

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำสั้นเรื่อง

มนุษย์เรามีความต้องการเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ที่ให้ความสะดวกสบาย ความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สิน เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้ การค้นคว้าวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์จึงยังคงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะการค้นพบสมบัติต่างๆ ของวัสดุจึงเป็นการเปิดเผยความลับของธรรมชาติที่สำคัญต่อการนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์

นับจากการค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกโดย ปีแอร์ คูรี และ แจ็ก คูรี ในปี ค.ศ. 1880 ครอบคลุมจนถึงปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาค้นคว้าและประดิษฐ์วัสดุไพโซอิเล็กทริกในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น ด้านการแพทย์ เครื่องกำเนียดคลื่นเหนือเสียงทางการแพทย์ (medical ultrasound) เครื่องกระตุ้นหัวใจด้วยไฟฟ้า (defibrillator) เครื่องขูดหินปูน (ultrasonic scaler) เครื่องฟอกอากาศ (ultrasonic nebulizer) เครื่องวัดความดันโลหิต (blood pressure monitor) ด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ มีการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกมาเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (ink - jet printer) เป็นตัวสั่น (resonator) หรือตัวกรอง (filter) ความถี่ต่างๆ ในเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เครื่องรับโทรทัศน์ วิทยุ เครื่องขยายเสียง ลำโพง ฯลฯ อุปกรณ์ที่ใช้ในบ้านเรือน เช่น ที่จุดประกายไฟ (ignator) ของที่จุดบุหรี่และเตาหุงต้ม เป็นต้น

วัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากการรวมกันของวัสดุหลักตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันในลักษณะที่ควบคุมได้ โดยจะมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุอีกชนิดเป็นวัสดุที่กระจายอยู่ในเนื้อของวัสดุชนิดแรก ส่วนประกอบที่มารวมกันมีความแตกต่างกันทั้งในด้านรูปแบบ องค์ประกอบทางเคมีและไม่เป็นตัวทำละลายซึ่งกันและกัน สมบัติเดิมของส่วนประกอบแต่ละส่วนจะมีสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งเด่นกว่ากัน ทำให้ได้วัสดุใหม่ที่มีสมบัติที่ดีทั้งหลายของส่วนประกอบตั้งต้น วัสดุคอมโพสิตชีวภาพที่พบเห็นกันในชีวิตประจำวัน ได้แก่ ไม้ (wood) วัสดุคอมโพสิตพวกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ ยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (asphalt) ใช้ประโยชน์ในการทำผิวหน้าถนนให้มีความเรียบและทน

วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบ 2 เฟส คือ เฟสเซรามิกและเฟสพอลิเมอร์ ซึ่งจำแนกตามลักษณะการเรียงติดกัน (connectivity) ของเฟสที่หนึ่งกับเฟสที่สองได้ 10 แบบ (ดูรายละเอียดในบทที่ 2) แบบที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 0 - 3 โดยตัวเลขตัวแรกหมายถึง มิติ (dimension) ในพิกัดคาร์ทีเซียน แสดงการเรียงติดกันของเฟสเซรามิก ในที่นี้มีมิติเป็น 0 หมายถึง ไม่มีการติดกันนั่นเอง ตัวเลขที่สองเป็นมิติการเรียงติดกันของเฟสพอลิเมอร์ มิติเท่ากับ 3 หมายถึงเรียงติดกันในแนวแกนทั้งสาม โดยเซรามิกที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แบเรียมไทเทเนต (barium titanate, $BaTiO_3$) เนื่องจากเป็น เซรามิกไพโซอิเล็กทริกที่มีสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกที่ดี และเป็นวัสดุที่นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตและนำเซรามิกดังกล่าวมาประยุกต์เป็นส่วนประกอบในสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วข้างต้น พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) ซึ่งเรียกย่อ ๆ ว่า PVF_2 หรือ PVDF เป็นวัสดุที่มีสมบัติเด่นบางประการ เช่น มีความเป็นผลึกสูงและแสดงความเป็นขั้ว (polarity) มีผิวเรียบโดยไม่จำเป็นต้องมีการขัดแต่ง น้ำหนักเบาและมีขั้นตอนในการผลิตที่ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุกลุ่มโลหะหรือเซรามิก ในอดีต พอลิเมอร์ PVDF ถูกจัดอยู่ในสารจำพวกฉนวนความร้อนหรือฉนวนไฟฟ้า แต่ต่อมาในปี ค.ศ.1969 Kawai (Kawai, 1969) นักวิทยาศาสตร์ญี่ปุ่นได้ค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric phenomenon) ในพอลิเมอร์ PVDF กล่าวคือ เมื่อมีความเค้นกระทำกับพอลิเมอร์ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) เปลี่ยนแปลงให้สัญญาณทางไฟฟ้าออกมา และในทางกลับกันเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่พอลิเมอร์นี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกล การศึกษาต่อมาพบว่าพอลิเมอร์ PVDF ยังแสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric property) กล่าวคือ ขนาดของโมเมนต์ขั้วคู่ในพอลิเมอร์นี้จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (Bergmann *et al.*, 1971) ดังนั้นสามารถใช้พอลิเมอร์ PVDF นี้เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิหรือเป็นเครื่องมือจับคลื่นความร้อนหรือคลื่นรังสีอินฟราเรดได้ซึ่งต่อมาพัฒนาไปเป็นเครื่องมือหลายชนิด เช่น เครื่องจับขโมย หรือสวิตช์ความร้อน (thermal switch) เป็นต้น

จากที่กล่าวมาทั้งหมดพอจะสรุปได้ว่าการวิจัยทางด้านวัสดุคอมโพสิตยังคงเป็นเรื่องจำเป็นต่อมนุษย์ นอกจากเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่แล้ว ยังส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพชีวิตด้านสุขภาพของมนุษย์ สำหรับประเทศไทยพบว่าการวิจัยด้านนี้ยังมีน้อย จึงคาดว่างานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยด้านวัสดุคอมโพสิตในด้านอื่น ๆ ต่อไป

1.2 การตรวจเอกสาร

สำหรับงานวิจัยที่มีการศึกษา BaTiO₃/PVDF คอมโพสิตโดยตรงนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาเฉพาะ BaTiO₃ หรือ PVDF อย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น หรือศึกษาสารดังกล่าวขั้นต้นที่เป็นคอมโพสิตกับสารชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสรุปได้โดยสังเขปดังนี้

Banno และ Ogura (1991) ได้ศึกษาค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กตริก (d_{33} , d_{31} และ d_{11}) ของวัสดุคอมโพสิต 0 - 3 polymer/PZT/PbTiO₃ พบว่าค่าต่าง ๆ เหล่านี้มีการแปรผันตามอัตราส่วนของเซรามิกที่เติมลงไป หลังจากนั้นอีก 3 ปี Madhavan และคณะ (Madhavan *et al*, 1994) ได้ศึกษาวัสดุคอมโพสิต 0 - 3 polymer/(PZT, PMN, PTSM, PZT - PT - BT) เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีอัดเม็ด (pressing pellets) และเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิแตกต่างกันเพื่อให้ได้คอมโพสิตที่มีความพรุนน้อยๆ หลังจากนั้นได้ใช้เทคนิคทางเรโซแนนซ์ศึกษาคุณสมบัติด้านไพเอโซอิเล็กตริก พบว่า วัสดุคอมโพสิต 0 - 3 polymer/ PTSM มีคุณสมบัติด้านไพเอโซอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรมทางการแพทย์

Chan และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกระบวนการโพลิง (poling process) ที่มีต่อวัสดุคอมโพสิต 0 - 3 PZT/P(VDF - TrFE) ที่มีอัตราส่วนของเซรามิกเท่ากับ 0.50 พบว่า ถ้าให้สนามโพลิงทั้งสองเฟสในทิศทางเดียวกันจะทำให้ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กตริกของวัสดุคอมโพสิตมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการหักล้างของค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กตริกของสารแต่ละชนิด แต่เมื่อเปลี่ยนเงื่อนไขการโพลิง โดยการให้สนามโพลิงแต่ละเฟสในทิศทางตรงข้ามกัน ก็จะทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถแสดงสมบัติไพเอโซอิเล็กตริกได้โดดเด่นขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า สมบัติไพเอโซอิเล็กตริกของแต่ละเฟสในวัสดุคอมโพสิตมีการเสริมกันนั่นเอง ต่อมา Chan และคณะ (1999) ที่ได้ขยายช่วงการศึกษาผลของการโพลิงที่มีต่อสมบัติไพเอโซอิเล็กตริกและไพโรอิเล็กตริกของวัสดุคอมโพสิต 0 - 3 PZT/P(VDF - TrFE) โดยแบ่งลักษณะการโพลิง 3 แบบและได้ผลการทดลอง ดังนี้ แบบที่ 1 ให้สนามโพลิงเฉพาะเฟสเซรามิกพบว่า วัสดุคอมโพสิตแสดงสมบัติไพเอโซอิเล็กตริกและไพโรอิเล็กตริกที่ไม่โดดเด่นมากนัก แบบที่ 2 ให้สนามโพลิงทั้งสองเฟสในทิศทางเดียวกันพบว่า สมบัติไพโรอิเล็กตริกจะโดดเด่นกว่าสมบัติไพเอโซอิเล็กตริก และแบบที่ 3 ให้สนามโพลิงทั้งสองเฟสในทิศทางตรงข้ามกันพบว่า สมบัติไพเอโซอิเล็กตริกจะโดดเด่นกว่าสมบัติไพโรอิเล็กตริก

Lau และคณะ (2001) ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบ 0 - 3 ชนิดฟิล์มบางที่มีเซรามิกกระจายตัวอยู่ในโพลิเมอร์ P(VDF - TrFE) ด้วยวิธีการฉาบแบบหมุน (Spin - coating method) และศึกษาค่าคงที่ไพโรอิเล็กตริกและไพเอโซอิเล็กตริกของวัสดุ P(VDF - TrFE) โดยก่อน

หน้านั้น Chynoweth (1956) ได้รายงานเทคนิคการวัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนให้แก่สารตัวอย่าง แล้ววัดค่ากระแสไพโรอิเล็กทริกเพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริก ซึ่งเทคนิคนี้สามารถใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับได้ เป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ต่อมาในปี ค.ศ. 1971 Febel และ Henisch (1971) ได้รายงานเทคนิควัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกสำหรับวัสดุที่ผลึกมีสภาพขั้วไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการที่อยู่บนพื้นฐานของการใช้วงจรเสมือนที่ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ ในการวัดจะพยายามทำให้การกระจายตัวของความร้อนมีความสม่ำเสมอ ต่อมาในปี 1972 มีการศึกษาการวัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกโดยวิธีของ Byer และ Roundy (1972) สามารถวัดค่าคงที่ไพโรอิเล็กทริกได้จากการวัดปริมาณการเปลี่ยนแปลงของประจุ ในขณะที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิของสารตัวอย่างในอัตราคงที่

Sakamoto และคณะ (2002) ศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติไพโรอิเล็กทริกของฟิล์มบางคอมโพสิตแบบ 0 - 3 เซรามิกเพอร์โรอิเล็กทริกกระจายอยู่ในเฟสพอลิยูรีเทน วัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิ 343 K ได้เท่ากับ $7.0 \times 10^{-5} \text{ C.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ซึ่งก่อนหน้านั้น Sakamoto และคณะ (1999) ได้ศึกษาการตอบสนองแรงดันทางไฟฟ้าของหัววัดสัญญาณไพโรอิเล็กทริก โดยใช้วัสดุคอมโพสิตแบบ 0 - 3 ซึ่งเตรียมได้จาก Castor oil-based polyurethane (PU) และ Lead Zirconate Titanate (PZT) ด้วยวิธีการฉาบแบบหมุน (spin coating method) แล้วนำมาจัดสภาพขั้วไฟฟ้าให้เป็นระเบียบและทดสอบสมบัติไพโรอิเล็กทริก และไพโรอิเล็กทริก ซึ่งจากการทดลองวัสดุคอมโพสิตที่มีปริมาณเซรามิกมากจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient) มีค่ามากตามไปด้วย และการตอบสนองแรงดันทางไฟฟ้าของวัสดุไพโรอิเล็กทริกจะลดลงเมื่อความหนาของวัสดุคอมโพสิตมีมากขึ้น วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นหัววัดไพโรอิเล็กทริกทางแสง (photo pyroelectric sensor)

Ploss (1993) ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของการโพลงวัสดุเฟสเดียวของ PZT กับ P(VDF - TrFE) และวัสดุคอมโพสิตของวัสดุทั้งสองนี้ในรูปแบบฟิล์มบางที่มีสัดส่วนปริมาตรของเซรามิกเป็น 0.2 และ 0.6 พบว่าพฤติกรรมการโพลงวัสดุคอมโพสิตมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของเซรามิกและพบว่า การเรียงติดกันของเฟสเซรามิกมีผลต่อการตอบสนองสมบัติไพโรอิเล็กทริกและการกระจายตัวของเซรามิกมีผลต่อการตอบสนองสมบัติไพโรอิเล็กทริก

Sa-gong และคณะ (1986) รายงานเกี่ยวกับกระบวนการโพลงเพื่อให้วัสดุนั้นแสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก วัสดุคอมโพสิตแบบ 0 - 3 ซึ่งประกอบด้วยเซรามิกกับพอลิเมอร์ พบว่า จะต้องใช้สนามไฟฟ้าสูง มาก ๆ เนื่องจากพอลิเมอร์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ต่ำ (ประมาณ 5) แต่วิธีที่จะทำให้สามารถโพลงโดยใช้สนามไฟฟ้าต่ำลงได้ โดยการเติมสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ปริมาณน้อย ๆ เช่น คาร์บอน เจอร์เมเนียม หรือซิลิกอน

Ramesh และคณะ (2002) ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิต โดยใช้เทคนิค BURPS โดยนำผงเซรามิก PZT ผสมกับ PEO (polyethylene oxide) ทำการขึ้นรูปโดยการอัด นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C เพื่อกำจัด PEO ออกทำให้มีความพรุนมากขึ้นเผาอบที่อุณหภูมิ 1,200 °C ทำซ้ำด้วยกาวยเงิน ผ่านกระบวนการโพลงโดยใช้เทคนิคโครนาโพลง จากนั้นทำการศึกษาค่าไดอิเล็กตริก สมบัติเชิงกลและค่าคงที่ไพโซอิเล็กตริก ที่เกิดการสั่นของโหมดความหนาโดยการเปรียบเทียบกับสัดส่วนโดยปริมาตรของ เซรามิก PZT พบว่าค่าไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อวัสดุคอมโพสิตมีสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก 70 - 90 % ค่า d_{33} , d_{31} และ d_{11} มีค่าสูงสุด เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก PZT เท่ากับ 30 - 40 % ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพโซอิเล็กตริกและค่า figure of merit (FoM) มีค่าสูงเมื่อมีเซรามิกเป็นส่วนประกอบ 10 - 30 โมลเปอร์เซ็นต์ ค่าคัปปลิงแพกเตอร์แนวความหนา มีค่าเท่ากับ 0.4 - 0.5 ซึ่งใกล้เคียงกับวัสดุคอมโพสิต ค่าอิมพีแดนซ์ทางอะคูสติก (acoustic impedance, Z) มีค่าแปรผันตรงกับสัดส่วนโดยปริมาตรของเซรามิก โดยมีค่าสูงเมื่อเซรามิกเป็นส่วนประกอบ 70-90 %

หลังจากที่มีการค้นพบว่า PVDF มีสมบัติไพโซอิเล็กตริกในปี ค.ศ. 1969 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อ Kawai และสามารถหาค่าคงที่ไพโซอิเล็กตริกของพอลิเมอร์ PVDF สูงถึง 6.7 pC/N ซึ่งมีค่าสูงกว่าในพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แล้ว หลังจากนั้นไม่นาน Bergmann และคณะ (1971) พบว่าพอลิเมอร์ชนิดนี้ยังมีสมบัติไพโรอิเล็กตริก ต่อมามีการศึกษากันแพร่หลายและพบว่าพอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกมีสภาพความเป็นขั้วไฟฟ้า (polarity) และสามารถใช้สนามไฟฟ้าสูงในการจัดเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ภายในพอลิเมอร์

การเตรียมพอลิเมอร์ PVDF นั้นวิธีหนึ่งที่สามารถเตรียมได้ง่ายและสะดวกคือการหล่อในสารละลาย (solvent casting) ซึ่งสามารถเตรียมได้ทั้งในรูปแบบแผ่นเรียบ (flat sheet) และแบบท่อ (hollow sheet) Deshmuleh และ Li (1998) ในส่วนของ Bottino และคณะ (1991) ได้เตรียมพอลิเมอร์ PVDF โดยการนำผงมาทำละลายกับตัวทำละลาย เช่น ไดเมทิลฟอร์มามาไมด์ (dimethylformamide, DMF) ไดเมทิลอะซิตาไมด์ (dimethyl acetamide, DMA) ไดเมทิลซัลไฟออกไซด์ (dimethylsulfoxide, DMSO) เอ็นเมทิลทูปิโรลิโดน (N - methyl - 2-pyrrolidone, NMP)

Luongo และคณะ (1972) สามารถเตรียม PVDF ให้มีโครงสร้างผลึกที่มีสภาพขั้วไฟฟ้า โดยการป้อนสนามไฟฟ้าสูงเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเฟสแอลฟาซึ่งไม่มีสภาพขั้วไฟฟ้าเป็นเฟสบีตาที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าและมีสภาพขั้วไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ พอลิเมอร์ 30 MV/m สามารถเปลี่ยนเฟสแอลฟาเป็นบีตาได้ ส่วน Southgate (1976) พบว่าต้องป้อนสนามไฟฟ้าแก่พอลิเมอร์สูงกว่า 30 MV/m แบบโครนาโพลงและพบเฟสพอลิเมอร์ผสมกันระหว่างเฟสแอลฟาและเฟสบีตา ต่อมา Davis และคณะ (1978) พบว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่พอลิเมอร์ที่ 120 MV/m จะ

เปลี่ยนพอลิเมอร์จากเฟสแอลฟาเป็นเฟสเดลตาและที่สนามไฟฟ้าสูงกว่านี้จะเปลี่ยนจากเฟสเดลตาเป็นเฟสบีตา ต่อมา Seggern และ Wang (1984) ได้รายงานว่าในการศึกษาพฤติกรรมของโพลาริเซชันของพอลิเมอร์ PVDF ระหว่างให้สนามไฟฟ้าโพลิงสูง ๆ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 3 - 8 kV (120 - 320 MV/m)

Xiaoxing Wang และคณะ (2003) ได้เตรียมไพโซเซรามิกที่ไม่มีตะกั่ว ชนิด $(\text{Bi}_{0.52}\text{Na}_{0.5})_{0.94}\text{Ba}_{0.06}\text{TiO}_3$ หรือ BNBT โดยปฏิกิริยาตรง เผาแคลไซน์ที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ทำการเติมสารเจือ CeO_2 ระหว่าง 0.1 - 1 โมลเปอร์เซ็นต์ ผสม PVA ทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นกลมหนา 2 mm เผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 2 ชั่วโมงทำขั้วด้วยกาวเงินและอบที่ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้สนามโพลิง $4\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ที่ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 10 นาที จากนั้นศึกษาสมบัติไพโซอิเล็กทริกและสมบัติทางไฟฟ้า พบว่า BNBT ที่มีการเติมสารเจือ 0.4 โมลเปอร์เซ็นต์จะมีสมบัติที่ดีที่สุดคือ ค่า d_{33} มีค่า $152\text{ pC}\cdot\text{N}^{-1}$ ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์แนวความหนา มีค่าเท่ากับ 0.34 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 652 อุณหภูมิคูรี (Curie's Temperature, T_c)¹ $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าทางไฟฟ้ากลต่างๆ นี้ เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซรามิกที่ไม่มีตะกั่วสำหรับงานด้านต่างๆ ที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

Wiederick และคณะ (1996) ใช้ระบบทางแสงที่เรียกว่า optical lever technique วัดค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิต 1 - 3 PZT/polyurethane พบว่าวิธีการนี้มีความละเอียดในการวัดถึงระดับ 10^{-9} เมตร แต่ขั้นตอนการเคลือบผิวหน้าสารตัวอย่างให้มีความแวววาวจนสามารถสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ยังคงเป็นอุปสรรคของวิธีนี้อยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการทางแสงยังคงเป็นที่สนใจของนักวิจัย นอกจากวิธีการเรโซแนนซ์และวิธีทางแสงแล้ว ยังมีวิธีที่น่าสนใจโดย Rastorguev และคณะ (1996) ใช้วิธี Piezoelectric Transformer วัดค่าคงที่ของการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าในแนวความหนา ค่าคงที่ยืดหยุ่น วัดความเร็วและการหน่วงความเร็วของเสียงในสารตัวอย่าง โดยอาศัยสมบัติของการเป็นตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของสารตัวอย่าง อัตราส่วนของสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนต่อสัญญาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ของการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าในแนวความหนา

Zhang และคณะ (1988) ได้ทดลองวัดค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริกของวัสดุบางชนิด โดยใช้ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ พบว่าที่ความถี่ต่ำๆ สัญญาณรบกวนทางกลมีผลต่อการทดลองมาก จึงใช้วงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับ (feedback loop) แก้ปัญหาการรบกวนทางกลที่ความถี่ต่ำดังกล่าวได้ ทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

เนื่องจากสารตัวอย่างที่ใช้ในระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์นั้นนอกจากมีผิวหน้าหรือถูกทำให้ผิวหน้าสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ดีแล้ว การยึดสารตัวอย่างให้ติดกับแท่นจับยึดสาร

¹ อุณหภูมิคูรี (Curie's Temperature, T_c) คือ อุณหภูมิที่สารหมดสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก

ตัวอย่างทำให้สารตัวอย่างมีอิสระในการขยายตัวเนื่องจากการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าน้อยลง ผลของการยึดสารตัวอย่างด้วยกาวนำไฟฟ้าติดกับแท่นจับยึดนั้นส่งผลให้ค่าคงที่โพซิโชนิเล็กตริกที่วัดได้น้อยลงกว่าความเป็นจริงเพราะการขยายตัวในแนวขนานกับลำแสงเลเซอร์ถูกจำกัดให้ขยายตัวได้เพียงด้านเดียว Zhang และคณะ (1988) วิเคราะห์ว่าแรงที่ยึดสารตัวอย่างให้ติดกับที่จับยึดนั้นมีลักษณะเหมือนแรงของสปริง ขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของกาวนำไฟฟ้าที่ใช้ พื้นที่ผิวที่จับยึด และความถี่ที่ปฏิบัติงาน สำหรับสารตัวอย่างหนา 1 mm พื้นที่ผิว 1 mm² พบว่าความถี่ในการปฏิบัติงานต้องน้อยกว่า 20 kHz สอดคล้องกับ Royer และ Kmetik (1992) ที่แสดงให้เห็นถึงผลของการที่สารตัวอย่างในระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ถูกบังคับให้ขยายตัวในแนวความหนาได้เพียงด้านเดียว

Pan และ Cross (1989) แก้ปัญหาการจับยึดสารตัวอย่างโดยการใช้ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ที่มีลำแสงเลเซอร์สองลำแสงตกกระทบบนผิวหน้าสารตัวอย่างทั้งสองผิวหน้าโดยใช้ด้านหนาของสารตัวอย่างเป็นส่วนที่ถูกจับยึดแทนผิวหน้า วิธีนี้สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่เนื่องจากมีความยุ่งยากในการวิเคราะห์ผลเพื่อให้ได้ซึ่งค่าคงที่โพซิโชนิเล็กตริก และการที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ที่ยาวเกินไป ทำให้วิธีนี้ไม่เหมาะกับระบบที่ใช้แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่มีกำลังต่ำหรือเลเซอร์ที่มีความยาวของลำแสงที่ไม่กระจายต่ำ (coherence length) ทำให้ถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมได้ง่าย วิธีนี้จึงไม่เป็นที่นิยม

วิธีการยึดผิวด้านหนึ่งของสารตัวอย่าง และใช้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนผิวหน้าของสารตัวอย่างยังคงเป็นที่นิยม แต่ปัญหาที่ตามมาคือการยึดสารตัวอย่างกับที่จับยึดหรือฐานรองนั้นอาจทำให้เกิดการโค้งงอ (bending effect) ของสารตัวอย่าง (เนื่องจากบางส่วนของสารตัวอย่างไม่มีกาวนำไฟฟ้าจึงยังคงสามารถขยายตัวในแนวความหนาได้ทั้ง 2 ด้าน) Kholkin และคณะ (1996) ได้แสดงให้เห็นถึงผลของการโค้งงอของสารตัวอย่างบนฐานรองและการโค้งงอของสารตัวอย่างกับฐานรองในสารตัวอย่างประเภทฟิล์มบาง พบว่าวิธีที่ใช้ 2 ลำแสงตกกระทบบนสารตัวอย่างเหมาะสมสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง ใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูงขึ้น และเปรียบเทียบให้เห็นว่าในแต่ละตำแหน่งของผิวหน้าสารตัวอย่างที่ลำแสงไปตกกระทบบนนั้นให้ค่าคงที่โพซิโชนิเล็กตริกต่างกัน และแนะนำว่าการลดขนาดของสารตัวอย่างลงนั้นสามารถแก้ปัญหาคงที่โพซิโชนิเล็กตริกของสารตัวอย่าง เช่นเดียวกันกับ Muensit และ Guy (1998) ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนตำแหน่งต่างๆ บนผิวหน้าสารตัวอย่างเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของสารตัวอย่างที่ยึดติดกับฐานรอง

1.3 วัสดุประสมค์

1.3.1 เตรียมวัสดุคอมโพสิทระหว่างเฟสเซรามิกและเฟสพอลิเมอร์

1.3.2 วัดค่าไพโซอิเล็กทริก ค่าไพโรอิเล็กทริก และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก