

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เซรามิกถือเป็นวัสดุที่มีความหลากหลายและคุณประโยชน์มากมาย ทั้งในรูปของเซรามิกดั้งเดิม (conventional ceramics) และเซรามิกขั้นสูง (advanced ceramics) สำหรับเซรามิกขั้นสูง นั้นถูกนำมาใช้ในงานทางด้านไฟฟ้า แม่เหล็ก อิเล็กทรอนิกส์ นิวเคลียร์ อุปกรณ์โทรคมนาคม ชิ้นส่วนยานยนต์ วัสดุทนไฟ วัสดุตัดและขัดถู อุปกรณ์ทางการแพทย์และชีวภาพ รวมไปถึงวัสดุโครงสร้างทั้งหลาย เป็นต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุกลุ่มนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวัน มีบทบาทต่ออุตสาหกรรม ตลอดจนเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศในระดับหนึ่ง

เซรามิกชนิดเฟอร์โรอิเล็กทริกเป็นเซรามิกอีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันนี้ เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆได้หลากหลาย เช่น ตัวเก็บประจุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง ทρανสดิวเซอร์ในอัลตราโซนิคส์และโซนาร์ที่ใช้พิโซอิเล็กทริก เป็นต้น โดยอุปกรณ์เหล่านี้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้นและมีขนาดที่เล็กลง [1]

สมบัติพิโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพเป็นขั้วทางไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุพิโซอิเล็กทริกมีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติได้แก่ แร่ควอartz แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ได้แก่ เลดไททาเนต (lead titanate) เลดเซอร์โคเนียไททาเนต (lead zirconia titanate) ซึ่งนิยมเรียกว่า PZT เลดไททาเนตเซอร์โคเนต และแบเรียมไททาเนต (barium titanate) สมบัติพิโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เป็นผลทางไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical) ของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแรง ทางกลไปเป็นกระแสไฟฟ้า หรือในทางตรงกันข้าม สามารถเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าไปเป็นแรงทางกลได้ [2] ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้เซรามิกที่มีสมบัติพิโซอิเล็กทริกนี้ ในอุตสาหกรรม อาทิเช่น piezoelectric compression accelerometer และ ultrasonic cleaning transducer เป็นต้น [3] วัสดุเซรามิกพิโซอิเล็กทริกมีโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก และมีหน่วยเซลล์ที่ไม่สมมาตร จะมีผลทำให้เกิด ขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole) ขึ้นเล็กน้อย วัสดุที่สามารถแสดงผลของพิโซอิเล็กทริกจะมีการจัดเรียงตัวของคู่ขั้ว ที่ด้านหนึ่งของวัสดุจะมีประจุบวกและอีกด้านหนึ่งจะมีประจุลบ เมื่อวัสดุถูกกดอัดด้วยแรง แรงกดทำให้ระยะห่างระหว่างคู่ขั้วซึ่งลดลงจะมีผลทำให้โมเมนต์คู่ขั้วของวัสดุทั้งหมดลดลง การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์คู่ขั้วของวัสดุนี้จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุ และความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองด้านเกิดการเปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุ ความหนาแน่นของประจุที่ปลายทั้งสองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น และมีผลทำให้ขนาดของวัสดุมีขนาดยืดออกสามารถนำมาใช้เป็น

ทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อัลตราโซนิก (ultrasonic) ทางการแพทย์ ลำโพง และนำมาใช้เป็นตัวขับเคลื่อน (actuator) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ประกอบที่สำคัญของเครื่องพิมพ์ 3D เครื่องฉีดพลาสติก เครื่องตัดเตอร์ในกล่องถ่ายภาพ วาล์วไฮดรอลิก (hydraulic valve) เป็นต้น และในกรณีให้แรงแกว่งทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า สามารถใช้เป็นอุปกรณ์จุดแก๊ส (gas igniter) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (generator) ตัวตรวจวัดความดัน (pressure sensor) เป็นต้น [4]

เลดไททาเนต (PbTiO_3 ; PT) เป็นสารเซรามิกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสร้างไดโพลหรือขั้วไฟฟ้าเล็กๆ ขึ้นได้โดยไม่ต้องได้รับแรงกล ซึ่งเป็นความสามารถของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) และไพโรอิเล็กทริก (pyroelectrics) นอกจากนี้ยังแสดงสมบัติเป็นพิโซอิเล็กทริก (piezoelectrics) อีกด้วย เลดไททาเนตมีโครงสร้างเป็นเทตระโกนอล (tetragonal) และสามารถเปลี่ยนสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริกไปเป็นพาราอิเล็กทริก (paraelectric) เมื่อได้รับอุณหภูมิที่พอเหมาะ เรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ทั้งนี้อุณหภูมิคูรีของสารเซรามิกแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไป โดยค่าอุณหภูมิคูรีของเลดไททาเนตนี้มีค่าประมาณ 490 องศาเซลเซียส [5] นอกจากนี้เลดไททาเนตยังให้ความถี่สูง ทำให้เหมาะในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง และต้องการความถี่สูง เช่น ตัวขับเคลื่อน ตัวตรวจรับแบบอินฟราเรด เป็นต้น แต่เนื่องจากมีค่าเทตระโกนอลลิตี (tetragonality) หรือ c/a สูงประมาณ 1.064 ทำให้ PT เป็นสารที่มีความเครียดภายในสูงมาก ดังนั้นการเตรียมชิ้นงานเซรามิกจึงทำได้ยากเพราะชิ้นงานจะแตก จึงนิยมเติมสารเจือเพื่อลดความเครียดภายในเนื้อสาร [6]

งานวิจัยนี้มุ่งความสนใจไปที่การลดค่าเทตระโกนอลลิตีโดยการเติมแบเรียมไอออนลงไปหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมเซรามิก รวมทั้งศึกษาโครงสร้างและสมบัติต่างๆ ของเซรามิกที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมผงผลึกและเซรามิกเลดแบเรียมไททาเนต
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค ของผงผลึกและเซรามิกเลดไททาเนตที่เติมแบเรียมไอออนลงไป
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณแบเรียมไอออนที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเซรามิกเลดแบเรียมไททาเนต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมผงผลึกและเซรามิกเลดแบเรียมไททานเตต
2. สามารถหาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างเฟส โครงสร้างจุลภาค ของผงผลึกและเซรามิกเลดแบเรียมไททานเตตที่เตรียมได้
3. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและปริมาณแบเรียมไอออนที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของผงเลดแบเรียมไททานเตต

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิแคลไซน์และเวลาในการเผาเซที่ที่เหมาะสมเพื่อนำไปเผาซินเตอร์ต่อไป โดยวิเคราะห์ผลจาก Thermo Gravimetric and Differential Thermal Analysis (TG-DTA) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
2. ศึกษาอุณหภูมิซินเตอร์และเวลาในการเผาเซที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เซรามิกที่มีสมบัติตามที่เรากำลังต้องการ โดยวิเคราะห์ผลจาก เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
3. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและการสูญเสียไดอิเล็กตริกของเซรามิกที่เตรียมได้

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เป็นที่ทราบกันดีว่า เลดไททานเตตเป็นวัสดุทางไฟฟ้าในรูปแบบเพอโรฟสไกต์ที่มีความสำคัญมากสามารถรวมตัวกับโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ (alkali earth metal) ได้ เช่น $(\text{Pb},\text{Ba})\text{TiO}_3$ [7] $(\text{Pb},\text{Sr})\text{TiO}_3$ [8] หรือ $(\text{Pb},\text{Ca})\text{TiO}_3$ [9] มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริก ไพโรอิเล็กตริก และพิโซอิเล็กตริกทำให้เพิ่มคุณค่าในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เกี่ยวกับสายตา ตัวแปลงสัญญาณ เครื่องส่งสัญญาณ และ non-volatile random access memories (NVRAM) [10] สมบัติทางกายภาพของเซรามิกเลดไททานเตตมีลักษณะคล้ายกับเซรามิกหลายตัว เช่น $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT), $\text{Pb}_x\text{Ca}_{1-x}\text{TiO}_3$, $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PZN-PT), $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT) ซึ่งที่อุณหภูมิห้องวัสดุมีโครงสร้างแข็งแรง และสามารถเปลี่ยนโครงสร้างที่อุณหภูมิ 490 องศาเซลเซียส รูปร่างของโครงสร้างสามารถวัดได้จากความเป็นเทระโกนอล (tetragonality; c/a) ของหน่วยเซลล์ซึ่งมีค่าประมาณ 1.06 [11] ในการเตรียมเซรามิกชนิดนี้เป็นเรื่องที่ยากเนื่องจากเกิดรูพรุน มีการแตกในระดับเซลล์ซึ่งส่งผลให้เซรามิกแตกหักง่าย และเป็นที่ยากที่จะ

เตรียมเซรามิกเลดไททานेटให้มีเฟสเดียวโดยไม่มีเฟสแปลกปลอม เนื่องจากการระเหยของตะกั่ว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส โดยทั่วไปจะพบการเกิดเฟสที่ไม่ต้องการของไททานेटเนียมออกไซด์ อีกทั้งลดสมบัติพีโซอิเล็กทริกลงอีกด้วย [12,13] การระเหยของตะกั่วเกิดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส [14]

เป็นเวลานานกว่าครึ่งศตวรรษที่นักวิจัยได้ศึกษาค้นคว้าโครงสร้างและสมบัติต่าง ๆ ของเซรามิกชนิดนี้ [11,16-21] โดยเฉพาะนักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจในเรื่องความผิดปกติของ positive temperature coefficient of resistivity (PTCR) ของแบเรียมไททานेट (ที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ของแบเรียมไททานेटสามารถลดลงได้เมื่อเติมไอออนของสารเคมีบางชนิดลงไป เช่น สตรอนเทียม หรือเซอร์โคเนียม และสามารถเพิ่มอุณหภูมิคูรีได้โดยการเติมตะกั่วลงไป เช่น $(\text{Ba}_{0.35}\text{Pb}_{0.65})\text{TiO}_3$ และ $(\text{Ba}_{0.2}\text{Pb}_{0.8})\text{TiO}_3$ มีอุณหภูมิคูรี 360 และ 420 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [22-24] ในทำนองเดียวกันมีการศึกษาการเติมสตรอนเทียมลงไปในเลดไททานेटเช่นกัน [18, 25-27]

ข้อดีของสารประกอบของแข็งที่เป็นเซรามิก คือสามารถออกแบบให้เหมาะสมกับการขยายตัวทางความร้อน [28-30] เซรามิกในรูปแบบเพอรอฟสไกต์จะถูกเตรียมที่อุณหภูมิสูงทำให้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 ครั้ง ซึ่งอาจทำให้ชิ้นงานเสียหายขึ้นอยู่กับการขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion coefficient) G. Shirane และคณะได้เสนอว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีของเลดไททานेट (ต่ำกว่า 490 องศาเซลเซียส) แลตทิซพารามิเตอร์ c จะลดลง a เพิ่มขึ้น และปริมาตรของหน่วยเซลล์เพิ่มขึ้น เกิดการลดการขยายตัวทางความร้อนของเลดไททานेटนั่นเอง [11, 31] Alguero และคณะ [32] พบว่าการขาดตะกั่วทำให้เลดไททานेटเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า 838 องศาเซลเซียส และกล่าวว่าการเตรียมฟิล์มบางเลดไททานेटโดยผสมแลนทานัมลงไปโดยวิธีโซลเจล ต้องการตะกั่วออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์เมื่ออุณหภูมิในเตาเผาเพิ่มขึ้นถึง 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดการสูญเสียตะกั่วเป็นจำนวนมากที่อุณหภูมินี้ Ananta และ Thomas [33] พบว่าการเผาซินเตอร์ของ PMN-PT ที่ 1250 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียตะกั่วเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อขนาดของอนุภาค กระบวนการและความคงที่ของสารเคมีอื่น ๆ ซึ่งการสูญเสียของตะกั่วก่อนกระบวนการซินเตอร์ก็มีผลเช่นกัน [15] ในงานวิจัยหลายชิ้นระบุว่า การสูญเสียของตะกั่วส่วนใหญ่เกิดในกระบวนการซินเตอร์ [14,34] Xue และคณะ [35] พบว่าเทคนิค Mechanical alloying (MA) สามารถลดการแตกหัก รุพุน และการระเหยของตะกั่วได้ และยังกล่าวได้ว่าได้ผลผลิตที่มีรูปร่างแน่นอนมีขนาดเกรน (grain size) ที่ละเอียด โดย Jennifer S. Forrester และคณะ [36] ได้ทำการเตรียมเซรามิกเลดไททานेटโดยการประยุกต์ใช้เทคนิค MA

ของ Xue ประกอบกับเทคนิคผสมออกไซด์ พบว่าไม่มีเฟสปลอมปนเมื่อเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แต่พบพีคเกิดขึ้นเล็กน้อยตามลูกศรชี้ (รูปที่ 1.1) เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูง คือตั้งแต่ 900 องศาเซลเซียสขึ้นไป

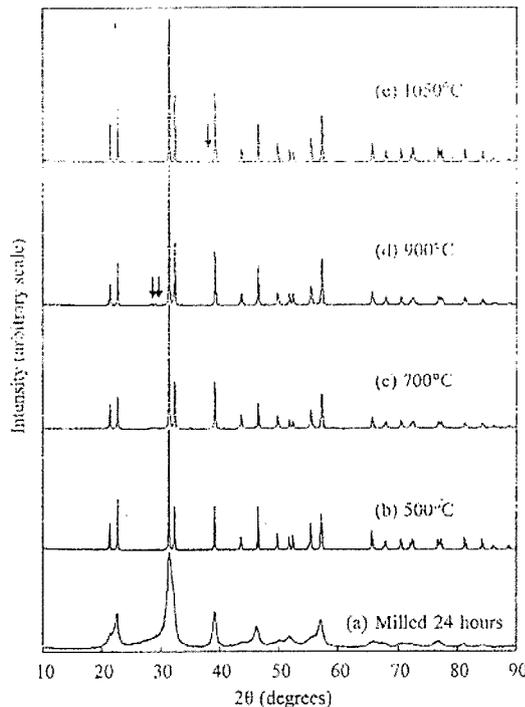


Fig. 1. (a-e) XRD patterns of milled PT and compacts sintered at selected temperatures.

รูปที่ 1.1 XRD patterns ของเลดไททานเนตโดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

กระบวนการโซลเจล (sol-gel) เป็นกระบวนการที่ค่อนข้างได้รับความนิยมในการเตรียมผงผลึกและฟิล์มบาง เนื่องจากใช้อุณหภูมิต่ำ ควบคุมส่วนประกอบได้ง่ายและสามารถผลิตโครงสร้างได้ละเอียด [37-39] มีการใช้โลหะอัลคอกไซด์ (metal alkoxide) ในการลดความชื้นในกระบวนการ แต่การเตรียมค่อนข้างลำบาก [41] ดังนั้นนักวิจัยจึงนำสารเคมีบางตัวที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยา เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) [41-42] 2-methoxyethanol [43-46] และ acetylacetone (2,4-pentanedione) [47-49] สารเหล่านี้เป็นตัวช่วยไม่ให้เกิดความชื้นในกระบวนการ เตรียมง่ายและราคาถูก โดย Wein-Duo Yang และ Sossina M. Haile [50] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุ $(\text{Pb}_{0.5}\text{Ba}_{0.5})\text{TiO}_3$ โดยวิธีโซลเจล ซึ่งเลือกใช้ acetylacetone เนื่องจากในขั้นตอนของปฏิกิริยาสารเคมีตัวนี้จะไปแทนที่ alkoxy group มีค่าสภาพไฟฟ้าลบ (electronegativity) ต่ำ

เพิ่มประสิทธิภาพให้ผงผลึก และลดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตได้ [51] จากนั้นศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำในการเปลี่ยนเฟส และเตรียมผงผลึก $(\text{Pb}_{0.5}\text{Ba}_{0.5})\text{TiO}_3$ ในระดับนาโน (nano) เมื่ออัตราส่วนโมลของน้ำต่อไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์เท่ากับ 17 พบว่าเมื่อเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ผงผลึกมีรูปร่างไม่แน่นอน ที่ 450 องศาเซลเซียส สารตั้งต้นเริ่มรวมตัวกันและตกผลึกแต่ยังพบเฟสของแบเรียมคาร์บอเนตอยู่ที่ 600 องศาเซลเซียส โครงสร้างของผงผลึกเป็นแบบเพอโรฟสไกต์และยังพบเฟสปลอมปนแต่พบในปริมาณน้อยดังรูปที่ 1.2 รูปที่ 1.3 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผงผลึกเผาแคลไซน์ที่ 550 องศาเซลเซียส โดยอัตราส่วนโมลของน้ำต่อไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (R_w) ต่างกัน พบว่าขนาดของอนุภาคอนุภาคอยู่ระหว่าง 55-95, 30-60, 40-80 และ 50-90 นาโนเมตร เมื่อ R_w มีค่า 0, 17, 30 และ 50 ตามลำดับ

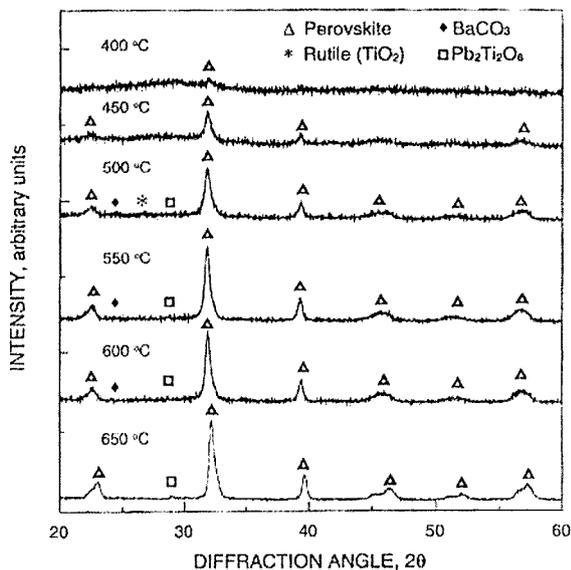


Fig. 5. The XRD patterns of the dried gel obtained from $R_w = 17$ and calcined at various temperatures.

รูปที่ 1.2 XRD patterns ของผงผลึก $(\text{Pb}_{0.5}\text{Ba}_{0.5})\text{TiO}_3$ โดยอัตราส่วนโมลของน้ำต่อไททานเนียมไอโซโพรพอกไซด์เท่ากับ 17 ซึ่งแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Xianran Xing และคณะ [52] ได้ศึกษาการขยายตัวทางความร้อนของเซรามิก $(\text{Ba}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{TiO}_3$ โดยที่ $0 \leq x \leq 1$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีผสมออกไซด์ โดยนำสารตั้งต้นคือ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, BaCO_3

และ TiO_2 มาผสมกันโดยใช้ครกบดสารหินผลึกบดให้เข้ากัน นำไปอัดในบ้ำอัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร นำเม็ดที่อัดได้ใส่ในถ้วยแพลตตินัม (platinum crucible) นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 500 และ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกจากเตาเพื่อให้ตัวอย่างเย็นลงทันที หลังจากนั้นนำไปเผาซ้ำอีก 2 ครั้ง นำตัวอย่างไปเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 950 ถึง 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิห้อง ในการซินเตอร์ครั้งสุดท้ายมีผลต่อปริมาณตะกั่วในตัวอย่าง ถ้าปริมาณตะกั่วสูงจะเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิต่ำ นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) และศึกษาผลทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยใช้อัตราการขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยได้ผลว่า โครงสร้างของตัวอย่างเป็นเทอร์โกนอล ระยะห่างของพีค (peak) จะมากขึ้นเมื่อปริมาณของตะกั่วเพิ่มขึ้น (รูปที่ 1.4) และแลตทิซพารามิเตอร์ c เพิ่มขึ้น ในขณะที่ a ลดลงดังรูปที่ 1.5 และปริมาตรของเซลล์ลดลงเมื่อ x เพิ่มขึ้น และพบว่าโครงสร้างของเซรามิก $(\text{Ba}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})\text{TiO}_3$ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเทอร์โกนอลไปเป็นลูกบาศก์ ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส

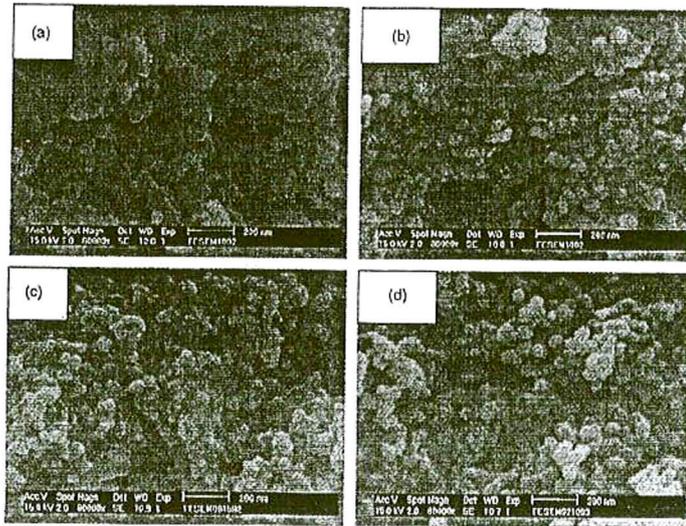


Fig. 7. SEM micrographs of $(\text{Pb}_{0.5}\text{Ba}_{0.5})\text{TiO}_3$ powders prepared from various water contents and calcined at 550°C : (a) the molar ratio of water to titanium isopropoxide at 0; (b) the molar ratio of water to titanium isopropoxide at 17; (c) the molar ratio of water to titanium isopropoxide at 30; and (d) the molar ratio of water to titanium isopropoxide at 50.

รูปที่ 1.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึก $(\text{Pb}_{0.5}\text{Ba}_{0.5})\text{TiO}_3$ ที่เตรียมโดยใช้ปริมาณน้ำต่างกันและเผาแคลไซน์ที่ 550 องศาเซลเซียส

A. Udomporn และ S. Anata [53] ได้ใช้วิธีการปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) และใช้เทคนิคการบดย่อยแบบสั่น (vibro-milling) เพื่อหาเฟสเดียวของเซรามิกเลดไททาเนต ลดขนาดอนุภาค และใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าปกติ พบว่าเฟสเดียวของผงผลึกเลดไททาเนตเริ่มเกิดเมื่อแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาเผาเซ้ 4 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มลดของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังรูปที่ 1.6 และพบว่ารูปร่างของอนุภาคมีลักษณะกลม มีขนาดตั้งแต่ 75-385 นาโนเมตร (รูปที่ 1.7)

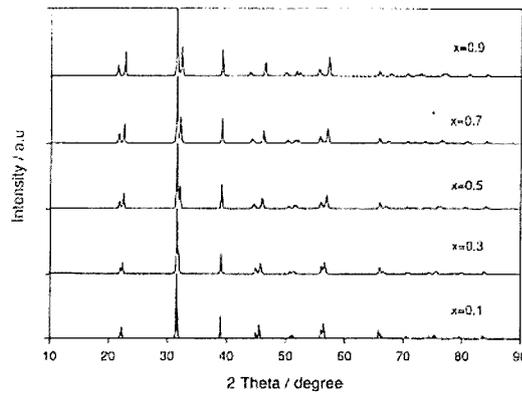


Fig. 1. XRPD patterns of Ba_{1-x}Pb_xTiO₃.

รูปที่ 1.4 XRD patterns ของ Ba_{1-x}Pb_xTiO₃ เมื่อปริมาณตะกั่วต่างกัน

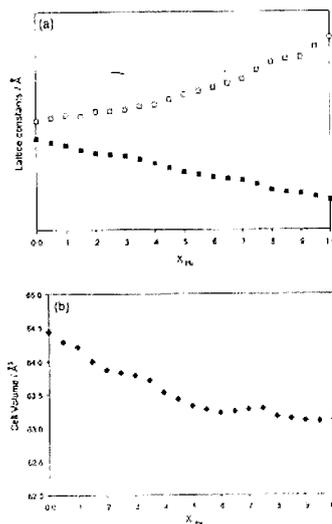


Fig. 2. (a) Cell parameters of Ba_{1-x}Pb_xTiO₃ with solubility. (b) Cell volume of Ba_{1-x}Pb_xTiO₃ with solubility.

รูปที่ 1.5 (a) พารามิเตอร์ของเซรามิก (Ba_{1-x}Pb_x)TiO₃ เมื่อปริมาณตะกั่วต่างกัน (b) ปริมาตรหน่วยเซลล์ของเซรามิก (Ba_{1-x}Pb_x)TiO₃ เมื่อปริมาณตะกั่วต่างกัน

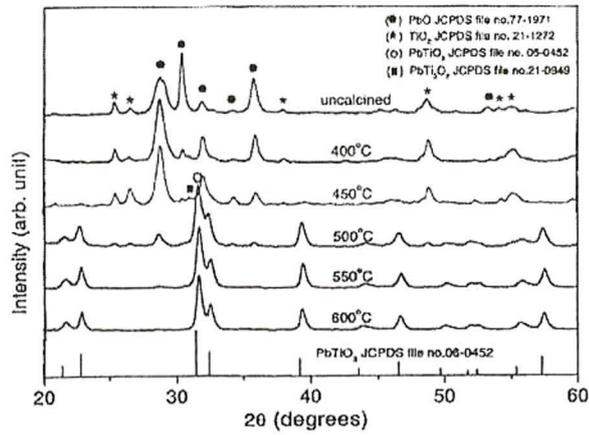


Fig. 2. XRD patterns of PT powder calcined at various temperatures for 4 h with heating/cooling rates of 20 °C/min.

รูปที่ 1.6 XRD patterns ของผงผลึกเลดไททานेटที่เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

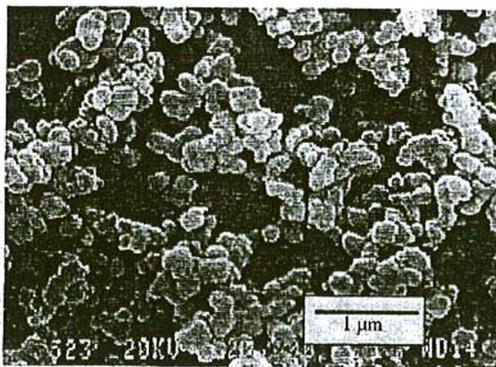


Fig. 3. SEM micrograph of the PT powders calcined at 550 °C for 4 h with heating/cooling rates of 20 °C/min.

รูปที่ 1.7 รูปถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผงผลึกเลดไททานेटที่เผาแคลไซน์ที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที