

บทที่ 3

วัสดุและวิธีการวิจัย

ในบทที่ 3 นี้กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย วิธีการเตรียมสาร BaTiO₃ และ KNbO₃ โดยวิธีปฏิกิริยาตรง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำไฮโดรโฟน การนำ BaTiO₃ และ KNbO₃ มาทดสอบคุณสมบัติที่เหมาะสมในการสร้างไฮโดรโฟน และขั้นตอนการสร้างไฮโดรโฟนดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุ

วัสดุใช้เป็นสารตั้งต้นและสารเคมีที่สิ้นเปลืองในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยหลายชนิดดังนี้

- 3.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂) ความบริสุทธิ์ $\geq 99\%$ (Riedel-deHen 14027)
- 3.1.2 แบเรียมคาร์บอเนต (Barium carbonate, BaCO₃) ความบริสุทธิ์ 99% (Fluka 11729)
- 3.1.3 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium Carbonate, K₂CO₃) ความบริสุทธิ์ 99% (Caution A381)
- 3.1.4 ไนโอเบียม(V)ออกไซด์ (Niobium(V)oxide, Nb₂O₅) ความบริสุทธิ์ 99.9% (Aldrich 208515)
- 3.1.5 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA)
- 3.1.6 สารละลายเอทานอล
- 3.1.7 น้ำกลั่น
- 3.1.8 สารละลายอะซีโตน
- 3.1.9 น้ำมันซิลิโคน (silicone oil)
- 3.1.10 กาวเงิน (silver paste) ยี่ห้อ Epo-Tek
- 3.1.11 กระดาษทราย (SiC grinding paper) ยี่ห้อ Buehler เบอร์ P 1200 P 800 P 400 และ P 240
ผงเพชร (diamond paste) ยี่ห้อ Buehler Metadi II ขนาด 1, 3 และ 6 ไมโครเมตร
- 3.1.12 น้ำยาล้างผงเพชร (diamond past suspension) ยี่ห้อ Buehler รุ่น Mastermet
- 3.1.13 ตะกั่วบัดกรี (solder)

- 3.1.14 กระดาษชั่งสาร (100x100 mm)²
- 3.1.15 กระดาษฟอยล์อะลูมิเนียม (aluminium foil)
- 3.1.16 ผงอะลูมินา (Al₂O₃) ผลิตโดยบริษัท Fluka
- 3.1.17 อิฐทนไฟ
- 3.1.18 ท่อสแตนเลส (Stainless steel tubing)
- 3.1.19 แผ่นทองเหลือง
- 3.1.20 แผ่นโพลีเมอร์
- 3.1.21 สายเคเบิล
- 3.1.22 หลอดหด
- 3.1.23 Epoxy
- 3.1.24 ลวดทองแดง
- 3.1.25 ฉนวนกันความร้อน (Encapsulation)
- 3.1.26 ตัวเก็บประจุค่าต่าง ๆ
- 3.1.27 ตัวต้านทานค่าต่าง ๆ
- 3.1.28 แผ่นวงจรพิมพ์ PCB (Printed Circuit Board)
- 3.1.29 กาวแท่ง
- 3.1.30 สายส่งสัญญาณ (Coaxial cable) แบบเดี่ยวและคู่
- 3.1.31 สายไฟอ่อนขนาดเล็ก
- 3.1.32 फिल्मโพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride film) และยางแผ่นบาง
- 3.1.33 เทปกาว
- 3.1.34 ขั้วต่อสายสัญญาณแบบต่าง ๆ
- 3.1.35 ไอซีเบอร์ TDA2004
- 3.1.36 ทรานซิสเตอร์เบอร์ C458

3.2 อุปกรณ์

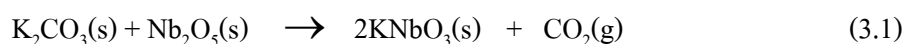
- 3.2.1 เครื่องชั่งสารแบบตัวเลข (digital electric balance) ยี่ห้อ Cahn รุ่น 7550
- 3.2.2 โกร่งบดสาร (agate mortar)
- 3.2.3 ซ้อนตักสารแบบสแตนเลส และพลาสติกขนาดต่างๆ
- 3.2.4 บีกเกอร์ขนาดต่างๆ ถ้วยเผาสารแบบฝาปิด ตะแกรงร่อนสาร
- 3.2.5 เครื่องบดผสมสารแบบ ball mill

- 3.2.6 หม้ออบพร้อมลูกบดอะลูมินาขนาด 5 และ 15 mm
- 3.2.7 เตาหน้าดำ (hotplate) ยี่ห้อ PNP รุ่น HS-2 และแท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic stirrer)
- 3.2.8 ปากคีบปลายแหลม
- 3.2.9 กระจบกร้อนสารและตะแกรงผ้าที่มีขนาดของรู ≤ 44 ไมโครเมตร
- 3.2.10 เครื่องขัดหยาบและละเอียด (grinding & polishing machine) ยี่ห้อ Phoenix Beta รุ่น 49-5102-23
- 3.2.11 ตู้อบไฟฟ้ายี่ห้อ National รุ่น NB-7500E
- 3.2.12 เครื่องอัดสารระบบไฮดรอลิก (Hot Isostatic Pressing Machine) สามารถอัดแรงดันได้สูงสุด 26 ตันและให้อุณหภูมิสูงถึง 300°C ยี่ห้อ Caution รุ่น Carver-4128
- 3.2.13 แม่พิมพ์โลหะสำหรับขึ้นรูปสารให้เป็นเม็ดจานกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 และ 1.5 cm
- 3.2.14 เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Lenton รุ่น AWF 13/5
- 3.2.15 เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Carbolite รุ่น 2416
- 3.2.16 เวอร์เนียบาลิเปอร์ มีความละเอียดประมาณ 0.05 mm
- 3.2.17 ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด 0.01 mm
- 3.2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ Jeol JSM รุ่น 5800LV
- 3.2.19 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (x-ray diffractometer) ยี่ห้อ Philips X, Pert MPD
- 3.2.20 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (laser particle size analyzer) ยี่ห้อ COULTER รุ่น LS230
- 3.2.21 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (kilovolt power supply) ยี่ห้อ Pasco Scientific รุ่น SF-9586
- 3.2.22 หัวแร้งบัดกรี (soldering iron) ยี่ห้อ Hisatomi รุ่น OP 60L
- 3.2.23 เครื่องวัด LCR meter ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น HP 4263B
- 3.2.24 เครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (lock-in amplifier) ยี่ห้อ Princeton รุ่น 5210
- 3.2.25 เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (function generator) ยี่ห้อ Stanford Research Systems รุ่น DS 340
- 3.2.26 ออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ยี่ห้อ Hameg รุ่น HM 604 และ ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 310

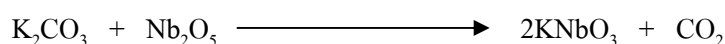
- 3.2.27 เครื่องมัลติมิเตอร์ (multimeter) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 189 True RMS
- 3.2.28 เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 189 True RMS
- 3.2.29 กล่องพลาสติกอะคริลิก (acrylic) ขนาด $5.5 \times 20 \times 19 \text{ cm}^3$
- 3.2.30 ลำโพงวิทยุ (loudspeaker) ขนาด 150 วัตต์ 2 ตัว เส้นผ่านศูนย์กลาง $15.0 \pm 0.5 \text{ cm}$
- 3.2.31 ตะแกรงลวดใช้สำหรับครอบสารตัวอย่าง 2 อัน
- 3.2.32 กล่องพลาสติกอะคริลิก (acrylic) ขนาด $20 \times 18 \times 19 \text{ cm}^3$
- 3.2.33 เครื่องวัดระดับเสียง (Precision integrating sound level meter รุ่น NL-15)
- 3.2.34 กล่องพลาสติกอะคริลิก (acrylic) ขนาด $25 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$
- 3.2.35 เครื่องดูดตะกั่ว jiu Feng รุ่น AX-208
- 3.2.36 หลอดหยด ถ้วยเซรามิกส์
- 3.2.37 เครื่องระเหิดสารในสุญญากาศ (Evaporation)
- 3.2.38 ปืนยิงกาว ขนาด 25 วัตต์
- 3.2.39 วงจรทดสอบเรโซแนนซ์
- 3.2.40 คีมแบบต่าง ๆ
- 3.2.41 ไขควงเบอร์ต่าง ๆ
- 3.2.42 เลื่อยฉลุ
- 3.2.43 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 12 V
- 3.2.44 กล่องโฟมขนาด $34 \times 47 \times 31 \text{ cm}^3$
- 3.2.45 เครื่องทดสอบโซนา (Sona Test)

3.3 การเตรียมโปแตสเซียมไนโอเบต (KNbO_3)

3.3.1 คำนวณและชั่งสารตั้งต้น โปแตสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และไนโอเบียม(V) ออกไซด์ (Nb_2O_5) มาผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 โดยโมล ตามสมการเคมี (Roncari, 2001) ต่อไปนี้



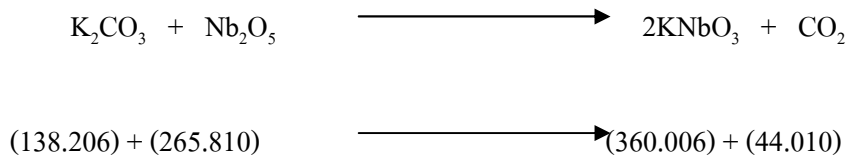
เพื่อทำการเตรียมสาร KNbO_3 ปริมาณ 25 g ต่อการเตรียม 1 ครั้ง จากนั้นชั่งสารดังกล่าวโดยใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความละเอียด 0.001 g ใช้ปฏิกิริยาเคมีดังนี้ในการหาน้ำหนักของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาเคมีกัน



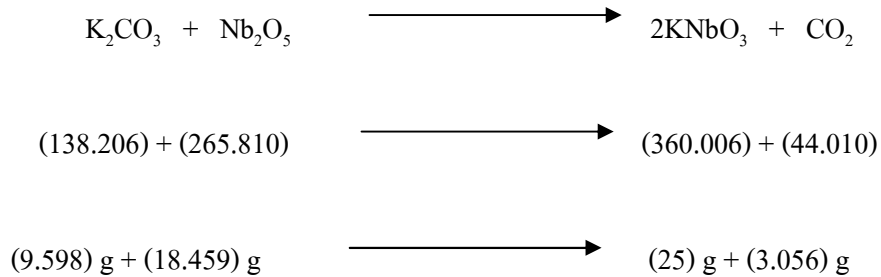
$$\{ (2)(39.098) + (12.011) + (3)(15.999) \} + \{ (2)(92.906) + (5)(15.999) \}$$

$$\longrightarrow [(2)\{(39.098) + (92.906) + (3)(15.999)\} + \{(12.011) + (2)(15.999)\}]$$

เมื่อทำการคำนวณน้ำหนักที่ใช้ทำปฏิกิริยาจะได้ดังนี้



ต้องการสาร KNbO₃ มาใช้ในการทดสอบ 25 g จะได้



ซึ่งสาร K₂CO₃ มาจำนวน 9.598 g และ Nb₂O₅ มาจำนวน 18.459 g นำสารทั้งสองผสมรวมกันในโถบดเพื่อทำการบดแบบเปียกโดยใช้เอทานอลเป็นตัวช่วยในการหล่อลื่นสำหรับการบดผสมจะทำให้ลดขนาดของสารตั้งต้นและทำให้สารตั้งต้นผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ลูกบดอะลูมินาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 , 15 และ 22 mm โดยใส่ลูกบด ปริมาตร 3/4 ของสารตั้งต้นจะสามารถคำนวณหาปริมาตรลูกบดอะลูมินาได้ดังนี้

$$D = M/V \text{ เพราะฉะนั้น } V = M/D$$

ปริมาตรรวมของสารหาได้จาก ปริมาตรของ K₂CO₃ และ Nb₂O₅ ซึ่งได้จากมวลหารด้วยความหนาแน่นได้ดังนี้

$$(9.598)/(4.47) + (18.459)/(4.62) = 2.1471 + 3.995$$

$$\text{สารผสมจะมีปริมาตร} = 6.1425 \text{ cm}^3$$

ปริมาตรของลูกบดอลอะลูมินาจะเป็น 3/4 ของสารผสมจะสามารถคำนวณได้

$$(3/4)(6.143) = 4.607 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรรวมทั้งหมดของสารจะเท่ากับ} = 4.607 + 6.143 \text{ cm}^3 = 10.750 \text{ cm}^3$$

3.3.2 นำกระป๋องที่บรรจุสารและลูกบดอะลูมินาปิดฝากระป๋องและพันด้วยเทปกาวให้แน่น แล้วนำไปทำการบดย่อยผสมสารแบบเปียก เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง โดยทำการพัก 2 ชั่วโมง ทุก 6 ชั่วโมง จนครบตามเวลาที่กำหนดดังภาพประกอบที่ 3.1



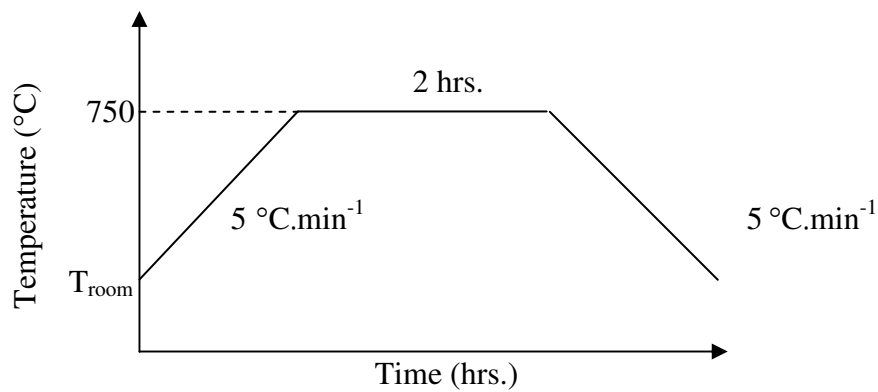
ภาพประกอบที่ 3.1 แสดงการบดย่อยผสมสารแบบเปียก

3.3.3 นำสารผสมที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปของเหลวมากรองโดยใช้ตะแกรงลวดเพื่อช่วยในการแยกสารออกจากเม็บบดโดยใช้ เอทานอลล้างทำความสะอาดจากนั้นนำสารไปอบแห้งโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ภายใต้การไหลเวียนของบรรยากาศที่ดีเพื่อทำให้เอทานอลระเหยได้หมดในของเหลวที่มีแท่งแม่เหล็กช่วยในการผสมเพื่อป้องกันการตกตะกอนแบบแยกชั้นอันเป็นผลมาจากความแตกต่างของขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของสารที่ใช้

3.3.4 เมื่อสารที่อบแห้งดีแล้ว นำมาบดด้วยครกจนละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดของรูน้อยกว่า $44\text{ }\mu\text{m}$ เพื่อควบคุมขนาดของผงและกำจัดสิ่งปนเปื้อนบางอย่างออกไปจากนั้นนำมาใส่ถ้วยอะลูมินา เพื่อเผาแคลไซต์ ดังภาพประกอบที่ 3.2 โดยเริ่มจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการเผา $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ จากนั้นเผาแช่ไว้นาน 2 ชั่วโมงเพื่อให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันเป็นสาร KNbO_3 ให้หมด หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงโดยใช้อัตราการลงของอุณหภูมิที่ $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ จนถึงอุณหภูมิห้องอีกครั้งแล้วนำสารออกจากเตาเผาดังภาพประกอบที่ 3. 3



ภาพประกอบที่ 3.2 เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Lenton รุ่น AWF 13/5



ภาพประกอบที่ 3.3 ไดอะแกรมการแคลไซน์ KNbO_3

3.3.4 นำสารที่ได้จากเผาแคลไซน์ตามรายละเอียดอีกครั้งด้วยครก แล้วนำมาร่อนด้วยตะแกรงไนล่อนเบอร์ 120

3.3.5 ทำการขึ้นรูปสารเป็นเม็ดคล้ายเหรียญโดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 16 mm ดังภาพประกอบที่ 3.4 และจะได้สารความหนาเฉลี่ย 1.00 mm แต่ละเม็ดหนัก 1.0 ± 0.001 กรัม ใช้เครื่องอัดร้อน (Hot press) ดังภาพประกอบที่ 3.5 และทำการเพิ่มแรงอัด

ขึ้นครั้งละ 1 ตันในช่วง 1- 5 ตัน ค้างไว้ประมาณ 30 นาที พร้อมกับการเพิ่มความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้องจนถึง 250 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 50 °C ใช้ PVA เข้มข้น 15%Wt เป็นตัวช่วยประสานทำให้ง่ายในการขึ้นรูป อัตราส่วน PVA 5 cm³ : KNbO₃ 1.5 g



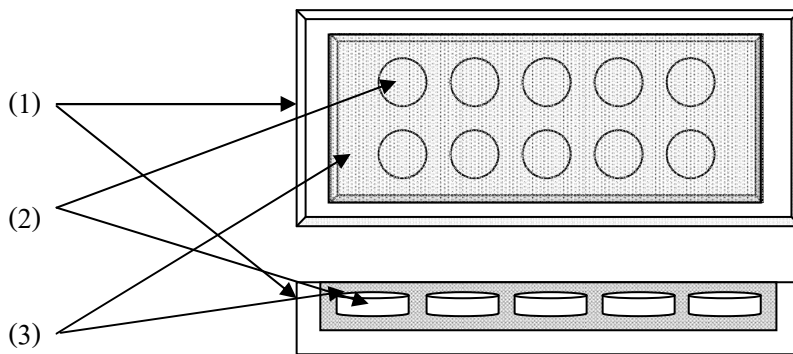
ภาพประกอบที่ 3.4 แสดงแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm

3.3.6 ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดค่าความหดรัดตัวเชิงเส้นและค่าความหดรัดตัวเชิงปริมาตร ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของสารตัวอย่าง

3.3.7 นำสาร KNbO₃ ที่ขึ้นรูปแล้วมาเรียงใส่กระบะที่ทำจากอิฐทนไฟโดยทำการจัดเรียงเม็ด KNbO₃ ดังภาพประกอบ 3.6 โดยโรยผงอะลูมินาคันเอาไว้เพื่อให้แยกเม็ด KNbO₃ แต่ละเม็ดออกจากกัน เมื่อเรียงเม็ดเสร็จจากนั้นจึงนำไปเข้ากระบวนการเผาอบผืนึก



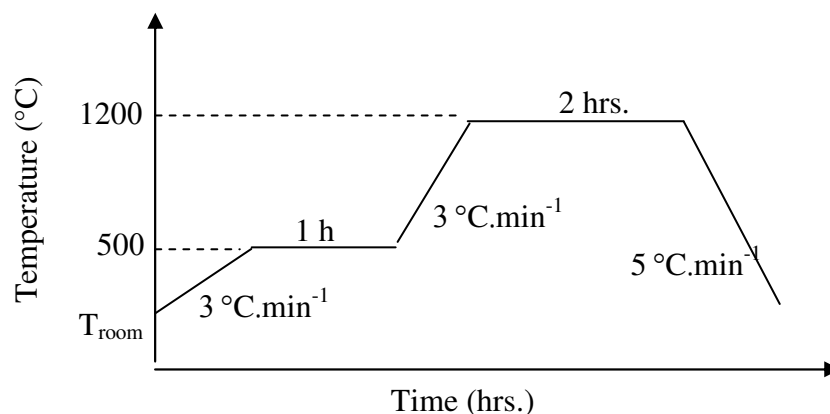
ภาพประกอบที่ 3.5 เครื่องอัดสารระบบไฮดรอลิก



ภาพประกอบที่ 3.6 แสดงการจัดเรียงเม็ด KNbO_3 เพื่อทำการเผาอบผนังในกระบะอิฐทนไฟ

- (1) กระบะอิฐทนไฟ (2) เม็ด KNbO_3
 (3) พงอะลูมินาใช้คลุมกบเม็ด KNbO_3 อีกครั้งหนึ่ง

3.3.8 หลังจากที่เราเรียงเม็ดสารใส่ด้วยอะลูมินาแล้ว ปิดฝาให้สนิทแล้วนำมาทำการเผาอบผนังด้วยเงื่อนไขต่างๆดังภาพประกอบ 3.7 โดยเริ่มจากการเริ่มจากอุณหภูมิห้องโดยใช้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ จนกระทั่งถึง $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นเผาแช่ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ PVA และสารอินทรีย์ที่ตกค้างในสาร KNbO_3 ออกไปให้หมด แล้วจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเดิมไปจนกระทั่งถึงอุณหภูมิเผาอบผนัง ค้างไว้ที่อุณหภูมิอบผนังเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงทำการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง ทำนองเดียวกันนี้สำหรับทุกอุณหภูมิเผาอบผนัง ซึ่งในที่นี้คือ $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบที่ 3.7 แสดงอุณหภูมิการเผาอบผนัง

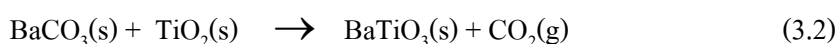
3.3.9 นำเซรามิก KNbO_3 ที่ได้จากระบวนการอบผนังมาตัดตกแต่งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 800 และ 1200 ตามลำดับแล้วทำการวัดขนาดของสารตัวอย่างโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดค่าความหนาตัวเชิงเส้นและค่าความหนาตัวเชิงปริมาตรโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของสาร

ตัวอย่างและนำสารตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วไปทำขั้วด้วยกาวเงินเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้ากลและนำไปประยุกต์ใช้เป็นหัววัดไฮโดรโฟนต่อไป

3.4 การเตรียมสารแบเรียมไททานต

การดำเนินการทดลองในขั้นตอนนี้ใช้สารตั้งต้นและปฏิกิริยาเคมีต่างกัน คือ แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทำการเตรียมตามขั้นตอนดังนี้

3.4.1 คำนวณและชั่งสารตั้งต้นแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) มาผสมกันในอัตราส่วน 1.0:1.0 โดยโมล ตามสมการเคมีต่อไปนี้



เพื่อทำการเตรียมสาร BaTiO_3 หรือ BT ปริมาณ 50 g ต่อการเตรียม 1 ครั้ง จากนั้นชั่งสารดังกล่าวด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียด 0.001 g

3.4.2 เมื่อทำการชั่งสารเรียบร้อยแล้ว นำสารใส่ในกระป๋องพลาสติกที่บรรจุเม็ดบดเซอร์โคเนีย อยู่ข้างใน 250 เม็ด หลังจากนั้น ใส่เอทานอลเป็นตัวช่วยละลาย ปิดฝากระป๋องและพันด้วยเทปกาวให้แน่น

3.4.3 นำกระป๋องที่บรรจุสารไปทำการบดเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง โดยทำการบดย่อยแบบเปียก 6 ชั่วโมง พัก 2 ชั่วโมง จนครบตามเวลาที่กำหนด

3.4.4 จากนั้นนำสารมากรองโดยใช้ตะแกรงลวดเพื่อช่วยในการแยกสารออกจากเม็ดบดโดยใช้เอทานอลล้างทำความสะอาด

3.4.5 นำของผสมที่อยู่ในรูปของเหลวมาทำการคนและใช้แท่งแม่เหล็กกวนสารคนสารไปด้วย พร้อมให้ความร้อนจนเอทานอลระเหยไปเกือบหมด

3.4.6 นำไปเข้าเตาอบใช้อุณหภูมิประมาณ $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เมื่อสารที่อบแห้งดีแล้ว นำมาบดด้วยครกจนละเอียด จากนั้นนำมาใส่ถ้วยอะลูมินา เพื่อเผาแคลไซต์ที่อุณหภูมิ $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค้างไว้ที่อุณหภูมินี้นาน 2 ชั่วโมงเพื่อให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันเป็นสาร BaTiO_3 ให้หมด หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลง อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิต่างกันกับการแคลไซน์ KNO_3 (ภาพประกอบที่ 3.3)

3.4.7 นำสารที่ได้จากเผาแคลไซต์มาบดละเอียดอีกครั้งด้วยครก แล้วนำมาอุ่นด้วยตะแกรงในอุณหภูมิ 120

3.4.8 ทำการขึ้นรูปสารโดยนำมาอัดให้เป็นเม็ดคล้ายเหรียญทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1.60 mm ความหนาเฉลี่ย 1.00 mm โดยแต่ละเม็ดหนัก $1.0 \pm 0.001\text{ g}$ โดยใช้แรงอัด

1-5 ตัน โดยเพิ่มแรงอัดขึ้นทีละ 1 ตัน อัดค้างไว้ประมาณ 30 นาที โดยให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิห้อง, 50 °C - 250 °C โดยเพิ่มความร้อนขึ้นทีละ 50 °C โดยใช้ PVA เป็นตัวช่วยประสาน ทำให้การขึ้นรูปง่ายขึ้น โดยใช้ PVA ความเข้มข้น 15%Wt. เป็นตัวช่วยประสาน ในอัตราส่วน 5 cm³:1.5 g คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วทำการขึ้นรูปสารตัวอย่าง

3.4.9 ใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ทำการวัดค่าความหดตัวเชิงเส้นและค่าความหดตัวเชิงปริมาตร โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของสารตัวอย่าง

3.4.10 นำสาร BaTiO₃ ที่ขึ้นรูปแล้วมาเรียงใส่กระบะอิฐทนไฟรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับการเผาอบผง โดยทำการจัดเรียงเม็ด BaTiO₃ ดังภาพประกอบที่ 3.6 โดยชั้นล่างจะใส่ผงอะลูมินา คั่นเอาไว้เพื่อใช้รองพื้นให้สารได้รับความร้อนทั่วถึง

3.4.11 เมื่อเรียงเม็ดเสร็จจะคลุมด้วยผงอะลูมินาด้านบนอีกครั้งหนึ่ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารอื่นหลังจากที่เรียงเม็ดสารแล้วนำมาทำการเผาอบผงด้วยเงื่อนไขต่างๆ ทำนองเดียวกับ KNbO₃ (ภาพประกอบที่ 3.7) อุณหภูมิเผาอบผงที่ใช้คือ 1100 1200 และ 1300 °C

3.4.12 นำเซรามิก BaTiO₃ ที่ได้จากระบวนการอบผงมาขัดตกแต่งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 800 และ 1200 ตามลำดับแล้วทำการวัดขนาดของสารตัวอย่าง โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดค่าความหดตัวเชิงเส้นและค่าความหดตัวเชิงปริมาตร โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของสารตัวอย่างและนำสารตัวอย่างที่เตรียมเสร็จแล้วไปทำขั้วด้วยกาวเงินเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้ากลและนำไปประยุกต์ใช้เป็นหัววัดไฮโดรโฟนต่อไป

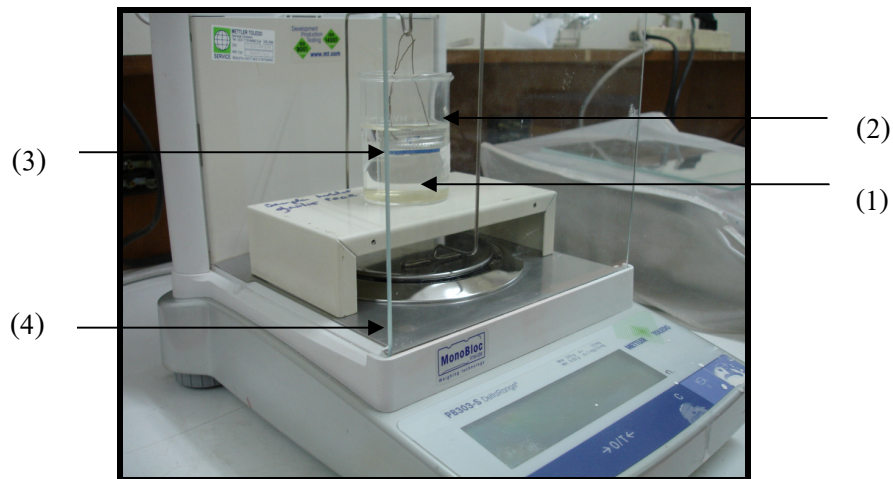
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

3.5.1 ตรวจสอบผงเซรามิก KNbO₃ และ BaTiO₃ โดยใช้เทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างผลึกของเซรามิกที่เตรียมได้ โดยใช้สารผงของเซรามิก KNbO₃ ที่ผ่านการเผาอบผงทั้งสามอุณหภูมิคือ 1,000 1,100 และ 1200 °C ตามลำดับ ส่วนผงของเซรามิก BaTiO₃ ผ่านการเผาอบผงทั้งสามอุณหภูมิคือ 1,100 1,200 และ 1,300 °C ตามลำดับ

3.5.2 ตรวจสอบลักษณะรูพรุนของสารตัวอย่าง อาศัยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวัดขนาดของเกรนโดยใช้วิธีลากเส้นตรงบนภาพถ่ายนับจำนวนเกรนที่เส้นตรงตัดผ่านและเมื่อนำจำนวนเกรนไปหารความยาวของเส้นนั้นก็จะได้ขนาดเกรน

3.5.3 หาค่าความหนาแน่นของสาร การหาค่าความหนาแน่นโดยหลักการวิธีอะคิมีดีส (Archimedes method) (ASTM, 1977) กล่าวคือ เมื่อวัดถุมนในของเหลววัตถุนั้นจะถูกพยุงขึ้นด้วยแรงที่มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ซึ่งมี ขั้นตอนดังนี้

1. นำสารตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเผาอบผนึกขัดด้วยกระดาษทรายตามขนาดเบอร์แล้ว ทำความสะอาดโดยเครื่องอัลตราโซนิค
2. นำสารตัวอย่างที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 5 ชั่วโมง
3. วัดขนาดของรูปทรงและชั่งน้ำหนัก
4. นำสารตัวอย่างคัมในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
5. ปล่อยให้เย็นตัวแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
6. ชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างขณะอยู่ในน้ำและขณะชับน้ำที่ผิวแล้ว โดยการชั่งน้ำหนัก ขณะอยู่ในน้ำแสดงดังภาพประกอบที่ 3.8



ภาพประกอบที่ 3.8 ชุดทดลองการชั่งน้ำหนักสารขณะอยู่ในน้ำ

(1) น้ำกลั่น (2) สารตัวอย่าง (3) บีกเกอร์ (4) เครื่องชั่ง

ค่าความหนาแน่นของสารคำนวณได้จากสมการ (ASTM, 1977)

$$\rho_b = \left(\frac{W_d}{W_a - W_{aw}} \right) \rho_w \quad (3.3)$$

- เมื่อ
- ρ_b คือ ความหนาแน่นของสาร มีหน่วยคือ kgm^{-3}
 - W_d คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างหลังอบแห้ง มีหน่วยคือ kg
 - W_a คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างขณะอมน้ำชั่งในอากาศ มีหน่วยคือ kg
 - W_{aw} คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างขณะอมน้ำชั่งในน้ำ มีหน่วยคือ kg
 - ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิขณะทดลอง มีหน่วยคือ kgm^{-3}

คำนวณค่าการดูดซึมน้ำของสารตัวอย่างจากสมการ

$$A_b = \left(\frac{W_d - W_{aw}}{W_d} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

A_b คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนน้ำ

คำนวณค่าความพรุนของสารตัวอย่างจากสมการ

$$P_p = \left(\frac{W_a - W_d}{W_a - W_{aw}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

P_p คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้านำสารตัวอย่าง KNbO_3 และ BaTiO_3 ที่ได้ไปทำการขัดโดยใช้กระดาษทรายเบอร์ P400 P800 P1200 ตามลำดับ หลังจากนั้นใช้ผงเพชร P240 ขนาด 13 และ 6 ไมโครเมตร ขัดสารตัวอย่างจนเพื่อให้พื้นที่หน้าตัดของสารมีความราบเรียบจนได้ขนาดที่ต้องการ นำสารที่ได้ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นจากนั้นจึงนำไปอบให้แห้งที่ 150°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมงแล้วนำสารตัวอย่างมาทำขั้วไฟฟ้าโดยการทาภาวเงินชนิดแห้งตัวได้เองที่ผิวหน้าทั้งสองข้างแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100°C 30 นาที เพื่อให้ภาวเงินที่ทาแห้งแนบสนิทติดกับผิวหน้าทั้งสองของสารตัวอย่าง

3.6.1 กระบวนการโพลิง

การโพลิงสารทำได้โดยให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูงและความร้อนแก่ KNbO_3 ให้โพลาริเซชัน ภายในสารจัดเรียงตัวไปในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ให้โดยจะให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $2-3 \text{ kV.mm}^{-1}$ (ขึ้นอยู่กับความหนาของสารตัวอย่าง) และให้ความร้อนระหว่าง $100-150^\circ\text{C}$ และใช้เวลาในการโพลิง 30 นาที โดยจัดอุปกรณ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 3.9



ภาพประกอบที่ 3.9 แสดงชุดทดลองการโพลิง (1) เทอร์โมมิเตอร์ (2) บีกเกอร์
(3) สารตัวอย่าง (4) เตาน้ำค้ำ (5) แหล่งกำเนิดกระแสสลับไฟฟ้าตรง

สำหรับสารตัวอย่าง KNbO_3 นั้นให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงสลับไฟฟ้าระหว่าง 2-3 $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C และใช้เวลาในการโพลิง 30 นาที

3.6.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกสามารถวัดได้จากเครื่อง LCR ได้โดยตรง โดยวัดค่าความจุไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่ความถี่ต่างๆจากนั้นคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยใช้สมการ (2.10) โดยอุปกรณ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 3.10

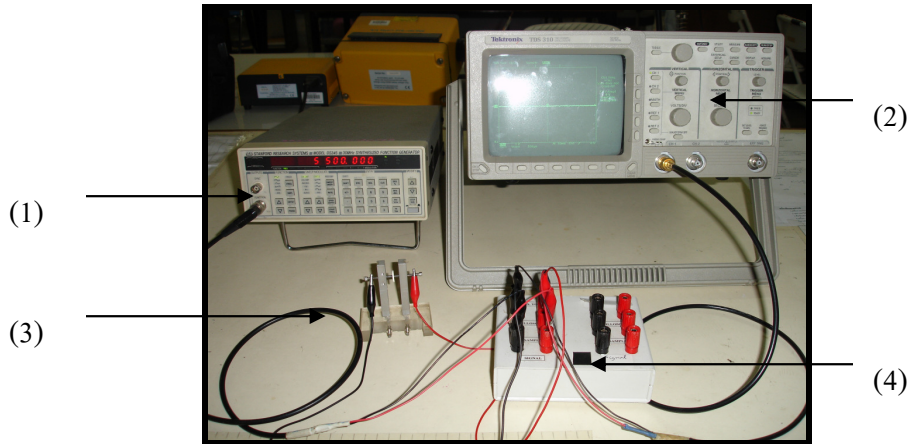


ภาพประกอบที่ 3.10 แสดงชุดทดลองการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

(1) เครื่อง HP 4263B LCR Meter (2) แท่นยึดจับสารตัวอย่าง (3) สารตัวอย่าง

3.6.3 การวัดค่าคัปปลิงแฟกเตอร์โดยวิธีเรโซแนนซ์

จากหลักการของวิธีเรโซแนนซ์ (ในบทที่ 2) นำมา คำนวณหาค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ของสารไพเอโซเซรามิกจากสมการ (2.5) - (2.6) อุปกรณ์ในการวัดค่า f_u , f_r แสดงดังภาพประกอบที่ 3.11

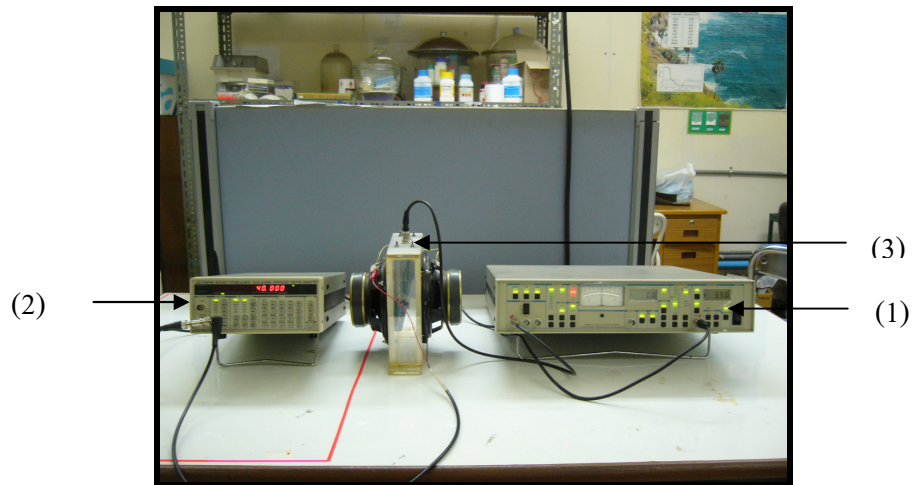


ภาพประกอบที่ 3.11 แสดงชุดทดลองการวัดค่าคัปปลิงแฟกเตอร์

- | | |
|------------------------------|------------------|
| (1) เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า | (2) ออสซิลโลสโคป |
| (3) แท่นยึดจับสารตัวอย่าง | (4) ก่อวงจร |

3.6.4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์อุทกสถิต

ค่าสัมประสิทธิ์ไพเอโซอิเล็กทริกอุทกสถิต ซึ่งมี 2 ชนิดคือ d_h และ g_h สามารถวัดได้โดยอาศัยออสซิลโลสโคปที่ออกแบบขึ้นมา ซึ่งมีการปรับเทียบกับสารตัวอย่างที่รู้ค่า d_h หรือ g_h เช่น LiTaO_3 โดยจัดอุปกรณ์ในการวัดค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริกอุทกสถิตดังภาพประกอบที่ 3.12 ค่าสองตัวนี้จะเป็นตัวบ่งบอกความสามารถในการรับและส่งคลื่นว่าสารที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหนในการใช้เป็นตัวรับและตัวส่งคลื่น



ภาพประกอบที่ 3.12 แสดงชุดทดลองการวัดค่าโพอิโซอิเล็กทริกอุทกสถิต

- (1) เครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (2) เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า
(3) กล่องพลาสติก

หลักการทำงานของชุดทดลองนี้ คือ การสร้างแรงดันอะคูสติกจากการสั่นของลำโพงโดยการให้สัญญาณความถี่ต่ำ 10-50 Hz แอมพลิจูด 1-5 Vpp เลือกสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแก่ลำโพง 2 ตัว มีตำแหน่งตรงข้ามกันกับกล่องพลาสติก ซึ่งทำหน้าที่เป็นกล่องอะคูสติกป้อนแรงดันที่กระทำต่อสารตัวอย่างภายในกล่องอะคูสติก ดังภาพประกอบที่ 3.13 สารตัวอย่างมีการสั่นก่อให้เกิดความต่างศักย์ที่แสดงผลด้วยเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน สามารถอ่านค่าได้ทั้งในพจน์ของกระแสไฟฟ้า หรือศักย์ไฟฟ้านำไปคำนวณหาค่า d_h และ g_h ของสารตัวอย่างโดยอาศัยสมการ

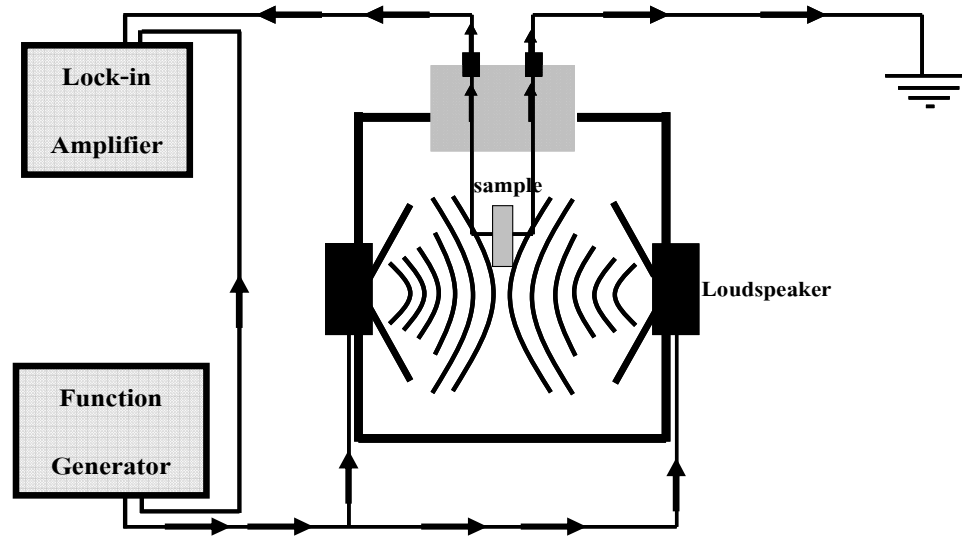
$$\frac{V_{LT}}{V_{sample}} = \frac{d_{hLT}}{d_{h_{sample}}} \quad (3.5)$$

เมื่อ d_{hLT} คือ ค่าสัมประสิทธิ์โพอิโซอิเล็กทริกอุทกสถิตของ $LiTaO_3$

V_{LT} คือ ค่าความต่างศักย์ที่ได้เมื่อทดสอบกับ $LiTaO_3$

V_{sample} คือ ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากสารตัวอย่าง

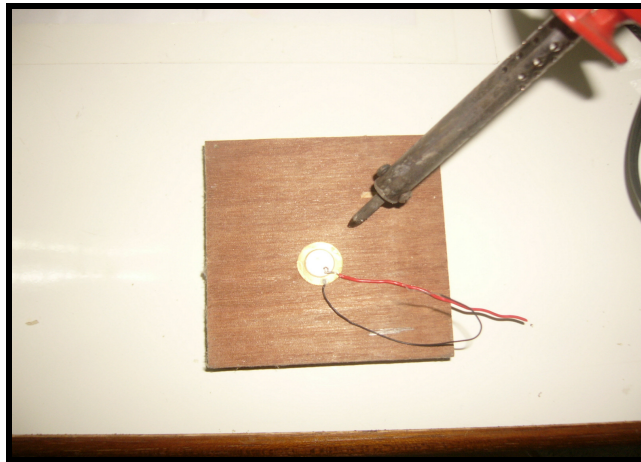
$d_{h_{sample}}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์โพอิโซอิเล็กทริกอุทกสถิตของสารตัวอย่าง



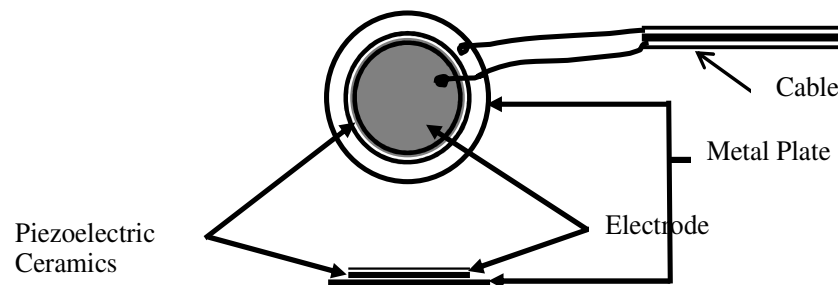
ภาพประกอบที่ 3.13 แสดงการสร้างแรงดันอะคูสติกจากการสั่นของลำโพง

3.7 การประยุกต์ใช้งานสารตัวอย่าง

การประยุกต์ใช้งานสารที่เตรียมได้นั้นจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติข้างต้นของสารก่อน จึงจะสามารถหาช่วงค่าการใช้งานที่ดีที่สุดของสาร ซึ่งสารที่เตรียมได้จะตอบสนองกับการสั่นได้ดี กับความถี่ช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้นจึงต้องมีการวัดความถี่ของสารที่สารตอบสนองต่อการสั่นมากที่สุด ในตัวกลางที่ต่างกันไปสารก็จะตอบสนองได้ในช่วงความถี่ที่ต่างไปด้วย ในที่นี้จะทดสอบสารกับตัวกลางที่เป็นอากาศและในตัวกลางที่เป็นน้ำเพื่อทำการเปรียบเทียบและเป็นการตรวจสอบการลดทอนของสาร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตัวกลางเพราะตัวหัววัดจะไม่สัมผัสกับน้ำแต่จะยังสัมผัสกับอากาศและใช้ตัวกั้นกลางพวกพอลิเมอร์เป็นตัวกลางส่งผ่านพลังงานไปยังน้ำจึงต้องมีการทดสอบสารตัวอย่างในอากาศด้วย สารไพโซเซรามิกที่เตรียมได้ก็นำมาสร้างเป็นทรานสดิวเซอร์ ในโครงการนี้คือ โพแทสเซียมไนโอเบต และแบเรียมไททาเนตโดยนำมาขัดให้มีความหนา 0.4 mm แล้วนำมาติดกับแผ่นทองเหลืองดังภาพประกอบที่ 3.14 และแสดงชิ้นงาน ดังภาพประกอบที่ 3.15



ภาพประกอบที่ 3.14 แสดงการทำหัววัดเพื่อประยุกต์ใช้งาน



ภาพประกอบที่ 3.15 รูปแสดงชิ้นงาน

3.7.1 การปรับเทียบสารตัวอย่างในตัวอย่างที่เป็นอากาศ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบในตัวกลางที่เป็นอากาศ เพื่อใช้เป็นแนวทางการส่งคลื่นในตัวกลางที่เป็นของเหลวและเป็นการปรับเทียบการตอบสนองของสารในตัวกลางที่เป็นอากาศ โดยนำสารตัวอย่างมาทำเป็นชิ้นงานเพื่อทำการวัดระดับความเข้มของเสียงที่เกิดจากการสั่นของสารตัวอย่างในช่วงที่หูได้ยิน โดยการนำสารตัวอย่างมาแขวนในกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส ป้อนความถี่ต่างๆ ทำการวัดระดับความเข้มของเสียงจากเครื่องวัดระดับเสียง ดังภาพประกอบที่ 3.16

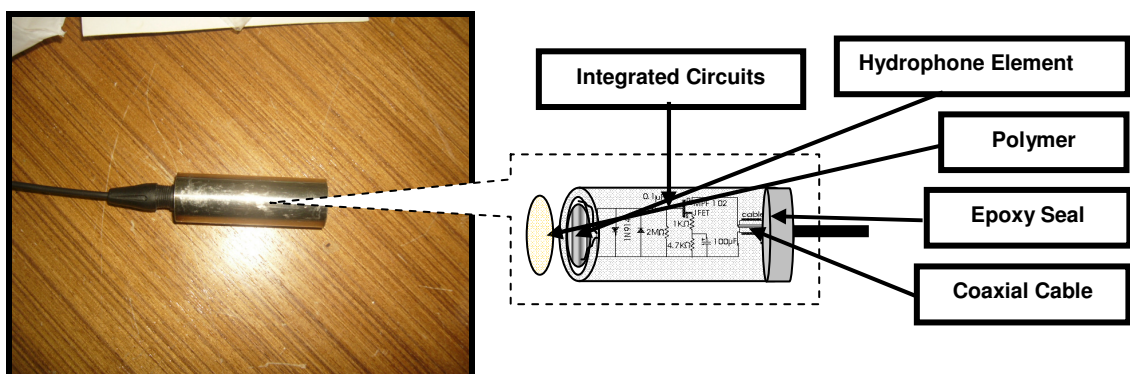


ภาพประกอบที่ 3.16 แสดงการจัดอุปกรณ์ทดลองสำหรับหาระดับความเข้ม

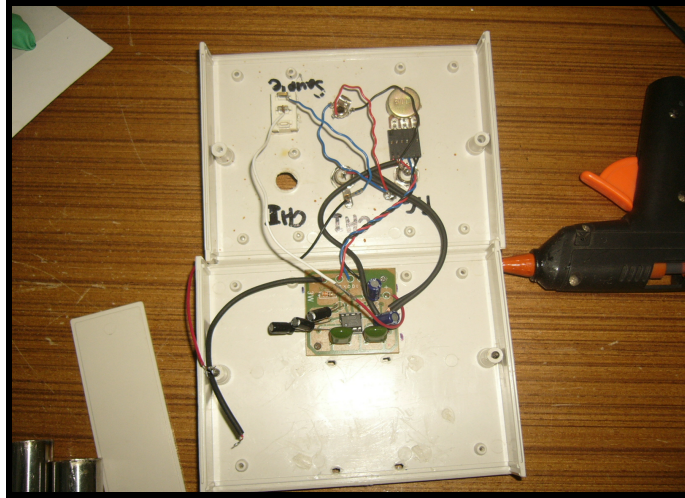
- (1) ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (2) เครื่องวัดระดับเสียง
 (3) กล่องพลาสติกผนังภายในบุด้วยฟองน้ำ

3.7.2 การเปลี่ยนสัญญาณจากคลื่นอะคูสติกมาขยายและแสดงผลโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์

การที่จะสามารถตรวจจับสัญญาณ ได้ดีนั้น นอกจากการส่งสัญญาณ ที่มีประสิทธิภาพแล้วจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถทำการแปลงสัญญาณที่ถูกส่งมาอยู่ในรูปความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้าดังภาพประกอบที่ 3.17 ส่วนมากแล้วสัญญาณที่ถูกส่งมาจากที่ไกลๆจะเกิดการลดทอนสัญญาณหรือไม่ก็เกิดสัญญาณอื่นแทรกบ้างทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้มีค่าค่อนข้างต่ำและมีการรบกวนจากอย่างอื่นจึงต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถทำการขยายสัญญาณที่ได้ให้สัญญาณที่รับได้มีปริมาณมากพอที่จะนำมาวิเคราะห์ส่วนมากเป็นการขยายสัญญาณขึ้นและทำการตัดสัญญาณรบกวนด้วยดังภาพประกอบที่ 3.18



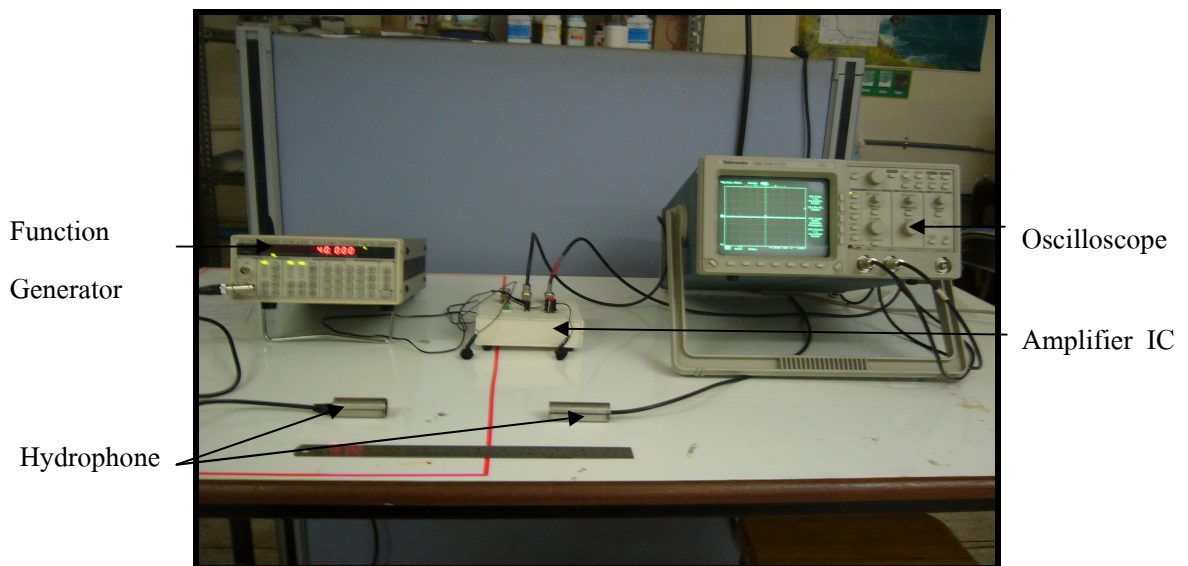
ภาพประกอบที่ 3.17 แสดงวงจรของหัววัดไฮโดรโฟน



ภาพประกอบที่ 3.18 แสดงการทำแผนวงจร Amplifier

3.7.3 การทดลองส่งคลื่นและรับคลื่นในตัวกลางที่เป็นอากาศ

จากคุณสมบัติข้อหนึ่งของคลื่นที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางที่ต่างชนิดกันจะทำให้ความเร็วและความยาวคลื่นเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้ความสามารถในการส่งผ่านพลังงานของคลื่นเปลี่ยนไปด้วยโดยปกติจะใช้อากาศเป็นตัวเปรียบเทียบในการตรวจสอบการลดทอนกำลังของคลื่นจึงต้องมีการตรวจสอบความสามารถในการส่งผ่านพลังงานของคลื่นในอากาศก่อนดังภาพประกอบที่ 3.19



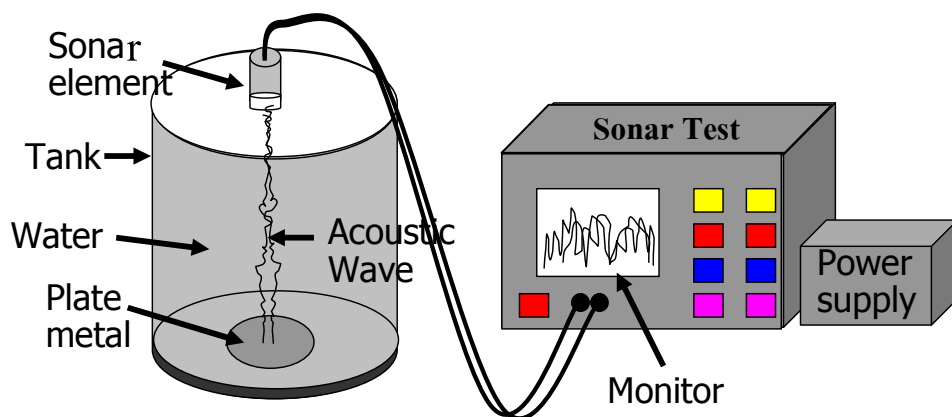
ภาพประกอบที่ 3.19 แสดงการทดลองส่งและรับคลื่นในตัวกลางที่เป็นอากาศ

3.7.4 การปรับเทียบสารตัวอย่างในตัวอย่างที่เป็นน้ำ

การทดสอบสารตัวอย่างในน้ำจำเป็นต้องรู้อัตราเร็วคลื่นในน้ำและการลดทอนของคลื่นเมื่อระยะห่างออกไปด้วยโดยการหาอัตราเร็วคลื่นอนุสติกโดยจัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพประกอบที่ 3.20 และเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันกับน้ำที่ทำการทดลองและแสดงภาพจำลองการวัดอัตราเร็วคลื่นอนุสติกโดยใช้เครื่อง Sonar Test ดังภาพประกอบที่ 3.21



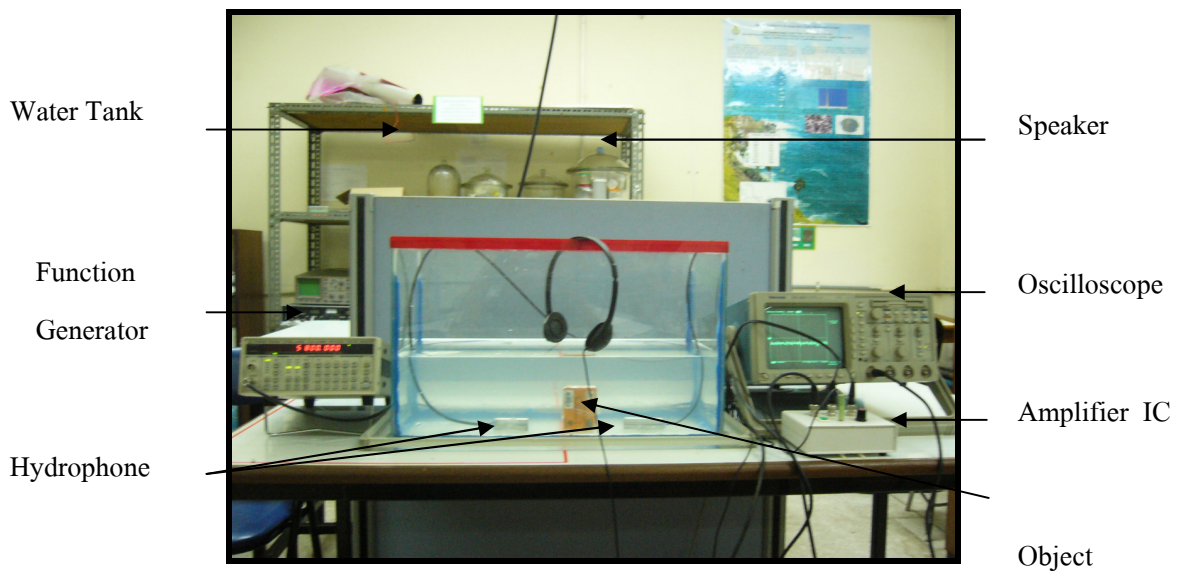
ภาพประกอบที่ 3.20 แสดงการวัดอัตราเร็วเสียงในน้ำโดยใช้อัลตราโซนิก



ภาพประกอบที่ 3.21 แสดงภาพจำลองของการวัดอัตราเร็วเสียงในน้ำโดยใช้อัลตราโซนิก

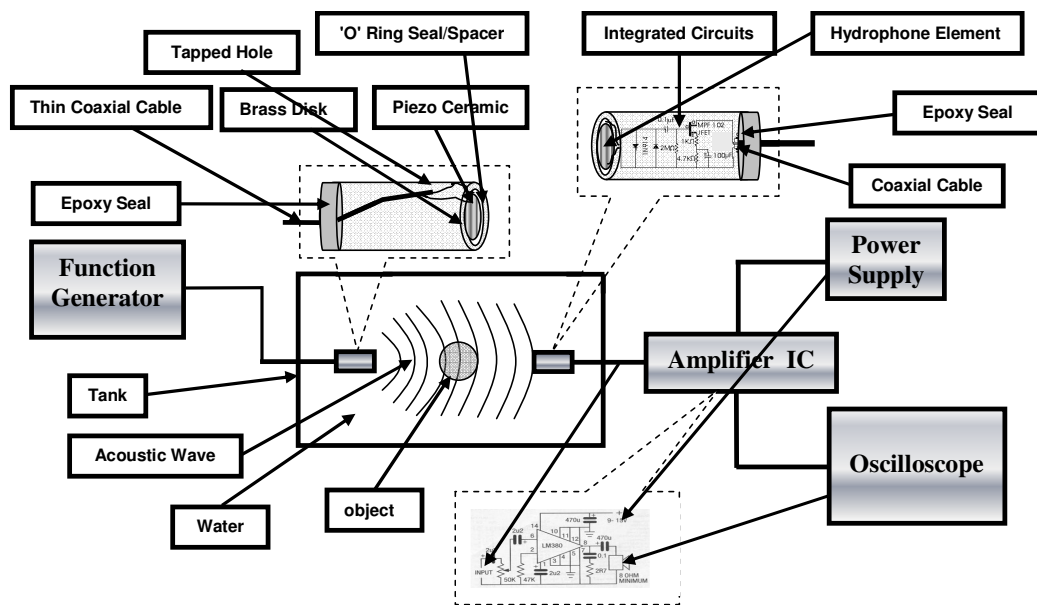
3.7.5 การประยุกต์ไฮโดรโฟนนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจำลอง

การทดลองใช้งานไฮโดรโฟนในสภาพแวดล้อมจำลองเพื่อตรวจสอบศักยภาพของไฮโดรโฟน ก่อนการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงโดยทำการตรวจสอบในเรื่องของการหาระยะและขนาดของวัตถุใต้น้ำแล้วนำมาวิเคราะห์กับระยะและขนาดของวัตถุจริงที่วัดได้กับการลดทอนของสัญญาณโดยใช้ ออสซิลโลสโคปเป็นตัวแสดงผลสัญญาณที่ได้ดังภาพประกอบที่ 3.22



ภาพประกอบที่ 3.22 แสดงการทดลองใช้งานไฮโดรโฟนในสภาพแวดล้อมจำลอง

การทดสอบการใช้งานไฮโดรโฟนในสภาพแวดล้อมจำลองเราสามารถควบคุมปัจจัยภายนอกที่อาจจะมีผลต่อการทดลองของเราได้และข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้นก็อาจจะเป็นข้อมูลที่ดีที่สุดของการนำไปใช้งานจริงก็ได้เนื่องจากปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อระบบการวัดข้อมูลมีน้อยในการทำงานวิจัยนี้ไม่ได้นำอุปกรณ์ที่ทำได้ไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงและยังไม่สามารถแปลงข้อมูลจากเสียงให้เป็นภาพได้แต่ก็สามารถนำข้อมูลที่ได้จากออสซิลโลสโคปมาหาขนาดและระยะห่างของวัตถุที่อยู่ในน้ำได้อย่างคร่าวๆอาจต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างภาพหรือทำเป็นแบบไฮโดรโฟนอาเรย์จึงจะวิเคราะห์ข้อมูลเสียงที่ได้มาประเมินเป็นภาพใต้น้ำได้แต่อุปกรณ์สำคัญหลักๆที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดพร้อมทั้งหลักการและรูปแบบการใช้งานของอุปกรณ์ไฮโดรโฟนได้แสดงไว้โดยสรุปในภาพประกอบที่ 3.23



ภาพประกอบที่ 3.23 แสดงองค์ประกอบของการทดลองใช้ไฮโดรโฟนในสภาพแวดล้อมจำลอง