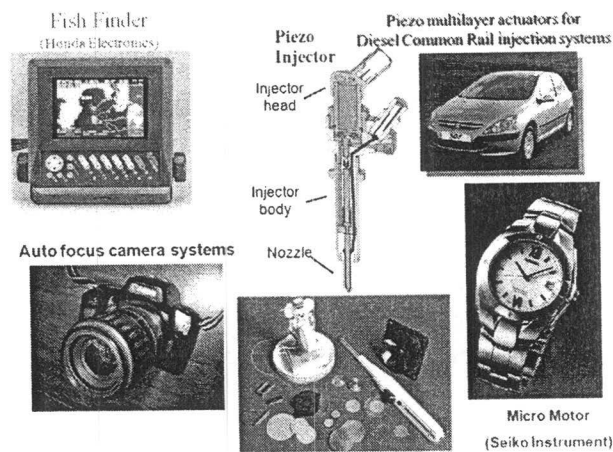


Executive Summary

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบัน การวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติดียิ่งขึ้น มีความหลากหลายในการทำงานหรือประยุกต์ใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น สามารถนำมาใช้ทดแทนหรือร่วมกับวัสดุชนิดเดิมๆ ที่มีขีดจำกัด หรือมีอายุการใช้งานน้อย ตลอดจนถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของวิธีการผลิตที่ใช้กันอยู่ให้ดียิ่งขึ้น ต่างก็ล้วนแล้วแต่เป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ทางด้านชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งสิ้น และก็ยังเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญที่มีความท้าทายต่อบรรดานักวิจัยในวงการนี้ มาโดยตลอด ซึ่งเป็นการศึกษาวิจัยเพื่อนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพในส่วนนี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในธรรมชาติและความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อโครงสร้าง และสมบัติสำคัญ ๆ ของวัสดุวัสดุในกลุ่มเพอโรฟสไกต์ อย่างเช่น $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ หรือ PZT และ BaTiO_3 หรือ BT นั้น จัดได้ว่าเป็นวัสดุในกลุ่มเฟอร์โรอิเล็กทริก ที่ได้รับความสนใจในการศึกษาค้นคว้าวิจัยกันอย่างกว้างขวางทั้งในเชิงวิชาการและในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการสนับสนุนงานทางด้านอุตสาหกรรม การพาณิชย์ การผลิตแบบ mass production ที่ต้องอาศัยเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ทันสมัยและมีความแม่นยำสูง ตลอดจนถึงเรื่องของการอำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ ในการดำรงชีวิตประจำวันในรูปแบบต่างๆ ที่ครอบคลุมไปแทบทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ภายในบ้าน ในที่ทำงาน อุปกรณ์ทางการแพทย์ ทางการกีฬาและบันเทิง ทางการคมนาคมติดต่อสื่อสาร ทางการศึกษาและทางเศรษฐกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การจ้างงานในแถบเอเชียดังตัวอย่างที่ปรากฏอยู่ตามนิคมอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น สำหรับตัวอย่างของการนำวัสดุเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เป็นชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ ได้แก่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitors) เซนเซอร์ (sensors) ทรานสดิวเซอร์ (transducers) หม้อแปลงไฟฟ้า (transformers) อุปกรณ์ตรวจสอบตำหนิหรือรอยแตกร้าวในวัสดุแบบไม่ทำลาย (non-destructive testing detectors) และอุปกรณ์ทางการแพทย์ชนิดต่างๆ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของสารเพโรอิเล็กทริกในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

สารเพโรอิเล็กทริกที่มีการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ (electroceramics) ส่วนมากจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite structure) โดยมีทั้งแบบเพอโรฟสไกต์อย่างง่าย (simple perovskite: สูตร ABO_3) เช่น $BaTiO_3$, $PbTiO_3$ และ $SrTiO_3$ เป็นต้น และแบบเพอโรฟสไกต์เชิงซ้อน (complex perovskite: สูตร $(A,A')(B,B')O_3$) เช่น $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, $(Ba,Sr)TiO_3$ และ $(Pb,La)(Zr,Ti)O_3$ เป็นต้น [1-3] เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต $Pb(Zr,Ti)O_3$ หรือ PZT นั้นเป็นสารละลายของแข็งระหว่าง $PbZrO_3$ กับ $PbTiO_3$ ที่ถูกจัดเป็นต้นแบบของสารเซรามิกพิโซอิเล็กทริกที่มีการศึกษาค้นคว้ากันอย่างกว้างขวางมาก โดยนิยมนำมาใช้ในที่จุดเตาแก๊ส บัชเซอร์ในลำโพง หัวฉีดหมึกในปริ้นเตอร์ โซนาร์ และทรานสดิวเซอร์ที่ใช้กันในเครื่องอัลตราโซนิกส์ เป็นต้น [4-7] เนื่องจาก PZT เป็นสารที่มีค่าตัวประกอบไฟฟ้าเชิงกลคู่ควบ (~ 0.65) และอุณหภูมิคูรี ($> 400^\circ\text{C}$) สูงกว่า BT มาก จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์พลังงานสูงที่ต้องมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ PZT ยังเป็นสารที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ใกล้เคียงกับ BT แต่ความต้องการอุณหภูมิเผาซินเตอร์ที่ต่ำกว่า ($\sim 1200^\circ\text{C}$) PZT เป็นสารที่สามารถทำการโพลิ่ง (poling) เพื่อจัดเรียงไดโพลภายในสารได้ง่ายกว่า BT และยังมีช่วงของค่าสภาพยอมสัมพัทธ์กว้างกว่า BT มาก [8-12] นอกจากนี้ สมบัติเพโรอิเล็กทริก พิโซอิเล็กทริก และไพโรอิเล็กทริกที่สำคัญของสาร PZT นั้นสามารถควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนที่ค่าอัตราส่วนของ Zr ต่อ Ti ทำให้สามารถสร้างสาร PZT ที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ได้หลากหลายมาก ซึ่งค่าอัตราส่วนของ Zr/Ti ที่ 52/48 53/47 และ 55/45 จะเป็นสูตรที่ได้รับความนิยมสูงมากเพราะเป็นสูตรที่อยู่แถบบริเวณแนว Morphotropic Phase Boundary (MPB) ที่มีทั้งเฟสของ PZT แบบเตตระกอนอลและรอมโบฮีดรอลอยู่ร่วมกัน ทำให้สาร PZT ที่มีสัดส่วนทางเคมีอยู่แถบบริเวณนี้มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกคู่ควบสูงมาก สำหรับข้อด้อยของสาร PZT นั้นก็มีอยู่หลายประการคือ เป็นสารที่มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกสูง ($\sim 4.0\%$) มีความล้า (fatigue) และการสูญเสียของพลังงานสูงมาก (มีสมบัติ Hysteresis ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในการใช้งานที่ต้องการความละเอียดอ่อน) เมื่อผ่านการใช้งานทำให้มีอายุการใช้งานสั้น และที่สำคัญ PZT

เป็นสารที่มีอุณหภูมิคูรีค่อนข้างสูง ($T_c \sim 200 - 400$ °ซ ขึ้นกับค่า Zr/Ti) ทำให้การใช้ประโยชน์สูงสุดของสารถูกจำกัดอยู่ที่อุณหภูมิสูงๆเท่านั้น

แบเรียมไทเทเนต (BT) เป็นต้นแบบของสารเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบปกติที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในทรานสดิวเซอร์ในยุคแรกเริ่มแต่ต่อมากลับได้รับความนิยมอย่างสูงในการนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า เนื่องจาก BT ซึ่งมีอุณหภูมิคูรี (T_c) อยู่ที่ประมาณ 120 °ซ นั้นเป็นสารที่มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูง ($\epsilon_r \sim 1700$) [5-7] แต่อย่างไรก็ตามการนำ BT มาใช้งานในทางปฏิบัตินั้นจะนิยมเติมสารชนิดอื่นๆลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของ BT ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากขึ้น เช่นการเติมเลดไทเทเนต (PT) ($T_c \sim 490$ °ซ) ลงไปเพื่อเพิ่มค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และอุณหภูมิคูรีของระบบให้สูงมากยิ่งขึ้นสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูง หรือการเติมสตรอนเชียมไทเทเนต (ST) ($T_c \sim -163$ °ซ) ลงไปเพื่อลดอุณหภูมิคูรีของระบบให้ลงมาอยู่ที่บริเวณอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังมีการทดลองเติมสารหลายๆชนิดลงไปเพื่อปรับพฤติกรรมทางไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิให้ระบบสารเหล่านี้ สามารถแสดงค่าสภาพยอมสัมพัทธ์สูงๆในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากยิ่งขึ้น [2,4,7]

วัสดุโลหะบางชนิดมีโมเมนต์แม่เหล็กแบบถาวรอยู่ในตัวถึงแม้ว่าจะไม่ได้อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กก็ตาม ทำให้สามารถแสดงสภาพแม่เหล็กที่แรงและถาวรได้ ลักษณะเฉพาะเช่นนี้เรียกว่า สภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (ferromagnetic) พบในพวกโลหะทรานสิชัน เช่น เหล็ก (โครงสร้าง BCC ได้แก่ เฟอร์ไรท์ แอลฟา) โคบอลต์ นิกเกิล และโลหะหายาก (rare earth metals) บางตัว เช่น กาโดลิเนียม (Gd) ค่าความไวต่อสภาพแม่เหล็กในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โรนี้สูงได้ถึง 10^6 โมเมนต์แม่เหล็กแบบถาวรในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โรเป็นผลมาจากโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน ทั้งนี้มีการหักล้างกันของโมเมนต์ ดังกล่าวไม่หมด อันเนื่องจากธรรมชาติของอิเล็กตรอนในอะตอมนั่นเอง โมเมนต์แม่เหล็กที่เป็นผลจากการโคจรของอิเล็กตรอนก็มีผลต่อโมเมนต์รวมเช่นกัน แต่ส่วนนี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับผลจากการหมุนรอบตัวเอง นอกจากนี้ในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โรจะมีปฏิสัมพันธ์แบบคู่ควบ (coupling interaction) ทำให้โมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวสุทธิของอะตอมที่อยู่ติดกันวางตัวในทิศที่สอดคล้องกันและกัน ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามภายนอกอยู่เลยก็ตาม เหตุที่เกิดแรงคู่ควบเช่นนี้ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่คาดกันว่าเป็นผลมาจากโครงสร้างทางอิเล็กตรอนของโลหะนั่นเอง การจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบของโมเมนต์นี้จะปรากฏขึ้นตลอดปริมาตรที่ค่อนข้างกว้างใหญ่ภายในผลึกของแข็งนั้น เรียกว่า โดเมน (แม่เหล็ก) สภาพแม่เหล็กสูงสุดที่เป็นไปได้ หรือ สภาพแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation magnetization) M_s ในวัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โรหมายถึงสภาพแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อไดโพลแม่เหล็กในชิ้นวัสดุนั้นจัดวางตัวเองในทิศเดียวกับสนามภายนอกทั้งหมด และในการนี้จะเกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กอิ่มตัว (saturation flux density) B_s ด้วย

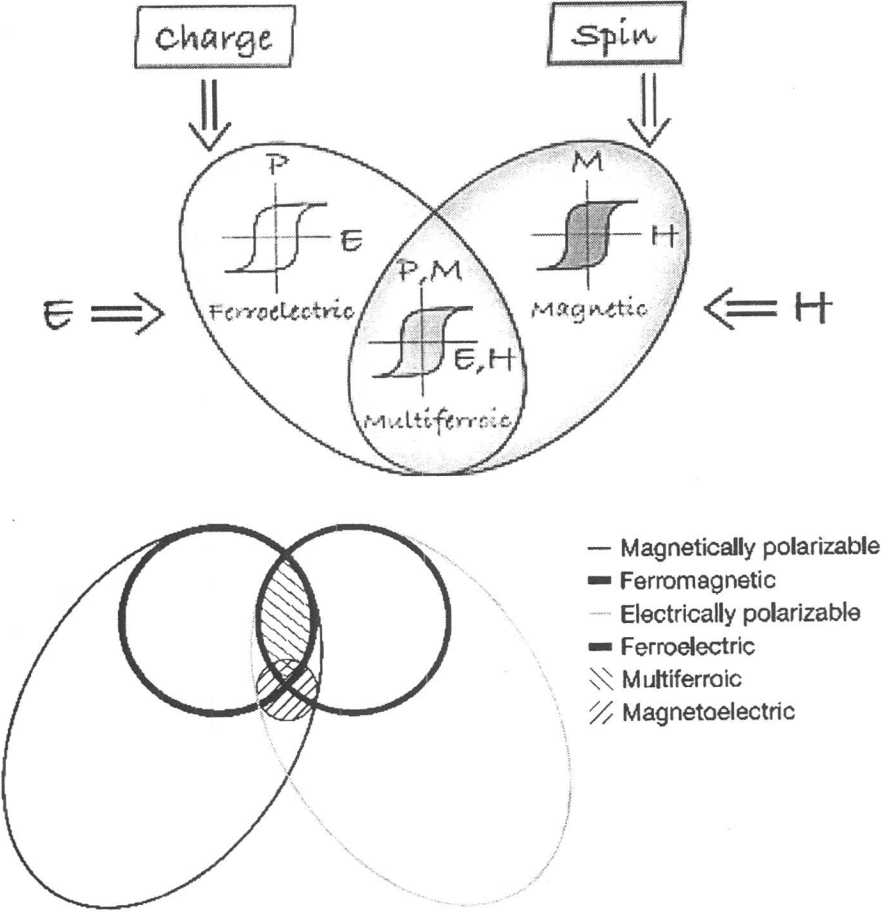
ค่าสภาพแม่เหล็กอิมิตัวเป็นผลคูณของโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิในแต่ละอะตอมกับจำนวนอะตอมทั้งหมดที่มีนั่นเอง

เฟอร์ไรท์ แบบคิวบิก (cubic ferrite)[8-10] วัสดุไอออนิกชนิดนี้อาจเขียนสูตรเคมีได้เป็น MFe_2O_4 โดยที่ M หมายถึงธาตุโลหะใดๆ ต้นแบบของเฟอร์ไรท์ คือแร่แมกนีไตต์ Fe_3O_4 ซึ่งเป็นแม่เหล็ก และบางครั้งก็เรียกว่า แร่แม่เหล็กเข็มทิศ (lodestone) สูตรของ Fe_3O_4 อาจเขียนเป็น $Fe^{2+}O^{2-}-(Fe^{3+})_2(O^{2-})_3$ ซึ่งหมายความว่าไอออนของ Fe ปรากฏในวัสดุนี้ทั้งในรูป +2 และ +3 ในอัตราส่วนเป็น 1:2 ในไอออน Fe^{2+} และ Fe^{3+} ต่างก็มีโมเมนต์แม่เหล็กสุทธิทั้งคู่ และมีค่าเท่ากับ 4 และ 5 หน่วยโมเมนต์แม่เหล็กของบอห์รตามลำดับ ส่วนไอออนของ O^{2-} นั้นเป็นกลางทางแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีปฏิสัมพันธ์แบบสวนทางกันของโมเมนต์จากการหมุนรอบตัว (ของอิเล็กตรอน) ระหว่างไอออนของ Fe ทั้ง 2 ชนิดด้วยคล้ายๆ กับลักษณะของสภาพแม่เหล็กแบบแอนติเฟอร์โร แต่อย่างไรก็ตาม โมเมนต์แม่เหล็กจากการหมุนรอบตัวเหล่านี้หักล้างกันไม่หมดพอดี จึงทำให้ผลสุทธิแล้วเกิดสภาพแม่เหล็กที่เราเรียกว่า เฟอร์รี ขึ้น

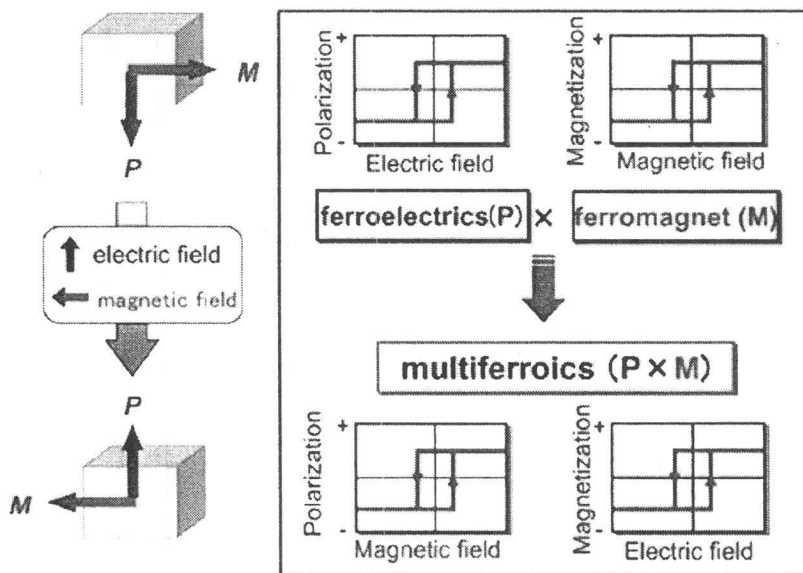
เราสามารถผลิตเฟอร์ไรท์ แบบคิวบิกที่มีส่วนผสมอื่นๆ ได้โดยการเติมไอออนของโลหะอื่นลงไปแทนที่เหล็กบางส่วนในโครงสร้างผลึก ลองพิจารณาสูตรเคมีของเฟอร์ไรท์ $M^{2+}O^{2-}-(Fe^{3+})_2(O^{2-})_3$ อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งนอกจาก Fe^{2+} แล้ว M^{2+} อาจจะเป็นไอออนวาเลนซ์สองอื่นๆ ได้ เช่น Ni^{2+} Mn^{2+} Co^{2+} และ Cu^{2+} ซึ่งไม่ว่าจะเป็นไอออนใดต่างก็มีโมเมนต์สุทธิจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนที่ไม่เท่ากับ 4 ด้วยกันทั้งสิ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.3 ดังนั้น โดยการปรับส่วนผสมเคมีจะทำให้ผลิตสารประกอบเฟอร์ไรท์ มีสมบัติทางแม่เหล็กที่แตกต่างออกไปได้ ยกตัวอย่างเช่น นิกเกิลเฟอร์ไรท์ ซึ่งมีสูตร $NiFe_2O_4$ นอกจากนี้ยังอาจผลิตสารประกอบในลักษณะอื่นที่มีไอออนวาเลนซ์สองของโลหะมากกว่า 1 ชนิด เช่น $(Mn,Mg)Fe_2O_4$ ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง Mn^{2+} : Mg^{2+} สามารถปรับเปลี่ยนได้ สารพวกนี้เรียกว่า สารประกอบเฟอร์ไรท์ หรือ เฟอร์ไรท์ผสม

ประเด็นการค้นคว้าวิจัยในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในกลุ่มเพอรอฟสไกต์เฟอร์โร อิเล็กทริกที่มีเลตเซอร์โคเนตไททาเนตและแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ นั้น เนื่องจาก ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา พบว่ามีการพัฒนาและศึกษาวัสดุที่มีคุณลักษณะรวมที่เรียกว่า มัลติเฟอร์โรอิก (Multiferroics) หรือ วัสดุเฟอร์โรอิก (Ferroics materials) ถือได้ว่าเป็นหัวข้อการวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างมาก มัลติเฟอร์โรอิกเป็นวัสดุที่แสดงสมบัติพร้อมกันมากกว่าหนึ่งชนิดซึ่งรวมทั้งสมบัติทางแม่เหล็ก, ไฟฟ้าและ ยืดหยุ่น (ดังรูปที่ 2) โดยที่ สมบัติทางแม่เหล็กเกิดจากอัตรกริยาระหว่างไดโพลแม่เหล็กและการจัดเรียงของอิเล็กตรอนที่เกิดจากสถานะที่ไม่ได้ถูกจัดเรียงใน shells สมบัติทางไฟฟ้าเป็นผลมาจากไดโพลไฟฟ้าที่ตำแหน่งท้องถิ่น (local electric dipoles) ส่วนสมบัติความยืดหยุ่นเป็น ผลมาจากการเกิดระยะกระจัด (displacements) ของอะตอมเนื่องจากความเครียด สารดังกล่าวจะแสดงสมบัติความยืดหยุ่นที่เกิดพร้อมกับการแสดงความเป็นแม่เหล็กและไฟฟ้า ซึ่งเป็นที่น่าสนใจโดยเฉพาะวัสดุแมกนีโตอิเล็กทริกที่นำไปประยุกต์ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลการประมวลผลและ การส่งผ่าน โดยการ

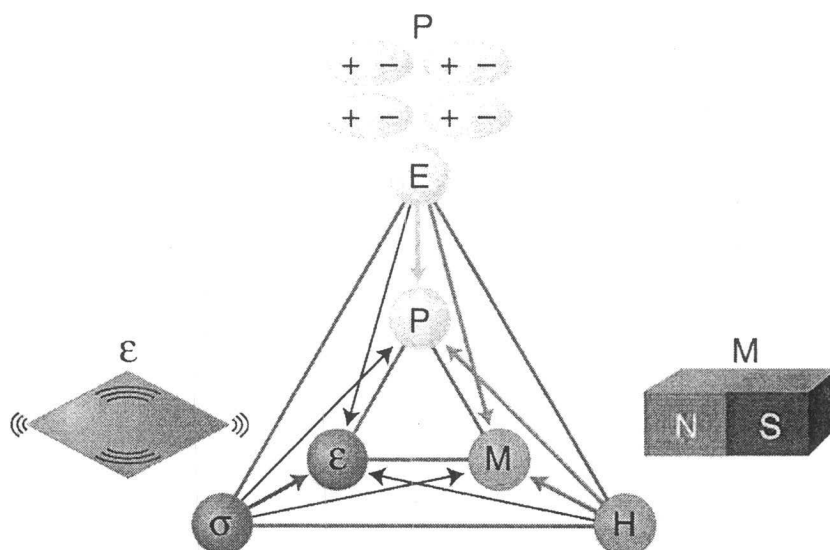
รวมคุณสมบัติดังกล่าว สามารถควบคุมสมบัติร่วมโดยการให้สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า แสดงการตอบสนองกับคำสั่งซึ่งกันและกัน โดยผ่านทางสนามแม่เหล็กหรือไฟฟ้า (ดังรูปที่ 3) โดยมีกลไกการควบคุมตอบสนองของวัสดุสมบัติเฟอร์โรอิกแสดงดังรูปที่ 4 โดยที่ สนามไฟฟ้า E , สนามแม่เหล็ก H , และความเค้น σ ทำการควบคุม โพลาริเซชันทางไฟฟ้า P , แมกนีไทเซชัน M , และความเครียด ϵ , ซึ่งค่าการเกิด P, M , หรือ ϵ ขึ้นเองในวัสดุ กล่าวคือ การแสดงสมบัติเฟอร์โร อิเล็กทริก (Ferroelectric) เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) และ เฟอร์โรอีลาสติก (Ferroelastic) สำหรับวัสดุสมบัติเฟอร์โรอิก จำเป็นต้องต้องแสดงสมบัติร่วมกันอย่างน้อย 2 ประเภท ซึ่งจะแสดงถึงอันตรกิริยาร่วมระหว่างกันขึ้น โดยที่วัสดุแมกนีโตอิเล็กทริก เป็นวัสดุที่สามารถทำการควบคุมโพลาริเซชันทางไฟฟ้า P โดยใช้สนามแม่เหล็ก หรือ ทำการควบคุม แมกนีไทเซชัน M โดยใช้สนามไฟฟ้าได้



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มสารมลติเฟอร์โรอิกกับวัสดุแมกนีโตอิเล็กทริก

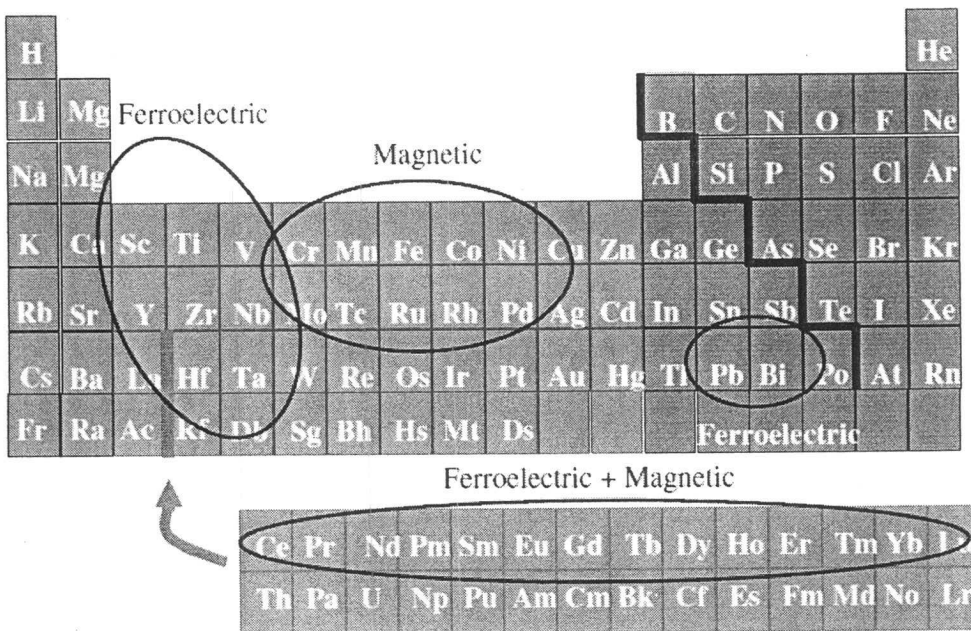


รูปที่ 3 มัลติเฟอร์โรอิกและการควบคุมโดย แมกนีโตอิเล็กทริก

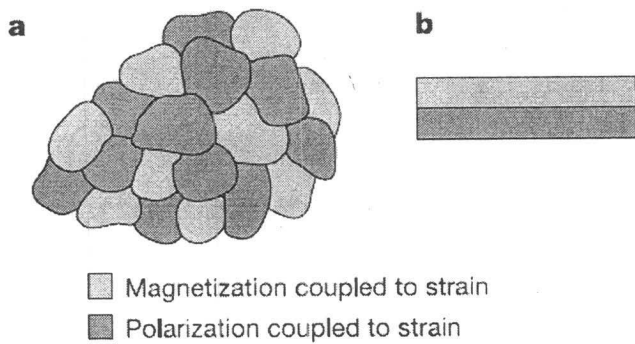


รูปที่ 4 กลไกการควบคุมตอบสนองของวัสดุ มัลติเฟอร์โรอิก

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติรวมดังกล่าว มีได้เด่นชัดมากนัก เนื่องจากวัสดุดังกล่าวจำเป็นต้องมีสมบัติทางไฟฟ้าเฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และ สมบัติทางแม่เหล็กเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ร่วมกันอยู่ ซึ่งโดยปกติของวัสดุแล้ว มักจะมีคุณลักษณะเด่นชัด เพียงอย่างเดียว (รูปที่ 5) สำหรับการพัฒนาวัสดุเฟอร์โรอิก (Ferrioids materials) แบบก้าวกระโดดคือการเลือกวัสดุที่มีคุณลักษณะเด่นชัดทางเฟอร์โรอิก เช่น เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) มาผสมรวมกันในประเด็นของวัสดุคอมโพสิต (composite materials) เพื่อให้เกิดคุณลักษณะร่วมมัลติเฟอร์โรอิก (Mutiferroics) เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6 และตารางที่ 1



รูปที่ 5 แสดงกลุ่มธาตุต่างๆ ที่มีความโดดเด่นทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก



รูปที่ 6 Magnetoelectric ของวัสดุในลักษณะ (a)คอมโพสิต (b) Laminate

ตารางที่ 1 ค่าคงที่คู่ควบทาง Magnetoelectric ของระบบสองเฟส

Morphology	Materials	Coupling constant (mV cm ⁻¹ Oe ⁻¹)
Composite	BaTiO ₃ and CoFe ₂ O ₄	50
Composite	Terfenol-D and PZT in polymer matrix	42
Laminated composites	Terfenol-D in polymer matrix/PZT in polymer matrix	3,000
Laminate	Terfenol-D/PZT	4,800
Laminate	La _{0.7} Sr _{0.3} MnO ₃ /PZT	60
Laminate	NiFe ₂ O ₄ /PZT	1,400

ประเด็นการค้นคว้าวิจัยในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในกลุ่มเพอรอฟสไกต์เฟร์โรอิเล็กทริกที่มีเลดเซอร์โคเนตไททาเนตและแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ นั้น เนื่องจาก ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา [11-13] พบว่าการพัฒนาและศึกษาวัสดุที่มีคุณลักษณะร่วมที่เรียกว่า มัลติเฟร์โรอิก (Multiferroics) หรือ วัสดุเฟร์โรอิก (Ferroic materials) ถือได้ว่าเป็นหัวข้อการวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เพราะว่าการศึกษาสมบัติของสารที่มีอันตรกิริยาระหว่าง สมบัติไฟฟ้าและสมบัติแม่เหล็กควบคู่กัน (coupling between ferroelectric-ferromagnetic interaction) ในการศึกษาสมบัติคู่ควบดังกล่าวจำเป็นต้องเลือก วัสดุที่มีคุณลักษณะเด่นชัดทางเฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และเฟร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) มาผสมรวมกันในประเด็นของวัสดุคอมโพสิต (composite materials) เพื่อให้เกิดคุณลักษณะร่วมมัลติเฟร์โรอิก (Multiferroics) เกิดขึ้นซึ่งเป็นวิธีที่นักวิจัยจำนวนมาก นิยมใช้กันในการเตรียมสาร [14-18] มากกว่าการค้นคว้า วิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุเฉพาะที่มีคุณลักษณะร่วมมัลติเฟร์โรอิก อย่างแท้จริง

ประเด็นการค้นคว้าวิจัยในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในกลุ่มเพอรอฟสไกต์เฟร์โรอิเล็กทริกที่มีเลดเซอร์โคเนตไททาเนตและแบเรียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์นั้น เป็นการศึกษาสมบัติของสารที่มีอันตรกิริยาระหว่างสมบัติไฟฟ้าและสมบัติแม่เหล็กควบคู่กัน (coupling between ferroelectric-ferromagnetic interaction) ซึ่งสมบัติร่วมดังกล่าว ยังไม่สามารถปรากฏในวัสดุชนิดเดียว เนื่องจากโดยปกติของวัสดุ มักจะมีคุณลักษณะเด่นชัดเพียงอย่างเดียว ในการศึกษาสมบัติคู่ควบดังกล่าวจำเป็นต้องเลือก วัสดุที่มีคุณลักษณะเด่นชัดทางเฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) และเฟร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) มาผสมรวมกันในประเด็นของวัสดุคอมโพสิต (composite materials) เพื่อให้เกิดคุณลักษณะร่วมมัลติเฟร์โรอิก (Multiferroics) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่นักวิจัยจำนวนมาก นิยมใช้กันในการเตรียมสาร มากกว่าการค้นคว้าวิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุเฉพาะที่มีคุณลักษณะร่วมมัลติเฟร์โรอิก อย่างแท้จริง

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการพัฒนาองค์ความรู้จากความชำนาญเป็นพิเศษทางด้านวัสดุเฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric materials) ของผู้วิจัยและที่ปรึกษาโครงการวิจัย ซึ่งยืนยันได้จากวารสารงานวิจัยในระดับสากล โดยทำการเลือก วัสดุ $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ หรือ PZT และ BaTiO_3 หรือ BT ซึ่งจัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ดีเยี่ยมในกลุ่ม เฟร์โรอิเล็กทริก มาเป็นสารตั้งต้น ทำการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุดังกล่าวโดยการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ ที่มีสมบัติทางแม่เหล็กที่เด่นชัด เพื่อให้เข้าใจอิทธิพล กลไกและปัจจัยของการเกิดการคู่ควบของสมบัติไฟฟ้าและสมบัติแม่เหล็กของวัสดุดังกล่าว เพื่อให้เกิดคุณลักษณะร่วมมัลติเฟร์โรอิก (Multiferroics) ขึ้น โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยของการเกิดการคู่ควบโดยแปรค่าของปริมาณและชนิดของสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ที่เติมลงไป ซึ่งศึกษาอิทธิพลของสนามทางแม่เหล็กที่มีต่อสมบัติไฟฟ้าของวัสดุที่เตรียมขึ้น

เป็นหลัก ซึ่งลักษณะร่วมมัลติเฟอร์โรอิก (Multiferroics) ที่ได้รับความสนใจอย่างมากแต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในวารสารงานวิจัยในระดับสากลมากนัก ทางผู้วิจัยได้เล็งเห็นว่ายังมีประเด็นให้ทำการศึกษาวิจัยอยู่อีกเป็นจำนวนมากที่สามารถจะนำไปสู่การสร้างองค์ความรู้ใหม่เพื่อการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารงานวิจัยในระดับสากลได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.J. Moulson and J.M. Herbert, *Electroceramics*, 2nded., Wiley-Interscience, 2003.
- [2] R.C. Buchanan, *Ceramic Materials for Electronics*, 3rd ed., Marcel Dekker, New York, 2004.
- [3] A.S. Bhalla, R. Guo and R. Roy, *Mater. Res. Innov.* **4**, 3 (2000).
- [4] Y. Xu, *Ferroelectric Materials and Their Applications*, North-Holland, 1991.
- [5] R.E. Newnham and G.R. Ruschau, *Am. Ceram. Soc. Bull.* **75**[10] 51 (1996).
- [6] K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic, 1997.
- [7] K. Uchino, "*Ferroelectric Devices*", Marcel Dekker, New York, 2000.
- [8] J. K. Kim, S. S. Kim, W.-J. Kim, A. S. Bhalla, R. Guo, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 132901 (2007).
- [9] K. Takahashi, M. Tonouchi, *J. Magn. Magn. Mater.* **319**, 1174 (2007).
- [10] H. Liu, Z. Liu, K. Yao, *Physica B* **391**, 103 (2007).
- [11] N. Hur, S. Park, P.A. Sharma, J.S. Ahn, S. Guha, S.-W. Cheong, *Nature* **429**, 392 (2004).
- [12] T. Kimura, S. Kawamoto, I. Yamada, M. Azuma, M. Takano, Y. Tokura, *Phys. Rev., B* **67**, 180401 (2003).
- [13] S.-W. Cheong, M. Mostovoy, *Nature Mater.* **6**, 13 (2007).
- [14] W. Eerenstein, N. D. Mathur, J. F. Scott, *Nature* **442**, 759 (2006).
- [15] Y. Yamasaki, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 147204 (2007).
- [16] I. M. Vitebskii, N. M. Kovtun, G. A. Troitskii, and V. M. Khmara, *Izv. Akad. Nauk USSR, Ser. Fiz.* **52**, 1739 (1988).
- [17] V. Bedekar, O.D. Jayakumar, J. Manjanna, A.K. Tyagi, *Materials Letters*, **62**, 3793 (2008).
- [18] Y. Tokunaga, N. Furukawa, H. Sakai, Y. Taguchi, T. Arima and Y. Tokura, *Nature Mater.* **8**, 558 (2009).

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมสารออกไซด์ชนิดต่างๆที่มีต่อ อุณหภูมิการเผาซินเทอร์ พฤติกรรมการก่อเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาค ของเซรามิกเพอร์โรอิเล็กทริก $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเติมสารออกไซด์ชนิดต่างๆที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า (Ferroelectric), และสมบัติทางแม่เหล็ก (Ferromagnetic) ของเซรามิกเพอร์โรอิเล็กทริก $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก
3. เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยลงในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการวิจัยนี้ประกอบด้วยระเบียบวิธีวิจัย 2 ส่วนหลัก คือ

1. การประดิษฐ์และตรวจสอบเซรามิกที่มี $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเตรียมด้วยวิธี mixed oxide (ตัวควบคุม)
2. การประดิษฐ์และตรวจสอบเซรามิกที่มี $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก ที่มีการเติม สารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ลงไป

โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

ระเบียบวิธีวิจัยในปีที่ 1

1. ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
2. พัฒนาระบบวัด Ferromagnetic เพื่อใช้ในการศึกษาและทำวิจัย โดยทดสอบและสอบเทียบสนามแม่เหล็กของระบบที่พัฒนาขึ้น
3. ทำการสังเคราะห์สาร $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 ด้วยวิธีการ mixed oxide แบบดั้งเดิม โดยใช้ $\text{PbO} - \text{ZrO}_2 - \text{TiO}_2$ และ $\text{BaCO}_3 - \text{TiO}_2$ เป็นสารตั้งต้นตามลำดับ (ตัวควบคุม)
4. ทำการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ Fe_2O_3 ลงไป
5. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการสังเคราะห์สารที่ได้จากข้อ 3-4 ด้วยเทคนิค solid-state reaction ได้แก่ เทคนิคการบดย่อย ระยะเวลาในการบดย่อยและเงื่อนไข

ในการเผา calcination (อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ระยะเวลาในการเผาแห้ง และอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิ) ที่มีต่อพฤติกรรมการก่อเกิดเฟสและสัณฐานวิทยา

6. ทำการตรวจวิเคราะห์สารที่เตรียมได้ด้วยการใช้เทคนิคต่างๆร่วมกัน เช่น TGA, DTA, XRD, SEM, และ EDX ดัน
7. ทำการประดิษฐ์เซรามิก จากผงที่เตรียมได้ในข้อ 3 และ 4 ด้วยวิธีการเผาซินเตอร์แบบปกติ (pressureless sintering)
8. ทำการคำนวณหาปริมาณเฟสเพอรอฟสไกต์และความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากการเผา sintering ในแต่ละเงื่อนไข นำเสนอกลไกเพื่ออธิบายพฤติกรรมการก่อเกิดเฟส การแน่นตัวและศึกษาอิทธิพลของการเติมสารออกไซด์ ที่มีต่อลักษณะเฉพาะทางมัลติเฟอร์โรอิกของเซรามิกที่มี $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้เทคนิคต่างๆร่วมกัน เช่น XRD, SEM และ Mutiferroics measurements (ferroelectric-ferromagnetic)เป็นต้น
9. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยในปีที่ 2

10. ทำการสังเคราะห์สารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ CoFe_2O_4 ด้วยวิธี hydrothermal
11. ทำการประดิษฐ์เซรามิก จากผงที่เตรียมได้ในข้อ 10 ด้วยวิธีการเผาซินเตอร์แบบปกติ
12. ทำการศึกษาลักษณะและสมบัติของเซรามิก ดังข้อ 8
13. สรุปผลการศึกษาอิทธิพลของการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ ที่มีต่อพฤติกรรมการก่อเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาคและลักษณะเฉพาะทางมัลติเฟอร์โรอิกของเซรามิกที่มี $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ และ BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก พร้อมทั้งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในกระบวนการเตรียม การก่อเกิดเฟส โครงสร้างและลักษณะเฉพาะทางมัลติเฟอร์โรอิก (ferroelectric-ferromagnetic) ของวัสดุเหล่านี้
14. นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยลงในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการในแต่ละช่วง 6 เดือน

กิจกรรมและผล (output) ที่จะได้	เดือน							
	1-6		7-12		13-18		19-24	
1. ศึกษาค้นคว้า + ดำเนินการซื้อสารเคมี								
2. พัฒนาระบบวัด Ferromagnetic เพื่อใช้ในการวิจัย								
3. ทำการสังเคราะห์สาร PZT , BT (ตัวควบคุม)								

4. ทำการสังเคราะห์และการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์ลงไป									
5. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการสังเคราะห์สารที่ได้ในการเผา calcination									
6. ทำการประดิษฐ์เซรามิกและศึกษาอิทธิพลของการเติมสารออกไซด์ที่มีต่อสมบัติแม่เหล็กเฟอร์โรอิก									
7. นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยลงในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รวมทั้งการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการทั้งในและต่างประเทศ									

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัย โดยเริ่มจากการเตรียมผง $Pb(Zr,Ti)O_3$ และ $BaTiO_3$ การเตรียมชิ้นงานของเซรามิก เหล่านี้ จากนั้นจึงกล่าวถึง ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าแม่เหล็กของเซรามิกที่เตรียมได้ การนำสารดังกล่าวมาใช้ในการสังเคราะห์สาร และการตรวจสอบสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคต่างๆโดยมีรายละเอียด ดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ rapid vibro-milling
- 2) อุปกรณ์เครื่องแก้วสำหรับการสังเคราะห์ผงด้วยเทคนิค solid-state reaction
- 3) ถ้วยอะลูมินาสำหรับเผาสาร
- 4) ชุดอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานแบบ uniaxial die pressing
- 5) เตาไฟฟ้าสำหรับเผาเซรามิกที่สามารถตั้งโปรแกรมในการเผาได้ (
- 6) เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น Siemens-D500 พร้อมฐานข้อมูล Powder Diffraction Files ของ ICDD ใน CD-ROM
- 7) เครื่อง Particle size analyser (laser diffraction)
- 8) เครื่องมือสำหรับตัดแต่งและขัดผิวชิ้นงานเซรามิก
- 9) เครื่อง Sputtering สำหรับทำขั้วไฟฟ้าลงบนผิวของชิ้นงาน
- 10) อุปกรณ์สำหรับตรวจสอบสมบัติต่างๆ โดยพัฒนาระบบขึ้นเอง เช่น สมบัติไดอิเล็กทริก

และสมบัติ Ferroelectric Hysteresis loop เป็นต้น

กระบวนการเตรียมผงและเซรามิก

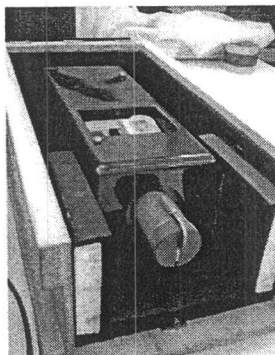
การเตรียมผงสาร

ในการวิจัยได้พัฒนาระบบออกเป็น 2 ชุดใหญ่ๆ

1. $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ เป็นองค์ประกอบหลักที่มีการเติมสารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์
 - $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Fe,Nb})\text{O}_3$: PZT-PFN
 - $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3 - \text{Pb}(\text{Zn,Nb})\text{O}_3 - \text{CoFe}_2\text{O}_4$: PZT-PZN – CoFe_2O_4
2. BaTiO_3 เป็นองค์ประกอบหลัก ที่มีการเติม สารที่มีองค์ประกอบของเฟอร์ไรท์
 - $\text{BaTiO}_3 - \text{BiFeO}_3$: BT-BF

โดยทำการเตรียมผงระบบดังกล่าว ด้วยวิธีผสมออกไซด์โดยการชั่งสารตั้งต้นตามสัดส่วนที่เหมาะสม

จากนั้นนำมาใส่ในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุลูกบดเซอร์โคเนีย แล้วเติมเอทานอลลงไปด้วย เพื่อเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่น ปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปทำการบดย่อยผสมสารด้วยเครื่อง vibro-milling เป็นเวลานาน 30 นาที แล้วจึงนำไปอบให้แห้ง เพื่อเตรียมเป็นเซรามิกต่อไป

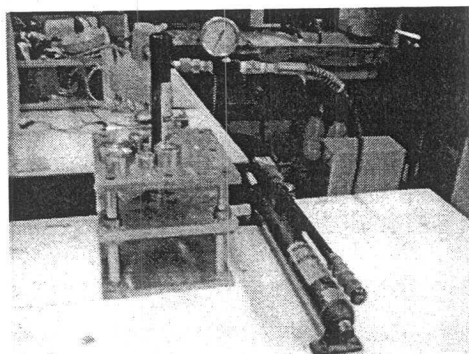


เครื่องบดย่อยผสมสารแบบ Vibro-milling

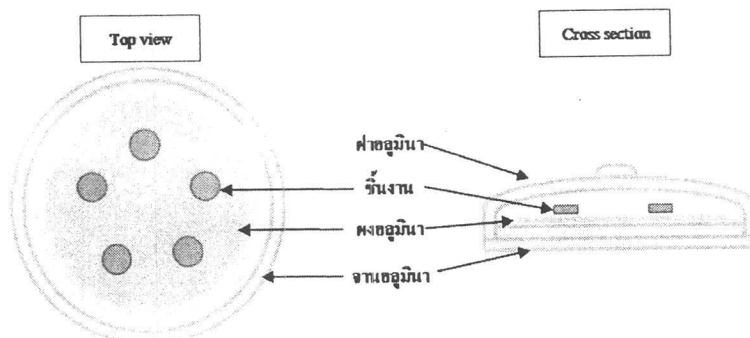
กระบวนการเตรียมเซรามิก

นำผงที่เตรียมได้มาอัดขึ้นรูปแบบ uniaxial pressing โดยชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นกลม (disk) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร โดยทำการอัดในแม่พิมพ์โลหะด้วยเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก ด้วยความดัน 150 MPa เป็นเวลานาน 30 วินาที เมื่อได้ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้น (green body) แล้วจึงนำมาจัดเรียงลงในถาดยอลูมินา จากนั้นปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปเผาซินเตอร์ เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิเป็น $10^\circ\text{C}/\text{นาที}$ ใช้ผงที่เตรียมได้กลบชิ้นงานเพื่อควบคุมบรรยากาศในการเผา ระหว่างที่ทำการเผาซินเตอร์ กลบชิ้นงานด้วยผงอะลูมินาที่บดอีกชั้นหนึ่งเพื่อควบคุมความสม่ำเสมอในการไหลเวียนความร้อนเข้าสู่ชิ้นงาน

ทุกทิศทาง ปิดฝาถ้วยอะลูมิเนียมให้สนิทแล้วนำไปเผาซินเทอร์ โดยเริ่มด้วยการเพิ่มความร้อนให้แก่ชิ้นงานขึ้นไปจนถึงที่อุณหภูมิ 500 °ซ และคงอุณหภูมิดังกล่าวไว้เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมงก่อน เพื่อเป็นการกำจัดสาร PVA ออกไปจากชิ้นงานให้หมด จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นต่อไป จนกระทั่งถึงค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้สำหรับการเผาซินเทอร์ชิ้นงาน

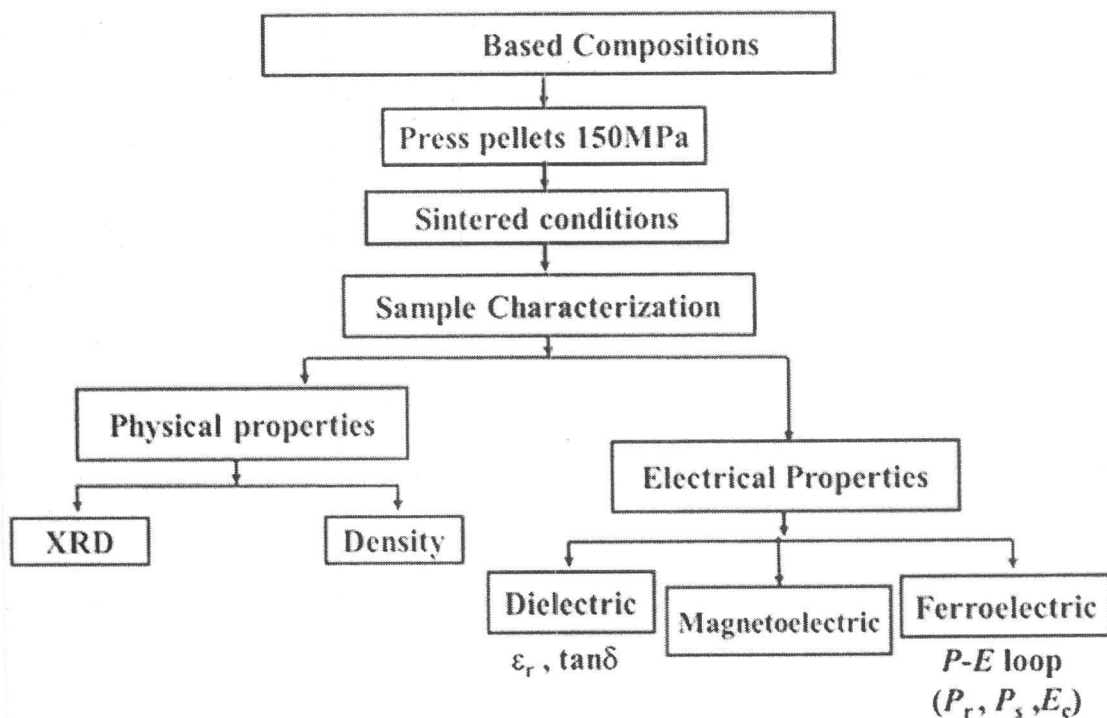


แม่พิมพ์โลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ เครื่องอัดระบบไฮดรอลิก



ลักษณะการจัดเรียงชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปในถ้วยสำหรับการเผาซินเทอร์

การตรวจสอบชิ้นงาน ดังแสดงตาม Flow chart



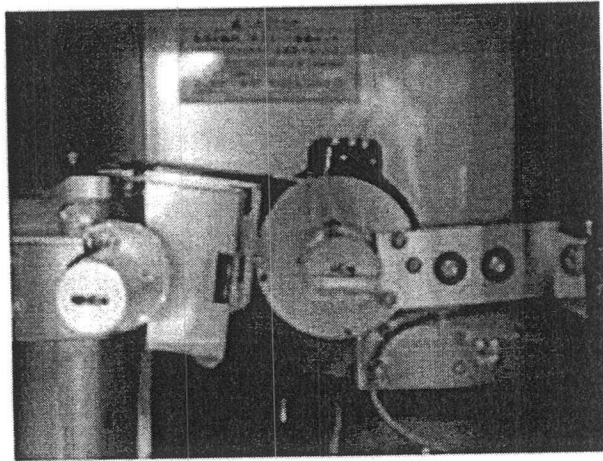
การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิค XRD

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) โดยใช้เครื่อง Siemens-D500 diffractometer ในการตรวจสอบหาชนิดและปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการตกกระทบของรังสีเอกซ์ลงบนผิววัสดุแล้วเกิดการกระเจิง (scattering) และเลี้ยวเบน โดยมีมุมในการเลี้ยวเบนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและระนาบ (hkl) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยแบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดนั้นก็จะมีเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุนั้นๆ ดังนั้น เมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด โดยพิจารณาจากข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมของแบรกก์ (Bragg's angle) และความเข้มของฟิวดังรังสีเอกซ์ของแบบอย่างการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป จึงสามารถนำแบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตรวจสอบได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลของสารชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS files) เพื่อตรวจสอบชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นได้ โดยเริ่มจากการนำผงและชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้มาแพคใส่ใน holder จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer แล้วจึงเดินเครื่องโดยใช้เป้าทองแดง ($\text{CuK}\alpha$) ที่ให้รังสีเอกซ์ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1.54 \text{ \AA}$ ออกมาด้วย step ประมาณ 5 องศาต่อนาที จากค่ามุม 2θ ที่ 20 องศา ไปจนถึงค่ามุม 2θ ที่ 60 องศา ในงานวิจัยนี้สามารถที่จะคำนวณหาปริมาณเฟสของสารตัวอย่างที่เกิดขึ้นมา ในแต่ละกรณีได้ โดยอาศัยสมการที่เสนอโดย Swartz และ Shrout ที่ว่า

$$\% \text{perovskite} = \frac{I_{\text{Perovskite}}}{I_{\text{Perovskite}} + I_{\text{Pyrochlore}}} \times 100$$

เมื่อ $I_{\text{Perovskite}}$ คือ ค่าความเข้มสูงสุดของพีคริงส์เอกซ์ (X-ray peak) ของเฟสหลัก

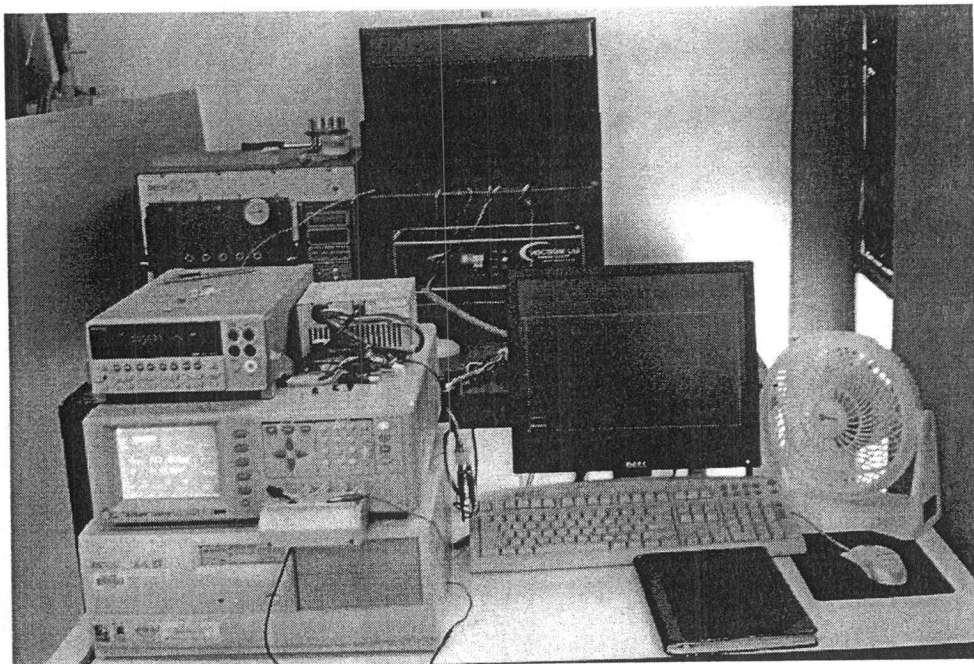
$I_{\text{Pyrochlore}}$ คือ ค่าความเข้มสูงสุดของพีคริงส์เอกซ์ของเฟสปนเปื้อนที่ปนเข้ามา



เครื่อง X-ray diffractometer

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้า

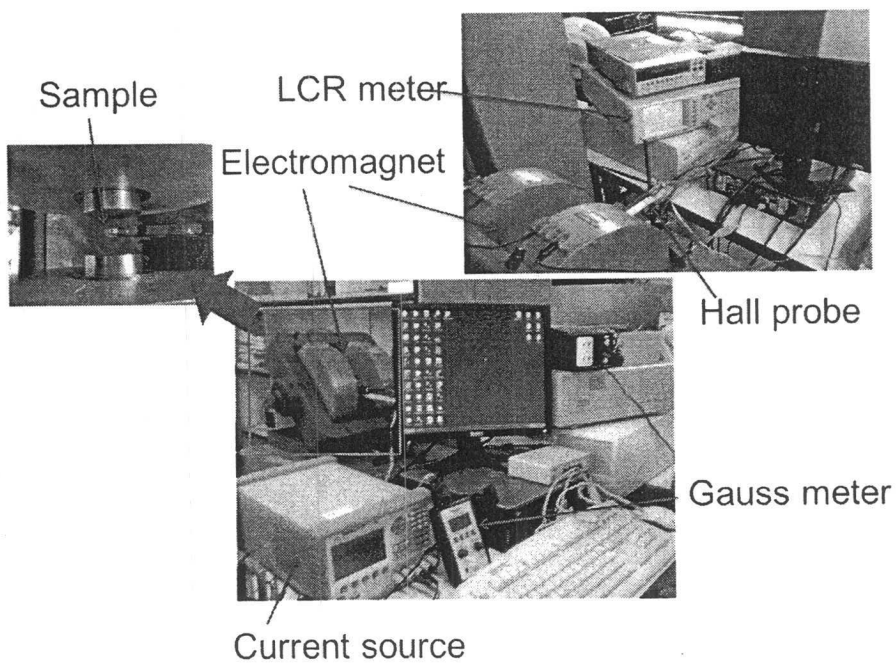
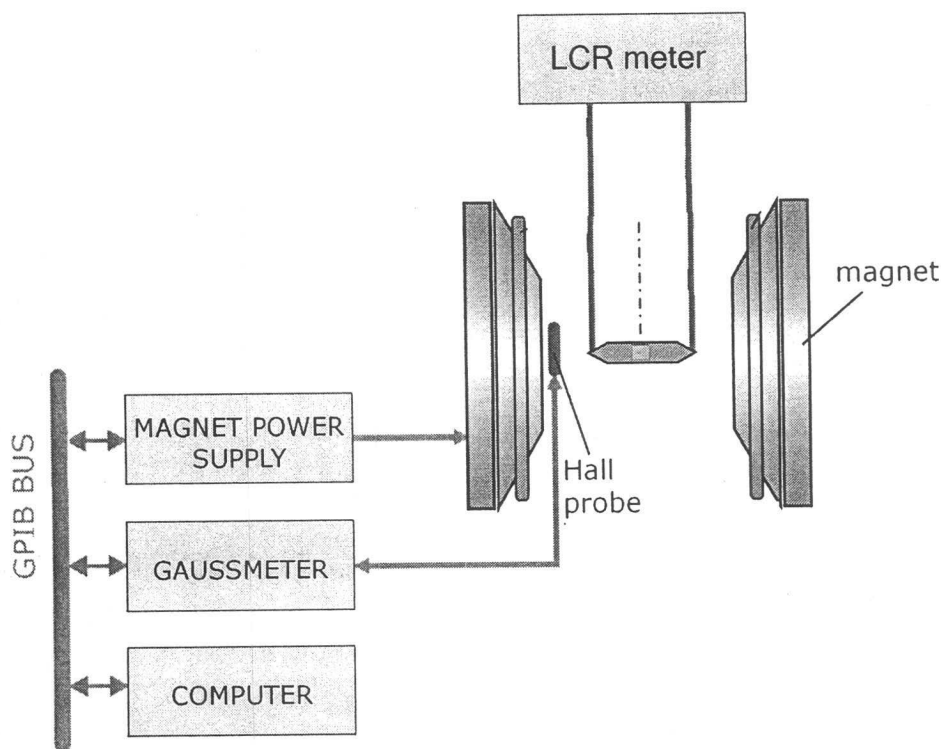
การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของของสารเซรามิก ที่เตรียมได้นั้นเซรามิกจะต้องผ่านการทำอิเล็กโทรด โดยการใช้กาวเงิน (silver paste) ทาที่ผิวทั้งสองด้านของสารเซรามิก ก่อนที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 °ซ เป็นระยะเวลา 5 นาที เพื่อทำให้เกิดขั้วนำไฟฟ้า สามารถวัดสมบัติ Dielectric , Ferroelectric และ Magnetoelectricตามลำดับ



ระบบวัดสมบัติไดโอดเลเซอร์



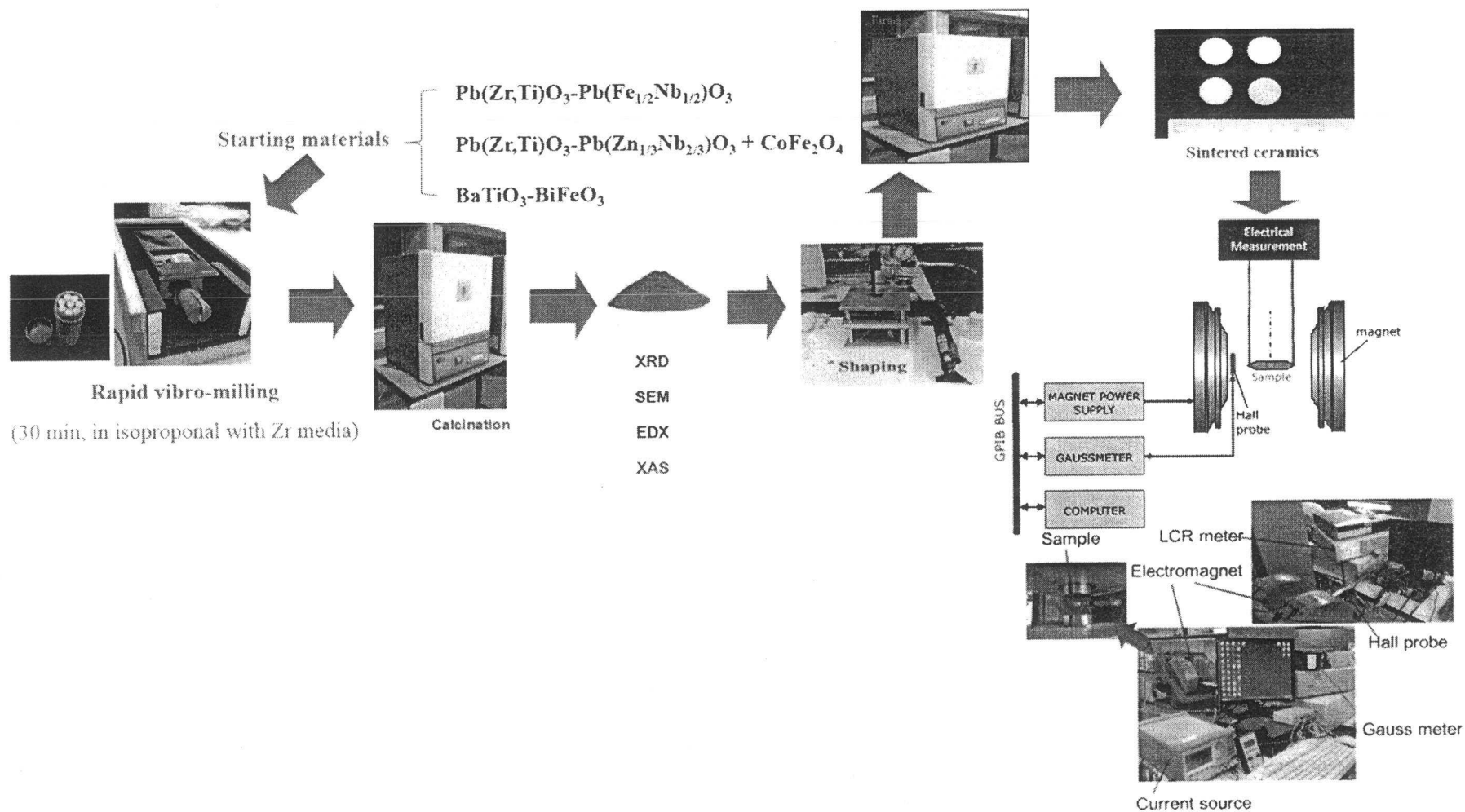
ระบบวัดสมบัติไฟเบอร์เลเซอร์



Current source

ระบบวัดสมบัติแม่เหล็ก

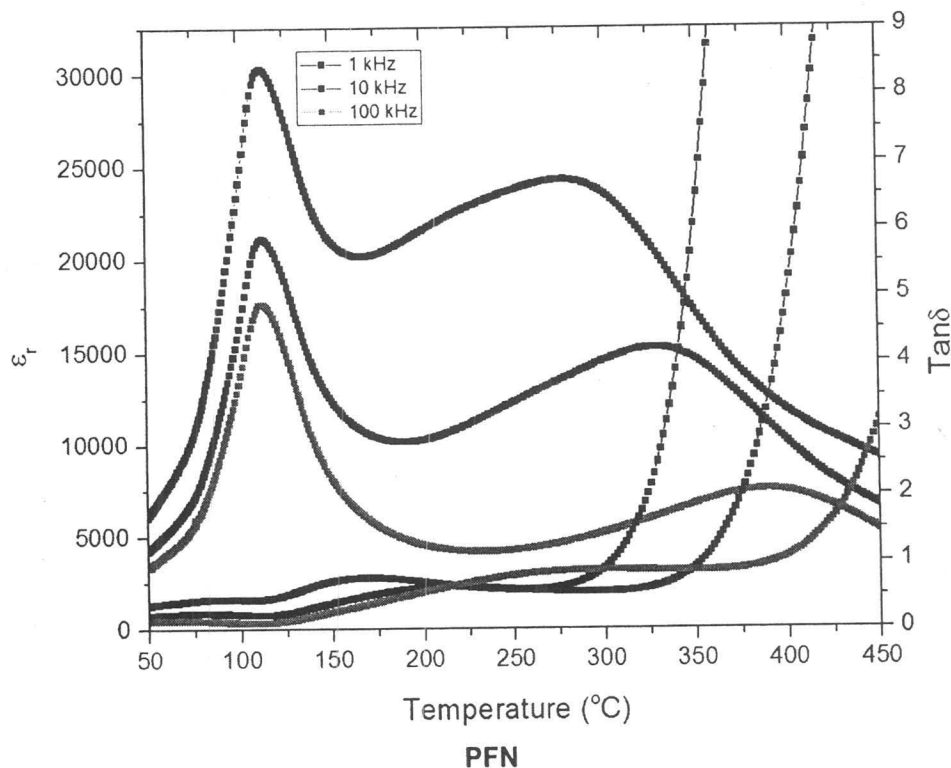
ภาพรวมของขั้นตอนการวิจัย

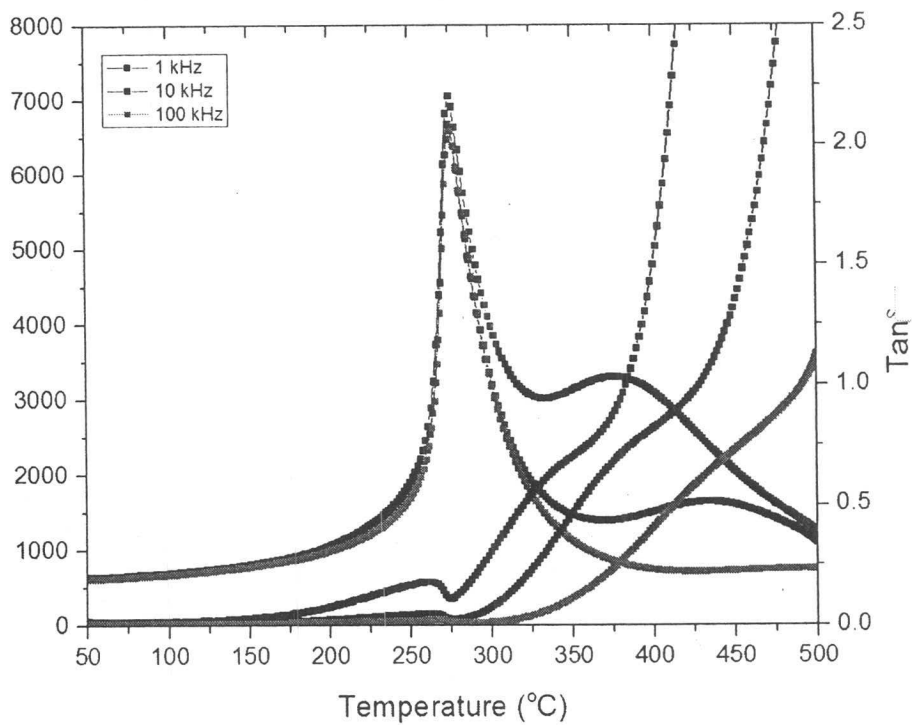


ผลการทดลองและการอภิปรายผล

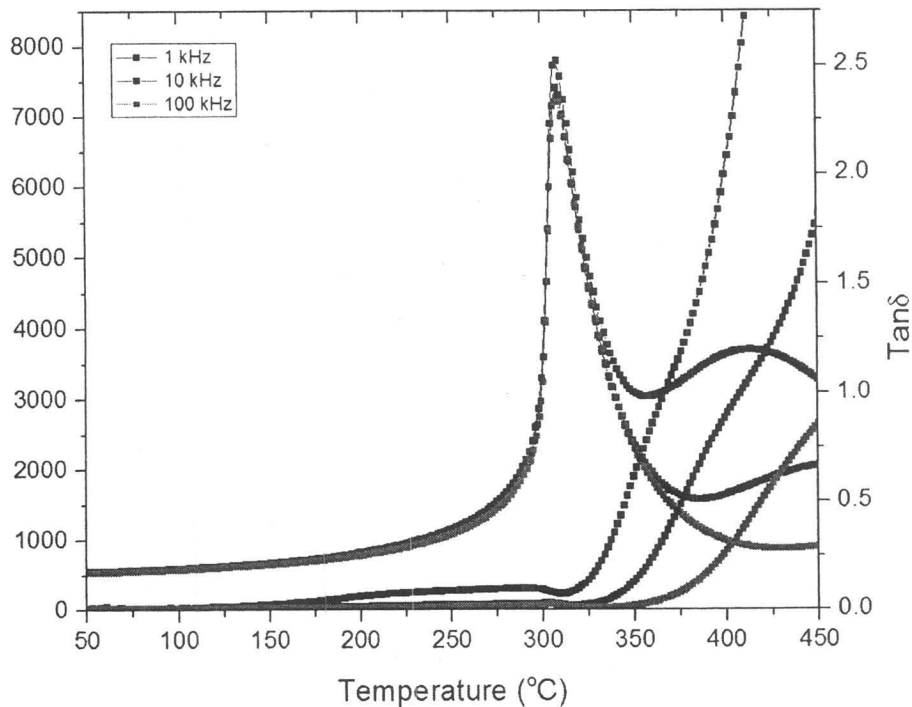
สมบัติทางไดอิเล็กทริก

ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan \delta$) ที่อุณหภูมิห้องซึ่งได้ผลดังรูป 4.2 จากข้อมูลพบว่าเมื่อให้ความถี่แก๊เซรามิกสูงขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มีแนวโน้มลดลงสำหรับเซรามิกทุก ๆ เรือนไข และในส่วนของค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริกนั้นมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ซึ่งการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็เนื่องจากการความถี่ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการนำไฟฟ้าของเซรามิก โดยเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นทำให้ค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลงส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น การเติม PZT เข้าไป ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก มีการแสดงเป็น normal ferroelectric ชัดเจนมากขึ้น และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส ที่สูงขึ้นตามปริมาณของ PZT ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น

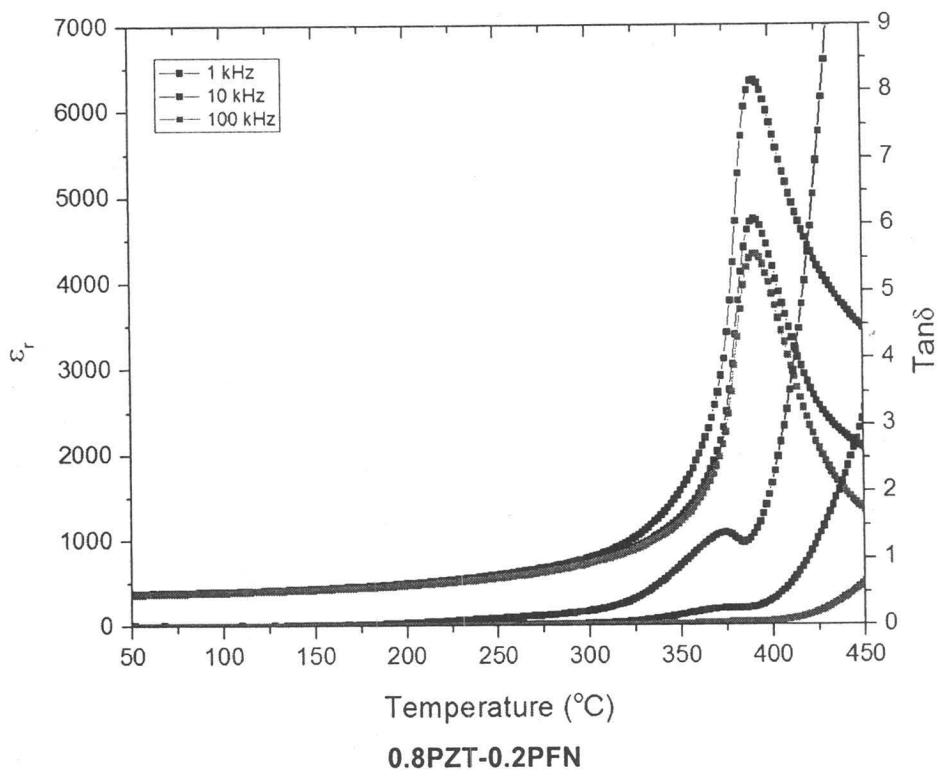
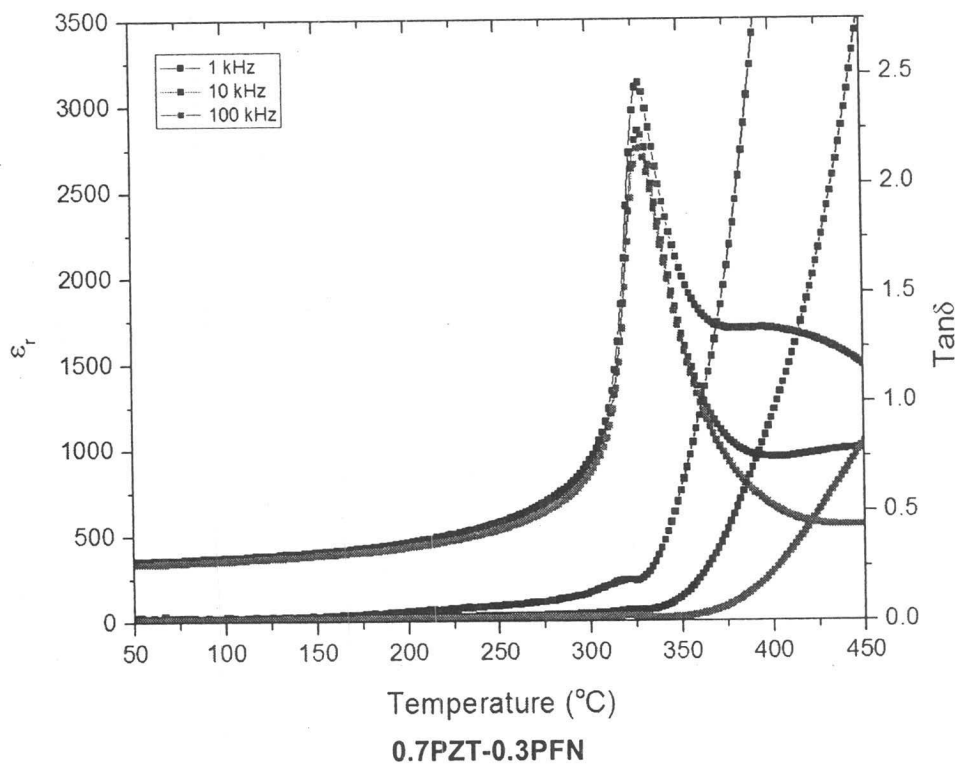




0.5PZT-0.5PFN



0.6PZT-0.4PFN

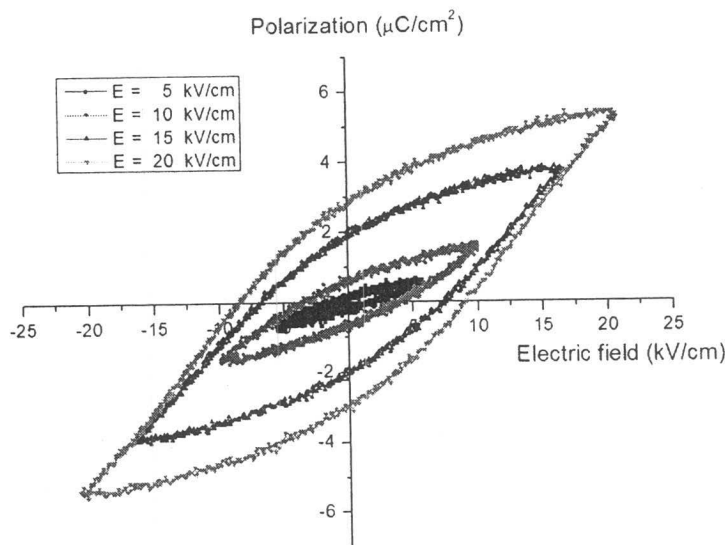


รูปที่ 4.2 สมบัติทางไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าความสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

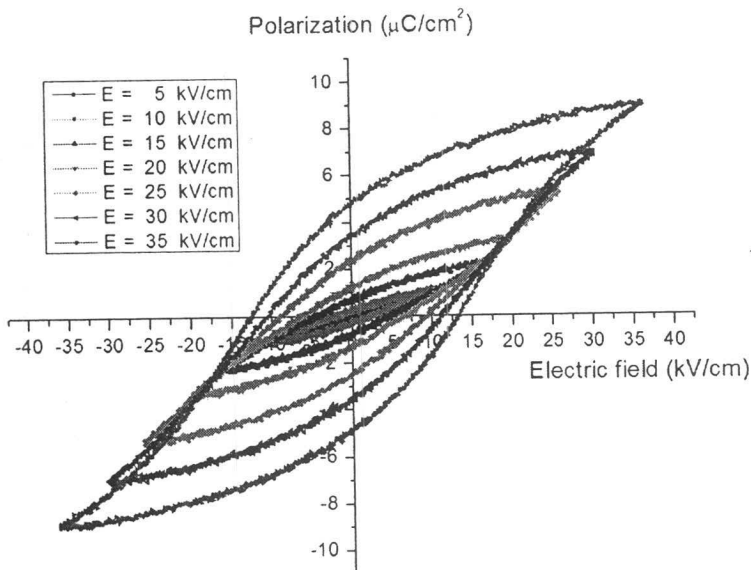
สมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริก

ในการทดลองวัดวงวนฮิสเทอรีซิสในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวัดวงวนฮิสเทอรีซิสโดยให้สนามไฟฟ้าตั้งแต่ 5 kV/cm - 30 kV/cm โดยใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่ละ 5 kV/cm จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟวงวนฮิสเทอรีซิส (P-E) ของแต่ละสัดส่วนองค์ประกอบ โดยในการเขียนกราฟวงวนฮิสเทอรีซิสนี้จะใช้ข้อมูลในส่วนที่แต่ละสัดส่วนองค์ประกอบสามารถทนต่อสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไปได้มากที่สุดในช่วงของสนามไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ซึ่งได้ผลดังนี้

จากผลการทดลองวัดวงวนฮิสเทอรีซิสของเซรามิก PFN-PZT (รูปที่ 4.3) พบว่าการเติม PZT เข้าไป วงวนฮิสเทอรีซิสที่ได้จะมี loop ที่มีลักษณะเด่นชัดขึ้น ทำให้สามารถได้สมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น



PFN

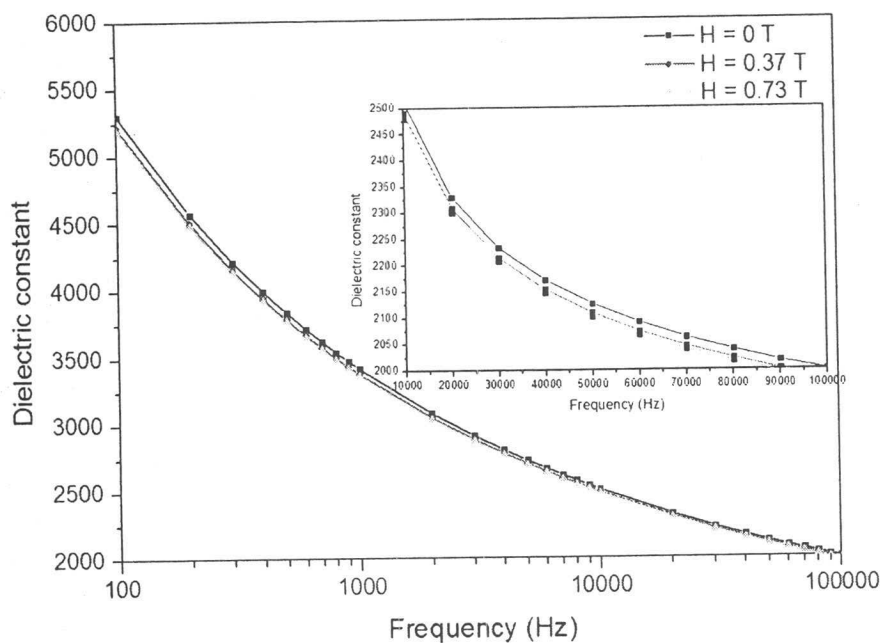


0.5PZT-0.5PFN

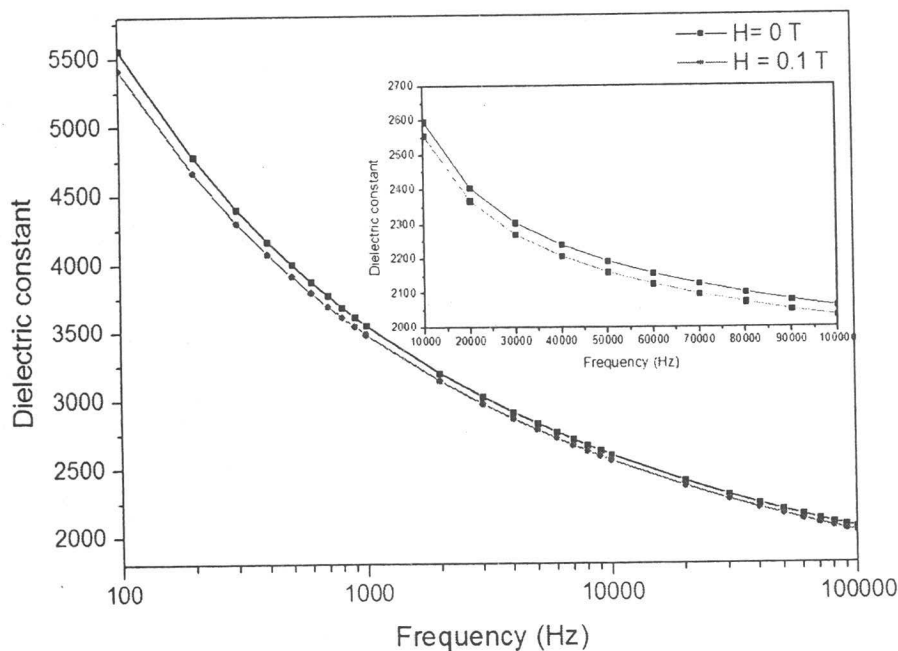
รูปที่ 4.3 วงวนฮิสเทอรีซิสไฟฟ้า P-E ของเซรามิก

สมบัติทางแมกนีโตอิเล็กทริก

ทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกภายใต้สนามแม่เหล็ก ที่ความเข้มต่าง ๆ พบว่า สมบัติทางไฟฟ้าสามารถ ควบคุมได้โดยสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งเป็นคุณลักษณะพิเศษของวัสดุ มัลติเฟอร์โรอิก ที่ทางผู้วิจัยต้องการพัฒนาขึ้น ซึ่งพบว่า PFN จะแสดงพฤติกรรมการตอบสนองกับสนามแม่เหล็กได้ดีกว่า PFN-PZT

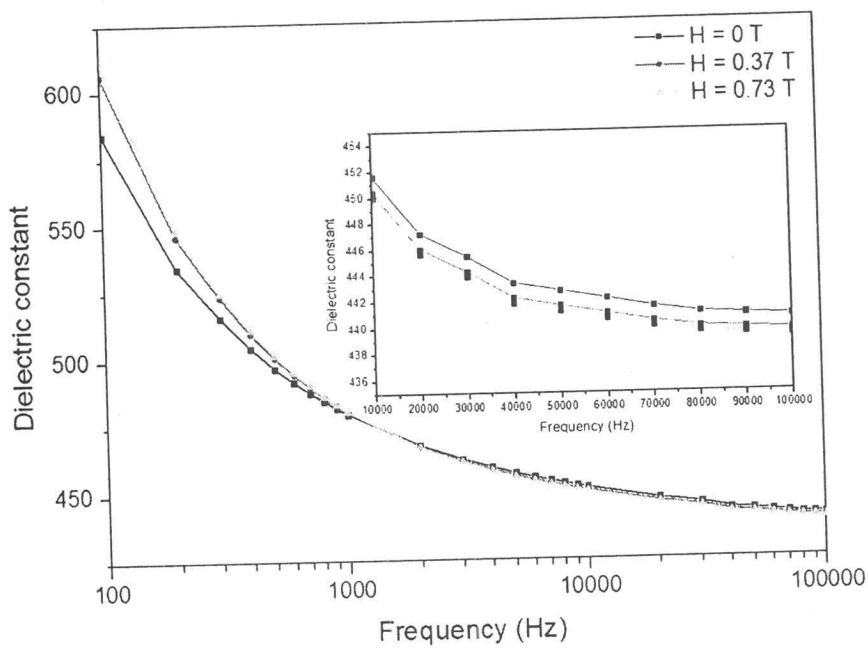


ในแนวตั้งฉาก

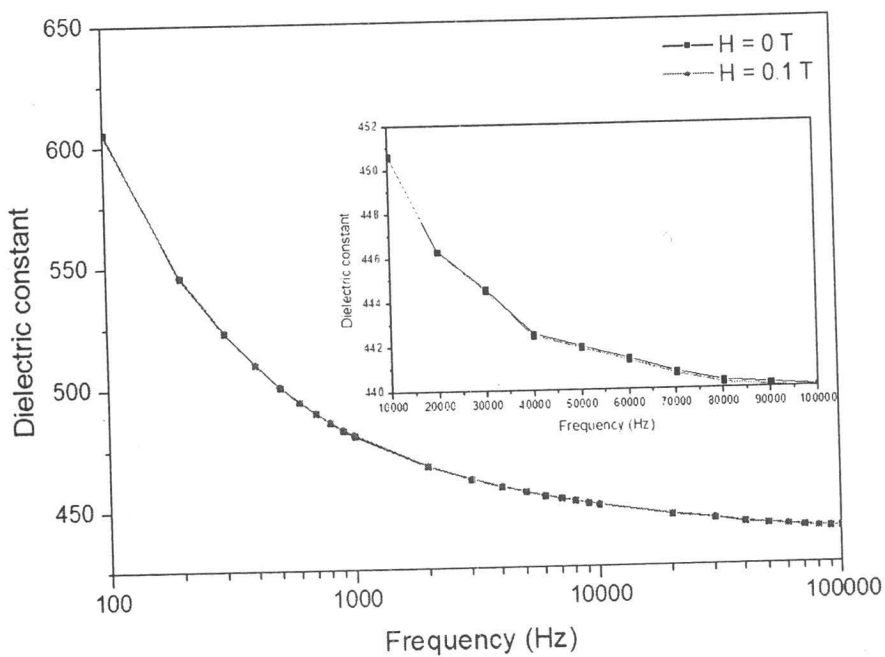


ในแนวนาน

แมกนีโตอิเล็กทริกของ PFN ในแนวตั้งฉากและแนวนานกับชั้นงาน



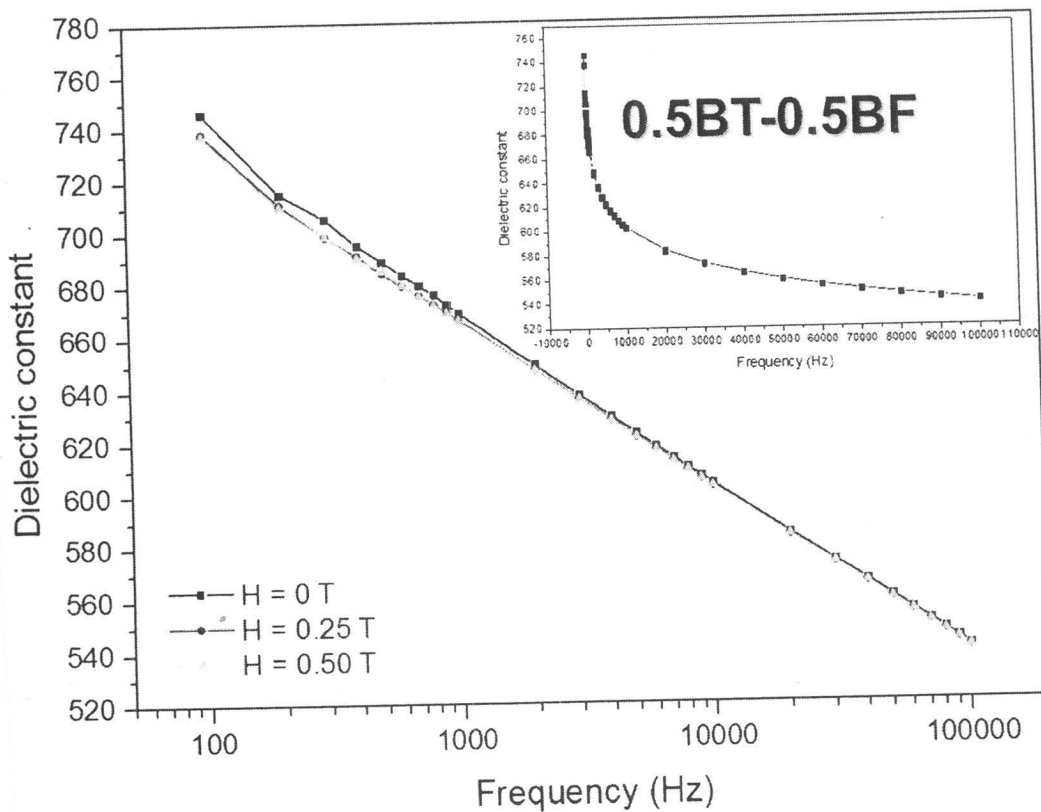
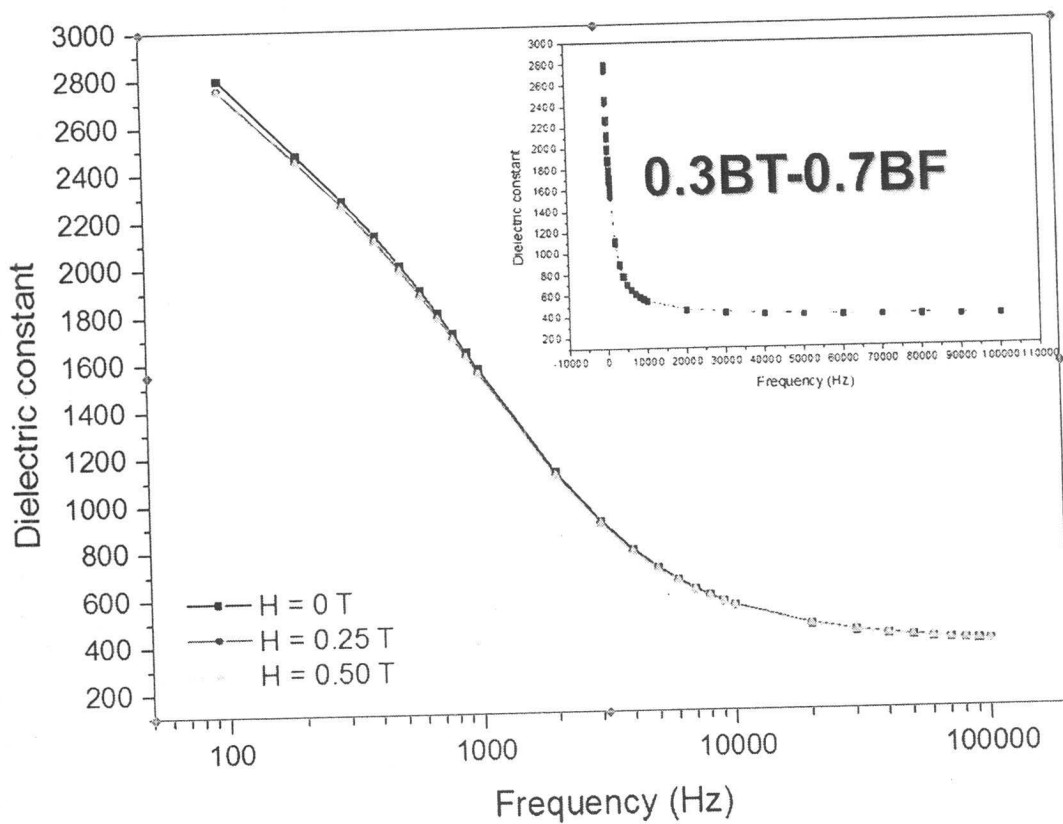
ในแนวตั้งฉาก



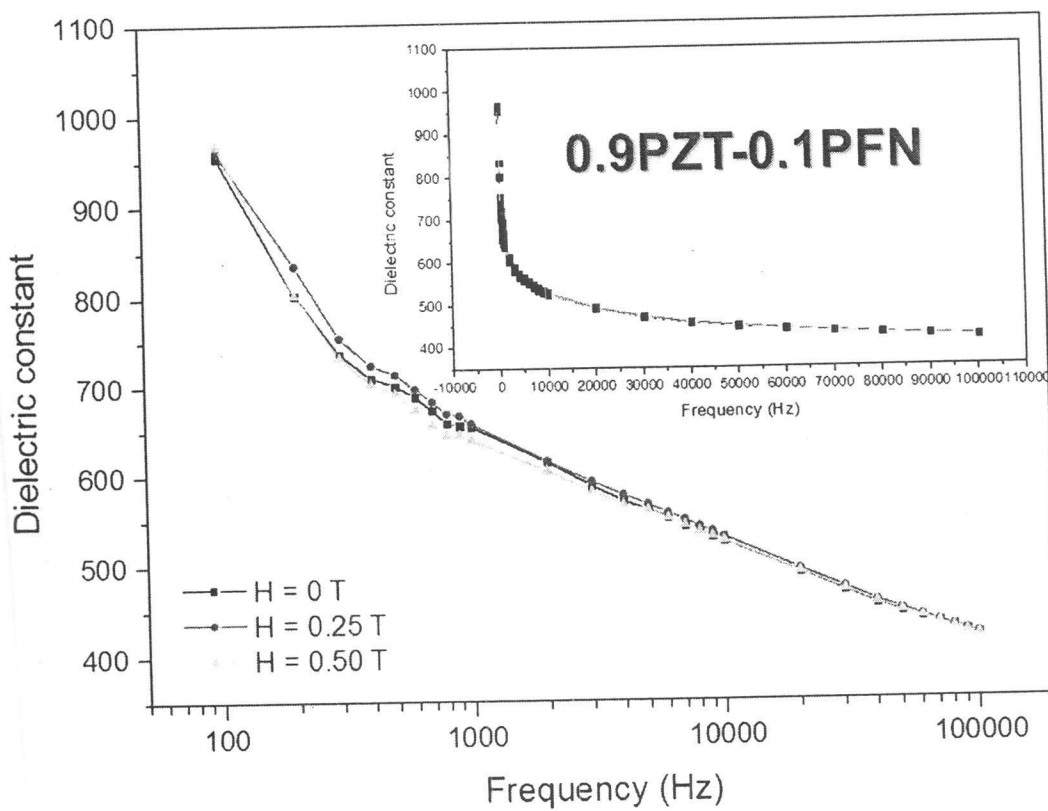
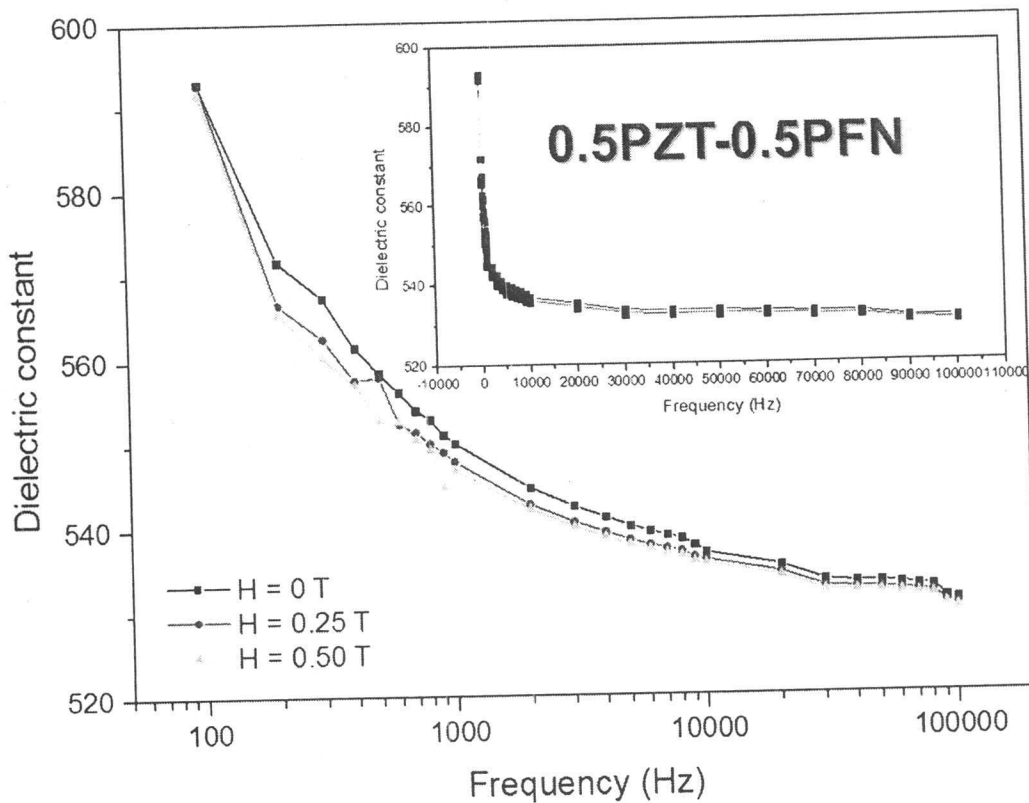
ในแนวขนาน

แมกนีโตอิเล็กทริกของ **0.5PZT-0.5PFN** ในแนวตั้งฉากและแนวขนานกับชั้นงาน

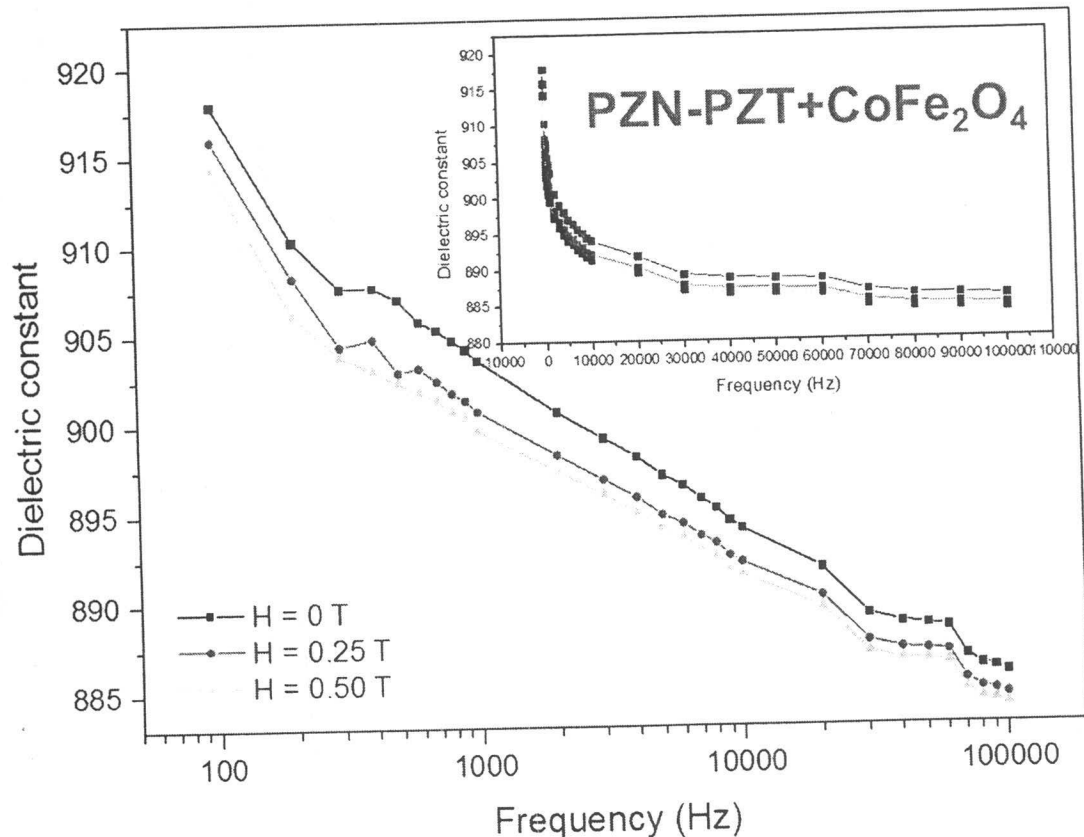
สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กทริกของ ระบบ **BT-BF** ในแนวตั้งฉากกับชั้นงาน



สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กทริกของ ระบบ **PZT-PFN** ในแนวตั้งฉากกับชั้นงาน



สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อค่าไดอิเล็กทริกของระบบ $\text{PZT-CoFe}_2\text{O}_4$ ในแนวตั้งฉากกับชั้นงาน



สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ศึกษาการสังเคราะห์สาร ในระบบต่างๆ ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการเตรียมผงและสารเซรามิก ตามที่ต้องการแล้ว ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดเฟสของสารเซรามิกที่เตรียมได้ด้วยโดยวิธีการ XRD รวมทั้งตรวจสอบลักษณะทางกายภาพอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น สมบัติไดอิเล็กตริก วงวนฮิสเทอรีซิสไฟฟ้า P-E และแมกนีโตอิเล็กทริก ของระบบดังกล่าว ทำให้ได้องค์ความรู้พื้นฐานที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาในระดับสูงต่อไป และอาจรวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ของผลการวิจัยในภาคปฏิบัติ

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. องค์ความรู้ใหม่ในเรื่องของการศึกษาเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์ที่มีต่อพฤติกรรมการก่อเกิดเฟส และสัณฐานวิทยาของสาร และสารเฟอร์โรอิเล็กทริก $Pb(Zr,Ti)O_3$, $BaTiO_3$, $ZnFe_2O_4$ และ $CoFe_2O_4$
2. องค์ความรู้ใหม่ในเรื่องของการศึกษาอิทธิพลของการเติมสารออกไซด์ชนิดต่างๆที่มีต่อพฤติกรรมการก่อเกิดเฟส โครงสร้างจุลภาคและลักษณะเฉพาะทางมัลติเฟอร์โรอิกของเซรามิกที่มี $Pb(Zr,Ti)O_3$ และ $BaTiO_3$ เป็นองค์ประกอบหลัก
3. ได้สร้างองค์ความรู้พื้นฐานให้กับหน่วยงานและบุคลากรของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการเผยแพร่ผลงานในระดับนานาชาติทั้งในรูปของการประชุมวิชาการและการตีพิมพ์ผลงานในวารสารระดับนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI เป็นหลัก
4. ผลงานวิจัยสำหรับนำเสนอในที่ประชุมวิชาการและตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

- (I) การศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีการควบคุมสมบัติของสารเหล่านี้ที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากสำหรับการวิจัยในอนาคต
- (II) งานวิจัยในอนาคตที่มุ่งเน้นเรื่องการตรวจสอบสมบัติร่วม ทางไฟฟ้า แม่เหล็ก และแสงของวัสดุเหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะช่วยเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจในเรื่องของสารมัลติเฟอร์โรอิกให้มีความลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น