# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 บทนำต้นเรื่อง

วัสดุไพอิโซอิเล็กตริก (piezoelectric material)[1] ถือเป็นหัวใจสำคัญของทรานสดิวเซอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง ถ้าหากใช้แปลงสัญญาณจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า จัดเป็นทรานสดิวเซอร์สำหรับปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริกแบบตรง (direct piezoelectric transducer) ในทำนองกลับกันถ้าหากใช้แปลงสัญญาณจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล จัดเป็นทรานสดิวเซอร์สำหรับปรากฏการณ์ผันกลับ (inverse piezoelectric transducer) ตัวอย่างเช่น ไฮโดรโฟน ไมโครโฟน ซึ่งทำหน้าที่รับคลื่นเสียงและเปลี่ยนพลังงานเสียงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า นอกจากนี้ สิ่งประดิษฐ์และอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ประโยชน์จากวัสดุไพอิโซอิเล็กตริก ได้แก่ เครื่องกระตุ้น (actuator) เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) โซนาร์ (sonar) เครื่องตรวจจับ (sensor) เครื่องส่งเสียงเตือน (alarmer) ลำโพง (loudspeaker) ทรานสดิวเซอร์ ส่ง-รับคลื่นอัลตราโซนิก สำหรับใช้ในทางการแพทย์ เช่น ตรวจอวัยวะภายในร่างกาย ที่จุดเตาแก๊ส (ignitor) ตัวกรองความถี่ (frequency filter) ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวสั่นพ้อง (resonator) ในอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น โทรทัศน์ เครื่องเสียง ฯลฯ สำหรับ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาค้นคว้าทรานสดิวเซอร์ที่ใช้งานเป็นไฮโดรโฟน (hydrophone) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสำหรับใช้งานในของเหลว เช่น น้ำ อาศัยวัสดุไพอิโซเซรามิก (piezoceramic) เป็นตัวรับ-ส่งสัญญาณในรูปของคลื่นอะคูสติก (acoustic waves) ซึ่งจะต้องมีความสูญเสีย (attenuation) ของสัญญาณต่ำ และ มีความไว (sensitivity) ในการตรวจจับสูง สามารถสรุปพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. คอปปลิงแฟกเตอร์ไฟฟ้า-กล (electromechanical coupling factor, k) ถ้ามีค่ามากหมายความว่า วัสดุหรือสิ่งประดิษฐ์มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นคลื่นเสียง

---

[1] ปรากฏการณ์ไพอิโซอิเล็กตริก (piezoelectric effect) ค้นพบครั้งแรก ปี ค.ศ. 1880 โดย ปิแอร์ คูรี และ แจ็ค คูรี หมายถึง เมื่อให้ความเค้นกล แก่วัสดุไพอิโซเซรามิกจะก่อให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าขึ้น และในทางกลับกันเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่วัสดุจะทำให้เกิดความเครียด (Cady, 1968)

2. สัมประสิทธิ์ความเครียดไพอิโซอิเล็กตริกอุทกสถิต (hydrostatic piezoelectric strain coefficient, $d_h$) ถ้ามีค่ามากหมายถึงวัสดุหรือสิ่งประดิษฐ์สามารถนำไปใช้เป็นตัวส่งคลื่นอะคูสติกที่ดี

3. สัมประสิทธิ์ความต่างศักย์อุทกสถิต (hydrostatic piezoelectric voltage coefficient, $g_h$) ถ้ามีค่ามากหมายถึงวัสดุหรือสิ่งประดิษฐ์สามารถนำไปใช้เป็นตัวรับคลื่นอะคูสติกที่ดี

4. อิมพิแดนซ์ทางอะคูสติก (acoustic impedance, z ) ถ้ามีค่าใกล้เคียงกับตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน จะช่วยลดการกระเจิงหรือการสะท้อนกลับของคลื่น

5. ความพรุน (porosity) ที่เหมาะสมของวัสดุ คือ 10-50 % ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( dielectric constant ,$\varepsilon_r$) ของสาร โดยทั่วไปค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความพรุนของสารมีค่ามากขึ้น

6. $d_h.g_h$ เรียกว่า Figure of Merit (FoM) เป็นค่าที่บ่งบอกประสิทธิภาพทั่วไปของทรานสดิวเซอร์ชนิดต่างๆ

งานวิจัยนี้สนใจเตรียมสารไพอิโซเซรามิก 2 ชนิดคือ แบเรียมไทเทเนต (barium titanate, $BaTiO_3$ ) และ โปตัสเซียมไทเทเนต (potassium titanate, $KNbO_3$) โดยวิธีปฏิกิริยาตรง (solid state reaction) เนื่องจากเป็น ไพอิโซเซรามิกที่ ไม่มีตะกั่ว เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัสดุไพอิโซเซรามิกที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม และนำสารไพอิโซเซรามิกที่เตรียมได้มาใช้เป็นส่วนประกอบหลักของไฮโดรโฟน โดยทั้งนี้ จะมีการทดสอบหาค่าทางอุทกสถิตของสารและไฮโดรโฟน ดังกล่าวข้างต้น

**1.2 การตรวจเอกสาร**

การศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุไพอิโซเซรามิกที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบ สำหรับการประยุกต์เป็นสร้างเป็นไฮโดรโฟน มีการ รายงานไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมาตราบจนปัจจุบัน ดังนี้

Bao-Jin Chu และคณะ (Chu *et. al.*, 2002) เตรียมไพอิโซอิเล็กตริกโดยใช้วิธีปฏิกิริยาตรง มี $BaTiO_3$ เป็นส่วนประกอบหลัก และมีการเติม โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, $Na_2CO_3$) สูตรโมเลกุลทั่วไปของสารคือ $(1-x)Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$-$xBaTiO_3$ โดยที่ x คือปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต พบว่าเมื่อ $x \leq 0.10$ มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก อยู่ในช่วง 400-800 สัมประสิทธิ์ไพอิโซอิเล็กตริกความเครียด (piezoelectric strain coefficient, d) เท่ากับ 122 $pC.N^{-1}$ คอปปลิงแฟกเตอร์ในแนวระนาบ (planar coupling factor, $k_p$) เท่ากับ 0.29 และในแนวความหนา (thickness

coupling factor, $k_t$) เท่ากับ 0.40 จากงานวิจัยนี้ ได้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของตัวเติมว่ามีส่วนในการปรับปรุงสมบัติไพอิโซอิเล็กตริก ให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานทางด้านอัลตราโซนิก

งานอีกชิ้นหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับบทบาทของตัวเติมคือ รายงานของ Xiaoxing Wang และคณะ (Wang *et. al.*, 2003) ได้เตรียมไพอิโซเซรามิกตระกูลแบเรียมไทเทเนตคือ $(Bi_{0.52}Na_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO_3$ หรือ BNBT โดยปฏิกิริยาตรง พบว่า BNBT ที่มีการเติมสารเจือ 0.4 โมลเปอร์เซ็นต์ มี $d_{33}$ 152 $pC.N^{-1}$ ค่าคอปปลิงแฟกเตอร์แนวความหนามีค่า 0.34 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 652 อุณหภูมิคูรี (Curie's Temperature, $T_c$)[2] ค่อนข้างต่ำคือ 280 °C

Zang และคณะ (Zang *et. al.*, 2003) ศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขแรงอัดที่มีผลต่อความพรุนของเซรามิก $BaTiO_3$ พบว่า เมื่อให้แรงอัดขนาด $1\times10^3$ MPa จะมีค่าความพรุนสูงถึง 25 % โดยที่ความหนาแน่นจะแปรผกผันกับความพรุน ขณะที่ ค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความพรุนมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์ไพอิโซอิเล็กตริกสูงขึ้น

Bowen และคณะ (Bowen *et al.*,2004) ศึกษาความพรุนของสารไพอิโซอิเล็กตริกสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับไฮโดรโฟนในช่วงความถี่ต่ำพบว่าสารไพอิโซอิเล็กตริกที่มีความพรุนสูงจะมีค่า FoM สูง และเหมาะที่จะเป็นตัวรับคลื่นเสียงความถี่ต่ำ วิธีการที่กลุ่มวิจัยนี้ใช้ในการทำให้สารมีความพรุนสูง คือใช้โฟมพอลิเมอร์ผสมเข้าไปในขั้นตอนการเตรียมสารเซรามิก และกำจัดโฟมพอลิเมอร์ออกในระหว่าง เผาซินเตอร์[3] (sintering process) ทำให้โฟม พอลิเมอร์ระเหิดออกไป และทิ้งช่องว่าง (void) ไว้ในโครงสร้าง รูพรุนของสารที่ได้จะอยู่ในระดับไมโครเมตรและกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ

จากการศึกษาของ Huebner และคณะ (Huebner *et al.*,1994) ในเรื่องของขนาดเกรนและรูพรุน ของสารไพอิโซเซรามิก (ในที่นี้คือ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต lead zirconate titanate : PZT) พบว่าสัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้ากล คืออุณหภูมิซินเตอร์ และเวลาในการเผาแช่ (soaking time) ถ้าอุณหภูมิซินเตอร์สูงและเผาแช่เป็นเวลานานทำให้ขนาดเกรนโตขึ้น ค่าไดอิเล็กตริก ค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริก และค่าสูญเสียทางไฟฟ้าจะลดลง

Smith และคณะ (Smith *et al.*,1991) เป็นกลุ่มวิจัยที่พัฒนาทฤษฎีและสมการทางอุทกสถิต ในทางปฏิบัติ กลุ่มวิจัยของ Taunaumang และ Guy (Taunaumang and Guy,1994) ศึกษาสมบัติอุทกสถิตของวัสดุไพอิโซอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุคอมโพสิท(composite)ซึ่งประกอบด้วยเฟส

---

[2] ที่อุณหภูมิสูงกว่า อุณหภูมิคูรี สารเปลี่ยนจากสมบัติเฟร์โรอิเล็กตริก (มีโพลาไรเซชันในตัวเอง)ไปเป็นพาราอิเล็กตริก(ไม่มีโพลาไรเซชัน)

[3] การเผาอบผนึก เพื่อให้เม็ดสารมีการเชื่อมต่อกัน

พอลิเมอร์และเฟสเซรามิกเทคนิควิธีที่ผู้วิจัยกลุ่มนี้พัฒนาคือการพัฒนาวัสดุคอมโพสิทมาใช้งานเป็นทรานสดิวส์เซอร์

Hans Jaffe (U.S. Pat. No. 1952) ได้ปรับปรุงทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้ากลจากแต่เดิมที่มีเกลือ Rochelle เป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีปัญหาในการประยุกต์ใช้กับงานในน้ำ และที่ที่มีความชื้นสูง เพราะว่าเกลือ Rochelle เป็นสารที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น Hans จึงหันมาใช้สารไดอิเล็กตริกแทน ซึ่งเป็นสารผลึกเดี่ยวที่ไม่สมมาตร และมีการยืดหดได้ภายในสนามไฟฟ้า แต่การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านี้ยังมีค่าน้อย และไม่ได้เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณอินพุตทางไฟฟ้าตรงที่ให้ แต่ Hans ก็ค้นพบว่าสารไดอิเล็กตริกที่มีโพลาไรเซชั่นจะมีการตอบสนองทางกลเป็นเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และได้ทำวัสดุไดอิเล็กตริกประเภทเซรามิกที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแบเรียมไทเทเนต ($BaTiO_3$) ซึ่งมีค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับสารที่มีค่าสูงมาทำเป็นทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้ากล โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมคล้ายเหรียญ และมีขั้วไฟฟ้าที่ผิวหน้าทั้งสองของสาร

Joseph W. Crownover (U.S. Pat. No.1958) ได้ทำทรานสดิวเซอร์ประเภทไฟฟ้ากลที่เป็นตัวกระตุ้น จากวัสดุเซรามิกประเภทอิเล็กโตรสตริกทีฟ (electrostrictive) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการหดตัวเมื่อให้แรงดันไฟฟ้า สารที่ใช้จะอยู่ในกลุ่มแบเรียม (Ba) หรือ สทรอนเทียม (Sr) ติตะเนต ($TiO_3$) การทำงานของทรานสดิวเซอร์จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแผ่นโลหะกับการโก่งงอของวัสดุเซรามิกเมื่อให้แรงดันไฟฟ้ากับสารเซรามิก ซึ่งวิธีนี้เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวกระตุ้น (actuator) ในการประยุกต์มาใช้งานเป็นไมโครโฟน ลำโพง เป็นต้น ลักษณะของทรานสดิวเซอร์แผ่นโลหะบางเป็นฐานรูปวงกลมและมีแผ่นเซรามิกรูปวงแหวนยึดติดกับแผ่นโลหะที่เป็นฐานด้วย (epoxide resin) โดยที่ขั้วไฟฟ้าจะอยู่ที่ผิวหน้าของสาร โดยเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเซรามิก จะมีการหดตัวในแนวรัศมีแล้วดึงให้แผ่นโลหะที่เป็นฐานเกิดการโก่งงอ

Necsoiu และคณะ (Necsoiu *et al.*,1997) ได้มีรายงานการประยุกต์ใช้งานไฮโดรโฟน ในลักษณะต่างๆ โดยได้ศึกษาสารไพอิโซอิเล็กตริก และความไวของช่วงความถี่ไฮโดรโฟนสำหรับค้นหาเรือดำน้ำ

Ramesh และคณะ (Ramesh *et al.*,2005) ได้ ศึกษาคุณสมบัติของคลื่นอะคูสติกของสารไพอิโซอิเล็กตริกที่มีความหนาแน่นสูง และของสารไพอิโซอิเล็กตริกที่มีความพรุนสูง โดยทำการขึ้นรูปแบบแผ่นและนำมาทำเป็นไฮโดรโฟน พบว่าไฮโดรโฟนที่ใช้ สารไพอิโซอิเล็กตริกที่มีความพรุนสูง (10-30%) เป็นตัวรับคลื่นอะคูสติกได้ดีในช่วงความถี่ค่อนข้างกว้างคือ 10-100 KHz ในช่วงความถี่เดียวกันนี้ ไฮโดรโฟนที่ใช้ สารไพอิโซอิเล็กตริกความหนาแน่นสูง เป็นตัวส่งคลื่นได้ดี

Hunter *et al.*1984; ( Matsubara *et al*.,1994) รายงานการค้นคว้าในทำนองเกี่ยวกับการใช้ไฮโดรโฟนในการตรวจการเกิดแผ่นดินไหวและทำการสร้างภาพโดยทำการรับสัญญาณที่สะท้อนกลับจากพื้นดินมาแปลงสัญญาณในการสร้างภาพ เพื่อศึกษาลักษณะของภูเขาไฟใต้น้ำ

สำหรับรายงานการค้นคว้าของ โปตัสเซียมไนโอเบต ที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรโฟน มีเพียงเล็กน้อย ส่วนใหญ่เป็นเรื่องเกี่ยวกับการศึกษาถึงผลของเงื่อนไขที่ใช้ในการแคลไซน์ที่มีผลต่อการเกิดเฟสและขนาดของอนุภาคของผง ( $Na_{1-x}K_x)NbO_3$ โดยวิธีสถานะของแข็ง แบบผสมออกไซด์ โดยมีสารตั้งต้นคือ $K_2CO_3$,$Na_2CO_3$,$Nb_2O_5$ ผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดเฟสของสารตัวอย่างโดยที่อุณหภูมิตั้งแต่ 900 $^{O}C$ ขึ้นไปสารตัวอย่างเกิดการฟอร์มของผลึกได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่เวลาและสัดส่วนของ (Na:K) ไม่มีผลต่อการเกิดเฟสอย่างชัดเจน สำหรับขนาดและรูปร่างของอนุภาคพบว่า เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคมีแนวโน้มโตขึ้นโดยขนาดที่โตที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.32 $\pm$ 0.11 $\mu m$ รูปร่างมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนของ (Na:K) ก็มีผลต่อรูปร่างของอนุภาคเช่นเดียวกัน

**1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ**

1.3.1 เพื่อเตรียมสารไพอิโซเซรามิกให้มีความพรุน10-30 % ที่ไม่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบอันได้แก่ $KNbO_3$ และ $BaTiO_3$

1.3.2 ศึกษาสมบัติอุทกสถิตของสาร

1.3.3 พัฒนาสารเป็นไฮโดรโฟนสำหรับใช้งานในน้ำ ทดสอบการทำงานในสิ่งแวดล้อมจำลอง โดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกที่เหมาะสม