



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเปลี่ยนเฟสในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก

“Phase Transformations in Ferroelectric Materials”

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิณากุล

ตุลาคม 2547



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการเปลี่ยนเฟสในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก  
“Phase Transformations in Ferroelectric Materials”

โดย รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิณากุล

ตุลาคม 2547

สัญญาเลขที่ RSA/08/2545

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการการเปลี่ยนเฟสในสารเฟอร์โรอิเล็กทริก “Phase Transformations in Ferroelectric Materials”

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ รุจิณากุล  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของนักวิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้จากความร่วมมือหลายฝ่าย ดังนั้นจึงขอขอบคุณดังต่อไปนี้

ผลการทดลองเกือบทั้งหมดมาจากการช่วยเหลือของนักศึกษาที่ศรัทธาและอาสาช่วยงานข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณนักศึกษาดังรายนามต่อไปนี้ นายอภิรัฐ อธิภาพิเศษพงษ์(นักศึกษาปริญญาตรี) นายอุดมศักดิ์ ตันมณี (นักศึกษาปริญญาตรี) นายวาทยุทธ วลัยไพฑูรย์(นักศึกษาปริญญาโท) นางสาวเสาวคนธ์ จอมพรวน(นักศึกษาปริญญาโท)นายวิฑูรย์ เรืองชัยยง(นักศึกษาปริญญาโท)นางสาวสุรีย์ พรอุทธิยา(นักศึกษาปริญญาโท) นายธีรชัย บงการณ (นักศึกษาปริญญาเอก) นายณราธิป วิทยากร (นักศึกษาปริญญาเอก) นางชมพูนุช พิษมาภ (นักศึกษาปริญญาเอก)

ขอขอบคุณ Dr. Steve J. Milne( Institute for Materials Research, University of Leeds, Leeds, UK.)และ Dr.Xiaoli Tan และ Dr. David P. Cann (Materials Science and Engineering Department Iowa State University USA) ที่ได้อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า(ซึ่งเป็นจุดอ่อนของห้องปฏิบัติการที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)และรับนักศึกษาเข้าฝึกงานตามโครงการปริญญาเอกร่วมสถาบัน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ วนิตย์ธนาคม ที่ให้ความร่วมมืออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง SEM

ขอขอบคุณ คุณดวงพร เล็กสวัสดิ์ ที่ได้ช่วยพิมพ์งาน และอำนวยความสะดวกด้านธุรการต่างๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรนนท์ น้อยมณี ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ช่วยเหลือในการการออกแบบและสร้างวงจรในส่วนการประยุกต์ใช้งาน

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทวี ตันมศิริ ที่ได้อนุญาตให้ใช้เครื่องมือต่างๆในห้องปฏิบัติการและสนับสนุนค่าใช้จ่ายบางส่วนในโครงการ(โดยได้รับจากเครือข่าย MTECและสกว.อีกทีหนึ่ง) รวมทั้งการให้ข้อคิดข้อเสนอแนะต่างๆ งานทั้งหมดจะไม่สามารถบังเกิดขึ้นเลยหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากท่าน

สุดท้าย ต้องขอขอบคุณทาง สกว.ที่ได้สนับสนุนและให้โอกาสในการทำวิจัยครั้งนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบวุฒิ ฤจิณากุล

## Abstract

This research project is divided into five main parts.

In Part I, 0-3 composites were prepared using polyethylene and lead zirconate titanate (PZT). Effect of particle size of PZT powder on the properties of the composites was studied. In order to improve the properties of the composites, carbon powder was mixed to the composites in many ways. The properties of the composites were related to the size of the PZT powder and the method of adding carbon.

In part II,  $\text{PbZrO}_3$  (PZ) and  $(\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{ZrO}_3$  (PBZ) ceramics were prepared. Effect of sintering temperature on phase transition and properties of these ceramics were studied. The sintering temperature affects the phase transition behavior and the properties of the ceramics. It is suggested that the phase transition behavior the PBZ ceramics might be due to the  $\text{PbO}$  loss during firing. In the present work, effects of  $\text{PbO}$  excess on the properties of  $(\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{ZrO}_3$  (PBZ10) was also studied. The properties and the phase transitions of the PBZ10 ceramics as a function of  $\text{PbO}$  excess were also investigated and discussed.

In part III, Solid solution between normal ferroelectric of PZT and relaxor ferroelectric of Lead zinc niobate (PZN) and lead nickel niobate (PNN) were synthesized. Influence of processing conditions on the phase transition and properties of the materials was studied. The optimum processing conditions for excellent properties were identified.

In part IV, The properties of  $\text{BaTiO}_3$  ceramics doped with  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  was studied. The results indicated that  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  and sintering temperature affect the properties of the ceramics. Effect of annealing temperature on the fracture properties of glass was also studied. The higher annealing temperatures could produce higher value of strength of the glass.

In Part V, A equipment for measured heart sounds was implemented. The system for measured heart sounds by using Lead Zirconate as a receiver was designed. The signal from the receiver was supplied to DAQ circuit for filter, changed from analog to digital, feed to personal computer and then display frequency spectrum of heart sounds.

## บทคัดย่อ

งานวิจัยสามารถแบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 จะเกี่ยวข้องกับการเตรียมห้องผสมระหว่าง polyethylene(PE) และ lead zirconate titanate (PZT)แบบ D-3 โดยจะศึกษาผลของขนาดอนุภาค PZT ที่มีต่อสมบัติของวัสดุ นอกจากนั้นแล้วยังศึกษาผลของการเจือ carbon แบบต่างๆ เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ ซึ่งพบว่าคุณสมบัติของวัสดุขึ้นกับขนาดอนุภาคของ PZT และวิธีการเจือ carbon

ส่วนที่ 2 ได้รายงานผลการวิจัยเกี่ยวกับการเตรียม  $PbZrO_3$  (PZ) และ  $(Pb_{1-x}Ba_x)ZrO_3$  (PBZ) เซรามิกส์ และศึกษาผลของอุณหภูมิซินเตอร์ที่มีต่อสมบัติและการเปลี่ยนเฟสของเซรามิกส์ดังกล่าว โดยพบว่าพฤติกรรมของการเปลี่ยนเฟสจะขึ้นกับอุณหภูมิซินเตอร์นี้ด้วย นอกจากนั้นแล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเผาสารนี้ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้มีการระเหยของ PbO เกิดขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลการเติม PbO ที่มีต่อสมบัติของ PBZ ด้วย

ส่วนที่ 3 สารละลายของแข็งระหว่างสาร ferroelectricธรรมดาซึ่งได้แก่ PZT และ ferroelectricแบบ relaxor ของ Lead zinc niobate หรือที่เรียกย่อว่า PZN และ lead nickel niobate หรือที่เรียกย่อว่า PNN ได้ถูกเตรียมขึ้น โดยในการวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้กระบวนการเตรียมแบบต่างๆที่มีต่อสมบัติและการเปลี่ยนเฟสของสารที่เตรียมขึ้น ซึ่งได้ทำการหาเงื่อนไขที่ทำให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุดของสารนี้

ส่วนที่ 4 เซรามิกส์ของ  $BaTiO_3$  ที่เจือด้วยสารเจือต่างๆได้แก่  $TiO_2$ ,  $Bi_2O_3$  และ  $B_2O_3$  ได้ถูกเตรียมและศึกษาซึ่งผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนเฟสของสารชุดนี้จะเกี่ยวข้องกับการที่เจือแบบต่างๆและอุณหภูมิการซินเตอร์ นอกจากนั้นแล้วได้ทำการศึกษาผลของการเผาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของแก้วซึ่งพบว่าที่การเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้แก้วมีความแข็งแรงมากขึ้น

ส่วนที่ 5 ในส่วนนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจฟังเสียงหัวใจโดยใช้เซรามิกเลดเซอร์โคเนตติตาเนตเป็นตัวรับสัญญาณเสียง สัญญาณเสียงที่ได้จากตัวรับจะป้อนเข้าวงจร DAQ โดยวงจรนี้จะกรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออกโดยวงจรกรองสัญญาณก่อนที่จะป้อนเข้าวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อป้อนเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ให้แสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟของเสียงหัวใจ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเซรามิกเลดเซอร์โคเนตติตาเนตสามารถใช้เป็นตัวรับสัญญาณเสียง ในระบบดังกล่าวได้

## Executive summary

ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติและการเปลี่ยนแปลงของสารเฟอโรอิเล็กทริกดังนี้

### 1. ศึกษาผลการเตรียมของผลสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT( $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ) และ PE (Polyethylene) โดย

- 1.1 ศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของผลสม PZT( $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ) และ Polyethylene(PE) โดยเตรียมขนาดอนุภาคของ PZT ต่างๆ กัน และผลสมกับ PE ซึ่งพบว่าค่าทางไฟฟ้า เช่น  $d_{33}$  และ  $\epsilon$ , ขึ้นกับขนาดอนุภาค โดยถ้าขนาดอนุภาคใหญ่ ค่าเหล่านี้จะดีขึ้น ซึ่งน่าจะมาจากปริมาณความไม่สมบูรณ์ของผิวที่สารทั้งสองเกาะกันลดลงเมื่อมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น
- 1.2 ศึกษาสมบัติของผลสม PZT และ/ PE ที่เจือ carbon และไม่เจือ carbon โดย carbon ที่เจือจะเป็นตัวช่วยในการโพลสาร ผลปรากฏว่าการเจือ carbon มีผลทำให้ค่า  $d_{33}$  ในของผลสมสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเจือ carbon จะทำให้ความต้านทานของสารต่ำลง และง่ายต่อการโพล

### 2. ศึกษาสมบัติทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงในสาร $\text{PbZrO}_3$ (PZ) และสาร $(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{ZrO}_3$ โดย

- 2.1 ศึกษาขนาดผลของอุณหภูมิซินเตอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงและสมบัติเชิงกลของ  $\text{PbZrO}_3$  เซรามิกส์ โดยสามารถเตรียมผง  $\text{PbZrO}_3$  โดยวิธีมิกซ์ออกไซด์ให้มีความบริสุทธิ์สูงเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยการเผาแคลไซน์ ที่  $775^\circ\text{C}$  ใช้เวลาแช่ 3 ชั่วโมง โดยมีอัตราขึ้นและลงของความร้อน  $3^\circ\text{C}$  ต่อ นาที และเซรามิกในระบบ PZ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซินเตอร์ และมีความหนาแน่นสูงสุดที่อุณหภูมิซินเตอร์  $1200^\circ\text{C}$  จากนั้นความหนาแน่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการระเหยของตะกั่วเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูง จึงทำให้เกิดรูพรุน และความหนาแน่นลดลง นอกจากนั้นแล้วอุณหภูมิคูรีของเซรามิกในระบบ PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิซินเตอร์  $1200^\circ\text{C}$  และเซรามิกในระบบ PZ ที่เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าความแข็งในหน่วยกิกะบาร์ ในลำดับเดียวกัน คือประมาณ 4.50 – 5.37 GPa
- 2.2 ศึกษาสมบัติทางจุลภาคและการเปลี่ยนแปลงใน  $(\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{ZrO}_3$  (PBZ10) โดยการเตรียม PBZ10 ตามสัดส่วนที่คำนวณและเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแคลไซน์และซินเตอร์

พบว่า การเปลี่ยนเฟสจาก ferroelectric ไปเป็น paraelectric จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิขึ้นและปริมาณเฟส ferroelectric จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขึ้นที่สูงขึ้น

### 3. เตรียมและศึกษาสมบัติของสาร $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$ หรือ PNN-PZN-PZT ceramics และ $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - (1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ หรือ PZN-PZT เซรามิก

3.1 เตรียมและศึกษาสมบัติของสารในชุด  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})\text{O}_3$  หรือ PNN-PZN-PZT เซรามิก พบว่าค่า  $\epsilon_r$  และ  $T_m$  ของ 0.5PNN-(0.5-x)PZN-xPZT เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PZT เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนจาก relaxor ferroelectric ไปเป็น ferroelectric จะเกิดเมื่อเพิ่มปริมาณ PZT นอกจากนั้นแล้วค่า ( $\epsilon_r$ ) มากที่สุด พบที่  $x = 0.5$  ซึ่งที่องค์ประกอบนี้ ค่า  $P_r$ ,  $P$ , และ  $E_c$  มีค่า  $31.9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $25.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  และ  $4 \text{ kV}/\text{min}$  ตามลำดับ

3.2 เตรียมและศึกษาสมบัติของสาร ferroelectric ในชุด  $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3 - (1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$  หรือ PZN-PZT เซรามิกโดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีเตรียมแบบธรรมดา และวิธี columbite พบว่าการเตรียมด้วยวิธีธรรมดาจะได้อุณหภูมิการแสดงโซไนต์ต่ำกว่าวิธี columbite และเมื่อเพิ่มปริมาณ PZN สารตัวอย่างก็ต้องทำการแคลโซไนต์อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้ได้เฟสบริสุทธิ์ นอกจากนั้นแล้วที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  จะได้เฟสบริสุทธิ์ของโครงสร้าง perovskite ไม่ว่าจะเตรียมด้วยวิธีใดก็ตาม และจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงระหว่าง tetragonal และ rhombohedral ได้ชัดเจน โดย MPB จะอยู่ระหว่าง  $x = 0.2$  และ  $0.3$  นอกจากนั้นแล้วการเผาซ้ำจะช่วยให้เกิดคุณสมบัติที่ดีขึ้นในบางสารตัวอย่าง

### 4. ศึกษาสมบัติของ Barium titanate ที่เจือด้วย $\text{TiO}_2$ , $\text{Bi}_2\text{O}_3$ และ $\text{B}_2\text{O}_3$

4.1 ศึกษาผลของการเจือ  $\text{TiO}_2$  ใน  $\text{BaTiO}_3$  พบว่าเมื่อเติม  $\text{TiO}_2$  เพิ่มขึ้น จะเกิดเกรนที่ไม่ปกติ มีลักษณะเป็นรูปร่างคล้ายเข็มเกิดขึ้น ซึ่งขนาดของเกรนไม่ปกตินี้ขึ้นกับปริมาณ  $\text{TiO}_2$  ที่เติมซึ่งน่าจะมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ (กำลังอยู่ในระหว่างการศึกษา)

- 4.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิซินเตอร์ที่มีต่อ Barium titanate ที่เจือด้วย  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  พบว่าเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น ค่า  $\epsilon_r$  จะสูงขึ้น และอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสจะสูงขึ้นเล็กน้อย ค่า  $\epsilon_r$  ที่สูงขึ้นน่าจะมาจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้น
- 4.3 ศึกษาผลของ  $\text{B}_2\text{O}_3$  ที่มีต่อการเปลี่ยนเฟสของ  $\text{Ba}(\text{Ti}_{0.9}\text{Sn}_{0.1})\text{O}_3$  เซรามิกโดยการผสม  $\text{B}_2\text{O}_3$  ใน  $\text{BaTiO}_3$  ในปริมาณต่างๆ ตั้งแต่ 0-20 % แล้วซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าค่า  $\epsilon_r$  ลดลง และค่ากราฟอุณหภูมิและ  $\epsilon_r$  (ค่าไดอิเล็กตริก) board มากขึ้น นอกจากนั้นแล้ว อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
- 4.4 ศึกษาผลของการ Annealing ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของแก้วพบว่าอุณหภูมิการเผามีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของแก้ว โดยเมื่อเผาอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า strength จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเผา เป็นการทำให้ข้อบกพร่องที่ผิวแก้วลดลง
5. ได้นำ PZT มาประยุกต์ใช้งานเป็นตัววัดการเต้นของหัวใจได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจฟังเสียงหัวใจโดยใช้ PZT เซรามิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเสียง ซึ่ง PZT เซรามิกส์ดังกล่าวสามารถใช้เป็นตัวรับสัญญาณเสียง ในระบบดังกล่าวได้

# เนื้อหางานวิจัย

## ตอนที่ 1

การศึกษาผลการเตรียมของผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT( $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ )  
และ PE (Polyethylene)

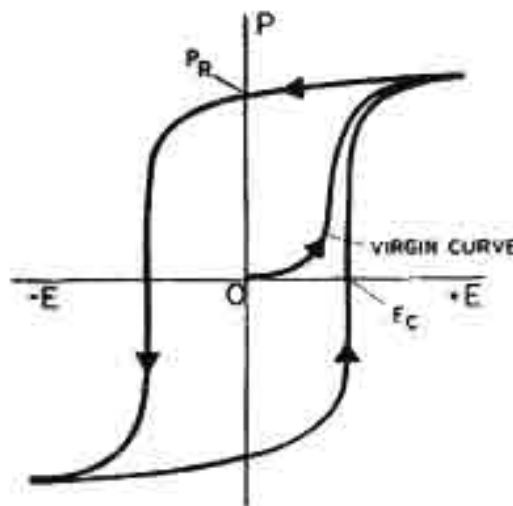
ตอนที่ 1

บทที่ 1

บทนำ

## 1.1 สารสารเฟอร์โรอิเล็กตริก[1]

ผลึกสารเฟอร์โรอิเล็กตริกสามารถมีไดโพลโมเมนต์ถาวรเกิดขึ้นภายในผลึก ในกรณีสารสารเฟอร์โรอิเล็กตริกนั้น เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกเข้าไป จะเกิดโพลาไรเซชันขึ้นในเนื้อสาร แต่เมื่อลดสนามไฟฟ้าลงจนเป็นศูนย์ ปรากฏว่ายังคงมีโพลาไรเซชันอยู่ และค่าโพลาไรเซชันจะเป็นศูนย์เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้มามีค่าเท่ากับ  $-E_c$  ดังรูปที่ 1 ปกติแล้วสถานะสารเฟอร์โรอิเล็กตริกจะไม่ปรากฏขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature,  $T_c$ ) โดยทั่วไปแล้วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมินี้ ผลึกจะอยู่ในสถานะพาราอิเล็กตริก (paraelectric)



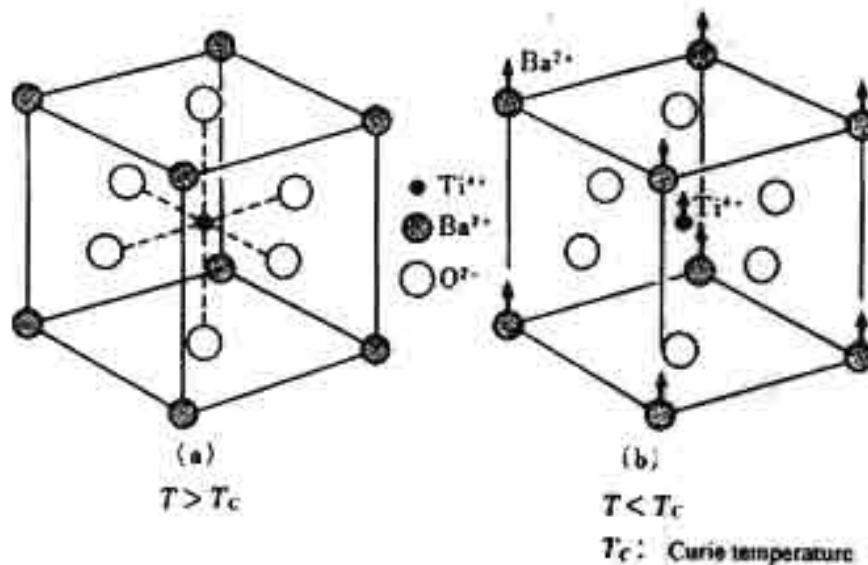
(a)

รูปที่ 1 แสดงเส้นวงฮิสเทอรีซิส ของผลึกสารเฟอร์โรอิเล็กตริก

## 1.2 โครงสร้างผลึกสารเฟอร์โรอิเล็กตริกแบบเรียมิตาเนต[1,2]

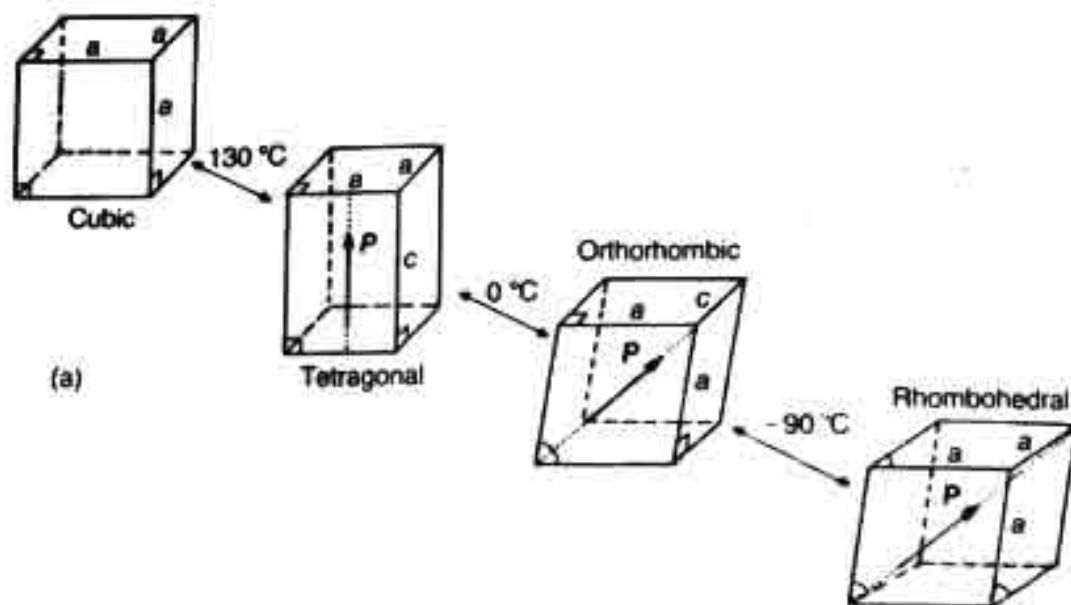
เนื่องจาก  $(\text{BaTiO}_3)$  เป็นสารเพียโซอิเล็กตริกที่มีคุณสมบัติที่ดี จึงมักนิยมใช้เป็นต้นแบบในการอธิบายพฤติกรรมของสารเฟอร์โรอิเล็กตริกนั้นคือ  $\text{BaTiO}_3$  มีโครงสร้างเป็นเพอรอฟสไกต์ (perovskite) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (ประมาณ  $130^\circ\text{C}$ ) หน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิก (cubic)

ลักษณะการจัดเรียงตัวดังรูปที่ 2 แต่ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีโครงสร้างจะบิดเบี้ยวเล็กน้อยเป็น เตตระโกนอล (tetragonal) ทำให้เกิด dipole moment ในทิศทางแกน C



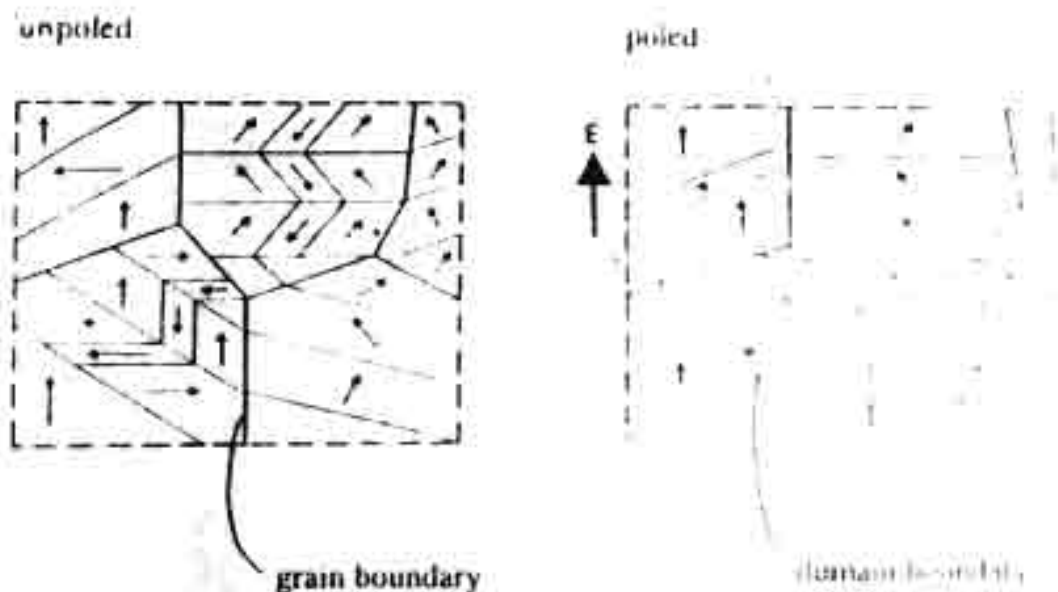
รูปที่ 2 หน่วยเซลล์ของแบเรียมดีคาเนตที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก

และเมื่ออยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำลง โครงสร้างจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ พิจารณาตามรูปที่ 3 ที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}C$  หน่วยเซลล์จะเปลี่ยนแปลงจากเตตระโกนอล (tetragonal) ไปเป็นออร์โธโรมบิก (orthorhombic) โดยมีแกนโพลาไรซ์ขนานกับระนาบหน้าของแนวทะแยง และที่อุณหภูมิ  $-90^{\circ}C$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างแบบรอมโบอีดรัล (rhombohedral) โดยมีแกนโพลาไรซ์ทะแยงตามเซลล์



รูปที่ 3 การเปลี่ยนโครงสร้างของแบเรียมไททาเนตที่อุณหภูมิต่างๆ

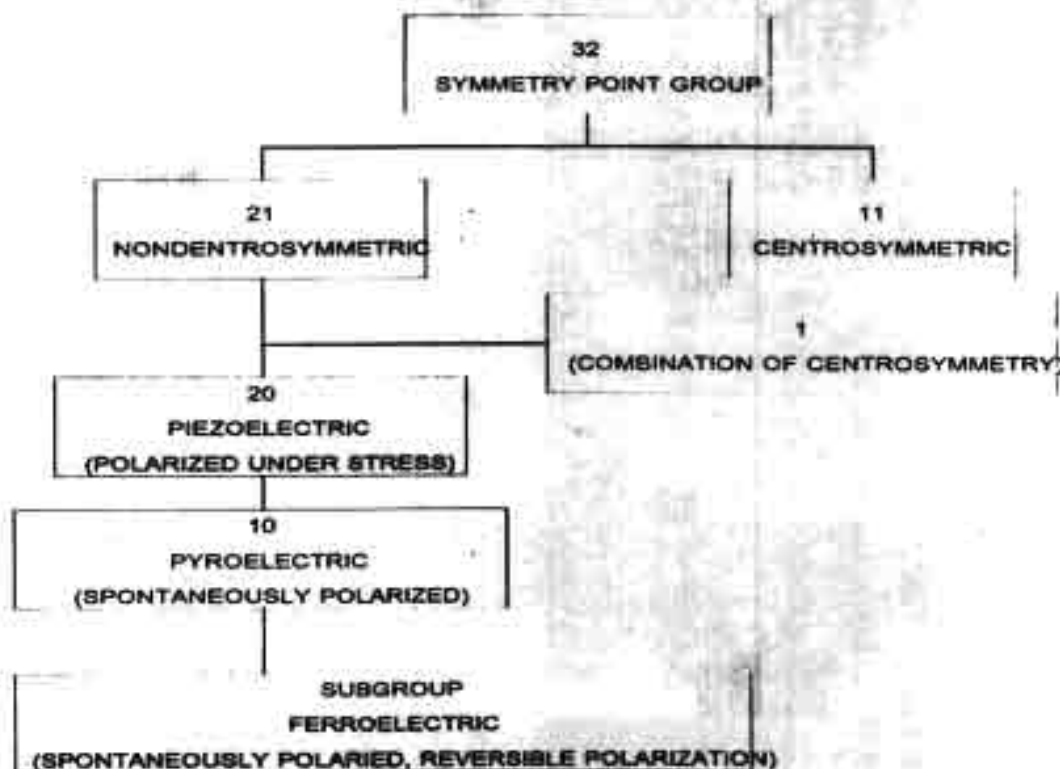
ที่ระหว่างอุณหภูมิประมาณ 0 °C และ 130 °C นั้น โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองในผลึกอาจจะมีทิศทางใดๆ ตามแกนทั้งสาม ดังนั้นในสารจะมีโพลาริเซชันเรียงไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน แต่จะมีบริเวณเฉพาะที่มีการเรียงโพลาริเซชันในทิศทางเดียวกัน เรียกบริเวณเหล่านั้นว่า โดเมน (domain) แต่ละโดเมนจะถูกกันด้วยผนังโดเมน (domain wall) แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าโพลาริเซชันพยายามจัดตัวเรียงตามสนาม ทำให้โครงสร้างโดเมนจะเปลี่ยนลักษณะดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การเรียงโดเมนก่อนและหลังทำการให้สนามไฟฟ้า

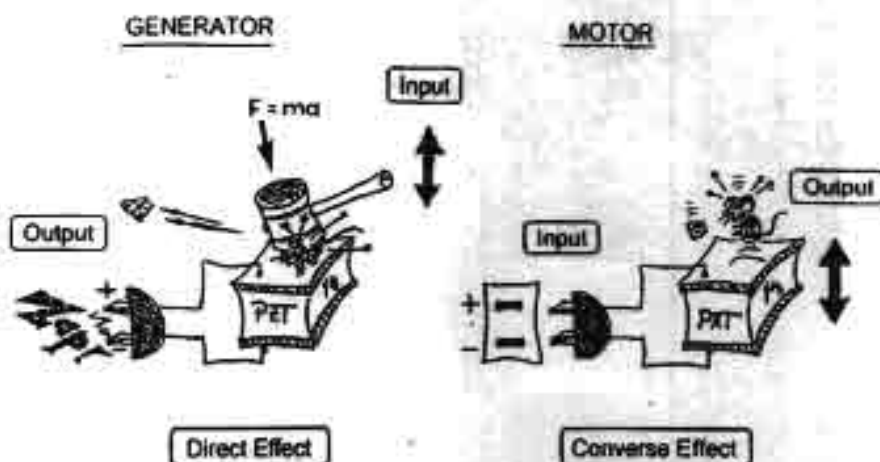
### 1.3 สารเพียโซอิเล็กตริก[1,2]

สารเพียโซอิเล็กตริกเป็นสารที่สามารถแปลงสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกได้ ซึ่งสมบัตินี้เป็นสมบัติที่อธิบายจากปรากฏการณ์ การเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันทางไฟฟ้า (electric polarization) ซึ่งเกิดจากความเครียดเชิงกล (mechanical strain) ซึ่งสมบัตินี้จะเกิดขึ้นกับสารเพียงบางกลุ่ม โดยทั่วไปมีการแบ่งชนิดสมมาตรของผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม หรือ 32 point group ซึ่งใน 32 point group นี้จะมีสารที่มีหน่วยเซลล์ไม่สมมาตรกับจุดศูนย์กลางเซลล์อยู่ 21 กลุ่ม ใน 21 กลุ่มนี้จะมีเพียง 20 กลุ่มที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กตริกส่วนอีก 1 กลุ่มที่เหลือจะไม่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกเนื่องจากมีสมมาตรอย่างอื่นมาเกี่ยวข้อง ทำให้ปริมาณการจัดทางไฟฟ้าหักล้างกันหมด และสามารถแสดงการจำแนกสารออกเป็นกลุ่มต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจำแนกสารโดยอาศัยสมมาตรของผลึก[2]

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกนั้นสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ปรากฏการณ์แบบ direct และปรากฏการณ์แบบ converse โดยที่ปรากฏการณ์แบบ direct นั้นจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน เมื่อสารถูกแรงกลกระทำ หรือเกิดความเค้น (stress) ในขณะที่ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกแบบ converse เกี่ยวข้องกับขนาดและปริมาณที่เปลี่ยนไปหรือความเครียด (strain) เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า[2]แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก(ก) แบบ direct (ข) แบบ converse

#### 1.4 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก

ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ปฏิกิริยาทางเพียโซอิเล็กตริกสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาแบบ direct และแบบ converse สามารถอธิบายปฏิกิริยาทั้งสองด้วยสมการเบื้องต้นดังนี้

$$D = d T \quad (1)$$

โดยที่  $D$  คือ (dielectric displacement)

$T$  คือ ความเค้นที่ใส่ให้กับสารเพียโซอิเล็กตริก(applied mechanical stress)

$d$  คือ สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก(piezoelectric change coefficient) มีหน่วยเป็น Coulomb/Newton

ในทำนองเดียวกัน สำหรับกรณีเพียโซอิเล็กตริกแบบ converse เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้า ขนาดของสารจะเปลี่ยนแปลงไป (ความเครียด) สามารถพิจารณาได้จากสมการ (2)

$$S = dE \quad (2)$$

โดยที่  $S$  คือ ความเครียดที่เกิดขึ้น (strains)

$E$  คือ สนามไฟฟ้าที่ใส่ให้กับสารเพียโซอิเล็กตริก(electrical field)ซึ่งในกรณีทั่วไปสามารถเขียนได้ดังนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (3)$$

และ

$$S = s^E T + dE \quad (4)$$

โดยที่  $\epsilon^T$  คือ dielectric constant at constant stress

$s^E$  คือ compliance at constant electric field

สมการที่ (1) และ (2) นี้อยู่ในรูปเมตริกซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่จะขึ้นกับทิศทาง นั่นคือ ความเป็นเพียโซอิเล็กตริกขึ้นกับทิศทาง ซึ่งทิศทางที่กล่าวนี้คือ ทิศทางของ

โพลาไรเซชันที่เปลี่ยน (หรือความเครียด) ที่เกิดจากการให้ความดัน (หรือสนามไฟฟ้า) ในทิศทางต่างๆ เช่น  $d_{33}$  คือ ที่เกี่ยวกับประจุที่วัดได้ในทิศทาง 3 (แกน Z) โดยสารได้รับความดันในทิศทาง 3

### 1.5 Piezoelectric Coupling Factor

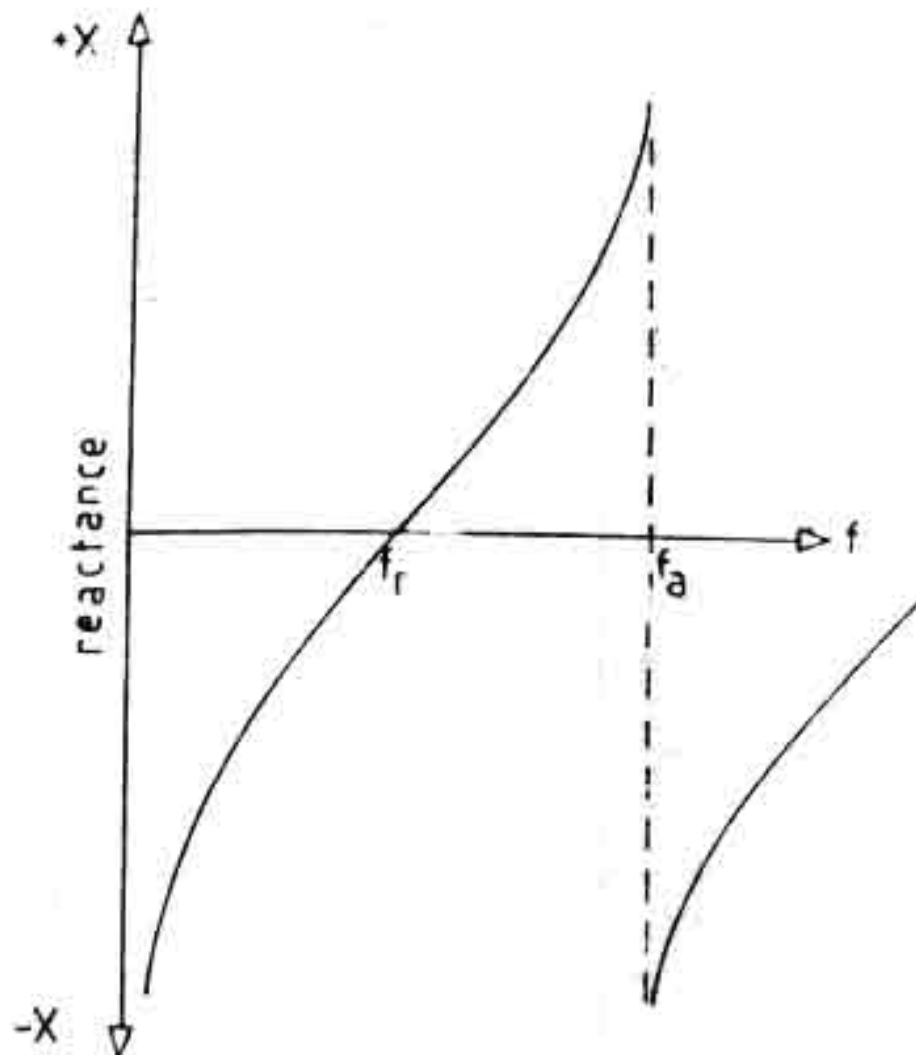
พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งที่สำคัญคือ electromechanical factor ( $k$ ) เป็นตัวบอกประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานในสารเพียโซอิเล็กตริกนิยามดังสมการ (5)

$$k^2 = \frac{\text{output mechanical energy}}{\text{input electrical energy}} \quad (5)$$

$$= \frac{\text{output electrical energy}}{\text{input mechanical energy}}$$

electromechanical coupling factor นี้เป็นปริมาณเทนเซอร์ ( $k_{ij}$ ) ในผลึกเพียโซอิเล็กตริกที่ไม่เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กตริกมีค่าน้อย ( $k < 0.1$ ) ส่วนใหญ่แล้วในเซรามิกที่เป็นสารเฟอร์โรอิเล็กตริกมีค่าค่อนข้างสูง ( $0.4 \leq k \leq 0.7$ ) แต่สำหรับผลึกสารเฟอร์โรอิเล็กตริกบางชนิดอาจจะมีค่าสูงมาก ( $k \leq 0.9$ ) ค่า  $k$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ เนื่องจากการเปลี่ยนรูปพลังงานไม่สมบูรณ์

สามารถหาค่า  $k$  โดยอาศัยพฤติกรรมทางไฟฟ้ากระแสสลับของเพียโซอิเล็กตริก ทำการวัดค่า reactance เทียบกับความถี่ ลักษณะความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 7



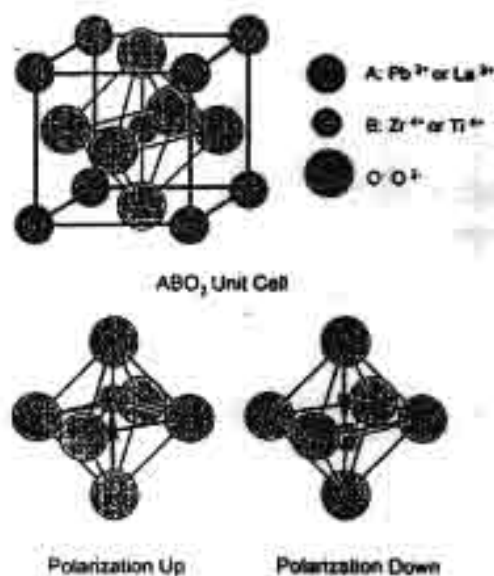
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง reactance กับความถี่

โดย antiresonance frequency ( $f_a$ ) และ resonance frequency ( $f_r$ ) หาได้จากจุดที่มีความถี่ที่ทำให้ ค่า reactant เป็นศูนย์หลังจากนั้นนำค่า  $f_r$  และ  $f_a$  ที่ได้มาคำนวณหาค่า  $k$  ซึ่งในกรณีของสารที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลม จะแทนด้วยตัวแปร  $k_p$  (planar coupling factor) ซึ่งสามารถหาได้โดยสมการ

$$k_p = \sqrt{\frac{2(f_a^2 - f_r^2)}{f_r^2}} + 0.038 \quad (6)$$

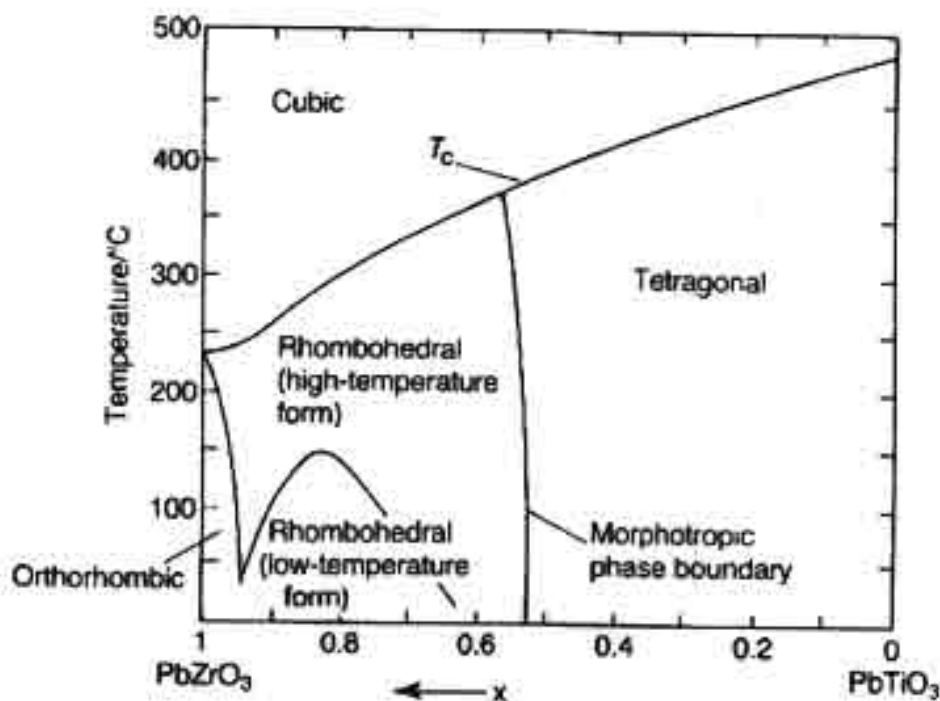
### 1.6 เลดเซอร์โคเนติตาเนต

หลังจากที่มีการค้นพบสารเลดเซอร์โคเนติตาเนต หรือพีแซดที นั้นสารนี้มักนิยมนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางด้านทรานสดิวเซอร์เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริกและ Piezoelectric Coupling Factor สูงมากและมีอุณหภูมิคูรีประมาณ  $350^{\circ}\text{C}$  ลักษณะโครงสร้างแบบ perovskite ของพีแซดทีนี้ จะประกอบด้วยเลดเซอร์โคเนต ( $\text{PbZrO}_3$ ) และเลดติตาเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) กระจายกันอยู่ สมมติให้โครงสร้างผลึกเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์  $\text{Pb}^{2+}$  เป็นไอออนที่อยู่ตามมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์  $\text{O}^{2-}$  อยู่ที่ face centre ส่วน  $\text{Ti}^{4+}$  และ  $\text{Zr}^{4+}$  จะอยู่เลื่อนไปจาก body centre เล็กน้อย ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างผลึกพีแซดทีที่เป็นแบบ perovskite

เนื่องจากพีแซดที ประกอบด้วย เลดเซอร์โคเนต ( $\text{PbZrO}_3$ ) และเลดติตาเนต ( $\text{PbTiO}_3$ ) โครงสร้างผลึกจึงขึ้นกับอุณหภูมิและอัตราส่วนของเลดเซอร์โคเนต และ เลดติตาเนต สามารถแสดง phase diagram ของระบบ  $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$  ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เฟสไดอะแกรมของระบบ  $\text{PbTiO}_3$  -  $\text{PbZrO}_3$

สำหรับ  $\text{PbZrO}_3$ , บริสุทธิ์มีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก และเป็นแอนติสสารเฟร์โรอิเล็กตริก (Antiferroelectric) ในขณะที่  $\text{PbTiO}_3$ , บริสุทธิ์มีโครงสร้าง perovskite เป็นเตตระโกนอล และเป็นสสารเฟร์โรอิเล็กตริก ในวัสดุที่มีสมบัติแอนติสสารเฟร์โรอิเล็กตริก แต่ละหน่วยเซลล์จะมีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง และหน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกันจะมีทิศทางของโพลาไรเซชันเรียงตัวในทิศทางตรงข้ามเป็นผลให้โพลาไรเซชันสุทธิในวัสดุแอนติสสารเฟร์โรอิเล็กตริกมีค่าเป็นศูนย์

แต่เมื่อทำการเติม  $\text{PbTiO}_3$  ประมาณ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ลงใน  $\text{PbZrO}_3$ , บริสุทธิ์จะทำให้เกิดเฟสรวมโบฮีตรอลที่เป็นสสารเฟร์โรอิเล็กตริก ( $F_r$ ) แต่ในพีแชนด์ที่ทั่วไปนิยมเตรียมในอัตราส่วนที่บริเวณใกล้ขอบเฟส (Phase Boundary) ระหว่างเฟสรวมโบฮีตรอล และเฟสเตตระโกนอล ซึ่งที่บริเวณของเขตนี้จะมีผลึกเฟร์โรอิเล็กตริกของรวมโบฮีตรอล และเตตระโกนอลรวมกันอย่างสมดุล โดยที่เกือบจะไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เรียกบริเวณนี้ว่า Morphotropic Phase Boundary (MPB) พบว่ายิ่งใกล้ MPB วัสดุจะมีความเป็นเพียโซอิเล็กตริกที่แรงมาก

ในการเตรียมเซรามิกพีแชนด์ที่เน้นเป็นการยากที่จะเตรียมส่วนผสมของเซรามิกพีแชนด์ที่ในบริเวณ MPB ที่แน่นอน เพราะที่ขอบเขตนี้เฟสทั้งสอง คือ เตตระโกนอล และรวมโบฮีตรอลมีการกระจายอยู่ร่วมกัน ความกว้างของบริเวณที่กระจายอยู่จะไม่แน่นอนซึ่งไม่ขึ้น

กับปัจจัยต่างๆ ที่ควบคุมในการเตรียมเซรามิก ดังนั้นการทำวัสดุที่แคดทีเฟดเดียว คือเฟดเตตระโกนอลเดียวๆ หรือเฟสธอมโบอีครอลเดียวๆ จึงต้องมีการทำให้เซอร์โคเนียม และติตาเนียม มีการรวมตัวกันในระดับอะตอม ซึ่งเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก แต่ปัจจุบันกระบวนการเตรียมได้พัฒนาขึ้น สามารถลดบริเวณที่มีการกระจายอยู่ร่วมกันได้

### 1.7 สมบัติไดอิเล็กตริก

โดยทั่วไปวัสดุไดอิเล็กตริกจะเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพความต้านทานสูง ในการพิจารณาวัสดุไดอิเล็กตริกมักจะกล่าวถึงเทอม ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(dielectric constant หรือ permittivity)และค่า ตัวประกอบความสูญเสีย ( $\tan\delta$ ) โดยในกรณีแผ่นโลหะคู่ขนานที่มีสารไดอิเล็กตริกอยู่ นั้นพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุ( $C$ )และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังนี้

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (7)$$

$\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก(สภาพยอมสัมพัทธ์)

$\epsilon_0$  คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ที่สุญญากาศ (permittivity of vacuum or dielectric constant  
 $= 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ )

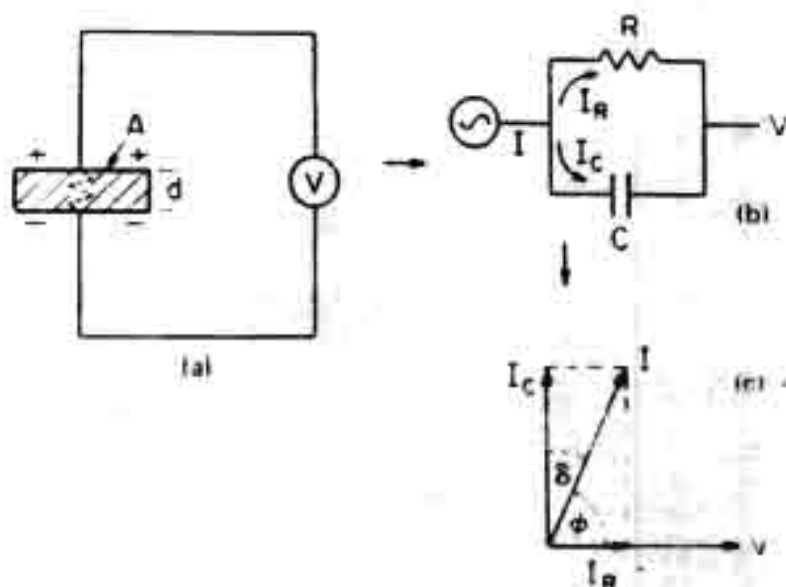
A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นโลหะที่ประกบวัสดุไดอิเล็กตริก

d คือ ความหนา

C และ  $C_0$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุและของอากาศตามลำดับ

$\epsilon$  คือ ค่า permittivity ของสาร

สามารถแสดงภาพเมื่อมีการวางตัวเก็บประจุ ซึ่งทำขึ้นจากการนำแผ่นโลหะมาประกบวัสดุไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การวางตัวเก็บประจุ

- (a) ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง (b) ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ  
(c) แสดงค่า loss tangent ที่เกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริก

เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับกับวัสดุไดอิเล็กตริก พบว่าพฤติกรรมของวัสดุจะแตกต่างไปจาก เมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง กล่าวคือ พารามิเตอร์ต่างๆ มักจะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ในกรณีไม่มีสารไดอิเล็กตริกสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q = C_0 V \quad (8)$$

เมื่อ  $Q$  คือประจุ  $V = V_0 e^{j\omega t}$  และ  $C_0$  เป็นค่าความจุในกรณีไม่มีสารไดอิเล็กตริก

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = j\omega C V \quad (9)$$

โดยที่  $I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่เวลา  $(t)$  โดย  $I$  ประกอบไปด้วย vector component  $I_C$  และ  $I_R$  ในกรณีเมื่อมีการสูญเสียทางไฟฟ้าไดอิเล็กตริกสามารถแสดงให้เห็นว่ามี วงจรจำลองที่

ประกอบไปด้วย ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 10 (b)  $I_C$  คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุซึ่งเป็นสัดส่วนกับประจุที่ถูกกักเก็บไว้ในตัวเก็บประจุนั้น ซึ่งมีเฟสนำแรงดัน  $V$  อยู่  $90^\circ$  ส่วนกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน ( $I_R$ ) จะมีเฟสเดียวกันกับ  $V$  ในกรณีมีสารไดอิเล็กตริกจะเห็นถึงการสูญเสียพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งลักษณะนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้ค่า permittivity ที่อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อน หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยเมื่อมีสารไดอิเล็กตริกในโลหะคู่ขนานจะได้ว่า

$$I = i\omega\epsilon^*V \quad (10)$$

เมื่อ  $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$  โดย  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  คือค่าไดอิเล็กตริกในส่วนของ real part และของ imaginary part

ดังนั้น

$$\begin{aligned} I &= i\omega C_0 \epsilon_0 (\epsilon' + i\epsilon'')V \\ &= I_C + I_R \end{aligned} \quad (11)$$

สามารถเขียนกระแสให้อยู่ในรูปของ dissipation factor :  $\tan \delta$  ได้ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\omega C_0 \epsilon_0 \epsilon'' V}{\omega C_0 \epsilon_0 \epsilon' V} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (12)$$

เรียกเทอม  $\tan \delta$  ว่า dissipation factor หรือ loss tangent

## 1.8 พอลิเมอร์

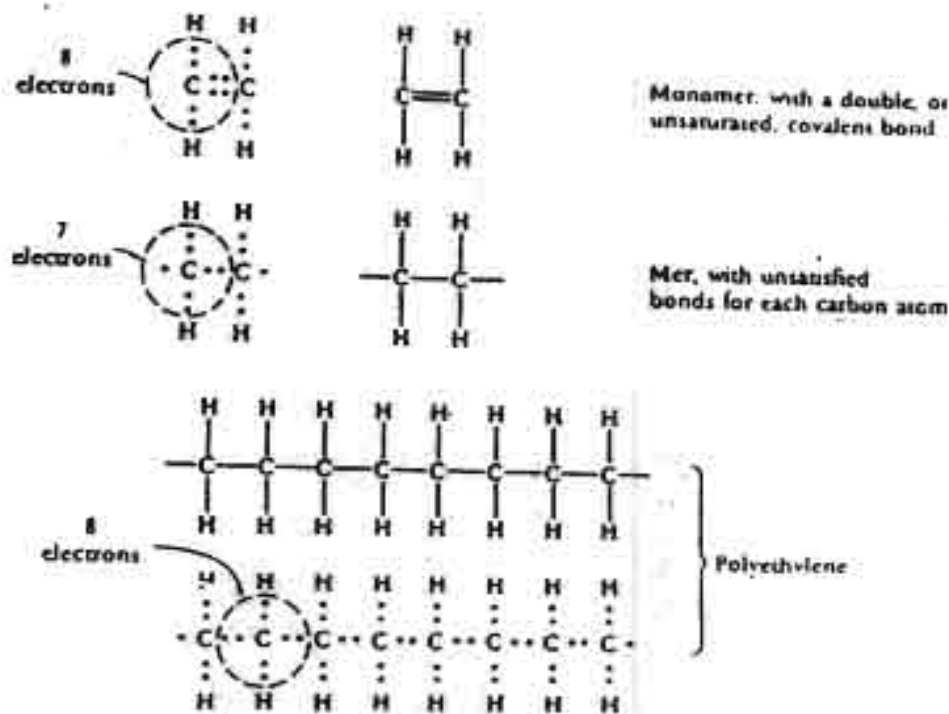
พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ เกิดจากการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลขนาดเล็ก (mer) ผลจากการเชื่อมต่อกันทำให้มีมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น มีความแข็งแรงมากขึ้น และมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น สามารถจำแนกประเภทของพอลิเมอร์ได้โดยอาศัยหลักเกณฑ์ต่างๆ แต่วิธีที่ง่ายที่สุด คือ การจำแนกตามพฤติกรรมหรือคุณสมบัติเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer) เป็นพลาสติกที่เมื่อเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว(ผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้ว)สามารถนำกลับมาใช้งานได้เรื่อยๆเช่น โพลีเอทิลีน เป็นต้น

2. เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (thermosetting polymer) จะเป็นพอลิเมอร์ที่เมื่อเป็นผลิตภัณฑ์แล้วไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่(ไม่สามารถผ่านกระบวนการทางความร้อนได้อีก) ยกตัวอย่างเช่น เรซิน (resin)

## 1.9 โพลีเอทิลีน

โมเลกุลของเอทิลีน ( $C_2H_4$ ) ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนเชื่อมกันด้วยพันธะคู่ชนิดโคเวเลนต์ (covalent bond) โดยคาร์บอนจะให้อิเล็กตรอนหนึ่งคู่จากแต่ละอะตอมร่วมกัน ขณะที่ไฮโดรเจน 2 อะตอมสร้างพันธะกับแต่ละอะตอมของคาร์บอน เมื่อมีการรวมตัวเป็นสายโซ่ โดยคาร์บอนจะเรียงกันเป็นสายยาว มีการสร้างพันธะเชื่อมกันในสายโซ่ พันธะคาร์บอนจะมีความเสถียรและโมเลกุลมีความแข็งแรง ลักษณะโมเลกุลโพลีเอทิลีนแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การเกิดโพลีเอทิลีนจากปฏิกิริยารวมตัวของโมเลกุลเอทิลีน

## 1.10 ของผสมเพียโซอิเล็กตริกและพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาของผสม เพื่อสร้างสารที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ที่สารเฟสเดียวทำไม่ได้ เช่นในทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ ต้องการใช้สารที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกที่ดี แต่มีความหนาแน่นต่ำ เพื่อต้องการให้ความหนาแน่นสอดคล้องกับความหนาแน่นของน้ำ ในขณะที่เดียวกันก็มีความยืดหยุ่น ซึ่งสมบัติเช่นนี้ไม่พบในสารเฟส

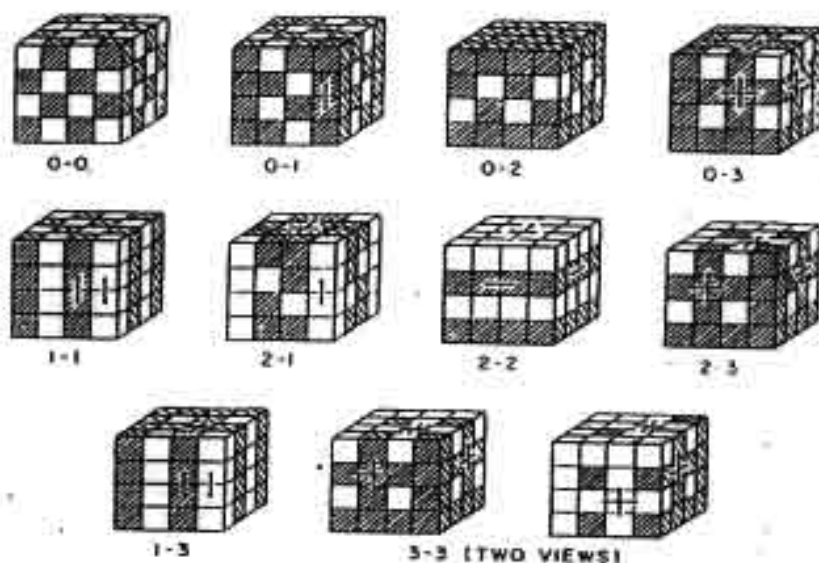
เดียว แต่เป็นสมบัติร่วมของของผลสองเฟส หรือมากกว่า จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้ อย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน

### 1.11 การเรียงติดกัน

โดยทั่วไปสมบัติต่างๆ ของของผลม มีความสัมพันธ์กับสมบัติพื้นฐานขององค์ประกอบแต่ละเฟส ปริมาณและลักษณะการเรียงติดกัน ซึ่งแนวความคิดการเรียงติดกันสามารถอธิบายได้ โดยพิจารณาถึงการจัดเรียงตัวของแต่ละเฟสที่มีการเรียงติดกันใน 3 มิติ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของผลม 2 เฟส จะมีการเรียงติดกันทั้งหมด 10 แบบ คือ 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 2-3, และ 3-3 แสดงดังรูปที่ 12 ความหมายของตัวเลขแต่ละตัวคือ เลขตัวแรกแสดงถึงทิศทางการเรียงติดกันของเฟสที่หนึ่ง และเลขตัวที่สองแสดงถึงทิศทางการเรียงติดกันของเฟสที่สอง ยกตัวอย่างเช่น ของผลมแบบ 0-3 ระหว่างเฟสโซเซรามิกและพอลิเมอร์ หมายถึง สารเฟสโซเซรามิกไม่มีการการเรียงติดกันเลย ในขณะที่เฟสของพอลิเมอร์มีการเรียงติดกันในสามทิศทาง หรืออาจอธิบายได้ว่าอนุภาคเซรามิกกระจายอยู่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์นั่นเอง

### 1.15 ของผลมแบบ 0-3

ของผลมแบบที่มีรูปแบบง่ายที่สุดคือ แบบ 0-3 เป็นลักษณะของผงเซรามิกกระจาย อยู่ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ข้อดีที่สำคัญของของผลมแบบ 0-3 คือสามารถเตรียมให้อยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้ง่าย และวิธีการเตรียมไม่ซับซ้อนยุ่งยาก สามารถเตรียมได้ในปริมาณมาก (mass-produced)[3] แต่อย่างไรก็ตามพบว่าปัญหาที่สำคัญในการเตรียมของผลมแบบนี้คือ การกระจายตัวของผงเซรามิกมักไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อสมบัติของของผลม



รูปที่ 12 ลักษณะการเรียงติดกันของของผลสมสองเฟส

### 1.16 งานวิจัยที่ผ่านมา

T.R.Shorout และคณะ[4] ได้ทำการเตรียมของผสมระหว่างเซรามิกพีแชนท์และพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้คือ โพลียูรีเทน (Polyurethane) พบว่าสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกของของผสมมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกพีแชนท์ และ PVDF ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกได้

A.Safari[5] ทำการทดลองเตรียมของผสมแบบ 0-3 โดยใช้เลดติตาทาเนตเป็นเฟสเซรามิก โดยใช้เทคนิคการเตรียมเลดติตาทาเนตแบบ mixed oxide, sol-gel และวิธีตกตะกอนร่วม (coprecipitation) พบว่าของผสมที่เตรียมจากเซรามิกที่ผ่านการเตรียมโดยวิธี coprecipitation จะมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริกดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้น

H.Banno และคณะ[6] ได้ทำการเตรียมของผสมแบบ 0-3 โดยใช้เฟสเซรามิกเป็นเลดติตาทาเนตเซรามิกแทนพีแชนท์เซรามิก เพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานทางด้าน hydrostatic properties พบว่าสมบัติของของผสมที่ใช้เลดติตาทาเนตเป็นเฟสเซรามิกจะได้ค่า hydrostatic voltage ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่ใช้พีแชนท์เป็นเฟสเซรามิก

S. Sa-Gong และคณะ[7] ได้ทำการปรับปรุงวิธีการโพลโดยการเพิ่มเฟสดัชนีนำลงในของผสม ซึ่งเฟสที่เติมลงไปนี้เป็นสารกึ่งตัวนำ เช่น คาร์บอน เจอร์มาเนียม หรือ

ซิลิกอน โดยของผสมนี้ถึงแม้จะทำการโพลในสนามไฟฟ้าที่ต่ำ แต่ผลที่ได้มีสมบัติเหมือนกับของผสมที่ไม่ได้ใส่เฟลด์ตัวนำ

Wersing[8] เตรียมของผสมแบบ 0-3 และปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อใช้ในการประยุกต์เป็น อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ สำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ และได้ทำการทดลองใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เป็นเมตริกซ์พอลิเมอร์แล้วศึกษาพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของของผสมที่เตรียมได้

H.G.Lee และคณะ[9] ทำการศึกษาพบว่ารูปทรงขององค์ประกอบแต่ละเฟส เช่น รูปทรงของเซรามิก และรูปทรงที่วอยซ์ของ phase ต่างมีผลต่อค่าความหนาแน่น สมบัติไดอิเล็กตริกและสมบัติเพียโซอิเล็กตริก

D.Waller และคณะ[10] ศึกษาวิธีการโพลของผสมแบบ 0-3 และได้นำเทคนิคที่เรียกว่า Corona Discharge technique มาใช้ปรับปรุงวิธีการโพล

วิธีการเตรียมของผสมแบบ 0-3 เป็นแผ่นฟิล์มบาง ถูกเสนอโดย Hanner และคณะ[11] พบว่าค่า  $d_{33}$ ,  $g_{33}$  และ figer of merit สำหรับการใช้งานเป็น hydrophone มีค่าสูงกว่าการเตรียมแบบเก่า

T.E.Petroff และคณะ[12] และคณะทำการศึกษาถึง อิทธิพลของผิวสัมผัสระหว่างผงเซรามิกกับเมตริกซ์พอลิเมอร์ ที่มีต่อค่า  $d_{33}$ ,  $g_{33}$  และ figer of merit พบว่าของผสมที่เตรียมขึ้นจากผงเซรามิกที่ผ่านการเคลือบด้วย 10-undecenoylazide และ hexane (1:50 weight%) จะให้ค่า  $d_{33}$ ,  $g_{33}$  และ  $\tan \delta$  สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่เตรียมจากผงพีแอสซีเซรามิกที่ไม่ผ่านการเคลือบ

Y.Chen และคณะ[13] เตรียมของผสมแบบ 0-3 ระหว่างเลคิตาเนตเซรามิก และพอลิเมอร์ร่วม (co-polymer) โดยเลคิตาเนตเตรียมจากกระบวนการ sol-gel ได้ผงที่มีขนาดเล็ก (nanocrystalline powder) และพบว่าผงเซรามิกที่ผ่านการเผา (annealing) ที่อุณหภูมิประมาณ  $700^{\circ}\text{C}$  มีความเหมาะสมในการใช้เตรียมของผสมเพื่อจุดประสงค์ในการใช้งานด้าน pyroelectric sensor เนื่องจากคุณสมบัติทาง pyroelectric ที่ดี

1986Varapasad[14] และคณะได้ศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของวัสดุผสม พบว่าอัตราส่วนผสมของวัสดุส่งผลต่อพฤติกรรมการนำไฟฟ้าและสมบัติไดอิเล็กตริก

Hanner[15] และคณะได้ศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุผสม 0-3 เป็นฟิล์มบางและศึกษาสมบัติไพโซอิเล็กตริกพบว่าค่า  $d_{33}$ ,  $g_{33}$  และ figure of merit สำหรับการใช้งานเป็น Hydrophone นั้นมีค่าสูงกว่าการเตรียมแบบเดิมมาก

Moon-Ho Lee [16]และคณะได้ศึกษากระบวนการโพลีวัสดุผสม Lead Titanate Epoxy (0-3) โดยการเตรียม PT ด้วยวิธี Coprecipitated โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของ PT พบว่าขนาดของ fine  $PbTiO_3$  ต้องการเวลาในการโพลีมากกว่าขนาดอนุภาคของ  $PbTiO_3$  ที่ใหญ่และยังพบอีกว่า ค่า  $d_{33}$  ลดลงเมื่อขนาด particlesize ลดลง

## เอกสารอ้างอิง

## ตอนที่ 1

## บทที่ 1

1. A. J. Moulson and J. M. Herbert. "Electroceramics." 1st. ed., Chapman & Hall, London, 1993.
2. R. C. Buchanan. "Ceramic Materials for Electronics : Processing, Properties and Applications." 1st.ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1986.
3. D. R. Askeland. "The Science and Engineering of Materials." Wadsworth, Inc., California, 1984.
4. T. R. Shrout, W. A. Schultze and J. V. Biggers., Mater. Res. Bull. 14 (1979)1553.
5. A. Safari, Y. H. Lee, A. Halliyal and R. E. Newnham. Am. Ceram. Soc. Bull. 66 [4], (1980) 668.
6. H. Banno and S. Saito. , Jpn. J. Appl. Phys. 22, (1983)66.
7. S. Sa-Gong, A. Safari, S. J. Jang and R.E. Newnham. Ferroelectric Letters 5 (1986)39.
8. W. Wersing. ,IEEE.(1986) 212.
9. H. G. Lee and H. G. Kim. , J. Am. Ceram. Soc. 72 [6] (1989)938.
10. D. Waller, T. Iqbal and A. Safari., J. Am. Ceram. Soc., 72, [2] (1989) 322.
11. K. A. Hanner, A. Safari, R. E. Newnham and J. Runt. , Ferroelectrics, 100 (1989) 260.
12. T. E. Petroff, M. Sayer and W. E. Baker. , Ceramic Transactions, 19(1991)365.
13. Y. Chen, H. L. W. Chan and C. L. Choy. , J. Am. Ceram. Soc., 81[5] (1998)1231.
14. A. M. Varaprasad and J. H. Jagannath, IEEE.(1986) 239.
15. K. A. Hanner, A. Safari, R. E. Newnham and J. Runt. , Ferroelectrics, 100 (1989). 255.
16. M.H.Lee, A. Halliyal and R.E. Newnham, J. Am. Ceram. Soc., 79[4], (1996)1053.

ตอนที่ 1

บทที่ 2

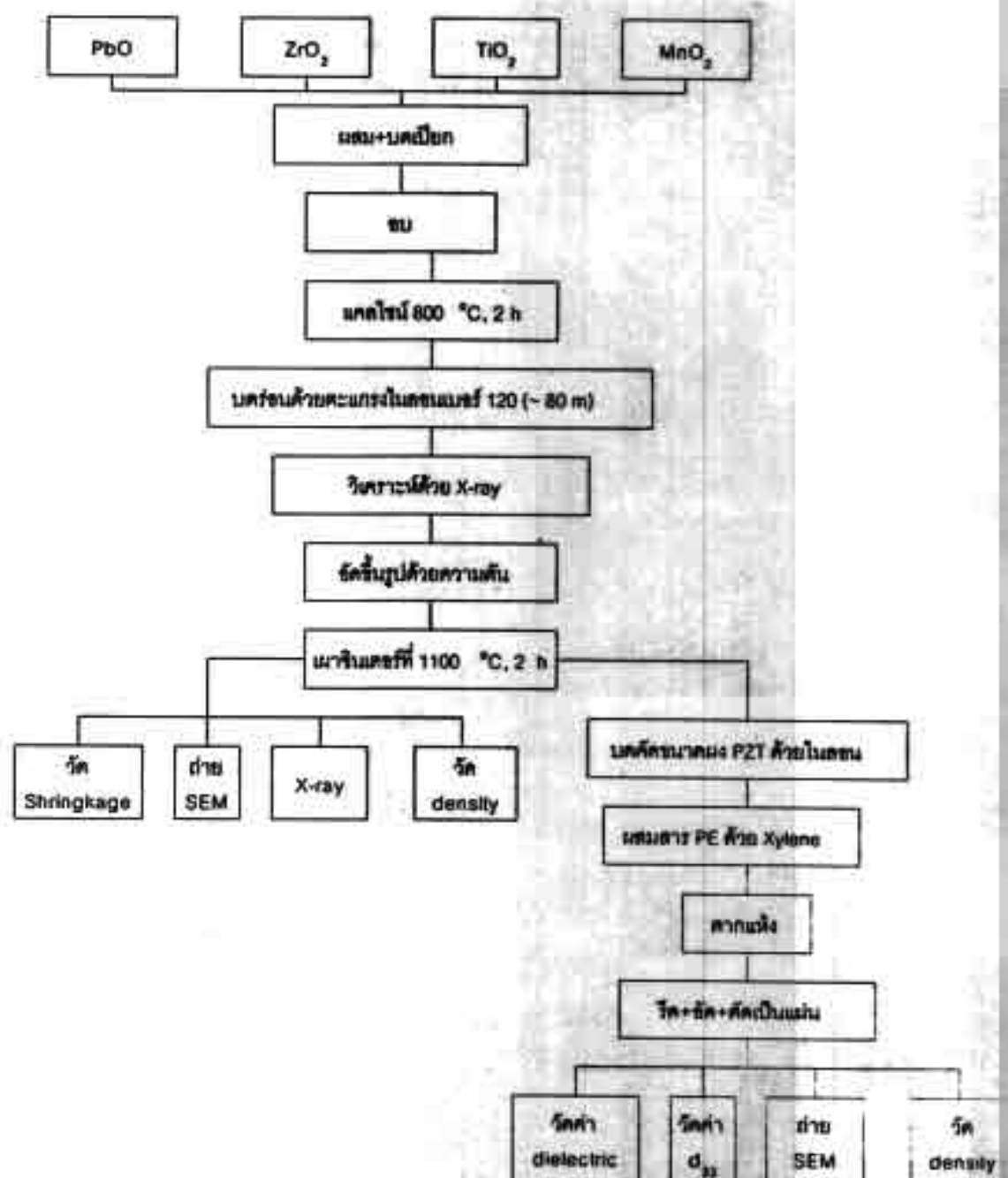
ผลของขนาดอนุภาค  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$  (PZT) ที่มีต่อสมบัติของวัสดุผสมแบบ 0-3 ระหว่าง PZT และ PE (Polyethylene)

## 2.1 บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาสมบัติของวัสดุในรูปแบบต่างๆกันอย่างแพร่หลาย [1-3] จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า คุณสมบัติของวัสดุผสมระหว่าง พิโรอิเลคตริก และ โพลีเมอร์ ขึ้น กับหลายตัวแปร เช่น คุณสมบัติของผงตัวกระจายในแบสหลักของวัสดุผสม วิธีการเตรียมเป็นต้น ในกรณีวัสดุผสม 0-3 ของ PZT และโพลีเอทิลีนนั้นได้มีผู้ทำวิจัย วิธีการเตรียมมีผลต่อการจัดเรียง ตัวของ PZT ตัวอย่างเช่น งานของ Fries และ Moulson [4] ซึ่งทำการศึกษาผลของกรรมวิธีการขึ้น รูปของ PZT แบบต่างๆที่มีผลต่อวัสดุผสม หรือ งานของ Lee และคณะ [5] ซึ่งพบว่า คุณสมบัติของ ผสม 0-3 PZT และโพลีเอทิลีน กับความพรุนของบริเวณรอยต่อของ วัสดุทั้งสองนอกจากนั้นแล้วยังมีการค้นพบว่าขนาดอนุภาคมีผลของคุณสมบัติพิโรอิเลคตริก ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิการ เปลี่ยนสถานะจากสถานะพิโรอิเลคตริกไปเป็นสถานะพาราอิเลคตริกจะขึ้นกับขนาดอนุภาค [6-10] และยังพบอีกว่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกก็ยังขึ้นกับขนาดอนุภาคอีกด้วย [9] Lee และ คณะ [11] ได้เตรียมวัสดุผสมระหว่าง  $\text{PbTiO}_3$  และ dielectric gel โดย  $\text{PbTiO}_3$  เตรียมด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งสามารถควบคุมขนาดอนุภาคได้ดี โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิการเผา แคลไรน์ ซึ่ง Lee และคณะ พบว่าขนาดอนุภาคมีผลต่อคุณสมบัติพิโรอิเลคตริก อย่างไรก็ตามวิธีการเตรียม  $\text{PbTiO}_3$  ของ Lee นั้น ทำให้ได้ขนาดอนุภาคระดับนาโน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าคุณสมบัติของอนุภาคในระดับนาโนมี จะต่างจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ [10] ซึ่งทำให้วัสดุผสมที่ได้มีสมบัติขึ้นกับมีสมบัติขนาด อนุภาค ซึ่งหากจะศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติของวัสดุผสมนั้นน่าที่จะควบคุมสมบัติ ของอนุภาคให้เหมือนกันในการวิจัยครั้งนี้ จะได้ศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อคุณสมบัติของ ของผสมอีกแง่มุมหนึ่ง โดยทำการเตรียม PZT ที่อุณหภูมิแคลไรน์เดียวกัน ทั้งนี้เพื่อควบคุมคุณ สมบัติของอนุภาคตั้งต้นให้เหมือนกันจากนั้นจึงทำการคัดขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรง (sieve) แล้วจึงทำการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสม

## 2.2 การทดลอง

ได้ทำการเตรียมของผสมระหว่าง PZT( $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ) และ PE(Polyethylene) ซึ่งของผสมที่เตรียมได้เป็นแบบ 0-3 ซึ่งขั้นตอนการเตรียมสารดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมของผสมระหว่าง PZT( $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ) และ PE(Polyethylene)

หมายเหตุ

1. ได้ทำการเตรียมวัสดุผสม 2 ชนิดส่วนคือ PZT:PE=50:50 %volume และ PZT:PE=40:60 %volume
2. การคำนวณจะใช้ตะแกรงในลอนขนาดต่าง ๆ ที่ทำการวัดขนาดตะแกรงในลอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
3. การหาขนาดของเกรนเซรามิกจะใช้วิธี intercept method [12] ซึ่งพบว่ามีค่าประมาณ  $1\mu\text{m}$
3. ใช้ xylene เป็นตัวทำละลายของ PE
4. การรีดและทำเป็นแผ่นจะใช้วิธี calendaring ซึ่งจะเป็นลูกกลิ้งโลหะร้อน 2 ลูกคอยรีดวัสดุผสม
5. การวัดค่าไดอิเล็กตริก จะใช้เครื่อง LCZ (Hewlett Packard 4194A)
6. การวัดค่า piezoelectric ( $d_{33}$ ) จะใช้เครื่อง Piezometer System (Model PM25)

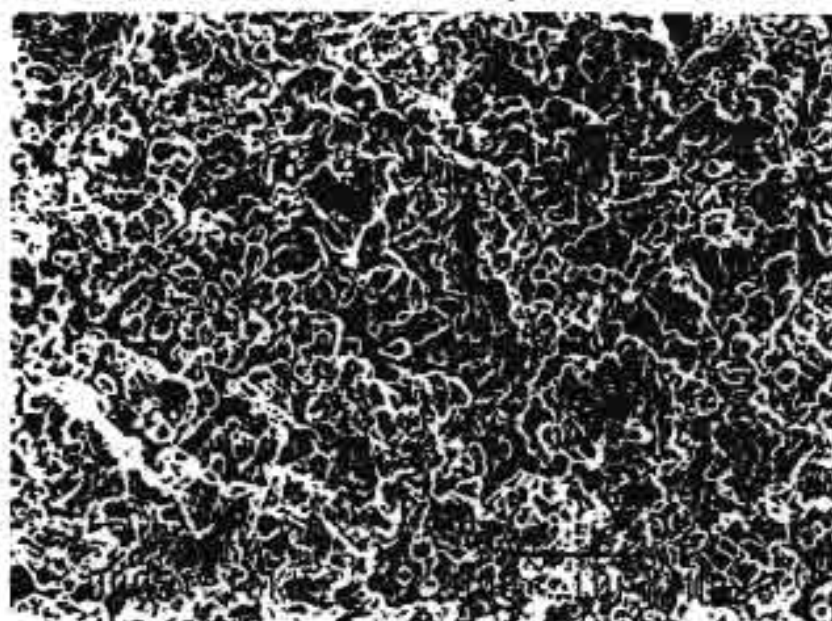
### 2.3 ผลการทดลอง

เมื่อทำการ X-ray สสารตัวอย่างที่ผ่านการแคลไซน์และซินเตอร์แล้วพบว่าเป็น PZT จริง โดยการเทียบข้อมูลจาก JCPDS (No. 33-784) และได้ทำการคำนวณขนาดของผง PZT ด้วยตะแกรงในลอน ขนาดของอนุภาคได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการหาขนาดผงเซรามิกที่ผ่านการบด แล้วร่อนผ่านตะแกรงในลอนขนาดต่างๆ

| ตะแกรงในลอนที่ใช้                           | No. สาร | ขนาด ( $\mu\text{m}$ ) | ขนาดเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------------------------|---------|------------------------|------------------------------|
| สารที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140               | size 1  | < 34                   | 17                           |
| สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงเบอร์ 120 และ 140 | size 2  | 34-60                  | 47                           |
| สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงเบอร์ 36 และ 120  | size 3  | 61-167                 | 113                          |
| สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงเบอร์ 28 และ 36   | size 4  | 168-181                | 174                          |
| สารที่ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงเบอร์ 28 และ 17   | size 5  | 182-316                | 249                          |

เมื่อทำการเตรียม PZT เซรามิก พบว่ามีค่าความหดตัว 1.2 % และมีค่าความหนาแน่น  $7.156 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งภาพถ่ายผิวเซรามิกแสดงดังรูปที่ 2

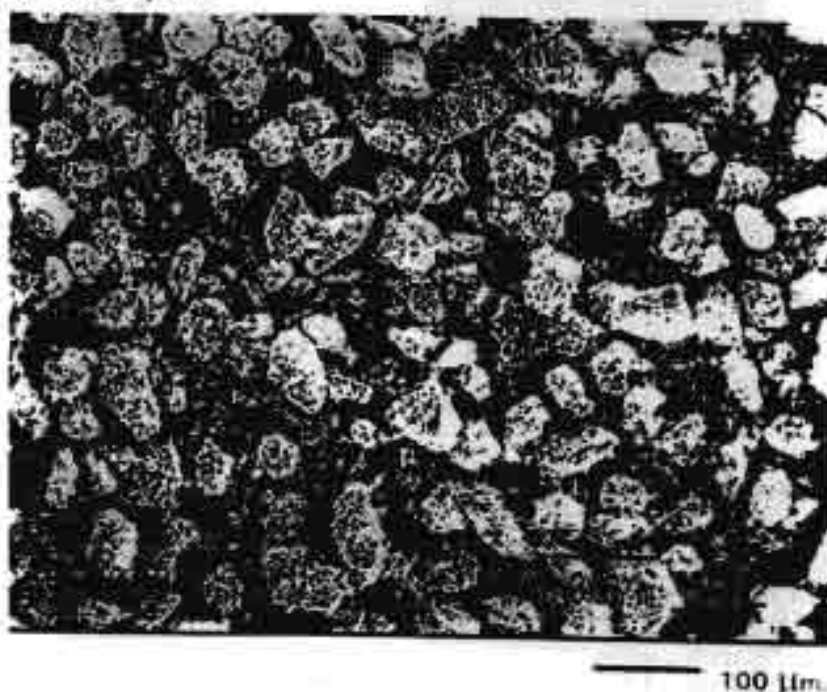


รูปที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของเม็ดเซรามิก PZT

ซึ่งภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่คัดขนาดแล้ว แสดงดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนผ่านตะแกรงไนลอนเบอร์ 140 (ผงสาร size 1 ขนาดเล็กกว่า 34  $\mu\text{m}$ )



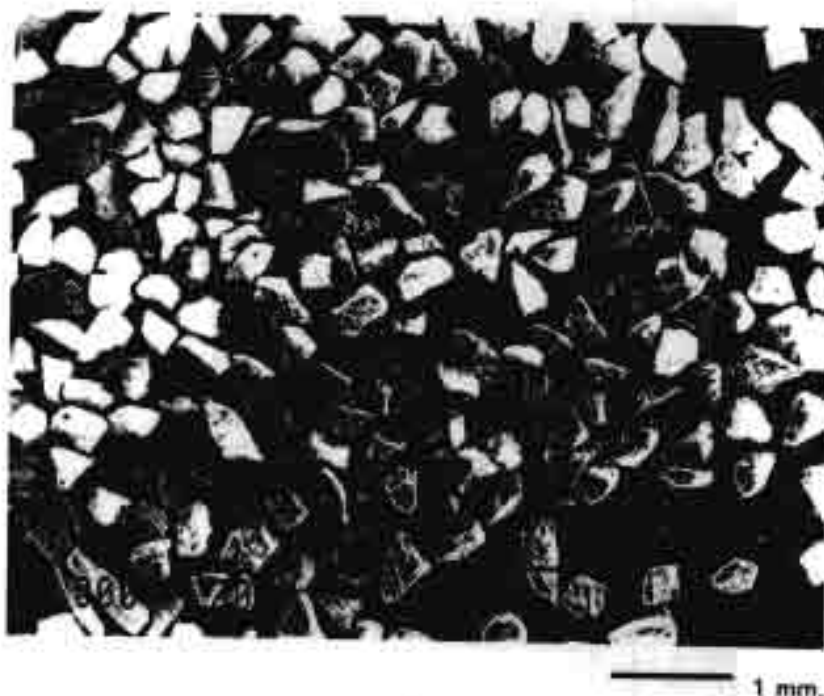
รูปที่ 4 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงไนลอนเบอร์ 120 และ 140 (ผงสาร size 2 ขนาดประมาณ 34-60  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงในลอนเบอร์ 36 และ 120 (ผงสาร size 3 ขนาดประมาณ 61-167  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงในลอนเบอร์ 28 และ 36 (ผงสาร size 4 ขนาดประมาณ 168-181  $\mu\text{m}$ )



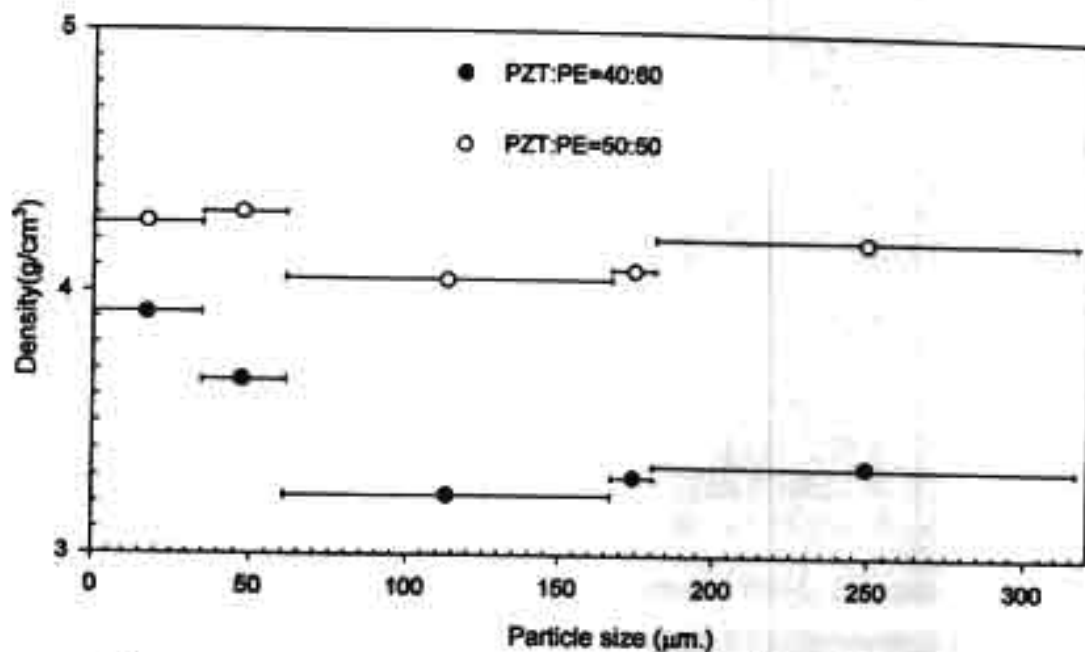
รูปที่7 ภาพถ่าย SEM ของผงเซรามิกที่ผ่านการบด-ร่อนค้ำระหว่างตะแกรงในลอนเบอร์ 28 และ 17 (ผงสาร size 5 ขนาดประมาณ 182-316  $\mu\text{m}$ )

เมื่อทำการเตรียมของผสมในสัดส่วน (PZT:PE) 40:60 และ 50:50 และวัดความหนาแน่น จะได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง

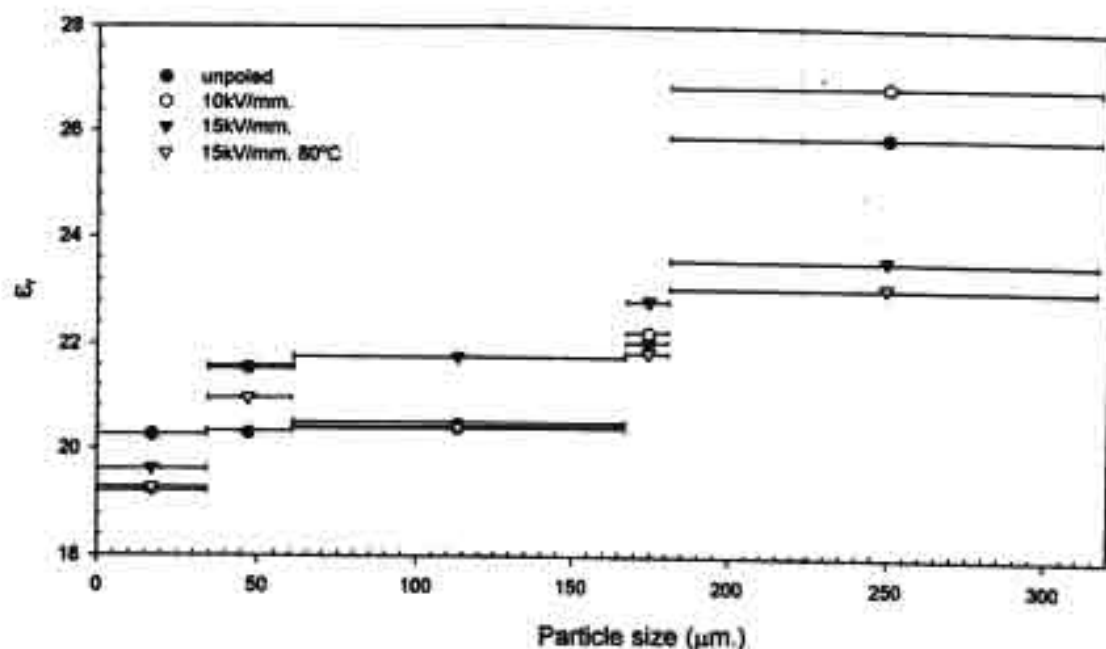
| สารตัวอย่าง             | ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|-------------------------|---------------------------------|
| PZT:PT = 40:60 (size 1) | 3.918                           |
| PZT:PT = 40:60 (size 2) | 3.662                           |
| PZT:PT = 40:60 (size 3) | 3.229                           |
| PZT:PT = 40:60 (size 4) | 3.229                           |
| PZT:PT = 40:60 (size 5) | 3.344                           |
| PZT:PT = 50:50 (size 1) | 4.207                           |
| PZT:PT = 50:50 (size 2) | 4.308                           |
| PZT:PT = 50:50 (size 3) | 4.050                           |
| PZT:PT = 50:50 (size 4) | 4.088                           |
| PZT:PT = 50:50 (size 5) | 4.201                           |

ซึ่งเมื่อพล็อตกราฟความหนาแน่นและขนาดอนุภาคของของผสมที่ผสมในอัตราส่วนต่างๆ จะได้ดังรูปที่ 8

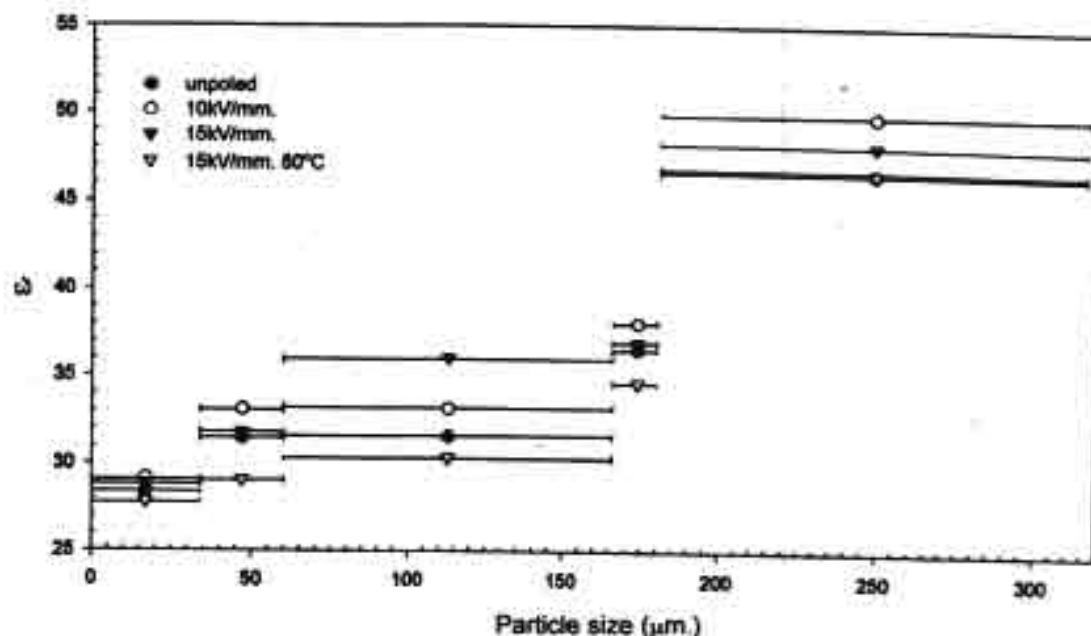


รูปที่ 8 กราฟความหนาแน่นกับขนาดของผงเซรามิก PZT ที่ใช้เตรียมของผสม

จากนั้นนำของผสมที่ได้มาทำจี้วและโพลที่ 10, 15 kV/min (ที่อุณหภูมิห้อง) และที่ 15 kV/min ณ อุณหภูมิ 80 °C ซึ่งผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกทั้งก่อนโพลและโพลแล้ว แสดงดังรูปที่ 9-10

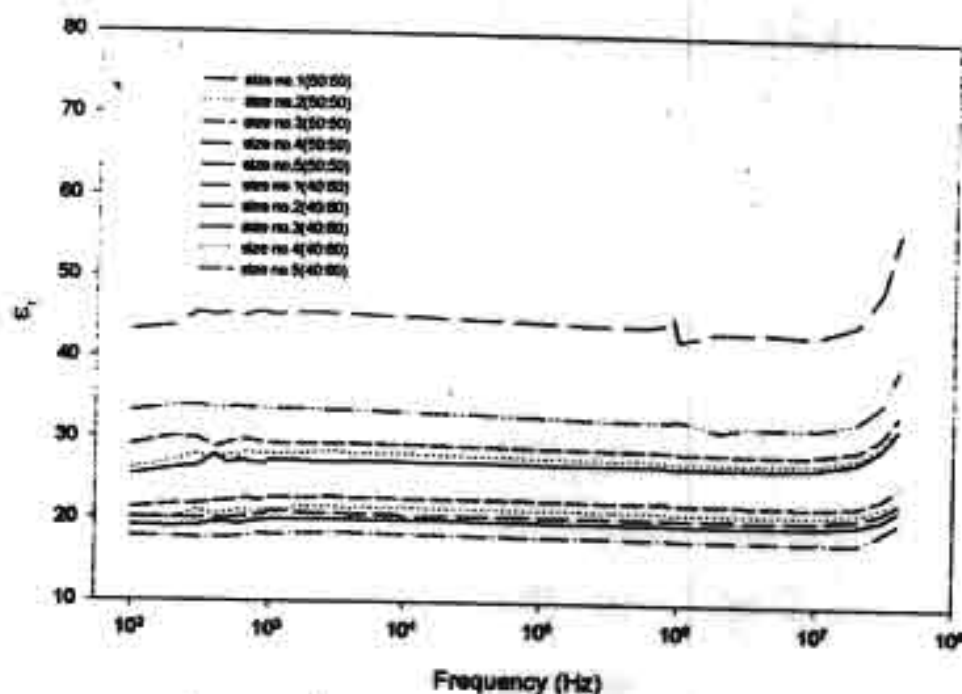


รูปที่ 9 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมที่เตรียมได้โดยใช้อัตราส่วนระหว่างผง PZT:PE = 40:60 โดยปริมาตรเทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม



รูปที่ 10 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของของผสมที่เตรียมได้โดยใช้อัตราส่วนระหว่างผง PZT:PE = 50:50 โดยปริมาตรเทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม

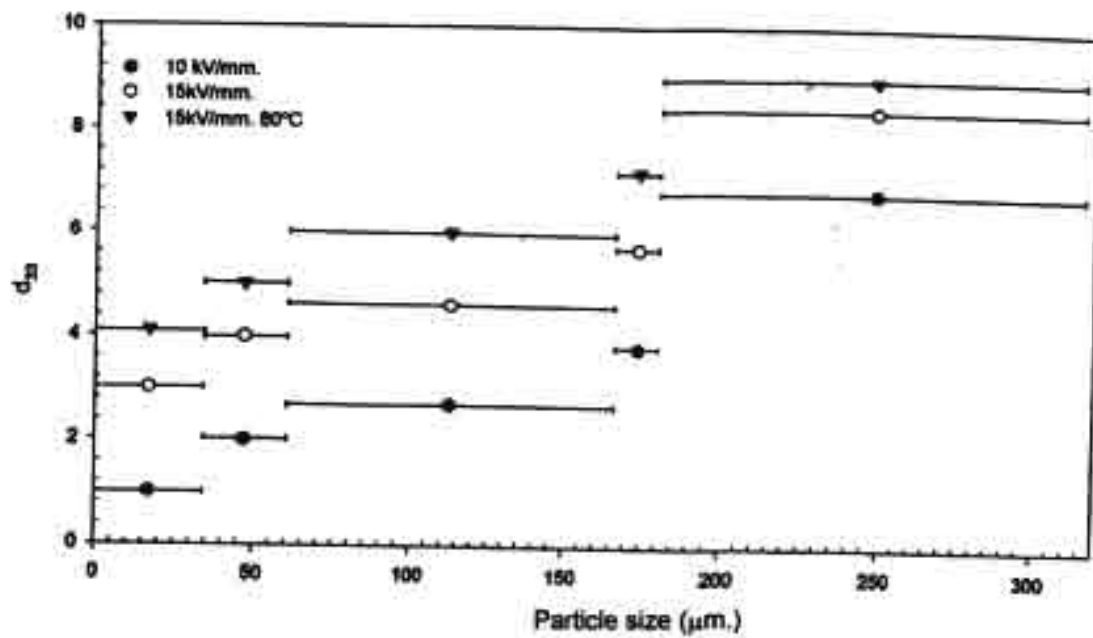
และเมื่อทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกของของผสม ณ ความถี่ต่างๆ ของสารตัวอย่างที่ โพลที่ 15 kV/min ณ อุณหภูมิ 80 °C จะได้ดังรูปที่ 11



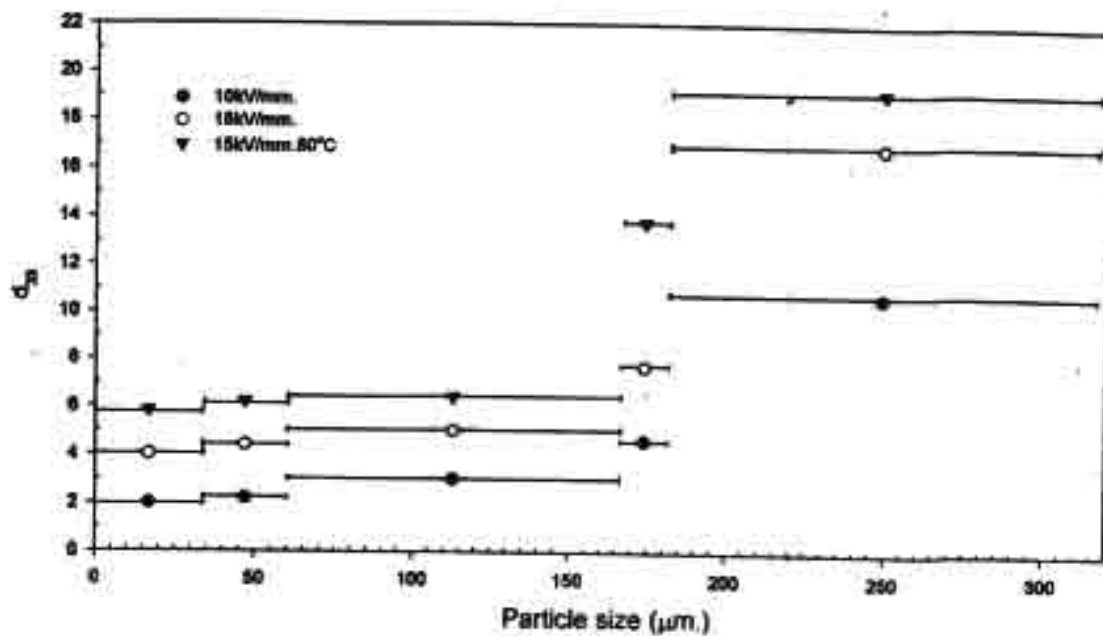
รูปที่ 11 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของรองผสมเทียบกับความถี่

จะเห็นได้ว่าค่าไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นซึ่งยังคงสอดคล้องกับผลของ Enomoto และ Yamaji [13] คณะวิจัยของ Chattopashyay [9] และคณะวิจัยของ Lee [11] ผู้ศึกษา  $\text{BaDy}_{0.08}\text{TiO}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$  และ วัสดุผสมแบบ 0-3 ของ  $\text{PbTiO}_3$  และ dielectric gel ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Han และคณะ [14] พบว่า ในกรณีของวัสดุผสมระหว่าง  $\text{PbTiO}_3$  และ polyvinylidene fluoride polymer จะไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าว นอกจากนั้นแล้ว Waller และคณะ [15] พบว่า การใช้การ pole แบบ coroa จะช่วยให้ได้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกดีขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ พบว่าการ pole ไม่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก

ผลการวัดค่า  $d_{33}$  ของรองผสมที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กัน แสดงดังรูปที่ 12-13 จากการทดลองพบว่า ค่า  $d_{33}$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการ pole และ สนามไฟฟ้า นอกจากนั้นแล้ว ค่า  $d_{33}$  เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น การที่ค่า  $d_{33}$  และ  $\epsilon_r$  สูงขึ้น น่าจะเป็นเพราะว่าปริมาณความไม่สมบูรณ์ของผิวรอยต่อระหว่าง PE และ PZT ลดลง เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการ pole อย่างมาก นอกจากนั้นแล้วการขัดผิวหน้าก่อนกระบวนการวัดค่าทางไฟฟ้า น่าจะทำให้ค่า  $d_{33}$  ของวัสดุผสมที่มี PZT ขนาดอนุภาคเล็กมากกว่าวัสดุผสมที่มี PZT ขนาดอนุภาคใหญ่ และเมื่อทำการศึกษาผิวของรองผสมโดยการถ่ายภาพ SEM จะได้ดังรูปที่ 14-23



รูปที่ 12 ค่า  $d_{33}$  ของของผสมที่เตรียมได้โดยใช้อัตราส่วนระหว่างผง PZT:PE = 40:60 โดยปริมาตรเทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม

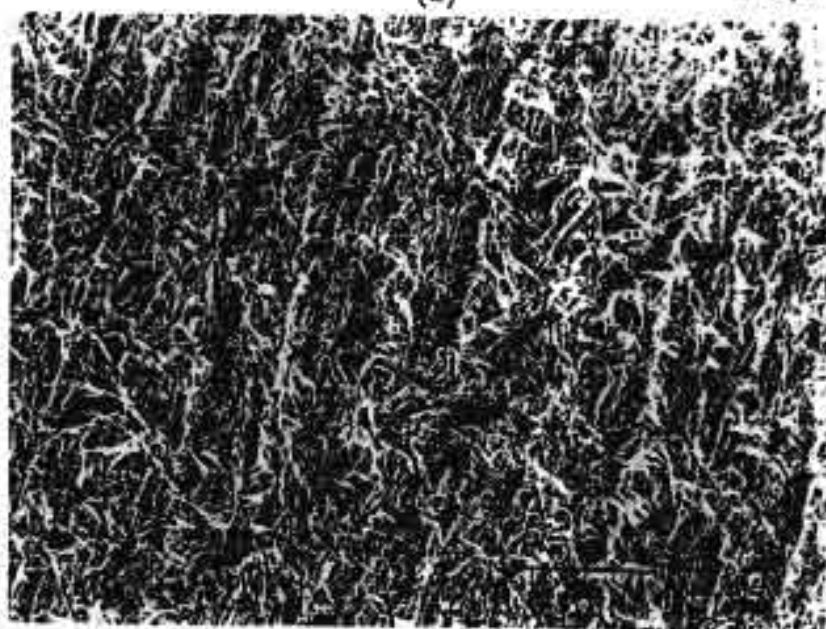


รูปที่ 13 ค่า  $d_{33}$  ของของผสมที่เตรียมได้โดยใช้อัตราส่วนระหว่างผง PZT:PE = 50:50 โดยปริมาตรเทียบกับขนาดของผงเซรามิกที่ใช้เตรียมของผสม



(a)

100 μm



(b)

100 μm

รูปที่ 14 การกระจายของอนุภาคที่แรดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60 ซึ่ง  
เตรียมจากผงเซรามิกขนาดเล็กกว่า 34 μm (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



(a)

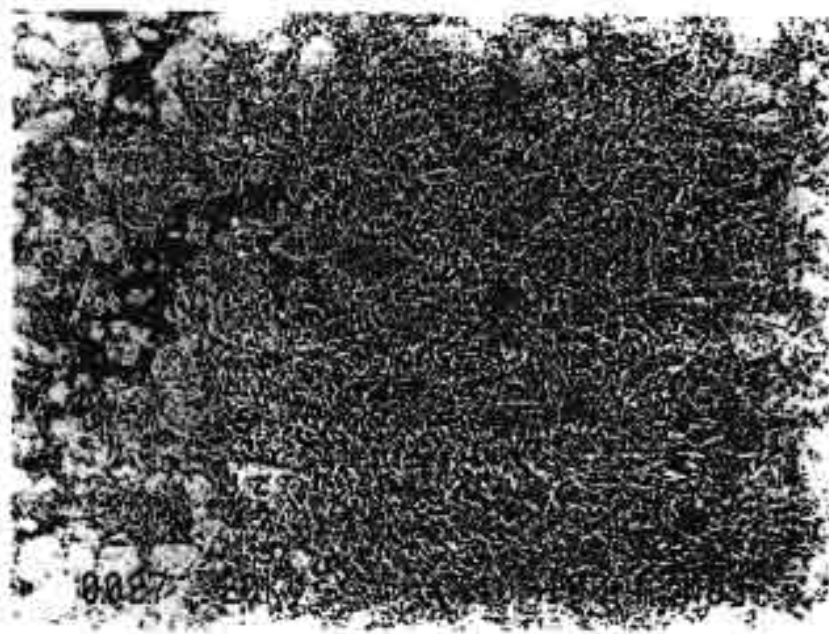
100 μm



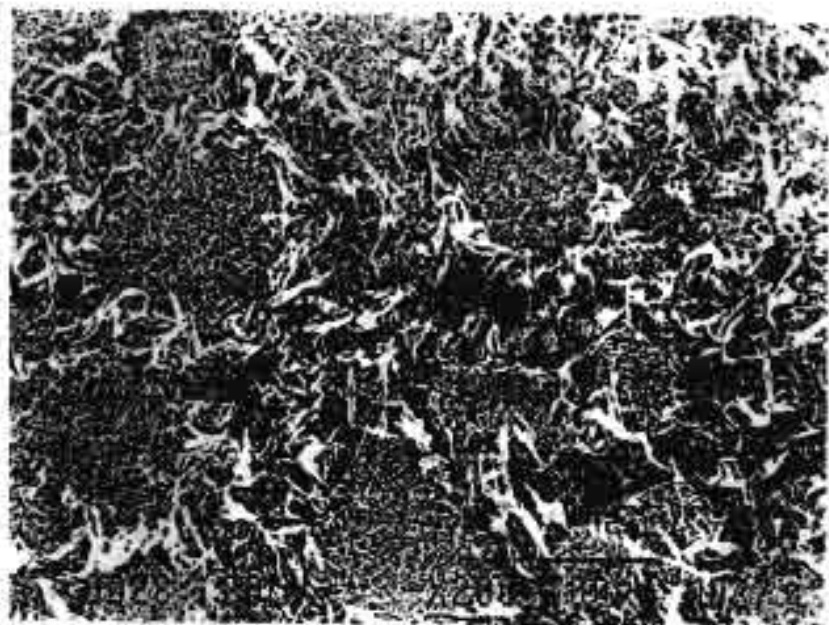
(b)

100 μm

รูปที่ 15 การกระจายของอนุภาคพีแอนด์ทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60 ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 34-60 μm (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า

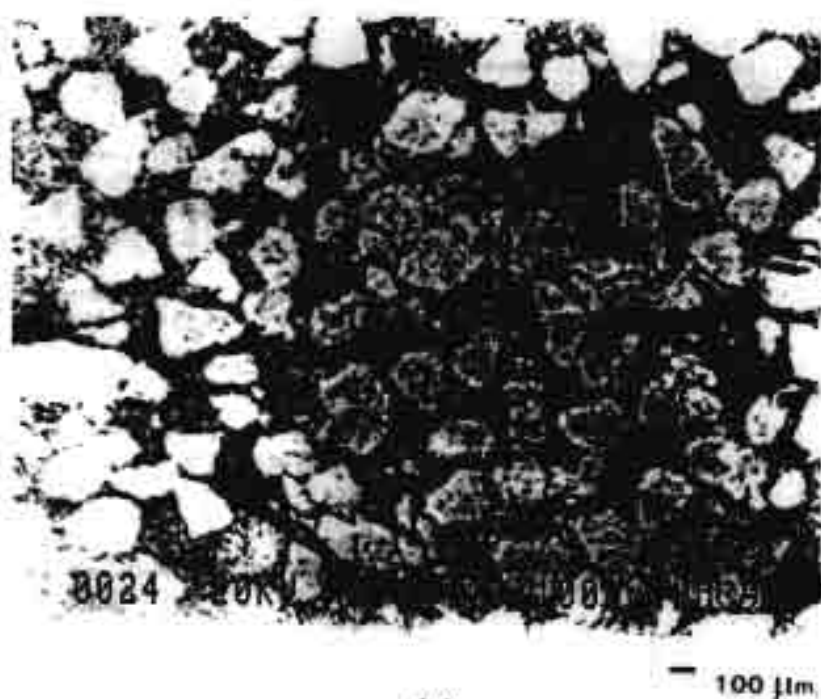


(a)

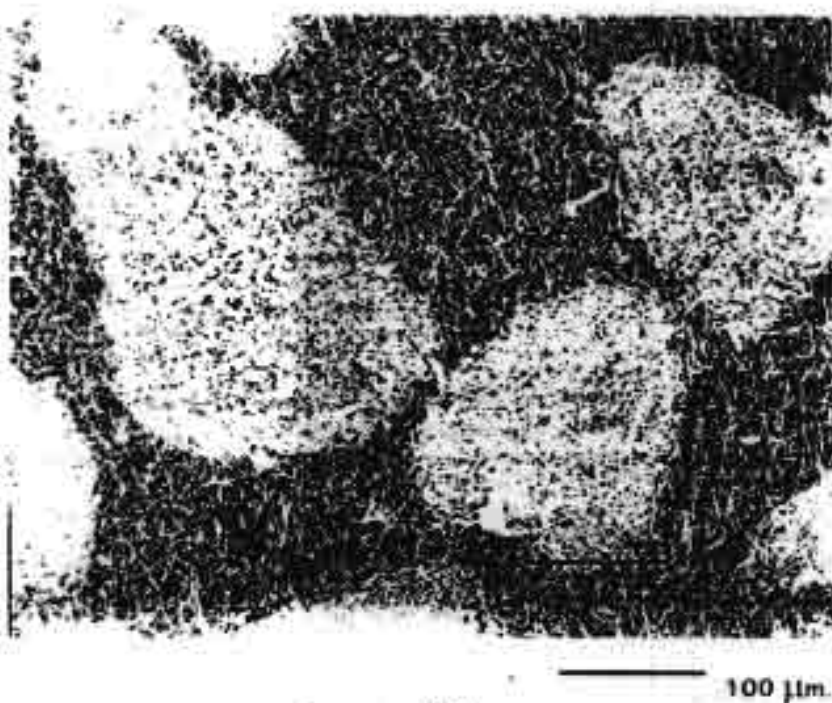


(b)

รูปที่ 16 การกระจายของอนุภาคที่แคดทิโนเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60 ซึ่งเตรียมจากผง เซรามิกขนาดประมาณ 61-167  $\mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า

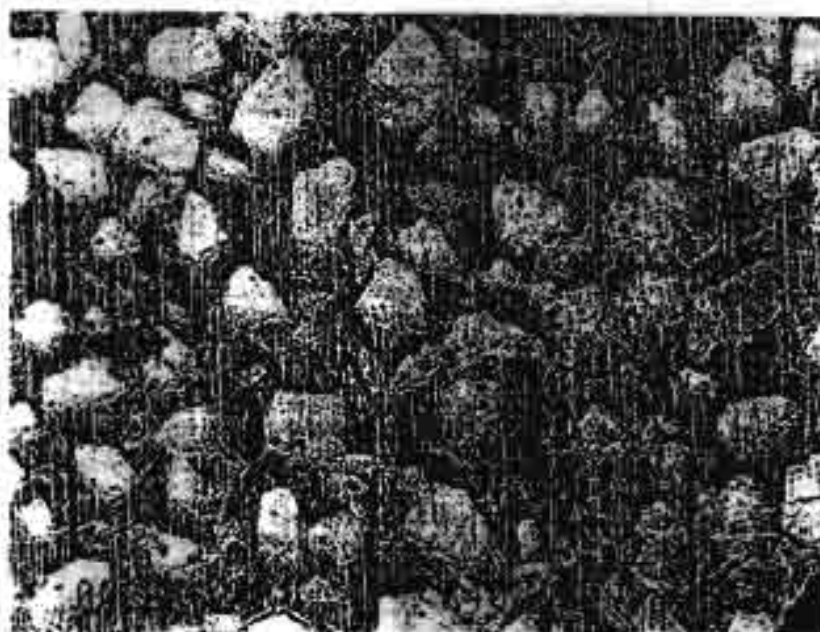


(a)



(b)

รูปที่ 17 การกระจายของอนุภาคซีรอนในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60 ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 168-181  $\mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



(a)

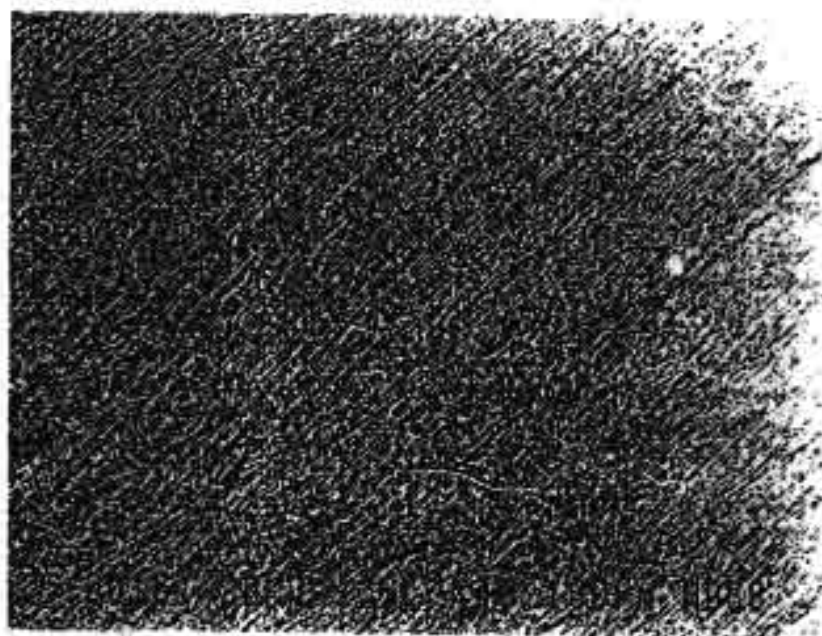
100  $\mu\text{m}$ .



(b)

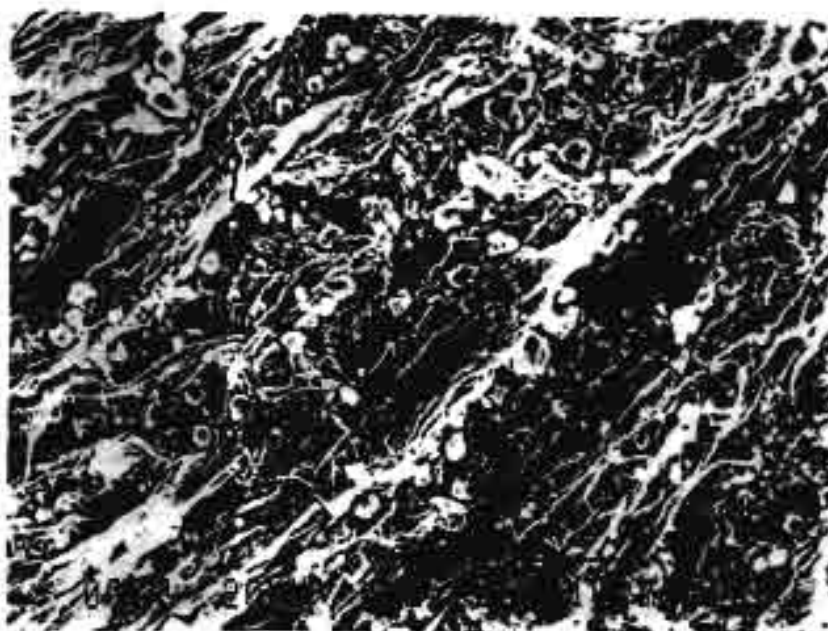
100  $\mu\text{m}$ .

รูปที่ 18 การกระจายของอนุภาคฟีนแซดทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 40:60 ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 182-316  $\mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



100  $\mu\text{m}$

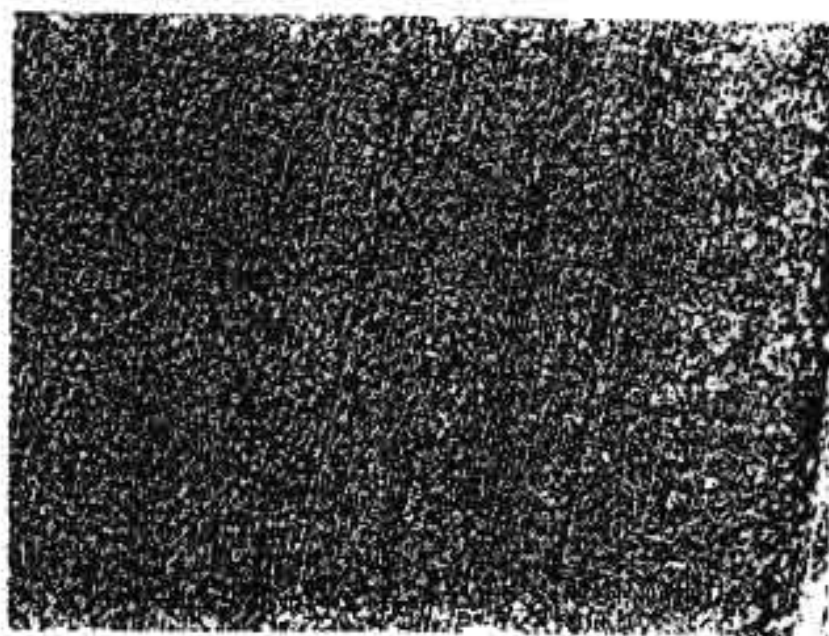
(a)



100  $\mu\text{m}$

(b)

รูปที่ 19 การกระจายของอนุภาคพีแอสต์ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50 ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดเล็กกว่า  $34 \mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



(a) 100  $\mu\text{m}$ .



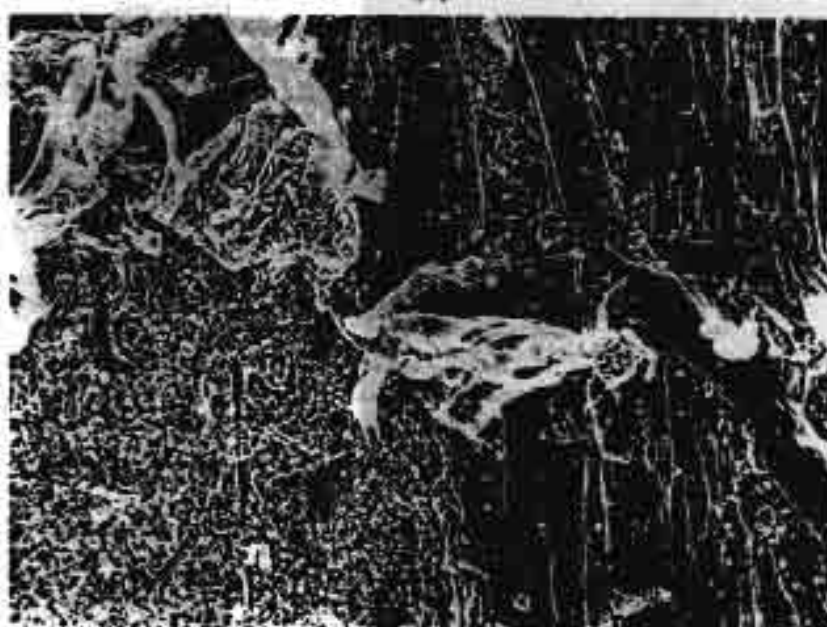
(b) 1  $\mu\text{m}$ .

รูปที่ 20 การกระจายของอนุภาคพีแชนด์ทีในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่ยึดราส่วน 50:50 ซึ่งเตรียมจากผง  
เซรามิกขนาดประมาณ 35-60  $\mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



— 100 μm.

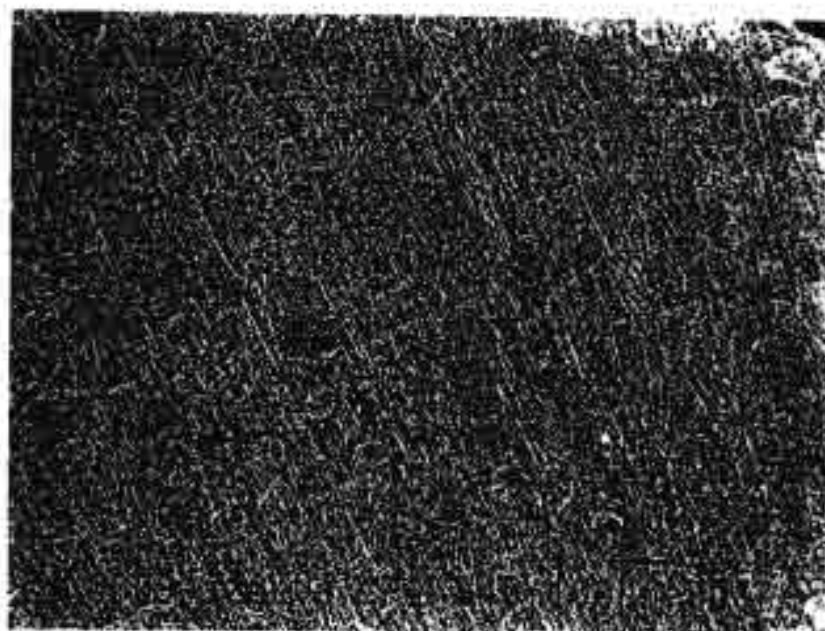
(a)



— 10 μm.

(b)

รูปที่ 21 การกระจายของอนุภาคที่แข็งทึบในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50 ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 61-167 μm (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



— 100  $\mu\text{m}$ .

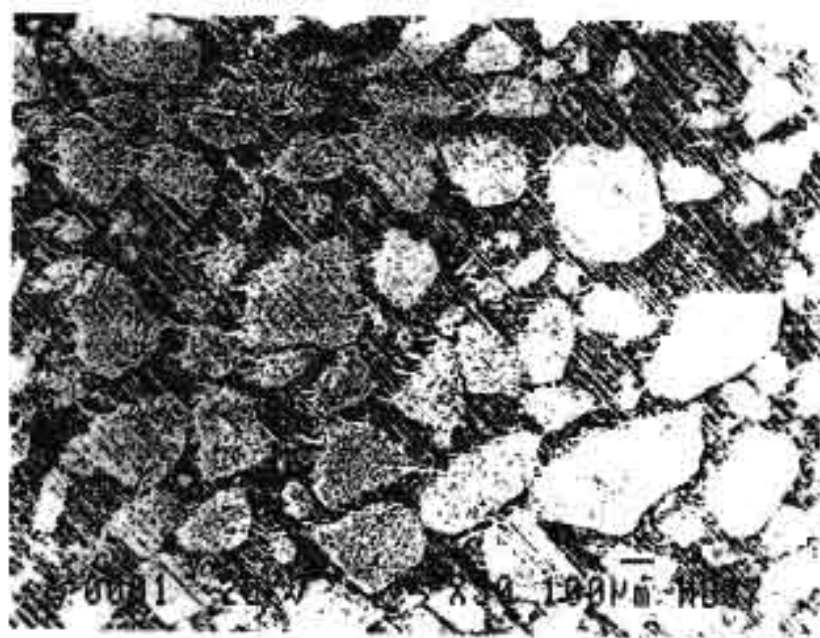
(a)



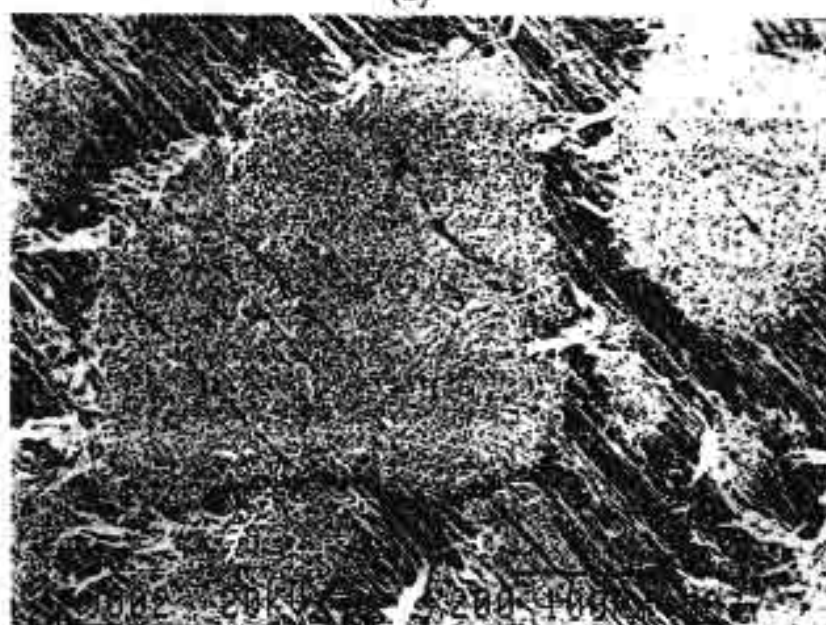
— 100  $\mu\text{m}$ .

(b)

รูปที่ 22 การกระจายของอนุภาคที่แทรกในเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50 ซึ่งเตรียมจากผง  
เซรามิกขนาดประมาณ 168-181  $\mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า



(a)



(b)

รูปที่ 23 การกระจายของอนุภาคพินแซดทีโนเมตริกซ์พอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 50:50 ซึ่งเตรียมจากผงเซรามิกขนาดประมาณ 182-316  $\mu\text{m}$  (a) ขยาย 40 เท่า (b) ขยาย 200 เท่า

จากรูปพบว่าผิวรอยต่อของ PE และ PZT จะมีความไม่สมบูรณ์ เช่น มีรอยแยกและรอยการไม่ประสานกันของเนื้อสารทั้งสองโดยทั่วไปแล้ว การกระจายตัวของอนุภาคนาโนขนาดเล็กจะดีกว่าขนาดใหญ่

#### 2.4 สรุปผลการทดลอง

1. ขนาดของอนุภาคมีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก โดยขนาดอนุภาคใหญ่จะมีค่าไดอิเล็กตริกสูง

2. ขนาดอนุภาคมีผลต่อค่า  $d_{33}$  โดยเมื่อขนาดอนุภาค  $d_{33}$  จะเพิ่มขึ้น

3. การโพลาไม่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก แต่จะมีผลต่อค่า  $d_{33}$  ซึ่ง

หมายเหตุ น่าจะเป็นเพราะว่าปริมาณความไม่สมบูรณ์ของผิวรอยต่อระหว่าง PE และ PZT ลดลงเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการpole อย่างมาก

## เอกสารอ้างอิง

## ตอนที่ 1

## บทที่ 2

1. R. E. Newnham, Ann. Rev. Mater. Sci. 16(1986) 47.
2. A. J. Moulson and J. M. Herbert, in "Electroceramics : materials, properties and application"(Chapman and Hall, London, 1990) 310.
3. H. Banno, Ferroelectric. 50(1983) 3.
4. R. Fries and A. J. Moulson, J. Mater. Sci. 5 (1994) 238.
5. H. G. Lee and H. G. Kim, J. Am. Ceram. Soc. 72(6)(1989) 938.
6. K. Ishikawa, K. Yoshikawa and N. Okada, Phys. Rev. B37(10)(1988) 5852.
7. K. Uchino, E. Sadanaga and T. Hirose, J. Am. Ceram. Soc. 72(8)(1989)1555.
8. W. L. Zhong, Y. G. Wang, P. L. Zhang and B. D. Qu, Phys. Rev. B50(2)(1994)698.
9. S. Chattopadhyay, P. Ayyub, V. R. Palker and M. Multani, Phys. Rev. B52,18 (1995)13177.
10. H. I. Hsiang and F. S. Yen, J. Am. Ceram. Soc., 79(4)(1996)1053.
11. M. H. Lee, A. Halliyal, and R. E. Newnham, J. Am. Ceram. Soc., 72(6)(1989)986.
12. Annual Book of ASTM. Standards, Section 3, Designation: E12-88, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1993.
13. Y. Enomoto and A. Yamaji, J. Am. Ceram. Bull. 60(5)(1981)566.
14. A. Safari, J. Phys. III France 4(1994)1129.
15. D. Waller, T. Iqbal and A. Safari, J. Am. Ceram. Soc. 72(2)(1989)322.

ตอนที่ 1

บทที่ 3

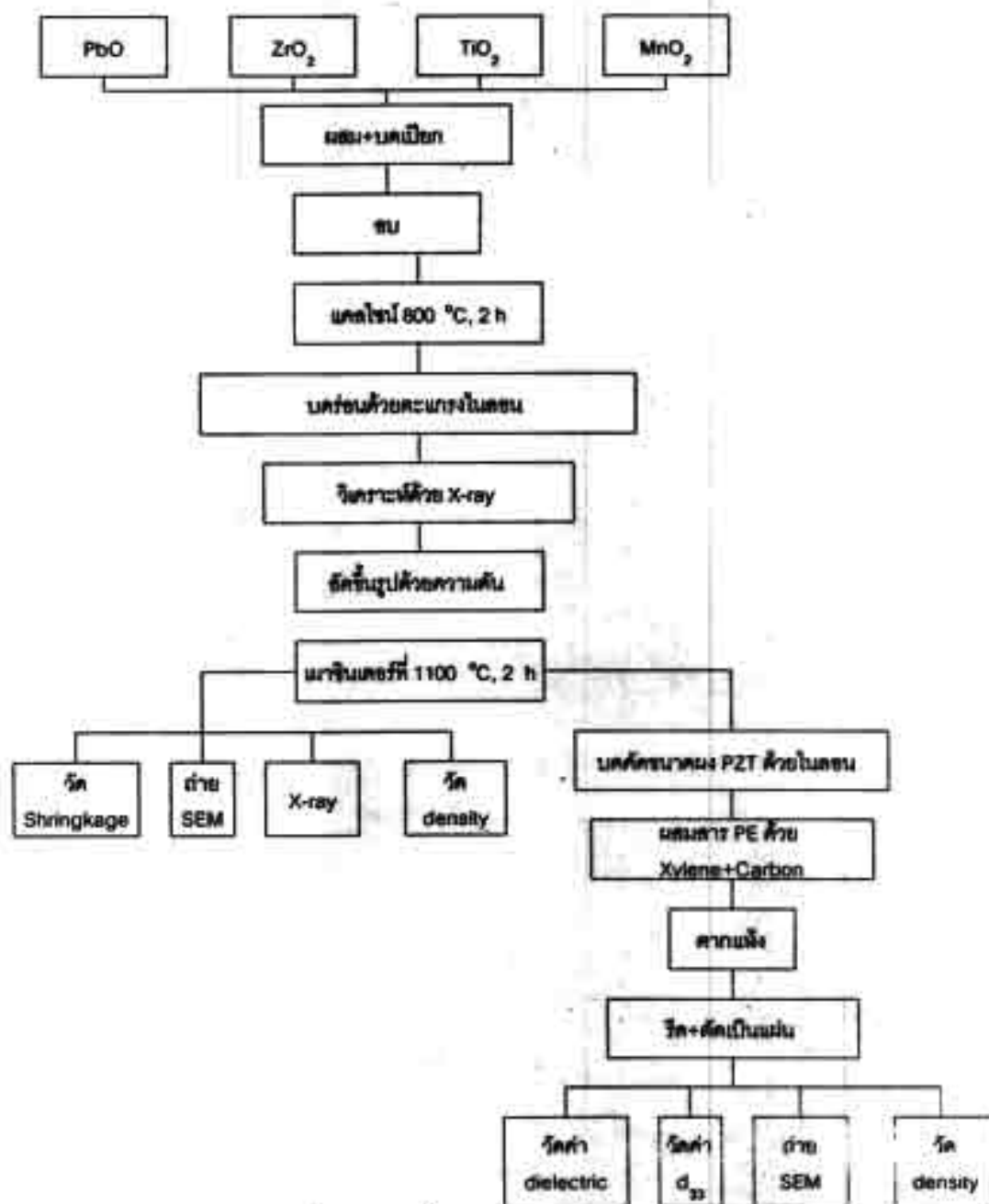
การศึกษาสมบัติของของผสม PZT และ/ PE ที่เจือ carbon และไม่เจือ carbon

### 3.1 บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา วัสดุผสมระหว่างเซรามิกส์และโพลิเมอร์ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ทำเป็นตัว sensor ทางความดัน ทำไฮโดรโฟน เป็นต้น[1-2] ซึ่งในบรรดาวัสดุผสมแบบต่าง ๆ พบว่าวัสดุผสมแบบ 0-3 (ซึ่งตัว dispers phase จะไม่ติดกันใน 3 มิติ ในขณะที่วัสดุที่เป็น matrix จะมีการเชื่อมติดกันใน 3 มิติ) เป็นวัสดุผสมที่ง่ายต่อการเตรียมและการศึกษา ซึ่งพบว่า คุณสมบัติของวัสดุผสมจะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ผงตัวกลาง วิธีการเตรียม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีวัสดุผสม piezo-polymer การจะทำการ pole นั้น ทำได้ยาก ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้ายากที่จะผ่าน polymer ดังนั้น จึงมีผู้พยายามที่จะพัฒนาการ pole [3-4] ในวัสดุ piezo-polymer ขึ้น วิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ การเติมสารนำไฟฟ้าลงในวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการ pole[3] ในการศึกษาครั้งนี้จะได้ศึกษาผลการเติมวัสดุ (สารนำไฟฟ้า) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง carbon แบบต่าง ๆ แล้วศึกษาผลของการเติมดังกล่าว

### 3.2 การทดลอง

ได้ทำการเตรียมของผสมระหว่าง PZT และ PE และมีการผสมคาร์บอนด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งของผสมที่เตรียมได้เป็นแบบ 0-3 ซึ่งขั้นตอนการเตรียมสารสรุปดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง

โดยองค์ประกอบของของผสมที่เตรียมได้สรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของของผสม

| Sample label | Compositions of the composites                                       |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| a            | 60 vol% of PZT ceramic +40 vol% of polyethylene (HDPE)               |
| b            | 58.5 vol% of PZT ceramic sintered with 1.5 vol%carbon +40 vol% of PE |
| c            | 58.5 vol% of PZT ceramic +1.5 vol%carbon+40 vol% ofHD PE             |

### 3.3 ผลการทดลอง

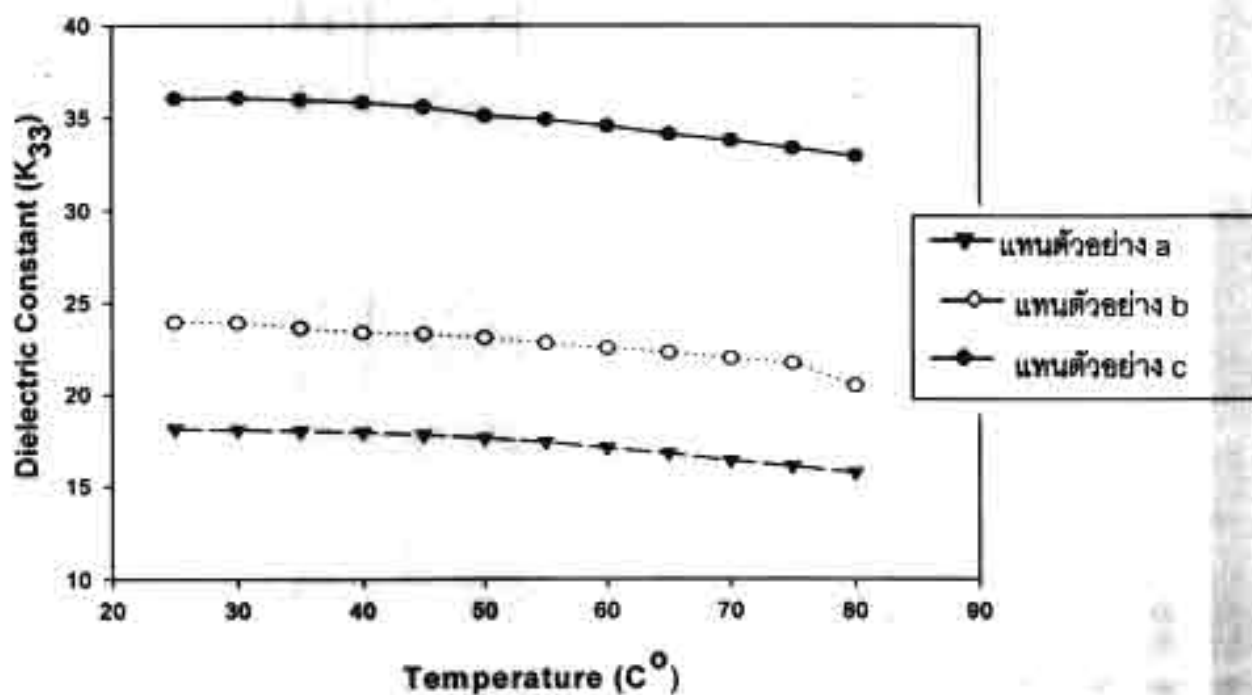
เมื่อทำการ X-ray สารที่ผ่านการแคลไซน์ พบว่าเป็น PZT โดยเทียบกับ JCPDS (No. 33-784) ผลการวัดค่าความหนาแน่นของของผสมแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าความหนาแน่นของของผสมแบบต่างๆ

| สารตัวอย่าง          | ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------|----------------------------------|
| PZT/HDPE = 60:40     | 4.755                            |
| 58.5PZT/40HDPE/1.5C  | 4.847                            |
| (1.5C-58.5PZT/40HDPE | 4.877                            |

จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมแบบต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน

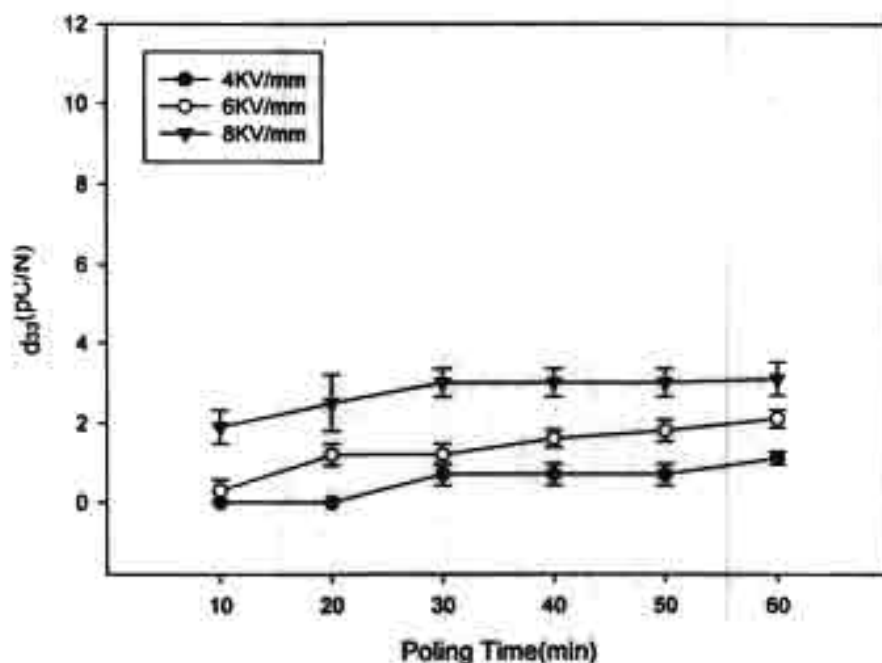
ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของของผสมแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2



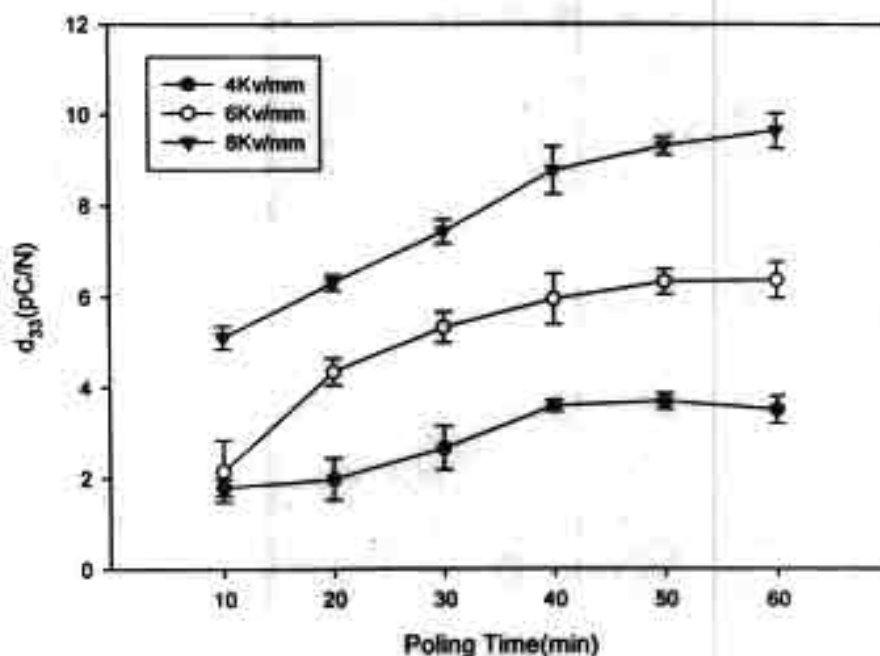
รูปที่ 2 ค่าไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิต่างๆ ของของผสม

หากผลการทดลองจะเห็นว่าที่อุณหภูมิค่าไดอิเล็กตริกมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงเล็กน้อย การลดลงของค่าไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิระหว่าง 60 ถึง 80°C น่าจะมาจากการขยายตัวของ HDPE ที่มากกว่า PZT นอกจากนั้นแล้วค่าไดอิเล็กตริกของสารตัวอย่าง c จะมากกว่าสารตัวอย่าง b และ a ตามลำดับ

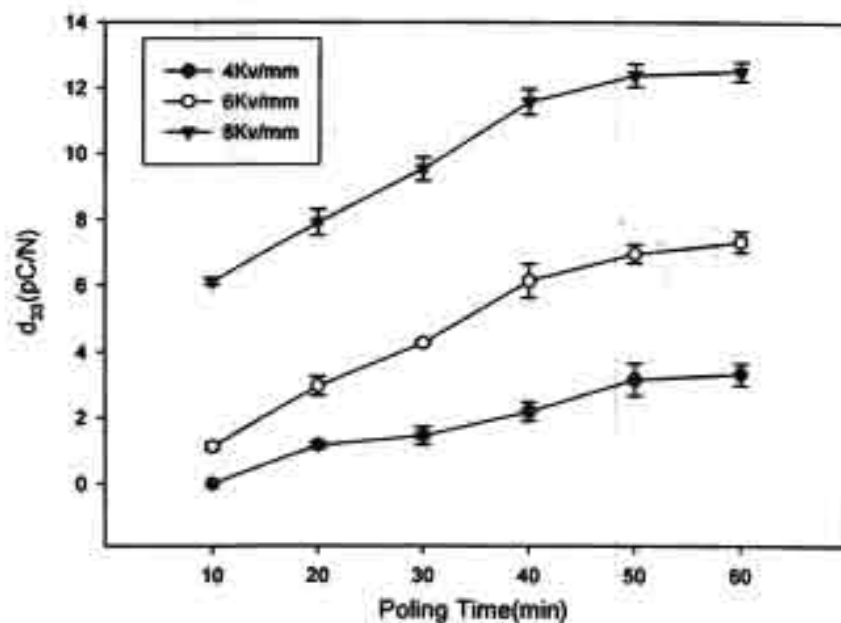
ผลการวัดค่า  $d_{33}$  ของของผสม ณ เงื่อนไขการโพลต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3-5



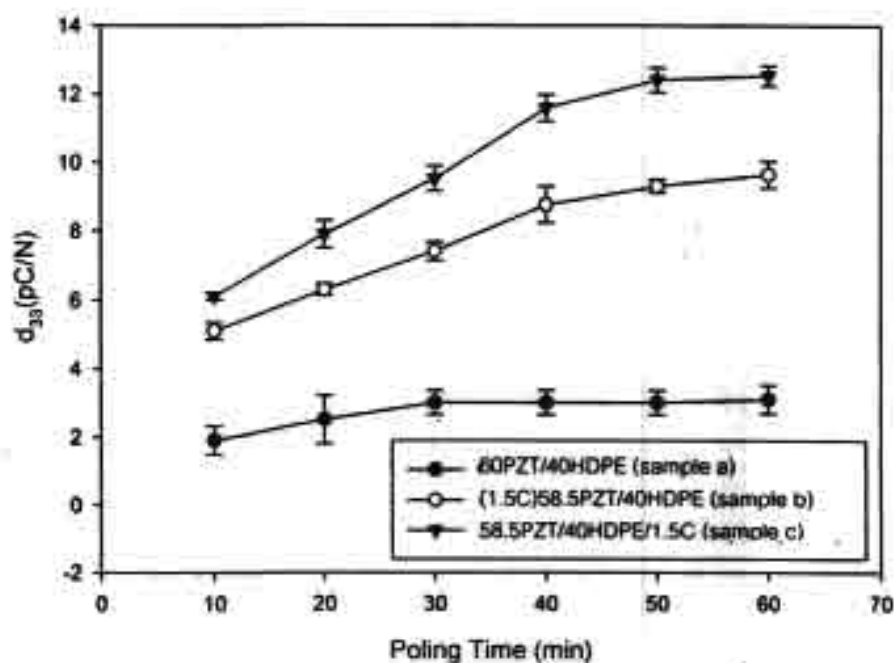
รูปที่ 3 ผลของสนามไฟฟ้าในการโพลที่มีต่อค่า  $d_{33}$  ของสารตัวอย่าง a



รูปที่ 4 ผลของสนามไฟฟ้าในการโพลที่มีต่อค่า  $d_{33}$  ของสารตัวอย่าง b



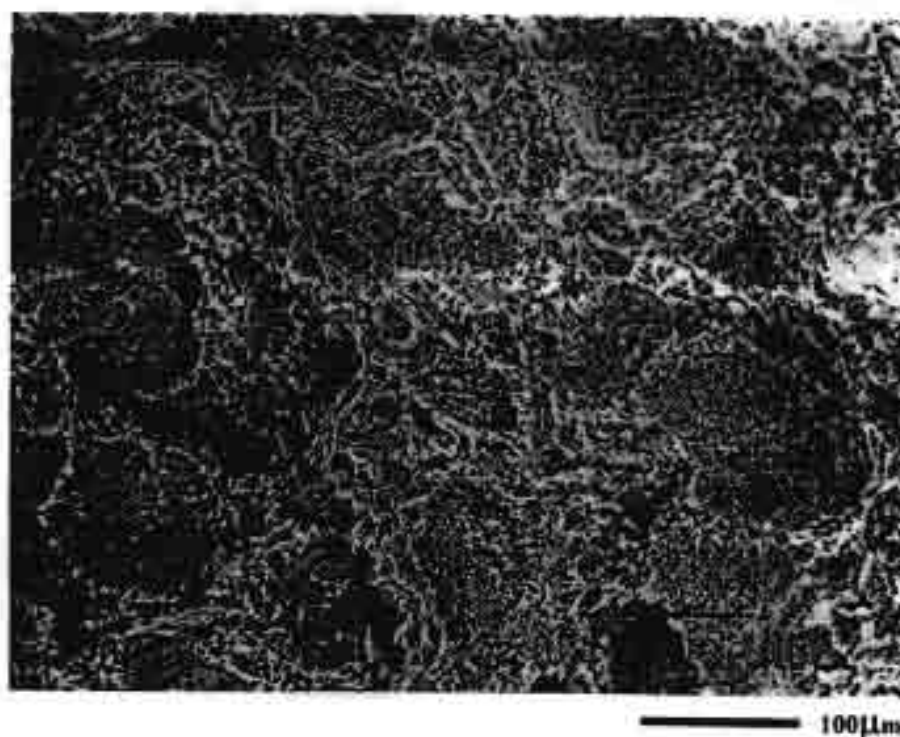
รูปที่ 5 ผลของสนามไฟฟ้าในการโพลที่มีต่อค่า  $d_{33}$  ของสารตัวอย่าง c



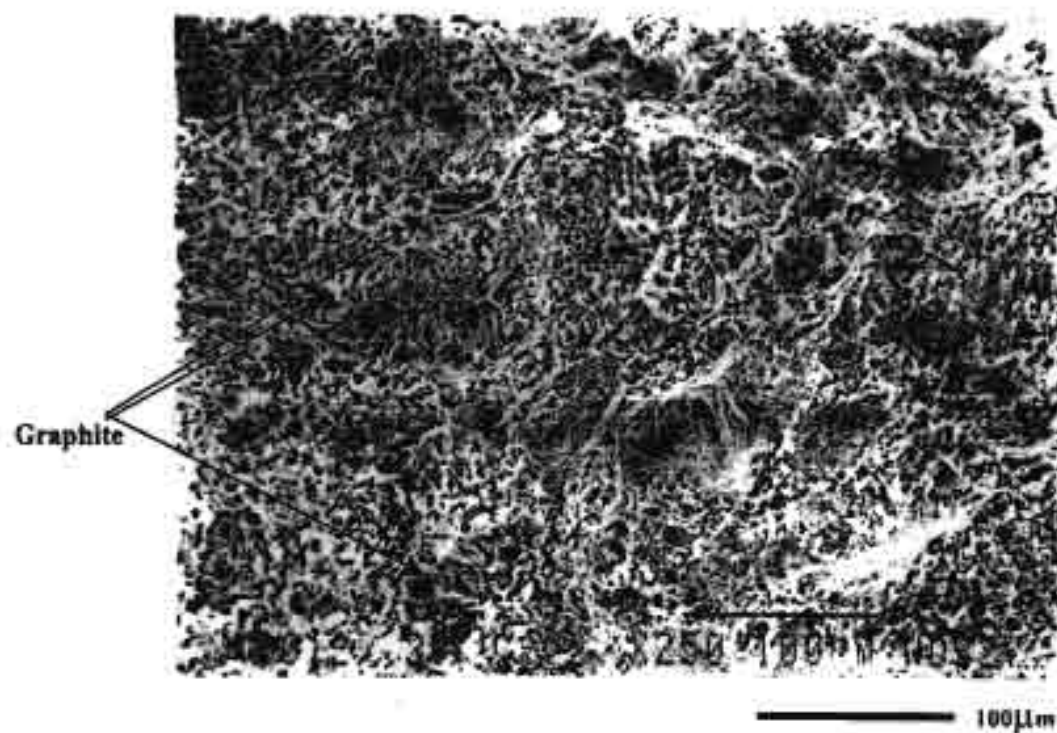
รูปที่ 6 ค่า  $d_{33}$  ของของผสมที่เวลาการโพลต่างๆ กัน โดยโพลที่ 8 kV/mm

จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่า  $d_{33}$  จะสูงขึ้นเมื่อเวลาการpoleมากขึ้น และที่เงื่อนไขการpole เดียวกันค่า  $d_{33}$  ที่มากที่สุดจะพบในสารตัวอย่างc รองลงมาคือ สารตัวอย่างb และa ตามลำดับซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการจะpole ในวัสดุผสมพีโซ-โพลีเมอร์ทำได้ยากซึ่งเกิดจากการที่โพลีเมอร์นำไฟฟ้าได้ยาก ดังนั้นการใส่คาร์บอนลงในวัสดุผสมจะช่วยให้การpoleทำได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามค่า  $d_{33}$  ที่สูงสูงน่าจะเกิดจากการปรากฏของทางเดินของการนำไฟฟ้าในสารตัวอย่างซึ่งมาจากคาร์บอนนั่นเองซึ่งคาร์บอนนี้เองจะเป็นตัวทำให้เกิดการbreakdown ได้ง่าย

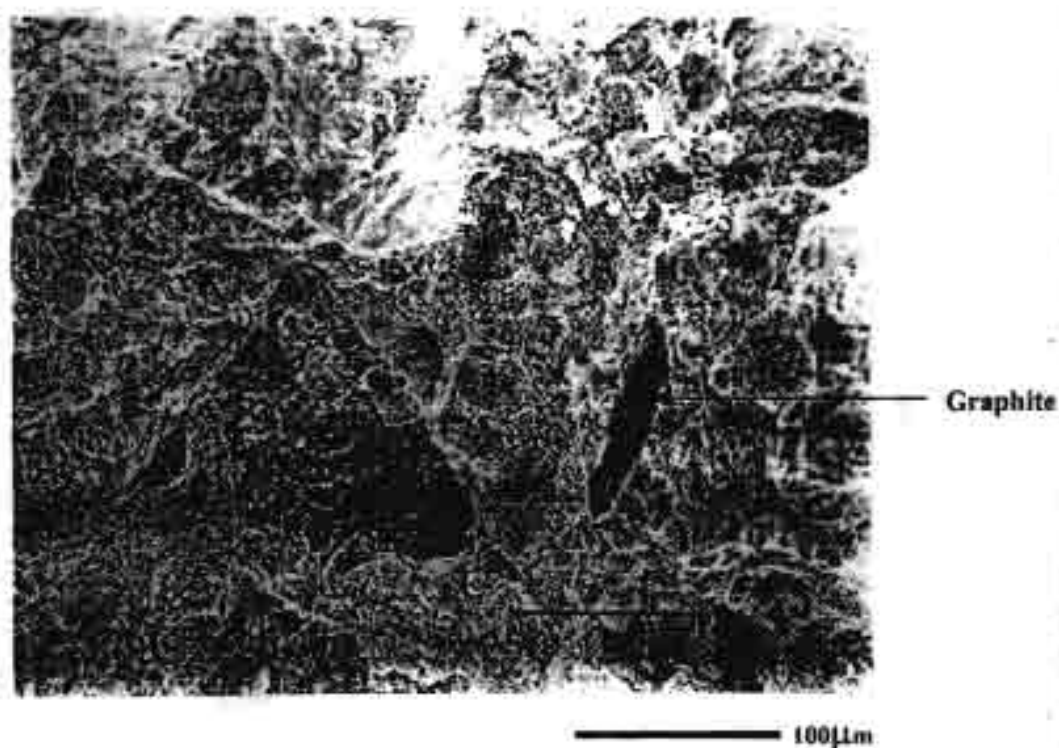
ผลการศึกษาผิวของของผสมด้วยภาพถ่าย SEM จะได้ดังรูปที่ 7-9



รูปที่ 7 ภาพถ่ายผิวของของผสม PZT:PE (60:40 Vol%)



รูปที่ 8 ภาพถ่ายผิวของของผสม PZT:PE:C (58.5:40:1.5 Vol%)



รูปที่ 9 ภาพถ่ายผิวของของผสม PZT+C:PE (58.5+1.5:40 Vol%)

จากรูป SEM จะสังเกต การกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนในกรณีต่างๆได้อย่างชัดเจน

### 3.4 สรุปผลการทดลอง

1. วิธีการผสมคาร์บอนในของผสมมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผสม PZT และ PE โดยถ้ามีการผสมคาร์บอนในเนื้อ PE จะทำให้ค่า  $d_{33}$  สูงขึ้น
2. วิธีการผสมคาร์บอนในของผสมไม่มีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก

หมายเหตุ การใส่ carbon ของผสม PZT และ PE จะทำให้ค่าความต้านทานของของผสมลดต่ำลง ซึ่งง่ายต่อการไหล

เอกสารอ้างอิง

ตอนที่ 1

บทที่ 3

1. R. E. Newnham, Ann. Rev. Mater. Sci. 16(1986) 47.
2. A. J. Moulson and J. M. Herbert, in "Electroceramics : materials, properties and application"(Chapman and Hall, London, 1990) 310.
3. D. Waller, T. Iqbal and A. Safari, J. Am. Ceram. Soc. 72(2)(1989)322.
4. S. Sa-Gong, A. Safari, S. J. Jang and R.E. Newnham, Ferroelectric Letters 5 (1986)39.

## ตอนที่ 2

การศึกษาสมบัติทางจุลภาคและการเปลี่ยนเฟสในสาร  $\text{PbZrO}_3$  (PZ)  
และ  $(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{ZrO}_3$

## ตอนที่ 2

### บทที่ 1

#### บทนำ

#### 1.1 สมบัติเชิงกลของเซรามิก

เซรามิกจัดเป็นวัสดุประเภทหนึ่งซึ่งมีความเปราะสูงสามารถเกิดการแตกได้ง่าย มีความแข็งแรงต่อการดึง (tensile strength) อยู่ในช่วงกว้างประมาณ 0.69 – 7000 MPa และมีความแข็งแรงต่อการกดอัด (compressive strength) ที่ดีมากโดยปกติจะมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงต่อการดึงประมาณ 5 – 10 เท่า นอกจากนี้เซรามิกยังจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีค่าความต้านทานต่อการร่อนแยก (fracture toughness) สูงอีกด้วยดังตัวอย่างแสดงในตาราง 1

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติเชิงกลของเซรามิกบางชนิด [1]

| วัสดุ                                               | ความหนาแน่น          | Compressive Strength |     | Tensile Strength |     | Flexural Strength |     | Fracture Toughness   |                      |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----|------------------|-----|-------------------|-----|----------------------|----------------------|
|                                                     | (g/cm <sup>3</sup> ) | MPa                  | ksi | MPa              | ksi | MPa               | ksi | MPa.m <sup>1/2</sup> | Ksi.m <sup>1/2</sup> |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99%)                | 3.85                 | 2585                 | 375 | 207              | 30  | 345               | 50  | 4                    | 3.83                 |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (hot pressed)        | 3.19                 | 3450                 | 500 | -                | -   | 690               | 100 | 6.6                  | 6.99                 |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (reaction-bonded)    | 2.8                  | 770                  | 112 | -                | -   | 255               | 37  | 3.6                  | 3.27                 |
| SiC (sintered)                                      | 3.1                  | 3860                 | 560 | 170              | 25  | 550               | 80  | 4                    | 3.83                 |
| ZrO <sub>2</sub> , 9% MgO<br>(Partially stabilized) | 5.5                  | 1860                 | 270 | -                | -   | 690               | 100 | 8+                   | 7.26+                |

จากตาราง 1 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดและความแข็งแรงต่อการดึงของเซรามิกนั้นมีค่าต่างกันมากกว่า 10 เท่า โดยมีปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เซรามิกแต่ละชนิดมีสมบัติเชิงกลที่ต่างกัน ดังนี้

- 1) โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ที่รวมถึงตำหนิชนิดต่างๆ เช่น รูพรุน และรอยร้าว
- 2) กระบวนการผลิต (processing) ที่เลือกใช้ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสัดส่วนของสารองค์ประกอบและค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่ได้

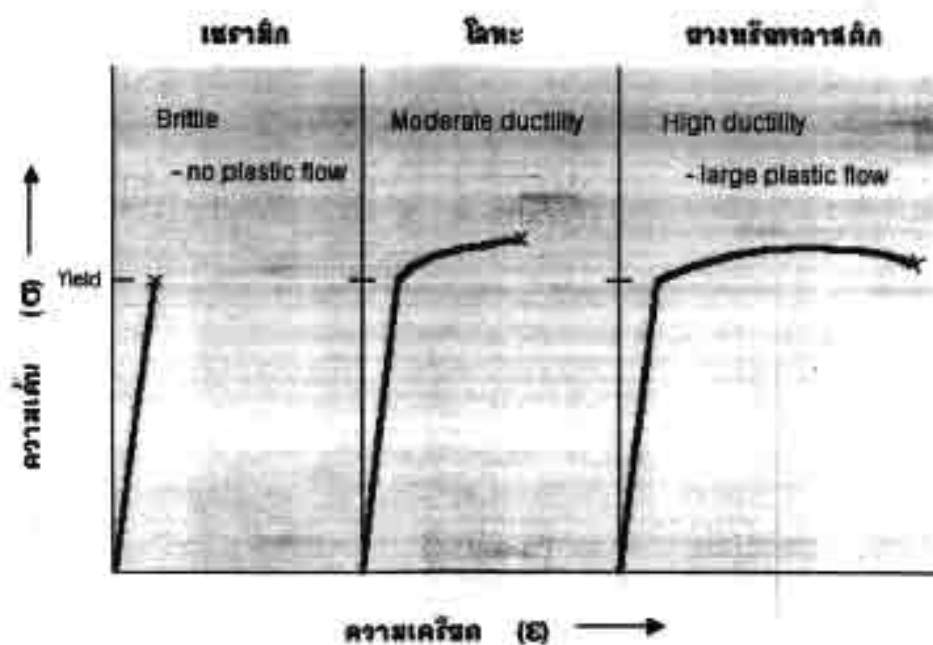
ปัจจัยทั้งสองข้อที่กล่าวมานี้มีความสัมพันธ์กันอยู่ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นภายในเซรามิกนั้นเป็นผลมาจากกระบวนการเตรียมเซรามิก ซึ่งจะต้องควบคุมสัดส่วนของสารตั้งต้นเพื่อให้มีองค์ประกอบตามที่ต้องการและมีความหนาแน่นสูงด้วยซึ่งหากมีการควบคุมกระบวนการ

การเตรียมที่เหมาะสมก็สามารถส่งผลทำให้เซรามิกที่ได้มีโครงสร้างจุลภาคตามที่ต้องการได้อีกด้วย

ถ้ารับสมบัติเชิงกลที่สำคัญของเซรามิกนั้นสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ค่าความแข็งแรง และ ค่าความแข็ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 1.1.1 ความแข็งแรง (Strength)

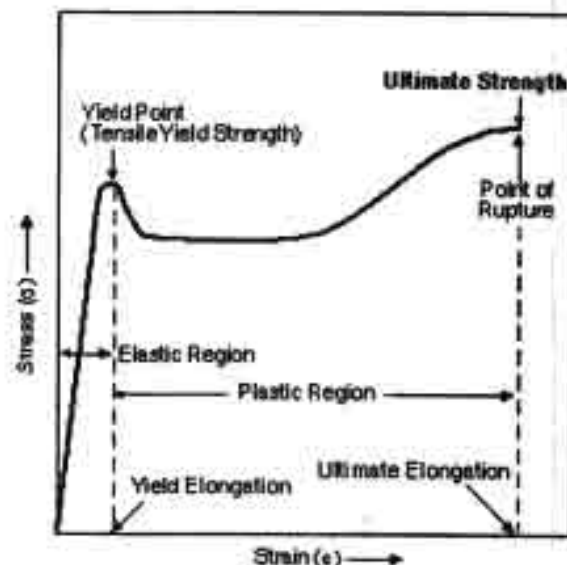
ค่าความแข็งแรงของเซรามิกเป็นค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมของเซรามิกในการต่อต้านแรงเชิงกลที่ได้รับอย่างต่อเนื่องในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงกด (compressive) แรงดึง (tensile) แรงเฉือน (shear) หรือ แรงกระแทก (impact) ซึ่งนิยมแสดงผลในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (stress) กับค่าความเครียด (strain) ของวัสดุนั้นๆ ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของวัสดุที่มีความเปราะและความยืดหยุ่นต่าง ๆ กัน



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุประเภทต่างๆ [4]

จากกราฟรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าวัสดุที่มีความเปราะสูง เช่น พวกเซรามิก จะมีช่วงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ที่น้อยมากหรือแทบจะกล่าวได้ว่าไม่มีเลยเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ ในขณะที่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงๆ เช่น พวกยางหรือพลาสติกนั้นจะมีช่วงการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่กว้างมากอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อทำการขยายกราฟที่แสดงความ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดออก จะทำให้สามารถทราบถึงรายละเอียดต่างๆ ได้มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 รายละเอียดของพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด [2]

จากการวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 2 นี้ ทำให้สามารถบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุในรูปของ ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่สามารถหาได้จากค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียดหรือจากค่าความชันของกราฟในช่วงที่มีการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) ซึ่งค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่ให้และความเครียดที่เกิดขึ้น ดังนี้

- 1) มอดูลัสของยัง (Young's Modulus , E)

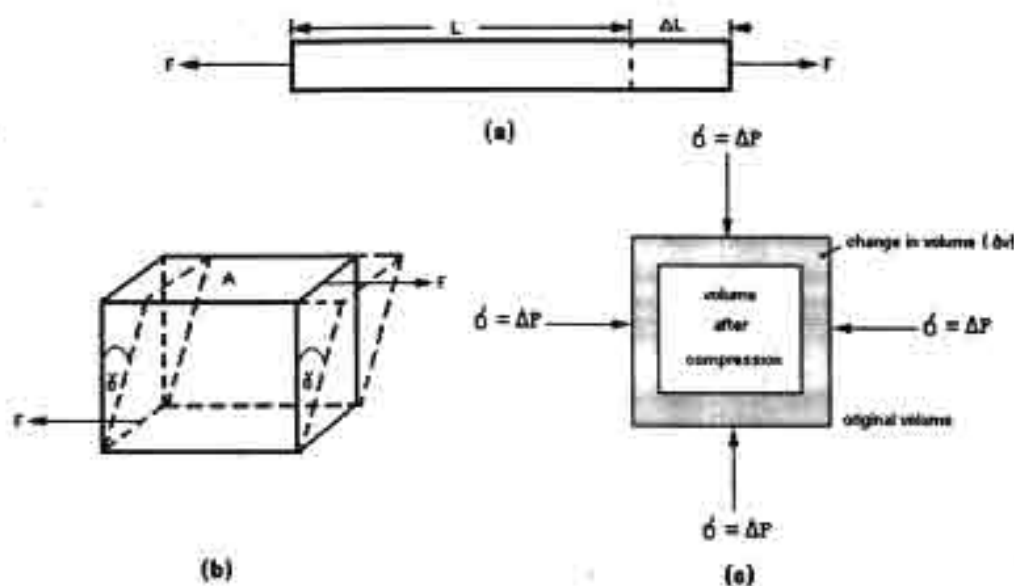
$$\begin{aligned}
 E &= \frac{\text{ความเค้นเชิงเส้น}}{\text{ความเครียดเชิงเส้น}} \\
 &= \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{(F/A)}{(\Delta L/L_0)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

## 2) มอดูลัสเฉือน (Shear Modulus, G)

$$\begin{aligned}
 G &= \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{ความเครียดเฉือน}} \\
 &= \frac{\tau}{\gamma} = \frac{(F/A)}{\gamma} \quad (2)
 \end{aligned}$$

## 3) มอดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk Modulus, K)

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียดปริมาตร}} \\
 &= \frac{\sigma}{\theta} = \frac{(\Delta P)}{(\Delta V/V)} \quad (3)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3 ลักษณะการทดสอบค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นแบบต่างๆ

(a) มอดูลัสของยัง (b) มอดูลัสเฉือน และ (c) มอดูลัสเชิงปริมาตร

นอกจากนี้ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 2 ยังสามารถใช้ในการหาค่าสมบัติเชิงกลได้อีกค่าหนึ่งคือ ค่าความต้านทานต่อรอยแตก (fracture toughness,  $K_{IC}$ ) โดยสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดแตกหัก แต่เนื่องจากเรามักนั้นเป็นวัสดุที่มีช่วงของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกน้อยมากทำให้พื้นที่บริเวณใต้

กราฟระหว่างความเค้นกับความเครียดของเรามีค่าน้อยส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อรอยแยกมีค่าน้อยตามไปด้วย ทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานต่อรอยแยกของเรามีได้จากการใช้สมการ

$$K_{IC} = Y\sigma(\pi a)^{1/2} \quad (4)$$

- เมื่อ  $K_{IC}$  คือ ค่าความต้านทานต่อรอยแยก  
 $Y$  คือ ตัวแปรที่ขึ้นกับขนาดของเรามี  
 $\sigma$  คือ ค่าความเค้น  
 $a$  คือ ลักษณะเฉพาะของรอยแยกที่เกิดขึ้นในเรามี

### 1.1.2 ความแข็ง (Hardness)

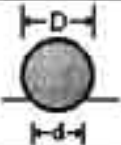
ค่าความแข็งของวัสดุเป็นค่าดัชนีที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการขีดข่วนที่บริเวณผิวของวัสดุ โดยปกติแล้วเรามีถูกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุที่มีค่าความแข็งสูงมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าเรามีเป็นวัสดุที่สามารถทนทานต่อการขีดข่วนได้ดี โดยที่วิธีการวัดค่าความแข็งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ตามลักษณะของการวัด ดังนี้

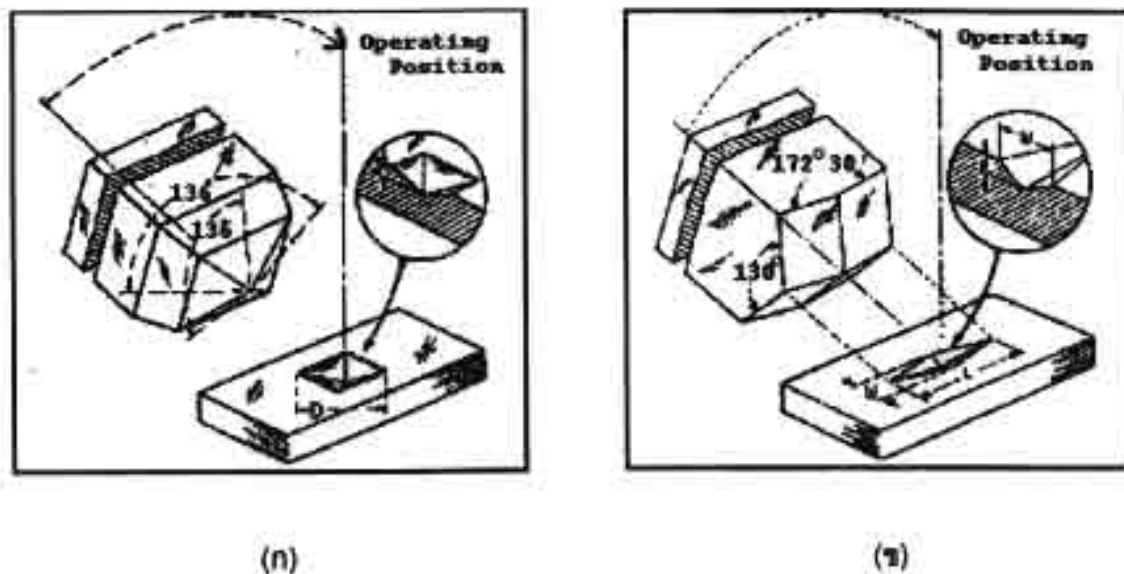
- 1) ค่าความแข็งเชิงเปรียบเทียบ เป็นวิธีการบ่งบอกถึงค่าความแข็งแรงของวัสดุโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าความแข็งของวัสดุมาตรฐานซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 10 ระดับ ในสเกลของ Mohs โดยวัสดุมาตรฐานที่มีความแข็งในระดับต่ำสุดคือ talc ซึ่งมีค่าระดับความแข็งเป็น 1 ส่วนวัสดุที่มีความแข็งในระดับสูงสุดคือ เพชร ซึ่งมีค่าระดับความแข็งเป็น 10 จากนั้นจึงนำวัสดุที่ต้องการทราบค่าความแข็งมาขีดกับวัสดุมาตรฐานแล้วเปรียบเทียบดูว่าอยู่ในระดับใด ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่เปรียบเทียบคร่าวๆ เท่านั้นจึงไม่มีความแน่นอนและไม่มีหน่วย
- 2) ค่าความแข็งที่ได้จากการกด (indentation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการหาค่าความแข็งของวัสดุมากที่สุดเนื่องจากให้ค่าเป็นตัวเลขที่แน่นอน โดยอาศัยหลักการกดวัสดุที่มีปลายขนาดเล็กลงไปบนผิวหน้าของวัสดุด้วยแรงขนาดหนึ่งที่ทราบค่า จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะของรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานซึ่งค่าความแข็งที่ได้จะเป็นการคำนวณจากแรงที่ให้เทียบกับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดขึ้น และอาจพิจารณาคร่าวๆ โดยเปรียบเทียบจากลักษณะของรอยกดได้ว่าถ้าหากรอยกดมีขนาดใหญ่และลึกกว่าก็แสดงว่าชิ้นงานนั้นมีค่าความแข็งต่ำกว่า สำหรับลักษณะของหัวกดนั้นก็มียูหลายแบบด้วยกันแต่แบบที่นิยมใช้ในการตรวจสอบค่าความแข็งที่นิยมใช้กับเรามีก็คือ

2.1) แบบวิกเกอร์ (Vickers indentation) ซึ่งเป็นหัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังแสดงในตาราง 2.2 และรูปที่.4 (ก)

2.2) แบบนู๊ป (Knoop indentation) ซึ่งเป็นหัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่.4 (ข)

ตารางที่ 2 ข้อมูลวิธีการทดสอบความแข็งของวัสดุด้วยหัวกดแบบต่างๆ [1]

| Test                | Indenter                                | Shape of indentation                                                                |                                                                                     | Load                      | Formular for hardness number                |
|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|
|                     |                                         | Side view                                                                           | Top view                                                                            |                           |                                             |
| Brinell             | 1mm sphere of steel or tungsten carbide |    |    | P                         | $BHN = \frac{2P}{\pi D[D-(D^2-d^2)^{1/2}]}$ |
| Vickers             | Diamond pyramid                         |    |    | P                         | $VHN = \frac{1.72P}{d^2}$                   |
| Knoop microhardness | Diamond pyramid                         |   |   | P                         | $KHN = \frac{14.2P}{f^2}$                   |
| Rockwell            |                                         |                                                                                     |                                                                                     |                           |                                             |
| A }<br>C }<br>D }   | Diamond cone                            |  |  | 60 kg<br>150 kg<br>100 kg | $R_A =$<br>$R_C =$<br>$R_D =$               |
| B }<br>F }<br>G }   |                                         |                                                                                     |                                                                                     | 100 kg<br>60 kg<br>150 kg | $R_B =$<br>$R_F =$<br>$R_G =$               |
| E                   |                                         |                                                                                     |                                                                                     | 100 kg                    | $R_E =$                                     |
|                     | 1/16-in-diameter steel sphere           |                                                                                     |                                                                                     |                           | 100-500t                                    |
|                     | 1/8-in-diameter steel sphere            |                                                                                     |                                                                                     |                           | 130-500t                                    |

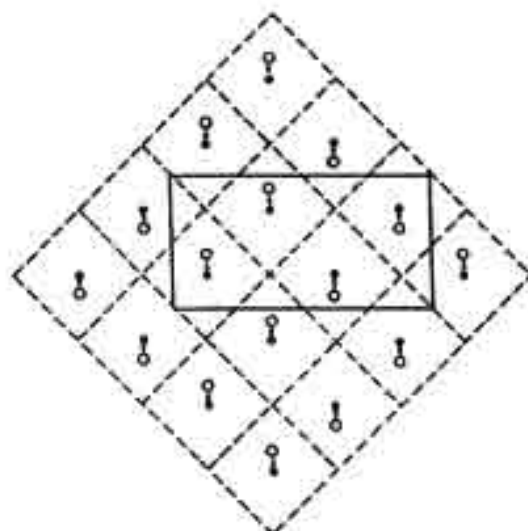


รูปที่ 4 รอยกดบนผิวหน้าของชิ้นงานที่เกิดจากหัวกดแบบ (ก) วิกเกอร์ และ (ข) แบบนูน [3]

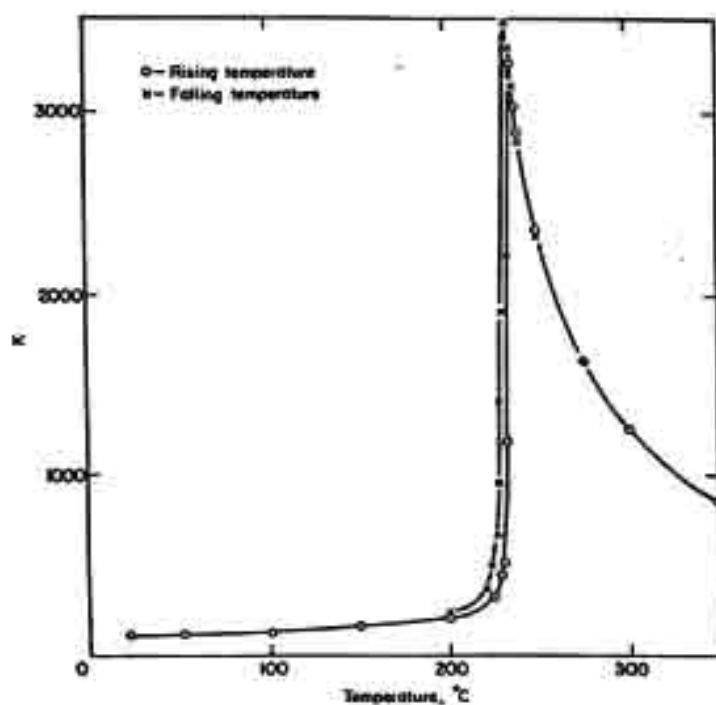
เนื่องจากเซรามิกเป็นวัสดุที่ค่อนข้างแข็งต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นจึงอาจทำการอนุมานในที่นี้ได้ว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่บริเวณผิวของเซรามิกนั้นน่าจะมีลักษณะเชิงกลใกล้เคียงกันกับโครงสร้างจุลภาคที่อยู่ภายในเนื้อเซรามิก และการทดสอบเชิงกลที่ผิวของชิ้นงานก็น่าจะนำมาหาค่าสมบัติเชิงกลอื่นๆ ของเซรามิกได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหาค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์และนูนนั้นยังสามารถนำค่าความแข็งที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ามอดูลัสของยังและค่าความต้านทานต่อรอยแตกได้อีกด้วย

## 1.2 เซรามิกเลดเซอร์โคเนต (PZ)

ในช่วงเริ่มแรกที่มีการศึกษาสมบัติของสาร PZ นั้น นักวิจัยต่างก็เชื่อกันว่าสาร PZ เป็นวัสดุที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริก จนกระทั่ง Sawaguchi และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาอย่างจริงจัง และรายงานว่า สาร PZ นี้ที่แท้จริงแล้วมีสมบัติเป็นสารแอนติเฟอร์โรอิเล็กตริก ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) โดยที่แต่ละหน่วยเซลล์มีแลตทิซพารามิเตอร์เป็น  $a = 5.87 \text{ \AA}$ ,  $b = 11.74 \text{ \AA}$  และ  $c = 8.20 \text{ \AA}$  นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าสาร PZ นี้จะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากออร์โธโรมบิกไปเป็นแบบคิวบิก (cubic) ที่อุณหภูมิคูรีของสาร PZ ประมาณ  $230^{\circ}\text{C}$

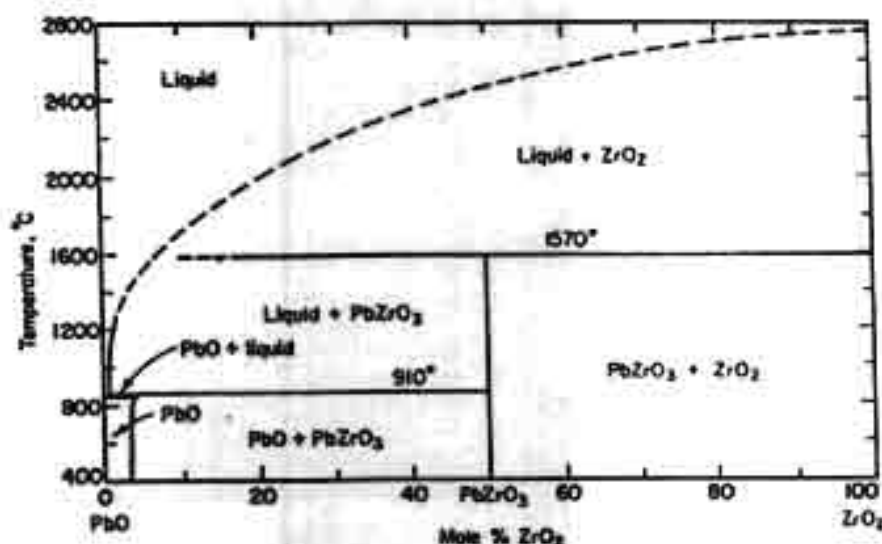


รูปที่ 5 แบบจำลองลักษณะของการจัดเรียงตัวของขั้วที่ตรงข้ามกัน (antipolar) ในระนาบ ab ของสาร PZ [5]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับอุณหภูมิของเซรามิก PZ [5]

สาร PZ นี้ เตรียมได้จากการผสมกันระหว่างเลคออกไซด์ ( $\text{PbO}$ ) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ ( $\text{ZrO}_2$ ) จากแผนภาพเฟสไดอะแกรมของระบบ  $\text{PbO-ZrO}_2$  ดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า สาร  $\text{PbZrO}_3$  เกิดขึ้นตรงกลางระหว่างสัดส่วนของ  $\text{PbO} : \text{ZrO}_2$  ที่เท่ากัน จึงมีการเตรียมสาร PZ โดยใช้สัดส่วนจำนวนโมลของ  $\text{PbO} : \text{ZrO}_2$  เป็น 1 : 1



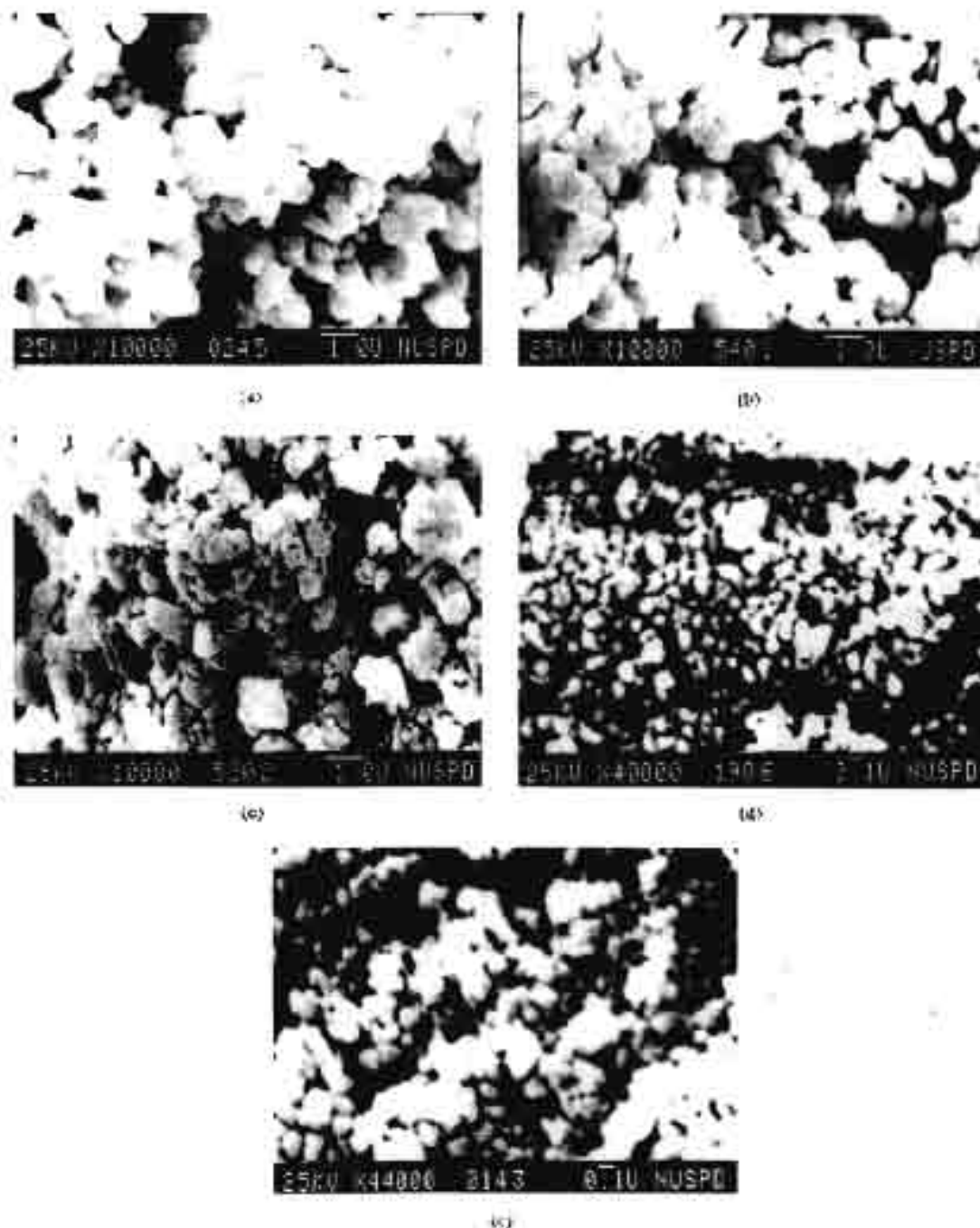
รูปที่ 7 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของระบบ  $\text{PbO-ZrO}_2$  [5]

ในปัจจุบันนี้สาร PZ ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่าง ๆ จำนวนมาก อาทิเช่น ตัวเก็บประจุ (capacitors) และพวกอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในการกักเก็บพลังงาน (energy storage application)[3] และนอกจากนี้ยังมีรายงานอีกว่า สาร PZ นี้มีสมบัติหลายประการที่คล้ายคลึงกับพวกไมโครเวฟไดอิเล็กตริก (microwave dielectrics) ด้วย แต่จะแสดงการผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (dielectric relaxation) ณ บริเวณใกล้ ๆ ความถี่ไมโครเวฟ (microwave frequency) [6] , [7]

### 1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fang และคณะ [6] ที่ได้ทำการทดลองเตรียมผงละเอียดของสาร PZ โดยใช้ 3 วิธี ได้แก่วิธีที่หนึ่งเตรียม conventional solid reaction (CSR) วิธีที่สองเตรียมแบบ conventional coprecipitations โดยใช้สารละลายกรดออกซาลิก (oxalic acid) หรือ สารละลายแอมโมเนีย (ammonia solution) ในการตกตะกอน (CCA,CCB) และอีกวิธีหนึ่งคือ microemulsion-refined

coprecipitations โดยใช้กรดออกซาลิก (oxalic acid) หรือ สารละลายแอมโมเนีย (ammonia solution) ในการตกตะกอน (MRA,MRB) โดยวิธีเตรียมแบบหลังสุดนี้แสดงให้เห็นชัดเจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการฟอร์มตัวของ  $\text{PbZrO}_3$  แบบอโรธอมบิกนั้นต่ำกว่า 2 วิธีแรก และสารละลายแอมโมเนียจะมีแรงยึดให้ตกตะกอนได้ดีกว่ากรดออกซาลิก จึงเป็นผลดีต่อการลดอุณหภูมิในการฟอร์มตัวของ  $\text{PbZrO}_3$  นอกจากนี้ผงของ PZ ที่เตรียมโดยวิธี microemulsion ยังให้ผงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในสเกลนาโนเมตร และผงที่ได้มีการเกาะตัวกันน้อยกว่าผงที่ได้จากวิธีที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นว่าการเตรียมโดยวิธี MRA (รูปที่ 8 d) จะให้ขนาดอนุภาคเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 0.08 ถึง 0.6 ไมโครเมตร ตามด้วยวิธีการเตรียมแบบ MRB (รูปที่ 8 e) ส่วนวิธีการเตรียมแบบ CCA และ CCB (รูปที่ 8 b และ c) ให้การกระจายตัวของกลุ่มอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายกัน และในการเตรียมแบบ CSR ให้ขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในช่วง 0.2 ถึง 1.3 ไมโครเมตร

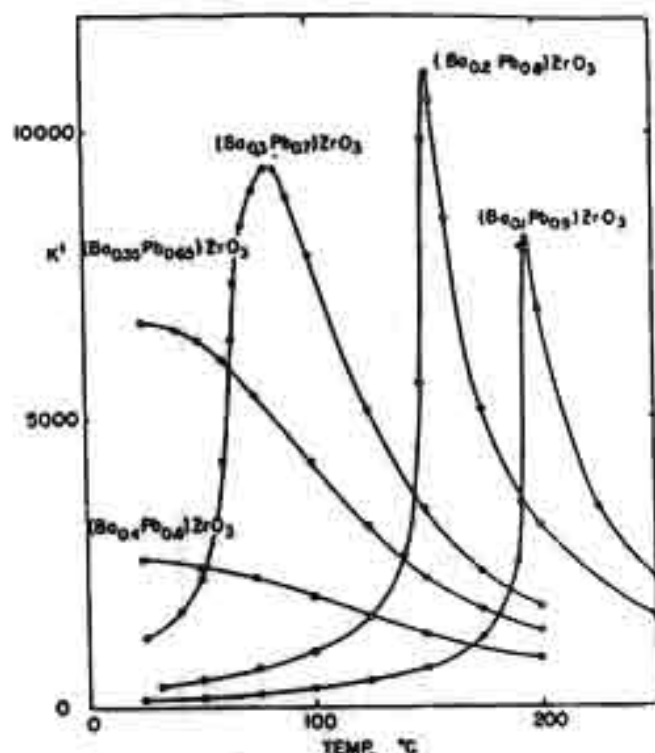


รูปที่ 8 ภาพ SEM ของผง  $\text{PbZrO}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีเตรียมแบบ

- (a) conventional solid reaction, CSR
- (b) conventional coprecipitation with oxalic acid solution, CCA
- (c) conventional coprecipitation with ammonia solution, CCB
- (d) microemulsion-refined coprecipitation with oxalic acid solution, MRA และ
- (e) microemulsion-refined coprecipitation with ammonia solution, MRB [2]

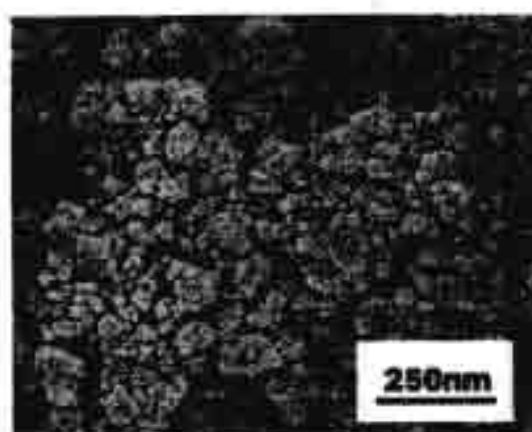
Lanagan และคณะ [7] ได้ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของเซรามิก PZ โดยการเตรียมเซรามิก PZ ด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์ และมีการเพิ่มปริมาณเซอร์โคเนีย 2.9% โดยอธิบายว่ามีการสูญเสียระหว่างการเผา และมีความเข้มข้นของสารเจือปน hafnium ประมาณ 2% ทำการผสมโดยการ vibratory milling ให้เม็ดบดเซอร์โคเนียเป็นตัวบด และใช้แอลกอฮอล์เป็นสารช่วยในการหล่อขึ้นเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นรูป disk เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร และหนา 0.3 – 0.7 เซนติเมตร เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1300 °C ในบรรยากาศด่าง นำเซรามิก PZ และแร่รูไทล์ (rutile) มาทำการวัดค่าไดอิเล็กตริก ในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้หลายๆ เทคนิค ที่จะวัดค่าไดอิเล็กตริกในช่วงความถี่จาก 100 Hz ถึง 26 GHz โดยใช้แร่รูไทล์เป็นวัสดุอ้างอิงในการวัดแต่ละวิธี พบว่าเซรามิก PZ มีการผ่อนคลายไดอิเล็กตริก (dielectric relaxation) และที่ความถี่สูง 10 GHz ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงร้อยละ 20 จากความถี่ในช่วง 1 MHz และค่าการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า

Roberts [8] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติไดอิเล็กตริกของเลดเซอร์โคเนต โดยการผสมแบบเวียนเข้าไปเป็นตามสูตร  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{ZrO}_3$  ทำให้ได้ค่าไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นจากประมาณ 3500 เป็นค่าที่สูงขึ้น ถึง 11000 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ Ba ที่ผสมเข้าไป และได้อุณหภูมิคูรีลดลง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารประกอบ Ba-PbZrO<sub>3</sub> ที่แปรค่าอุณหภูมิ [8]

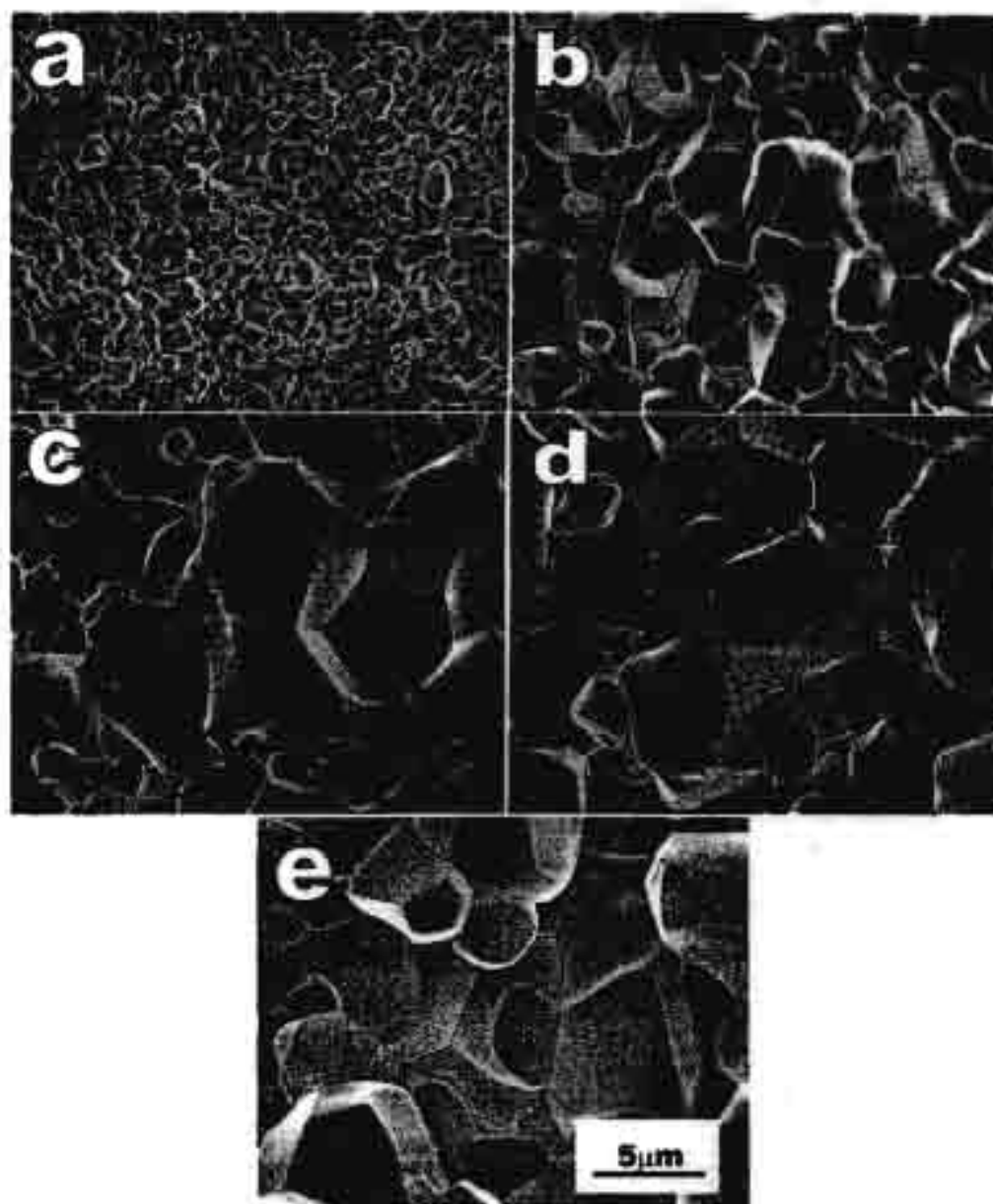
Kong และคณะ [9] ได้ทำการเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของเซรามิก PZ ที่ได้จากการอบด้วยพลังงานสูง โดยใช้ขวดหึ่งสแตนคาร์ไบด์ขนาด 250 มิลลิลิตร และลูกบดหึ่งสแตนคาร์ไบด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เป็นตัวบด ใช้ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที บด 25 นาที และ หยุด 5 นาที ทำการอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผงที่ได้จากการบดจะมีขนาดของอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตรดังรูปที่ 10



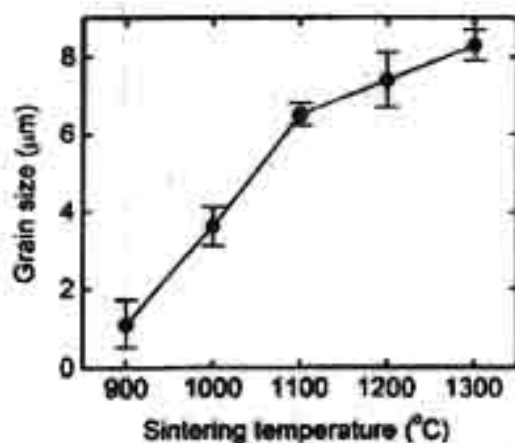
รูปที่ 10 อนุภาคของสาร PZ ที่ได้จากวิธีมิกซ์ออกไซด์โดยการบดพลังงานสูง [9]

เมื่อนำผงที่ได้มาทำการขึ้นรูปและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่  $900 - 1300^{\circ}\text{C}$  โดยที่เพิ่ม PbO (10% โดยน้ำหนัก) เพื่อชดเชยปริมาณตะกั่วที่ระเหยไประหว่างการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงทำการ XRD เซรามิก PZ ทุกอุณหภูมิซินเตอร์พบว่าเป็นเฟสเดียวทุกอุณหภูมิซินเตอร์ โดยมีค่าแสดงทิศทางเป็น  $a = 5.886 \pm 0.003$ ,  $b = 11.749 \pm 0.008$  และ  $c = 8.248 \pm 0.006$  ในการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้นมีขนาดของเกรนดังรูปที่ 11 ซึ่งจะเห็นว่ามีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ แต่ถ้านำมาเขียนเป็นกราฟระหว่างขนาดของเกรน และความหนาแน่นของเซรามิกเทียบกับอุณหภูมิซินเตอร์แล้ว ดังรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับแล้ว จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์สูงขึ้นจาก  $900$  ถึง  $1100^{\circ}\text{C}$  ทั้งขนาดของเกรนและความหนาแน่นมีการเพิ่มแบบเชิงเส้นเทียบกับอุณหภูมิซินเตอร์ หลังจากอุณหภูมินี้อัตราการเติบโตของเกรนก็ต่ำลง และความหนาแน่นก็ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการระเหยของตะกั่วที่อุณหภูมิซินเตอร์สูง มีการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเห็นว่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซินเตอร์เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 14 เนื่องจากขนาดของเกรนของเซรามิกแบบเฟอร์โรอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น สัดส่วนของขอบเกรนจะถูกเหนี่ยวนำ ผลลัพธ์ของการเหนี่ยวนำในขอบเกรน เป็น

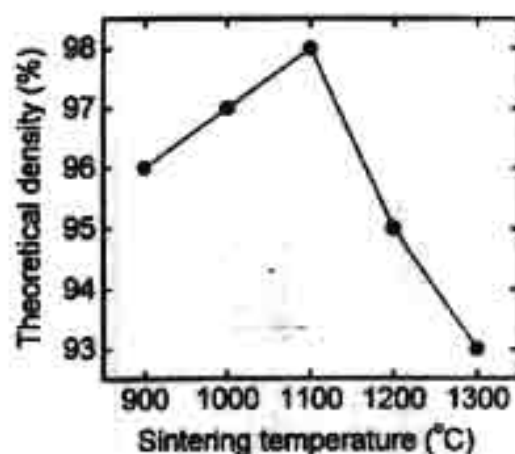
ผลให้ลดปรากฏการณ์คู่ควบระหว่างขอบเกรนและผนังโดเมน ทำให้สภาพคล่องตัวของผนังโดเมนเพิ่มขึ้นและทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงที่อุณหภูมิขึ้นเตอร์ 1300 °C นั้นน่าจะมีสาเหตุมาจากปริมาณของตะกั่วหายไป



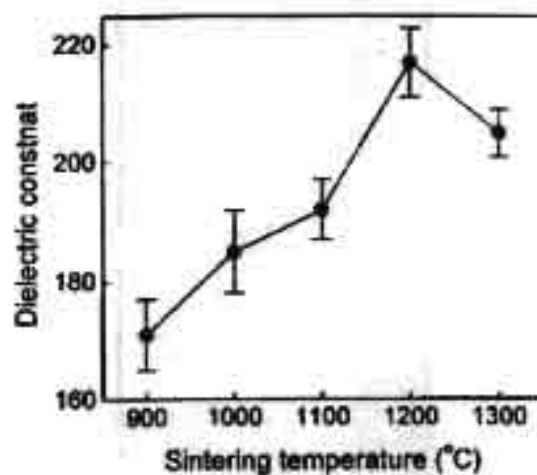
รูปที่ 11 โครงสร้างทางจุลภาคของรอยหักของเซรามิก PZ ที่เผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ :  
(a) 900 °C , (b) 1000 °C, (c) 1100 °C, (d) 1200 °C และ (e) 1300 °C [9]



รูปที่12 กราฟแสดงขนาดของเกรนเทียบกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิก PZ [9]



รูปที่13 กราฟแสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์เทียบกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิก PZ[9]



รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเทียบกับอุณหภูมิซินเตอร์ของเซรามิก PZ[9]

Yoon และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาค่าไดอิเล็กตริก และค่าสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อพฤติกรรม strain ของเซรามิกระบบ  $(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{ZrO}_3$  เมื่อ  $0.05 \leq x \leq 0.3$  พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุดของเซรามิก  $(\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x)\text{ZrO}_3$  เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่ม  $\text{Ba}^{2+}$  ถึง 20 mol% จากนั้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงเมื่อปริมาณนี้เพิ่มขึ้น และจาก hysteresis loops ช่วงอุณหภูมิของเฟสเฟอร์โรอิเล็กตริกอยู่ระหว่างเฟสของแอนติเฟอร์โรอิเล็กตริก และเฟสพาราอิเล็กตริก ซึ่งจะขยายออกโดยการเพิ่มสนามไฟฟ้าและปริมาณของ  $\text{Ba}^{2+}$  สนามไฟฟ้าที่ต้องการจะเหนี่ยวนำเฟสเฟอร์โรอิเล็กตริกจะลดลงถ้าเพิ่มปริมาณของ  $\text{Ba}^{2+}$  เมื่อเทียบกับความจริงที่ว่าเฟสเฟอร์โรอิเล็กตริกของ  $(\text{Pb}_{0.9}\text{Ba}_{0.1})\text{ZrO}_3$  รับสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้ 25 kV/cm ที่อุณหภูมิห้อง รูปของเฟอร์โรอิเล็กตริกยังไม่เกิดการเหนี่ยวนำ เช่นกันกับเมื่อให้สนามไฟฟ้า 55 kV/cm กับชิ้นงานที่ถูกแทนที่ด้วย  $\text{Ba}^{2+}$  5 mol% พฤติกรรมของ strain สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟอย่างชัดเจนจากประเภทแอนติเฟอร์โรอิเล็กตริกเป็นเฟอร์โรอิเล็กตริกเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้า และขีดจำกัดของสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ  $\text{Ba}^{2+}$  ค่าสูงสุดของ strain ประมาณ  $2.8 \times 10^{-3}$  และ remnant polarization (ชี้ที่เหลือน้ำค้างอยู่) ประมาณ  $25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  เมื่อปริมาณ  $\text{Ba}^{2+}$  ที่แทนลงในชิ้นงานได้ 20 mol%

Oren และคณะ [11] ได้ศึกษาการเตรียมและการเผาแคลไซต์ PZ โดยวิธีการ homogenous precipitation มีการเผาแคลไซต์ที่ให้เฟสบริสุทธิ์ของ  $\text{PbZrO}_3$  ที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

เลดเซอร์โคเนตไททาเนต หรือ PZT เป็นสารพีโรอิเล็กตริกที่ถูกค้นพบและพัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานภายหลังจาก BT ได้ไม่นาน จึงทำให้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ PZT อยู่เป็นจำนวนมากทั้งการศึกษาทางด้านสมบัติเชิงไฟฟ้าและทางด้านสมบัติเชิงกล ซึ่งในปัจจุบันนิยมเตรียมสาร PZT ที่มีสัดส่วนองค์ประกอบระหว่าง Zr:Ti เป็น 52:48 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่อยู่ในบริเวณรอยต่อเฟส (MPB) ของ PZT ทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเป็นบริเวณที่สามารถแสดงสมบัติทางไฟฟ้าได้สูงที่สุดอีกด้วย สำหรับการศึกษาสมบัติเชิงกลของสาร PZT นั้นก็มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ซึ่งมักจะเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PZT ในลักษณะที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยการเติมสารเจือต่างๆ ลงไป ดังเช่นตัวอย่างงานวิจัยของ Hwang และคณะ [12] ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเฟสปนเปื้อนที่มีผลต่อสมบัติพีโรอิเล็กตริกและสมบัติเชิงกลของเซรามิกในระบบที่มี PZT เป็นองค์ประกอบหลัก โดยได้ทำการทดลองเติมออกไซด์ของเงิน ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ) ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรลงไปใน PZT แล้วนำไปทำการตรวจสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้เทคนิคการกดด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์และใช้เทคนิค 3-point bending เพื่อศึกษาค่าความแข็งแรงของเซรามิก PZT และ