคุณสมบัติพื้นฐานดังกล่าวนี้ทำให้วัสดุไดอิเล็กทริกบางชนิดถูกนำมาใช้งานโดยตรง คือทำหน้าที่เป็นวัสดุป้องกันการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้วัสดุไดอิเล็กทริกยังเป็นวัสดุที่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ เช่น

- ตัวเก็บประจุหลายชั้น (Multilayer ceramic capacitor, MLCC) ดังภาพที่ 2.26 (ก) โครงสร้างของตัวเก็บประจุหลายชั้นสามารถนำความจุสูงสุดที่ได้จากการนำวัสดุไดอิเล็กทริกบาง มาบรรจุในพื้นที่ที่น้อยที่สุดในรูปแบบที่มีความแข็งแรงเชิงกลเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปโครงสร้างดังกล่าวมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดภายในมีค่าประมาณ 20 μm โดยตัวเก็บประจุหลายชั้นมีขนาดโดยรวมอยู่ในช่วง 1.25 มม. x 1 มม. x 1 มม. ถึง 6 มม. x 6 มม. x 2.25 มม. มีค่าความจุอยู่ในช่วง 1 pF ถึง 2.2 μF และในปัจจุบันได้มีการผลิตตัวเก็บประจุให้มีขนาดใหญ่ขึ้นมากโดยมีความจุสูงถึง 300 μF โดยทั่วไปแล้ววัสดุไดอิเล็กทริกที่ใช้นามาประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุหลายชั้นจะอยู่ในวัสดุไดอิเล็กทริกกลุ่มที่ 1 หรือ กลุ่มที่ 2 (รัตติกร ยัมนิรณ, 2546)

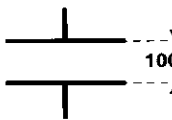
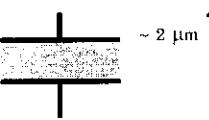
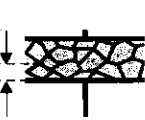
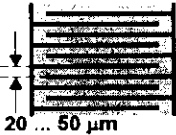
- ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.26 (ข) และ ภาพที่ 2.26 (ค) นอกจากวัสดุเซรามิกแบบเรียบโททานेटจะเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่ดีแล้วยังเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) อีกด้วย กล่าวคือ เมื่อวัสดุได้รับแรงกล (mechanical force) จะ

เกิดแรงดันไฟฟ้า (voltage) ขึ้น แต่ในทางกลับกันเมื่อวัสดุได้รับแรงดันไฟฟ้าจะทำให้มีการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) เกิดแรงกลขึ้น การเปลี่ยนไปมาระหว่างพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่นนำมาใช้เป็นทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ทาง การแพทย์ การใช้เป็นโซนาร์ทรานสดิวเซอร์ใต้น้ำเพื่อระบุตำแหน่งของเรือดำน้ำ เป็นต้น (ตัวเก็บประจุหลาย ชั้น, ม.ป.ป.)



ภาพที่ 2.26 วัสดุไดอิเล็กทริกที่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญ (ก) ตัวเก็บประจุหลายชั้น (ตัวเก็บประจุหลายชั้น, ม.ป.ป.) (ข) ทรานสดิวเซอร์ (ทรานสดิวเซอร์, ม.ป.ป.) (ค) อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (อิเล็กทรอนิกส์, ม.ป.ป.)

ตัวเก็บประจุที่พบตามท้องตลาดทั่วไปสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและชนิดของสารที่ใช้ทำวัสดุไดอิเล็กทริก ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุทุกชนิดจะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุที่นำมาประดิษฐ์ เช่น ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกกลุ่มต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.27 วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีวัสดุ BaTiO_3 เป็นวัสดุหลักนั้นสามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มของตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 2 ส่วนวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีวัสดุ BaTiO_3 เป็นวัสดุเสริมถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 3 ถึงแม้ว่าตัวเก็บประจุทั้งสองกลุ่มนี้จะถูกใช้งานมาอย่างยาวนานแต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากวัสดุ BaTiO_3 เป็นวัสดุที่มีความเสถียรของอุณหภูมิต่ำ (Yuan et al., 2004) อย่างไรก็ตามในการนำวัสดุ X7R มาใช้งานในช่วงอุณหภูมิ -55°C ถึง 125°C ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $+15\%$ เมื่อเทียบกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 25°C และมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกน้อยกว่า 2.5% (Wang et al., 2003)

	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3	ตัวเก็บประจุหลายชั้น
				
mat.:	paraelectric materials	ferroelectric mat. based on BaTiO ₃	ferroelectric mat. doped BaTiO ₃	type 1 or type 2
ϵ_r	20 ... 200	1000 ... 16000	$\epsilon_{\text{eff}} = 10^5$	as type 1 or 2
$\tan \delta$	0,2 ... 5 · 10 ⁻³	10 ... 20 · 10 ⁻³	20 ... 50 · 10 ⁻³	as type 1 or 2
C	1 pF ... 1 nF	0,2 ... 22 nF	10 ... 100 nF	10 pF ... 10 nF (type 1) 1 nF ... 1 μF (type 2)
P*	$\alpha_{\text{el}} + \alpha_{\text{ion}}$	$\alpha_{\text{el}} + \alpha_{\text{ion}} + \alpha_{\text{or}}$	$\alpha_{\text{el}} + \alpha_{\text{ion}} + \alpha_{\text{or}} + \alpha_{\text{RL}}$	$\alpha_{\text{el}} + \alpha_{\text{ion}} (+ \alpha_{\text{or}})$
*polarization mechanism				

ภาพที่ 2.27 ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกกลุ่มต่างๆ (ประสิทธิ์ ทองใบ, 2549)

นอกจากนี้แล้วกลุ่มของตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 2 ยังสามารถแบ่งได้หลายชนิดทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุกลุ่มนี้มีรากฐานจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริกที่มีสมบัติที่เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากกับสิ่งแวดล้อมและสภาพการใช้งาน การพัฒนาในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาได้นำไปสู่สมบัติที่มีเสถียรภาพมากขึ้น โดยที่ยังคงรักษาสภาพยอมที่มีค่าสูงที่เป็นลักษณะเด่นของไดอิเล็กทริกประเภทนี้ สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (The Electronics Industries Association : EIA) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดระบบในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่มีประโยชน์ในทางปฏิบัติ กฎเกณฑ์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รหัสของตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 2 และ 3 สำหรับการเลือกใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าต่างๆ

EIA Code	ช่วงอุณหภูมิ (°C)	EIA Coded	การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า (%)
X5	-55 ถึง +85	D	± 3.3
X7	-55 ถึง +125	E	± 4.7
X8	-55 ถึง +150	F	± 7.5
Y5	-30 ถึง +85	P	± 10
Z5	+10 ถึง +85	R	± 15
		S	± 22
		T	-33 ถึง +22
		U	-56 ถึง +22
		V	-82 ถึง +22

(Moulson, Herbert, 2003)

หมายเหตุ EIA (Electronics Industries Alliance) Codes D-R คือตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 2 และ EIA Codes S-V คือ ตัวเก็บประจุกลุ่มที่ 3 ตัวอย่าง เช่น X7R คือตัวเก็บประจุกลุ่ม 2 ที่ต้องการใช้งานในช่วงอุณหภูมิ -55 °C ถึง 125 °C และมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าไม่เกิน ± 15 %