บทที่ 2

ทฤษฎี

บทที่ 2 นี้กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของไฮโดรโฟน ทฤษฎีค่าคงที่ไพอิโซอิเล็กตริกอุทกสถิตและค่าคงที่ไฟฟ้ากลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง สมบัติของสารที่เตรียมและสมบัติพื้นฐานของสารมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย โดยแยกเป็นหัวข้อ ดังนี้

2.1 ประวัติการประดิษฐ์ไฮโดรโฟน

ไฮโดรโฟน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ฟังหรือตรวจจับพลังงานเสียงใต้น้ำ ไฮโดรโฟนสามารถเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้และใช้ฟังเสียงใต้น้ำเพียงอย่างเดียวและตรวจจับหรือฟังเสียงได้ช่วงใดช่วงหนึ่งเท่านั้น ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบการฟังเสียงใต้น้ำโดยใช้ไฮโดรโฟนในการตรวจหาเรือดำน้ำในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเพื่อการหาซากของเรือไททานิกที่จมในมหาสมุทรแปซิฟิกในปี ค.ศ. 1912 ในเวลาต่อมาอเล็กซานเดอร์ เบล (Alexander Belm) ได้นำมาใช้ในการทำแผนที่ใต้มหาสมุทรจากเสียงสะท้อนในปีเดียวกัน และได้มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกสำหรับการใช้งานใต้น้ำโดยอาศัยหลักการของเสียงสะท้อนในนามของโซนาร์ที่ประเทศอังกฤษในนาม The British Patent Office by English meter geologist Lewis Richardson หนึ่งเดือนหลังการจมของเรือไททานิกได้มีการสร้างโซนาร์ใน สหรัฐอเมริกา โดย ชาวแคนาดาชื่อ Reginald Fessenden ในปี 1914 โซนาร์ของเขา สามารถตรวจสอบก้อนน้ำแข็งที่อยู่ห่างออกไป 2ไมล์ ได้มีการรับส่งคลื่นแบบวิทยุและมีความแม่นยำในการระบุทิศทางของวัตถุใต้น้ำมากขึ้น หลังจากมีการนำไดโอดมาใช้กับไฮโดรโฟนพัฒนากลายมาเป็นเครื่องวัดอัลตราโซนิก โดยอัลตราโซนิกใช้หลักการของเสียงสะท้อนที่มีพลังงานและความถี่สูงโดยการพัฒนาของนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสและรัสเซียและพวกเขาเรียกมันว่าไฮโดรโฟนในช่วงนั้นมันเป็นอุปกรณ์ที่รับและส่งคลื่นเสียงใต้น้ำภายหลังที่เสียงจากแหล่งกำเนิดถูกปล่อยออกมาจะไปกระทบวัตถุและถูกสะท้อนกลับมา สามารถตรวจวัดได้ คลื่นเสียงที่ถูกส่งออกไปจะเป็นเสียงความถี่เรโซแนนซ์ ถ้าย้อนกลับไปใน 1912 ในแคนาดา หัวหน้าแผนกฟิสิกส์ที่ University of Alberta เขาได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับแผ่นดินไหวโดยใช้อัลตราโซนิกในช่วงที่สงครามโลกกำลังแผ่ออกไป Boyle ทำหน้าที่เป็นผู้คุมงานวิจัยและประดิษฐ์อุปกรณ์ให้กับ Royal Navy ที่ Parkeston Quay ใน 1916 เขาได้ทำงานวิจัยลับสุดยอดให้กับ ASDICS (Anti-Submarine Detection Investigation Committee) และสิ้นสุดใน

ปี 1918 งานวิจัยของเขาสามารถตรวจสอบวัตถุใต้น้ำได้ไกลออกไปถึง 1,260 เมตร มันเป็นเทคโนโลยีที่ทรงคุณค่าในการต่อต้านเรือดำน้ำของเยอรมันและบรรลุผลสำเร็จครั้งแรกในการจมเรือดำน้ำเยอรมันรุ่น German U-Boat UC-3 ในมหาสมุทร แอตแลนติกระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ในวันที่ 23 เมษายน 1916โดยใช้ไฮโดรโฟน (Boyle and Taylor, 1925.)

2.2 ทฤษฎีและสมการไพอิโซอิเล็กตริกอุทกสถิต

สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นไฮโดรโฟน ค่าคงที่ต่างๆ ที่สำคัญในการศึกษาคือค่า d_h , g_h , FoM และ M

ถ้าวัสดุไพอิโซอิเล็กตริกจุ่มหรือแช่อยู่ในของเหลวภายใต้แรงดันสัมพัทธ์กับ d_{33} และ d_{31} ดังสมการ (Cady, 1964)

$$d_h = d_{33} + (d_{31} + d_{32}) \tag{2.1}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์อุทกสถิต (g_h) มีความสัมพันธ์กับค่า d_h และ ε ดังสมการ

$$g_h = \frac{d_h}{\varepsilon} \tag{2.2}$$

ค่า Figure of Merit หรือ FoM ใช้อธิบายความเหมาะสมของวัสดุในการประยุกต์ใช้งานใต้น้ำ เป็นผลคูณของ 2 ปริมาณดังสมการ

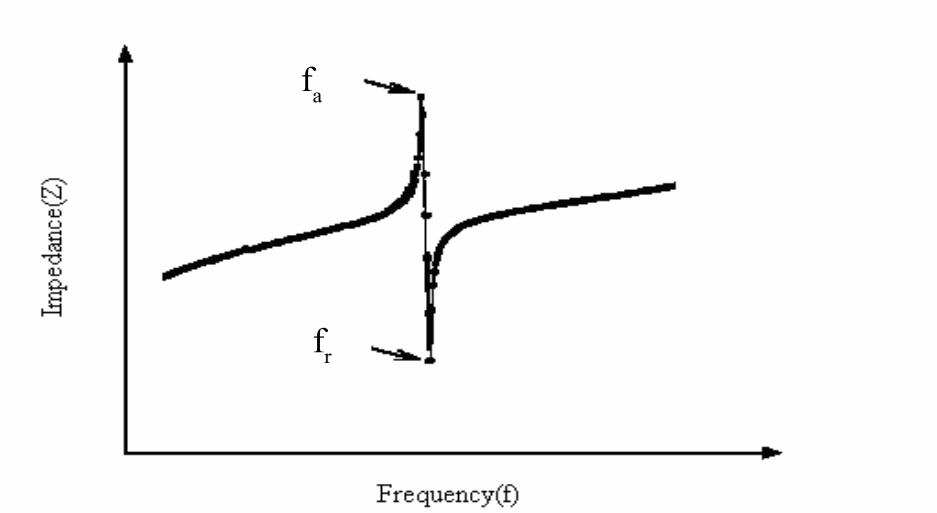
$$FoM = d_h . g_h \tag{2. 3}$$

ในการพิจารณาเกี่ยวกับความไวของวัสดุที่ใช้งานในเงื่อนไขความดันอุทกสถิต สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่า g_h และค่าความหนาของวัสดุทดสอบ ดังสมการ

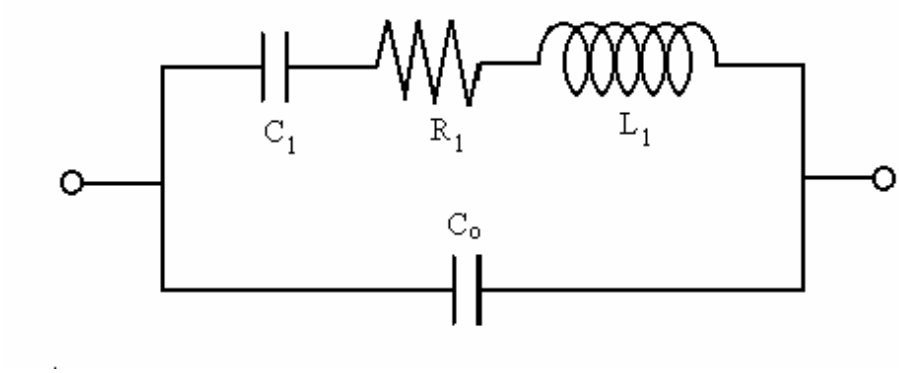
$$M = g_h . t \tag{2.4}$$

2.2.1 คัปปลิงแฟกเตอร์ (coupling factor)

ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ (coupling factor, k^2) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือในทางกลับกัน วิธีที่นิยมใช้ในการหาค่าคัปปลิงแฟกเตอร์คือวิธีการเรโซแนนซ์ (resonance methods) ซึ่งเป็นการหาตำแหน่งชนิดแบบที่หาความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency, f_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (anti-resonance frequency, f_a) ผลที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงลักษณะค่าความถี่เรโซแนนซ์และค่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (ที่มา : Jordan *et. al.*, 2001)



ภาพประกอบที่ 2.2 วงจรสมมูลของเมสัน (ที่มา : Mason *et. al.*, 1954)

วิธีการเรโซแนนซ์ วิธีนี้ใช้สมบัติทางไฟฟ้าในวัสดุไพอิโซอิเล็กตริกเพราะภายในวัสดุไพอิโซเซรามิกจะมีลักษณะสมมูลกับวงจรทางไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2 ซึ่งเรียกว่าวงจรสมมูลของเมสัน (Mason's equivalent circuit) (Mason *et. al.*, 1954) คือภายในมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำในตัวเดียวกันในการพิจารณาการตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่างๆที่ให้แก่สารไพอิโซอิเล็กตริก เมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่เซรามิกไพอิโซอิเล็กตริกจะเกิดการสั่นภายในเนื้อสารที่มีความถี่ค่าหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกับผลึกของสารนั้น ทิศทางการสั่นจะขึ้นกับรูปและขนาดของสารค่าความถี่ที่ทำให้

อนุภาคสารเกิดการสั่นขึ้นและมีการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังกลอย่างรวดเร็ว นั้นเรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ถ้าเพิ่มความถี่มากขึ้นเรื่อย ๆ จนไปถึงค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าอิมพิแดนซ์มีค่ามากที่สุด จะเรียกค่าความถี่นั้นว่า ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ความสัมพันธ์ของความถี่ดังกล่าวใช้ในการหาค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ในแนวระนาบสำหรับแผ่นเซรามิกรูปร่างแบบจานกลมแสดงดังต่อไปนี้

$$k_p^2=\left[2.5\left(\frac{f_a^2-f_r^2}{f_r^2}\right)+0.038\right] \tag{2.5}$$

สำหรับค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ในแนวความหนา สามารถวัดโดยให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดแอมพลิจูดต่างๆ แก่วัสดุไพอิโซเซรามิก แล้วทำให้วัสดุไพอิโซเซรามิกเกิดการยืดหดในแนวความหนา ดังนั้นค่าคัปปลิงแฟกเตอร์กรณีนี้หาได้โดยใช้สมการ

$$k_t^2=\frac{\pi}{2}\frac{f_r}{f_a}\cot\left(\frac{\pi}{2}\frac{f_r}{f_a}\right) \tag{2.6}$$

ค่าความเร็วเสียง ในวัสดุไพอิโซเซรามิกสามารถคำนวณจากสมการ

$$v^2=\frac{1}{\left[s_{11}^E\left(1-\sigma^{E^2}\right)\rho\right]} \tag{2.7}$$

โดยที่ v คือค่าความเร็วเสียงในวัสดุไพอิโซอิเล็กตริกในทำนองเดียวกัน ค่าบัลค์มอดูลัส (bulk modulus, B) อาศัยสมการต่อไปนี้

$$B=\rho v^2 \tag{2.8}$$

ค่ายังมอดูลัส (Young's modulus, Y) หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าบัลค์มอดูลัสและอัตราส่วนของปัวส์ซอง

$$Y=B\left[3\left(1-2\sigma^E\right)\right] \tag{2.9}$$

2.2.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) หรือค่าสภาพยอมรับได้สัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity, ε) ของวัสดุกับค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (ε_0) สามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน (impedance analyzer) โดยทั่วไปจะทำการป้อนความถี่ในช่วงต่างๆ และความต่างศักย์ในระดับ mV เพื่อทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยใช้สมการ (2.10) วงจรสมมูลแทนวัสดุไพอิโซอิเล็กตริกแสดงดังภาพประกอบที่ 2.2 ตารางที่ 2.1 แสดงค่าไดอิเล็กตริกของสารเปรียบเทียบกับสุญญากาศ ตารางที่ 2.2 เป็นค่าทางการทดลองที่ได้ของวัสดุต่างๆ เปรียบเทียบกัน

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{tC}{\varepsilon_0 A} \tag{2.10}$$

ซึ่ง ε_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กอิเล็กตริก

ε_0 คือสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (8.854×10^{-12} $F.m^{-1}$)

t คือความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยคือ m

A คือพื้นที่ผิวของขั้วสาร มีหน่วยคือ m^2

C คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยคือ F

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุอื่นๆ

วัสดุ	ค่าคงตัวสารไดอิเลคตริก(ε_r)
Vacuum	1
Air	1.0006
Teflon	2.1
Polyethylene	2.25
Polypropylene	2.25
Polystyrene	2.5
Glass cloth	2.55
Glass	3.78
Ceramics	3-7
Ceramic filled/glass	6-8

(ที่มา: Hewlett Packard, 1987)

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางไดอิเล็กตริกของเซรามิก พอลิเมอร์ และคอมโพสิทเซรามิก-พอลิเมอร์อีพอกซี

พารามิเตอร์	เซรามิกส์	พอลิเมอร์	คอมโพสิท
ε_r	200-5000	6-10	ขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตร
tan δ_m	0.0125	0.1	0.05
tan δ_e	0.02	0.25	0.02

(ที่มา: MTEC, มกราคม-มีนาคม 2543) (m = matrix, e = epoxy)

2.2.3 การค้นพบเฟร์โรอิเล็กตริก (ferroelectricity)

ในปี ค.ศ. 1940 ได้มีการทำตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (high dielectric constant capacitor) ไฟฟ้าเฟร์โรเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเมนต์ขั้วคู่ไฟฟ้าซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความสมมาตรของผลึก (crystal symmetry) ไฟฟ้าเฟร์โรเกิดจากทิศทางขนานกันของโมเมนขั้วคู่ไฟฟ้า (electric dipole moment) บริเวณที่มีโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นเอง (spontaneously polarized region) ที่มีโพลาไรเซชันทิศทางเดียวกันเรียกว่า โดเมน (domain) การจัดเรียงตัวของโดเมนหนึ่งกับอีกโดเมนหนึ่งถูกควบคุมโดยความสมมาตรของผลึก วัสดุในกลุ่ม $BaTiO_3$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเรียงตัวขนานกับขอบของหน่วยเซลล์ โดเมนจะโตขึ้นเมื่อสารได้รับสนามไฟฟ้าแรงสูง (high electric field) หลังจากที่สารผ่านการโพลิง (poling) พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเปลี่ยนแปลง การมีโพลาไรเซชันค้างในสารเนื่องจากผลของโพลิงสามารถพิจารณาได้จากวงการล้าเฟร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric hysteresis loop) สารพวกนี้ได้แก่

1) แบเรียมติตาเนต เป็นวัสดุชนิดแรกที่ได้รับการพัฒนาเป็นเพียโซอิเล็กตริกเซรามิกส์ ขณะที่แบเรียมติตาเนตเปลี่ยนโครงสร้างพบว่า สมบัติเชิงกลและเชิงไฟฟ้าก็เปลี่ยนแปลงด้วย การแทนที่ของ Pb หรือ Ca สำหรับ Ba จะลดอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างซึ่งควบคุมสมบัติเพียโซอิเล็กตริก การแทนที่ของ Zr หรือ Sn สำหรับ Ti จะเพิ่มสมบัติเพียโซอิเล็กตริก และเกิดการสูญเสียไดอิเล็กตริก (dielectric loss) ขณะใช้งานเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของผนัง โดเมน (domain wall) ดังนั้นถ้าเราสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของผนังโดเมนก็จะสามารถควบคุมการสูญเสียสนามค่าสูง (high-field loss) ได้มีการนำแบเรียมติตาเนตไปใช้สำหรับการตรวจจับใต้น้ำ (underwater detection) และการทำเสียงก้องกังวาล (echo sounding)

2) ตะกั่วเซอร์โคเนต ($PbZrO_3$) และตะกั่วติตาเนต ($PbTiO_3$) ตะกั่วเซอร์โคเนตมีจุดคูรี 234 ^oC และมีโครงสร้างผลึกแบบออร์ธอรอมบิค ตะกั่วติตาเนตมีจุดคูรี 495 ^oC และมีโครงผลึกแบบเตตระโกนอลและมีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์

3) ตะกั่วไนโอเบทต ($Pb\ Nb_2O_6$)

4) ลิเทียมไนโอเบต ($LiNbO_3$) และลิเทียมแทนทาเลต ($LiTaO_3$)

5) วัสดุผสมระหว่างเพียโซเซรามิกส์กับโพลิเมอร์ (piezoceramic-polymer composites)

สมบัติของเพียโซอิเล็กตริกเซรามิกส์ที่มีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งาน มีดังนี้

1) สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูง

2) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ

3) การสูญเสียไดอิเล็กตริกมีค่าต่ำ

4) ค่าคงที่เพียโซอิเล็กตริกมีค่าสูง(high piezoelectric constant)

5) การคู่ควบเชิงกลไฟฟ้ากลมีค่าสูง (high electromechanical coupling)

6) อุณหภูมิคูรีสูงซึ่งสามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้

7) สามารถทำโพลิงได้ง่าย

8) ง่ายต่อการทำซินเตอริง

9) สามารถทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (solid solution)ที่มีส่วนผสมทางเคมีได้หลายแบบ

10) ไม่ไวต่อความชื้น

การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเพียโซอิเล็กตริก ได้แก่ อุปกรณ์ที่ทำมาจากสารเพียโซอิเล็กตริก ได้แก่ ไมโครโฟน (microphone) ลำโพง (loudspeaker) สปาร์กอินไนเตอร์ (spark igniter) หรืออุปกรณ์จุดก๊าซ (gas ignitor) หัววัดการสั่น (vibration sensor) อุปกรณ์สั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โซนาร์ โฮโดรโฟน อุปกรณ์กรองคลื่น (wave filter) แอคทูเอเตอร์ (actuator) ดีเลย์ไลน์ (delay line) อุปกรณ์ทำความสะอาดอัลตราโซนิกส์ (ultrasonic generator) หม้อแปลงเพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric transformer) มอเตอร์เพียโซอิเล็กตริก (piezoelectric motor) และอุปกรณ์ทางการแพทย์ (medical diagnostic equipment) (Buchanan ,1991)

2.2.4 อิมพิแดนซ์ทางอะคูสติก (acoustic impedance)

ค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติก(acoustic impedance, Z)เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของวัสดุ (ρ) กับความเร็วของเสียงในวัสดุ (ν) สำหรับค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติกมีหน่วยเป็น $kg.m^{-2}.s^{-1}$ หรือ Rayl สมบัตินี้ถือว่าเป็นค่าที่สำคัญสำหรับการส่งคลื่นอะคูสติกผ่านตัวกลาง ค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติกของวัสดุไพอิโซอิเล็กตริกที่ใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์ทางการแพทย์ควรมีค่าประมาณ 1.5 Rayl เพื่อให้มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอิมพิแดนซ์ของน้ำและของเหลวในร่างกายมนุษย์ สมการ(2.11) ใช้สำหรับหาค่า Z ดังนี้

$$Z = \rho v \qquad (2.11)$$

โดยทั่วไปค่าอะคูสติกอิมพิแดนซ์ของไพอิโซอิเล็กตริกมีค่าสูงกว่าค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติกของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน เช่น น้ำ อากาศ หรือเนื้อเยื่อมนุษย์

2.3 ทรานสดิวเซอร์ไพอิโซอิเล็กตริก

สมบัติที่จำเป็นของไพอิโซอิเล็กตริกสำหรับการใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ดีมีดังนี้

1. สามารถเชื่อมโยงระหว่างตัวกำเนิดและตัวตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับค่าอิมพิแดนซ์ทางไฟฟ้า[1] (electric impedance) ให้เข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นตัวขับเคลื่อน
2. ทำหน้าที่แปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าได้ โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้า
3. สามารถส่งสัญญาณอะคูสติกแบบพัลส์ความเข้มสูงสู่ตัวกลาง โดยการปรับค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติกของวัสดุให้ใกล้เคียงกับค่าอิมพิแดนซ์อะคูสติกของตัวกลาง
4. รับสัญญาณสะท้อนกลับที่ความเข้มต่ำ โดยการปรับรูปทรงของทรานสดิวเซอร์ให้สามารถรวมลำเสียงได้

สำหรับทรานสดิวเซอร์ การแผ่กระจายของคลื่นนั้นสามารถอาศัยเทคนิคการตรวจสอบโดยใช้คลื่นในโหมด (mode) ต่างๆ ใช้หลักการแปรผันความเร็วและการลดทอน (attenuation) ใช้ปรากฏการณ์การหักเห (refraction)และใช้ปรากฏการณ์การสะท้อน (reflection)ของหน้าคลื่น (wave front) ที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการวัดนั้น คลื่นที่ใช้จะถูกส่งผ่าน (transmitted) ไปยังวัตถุที่ต้องการวัด และรับ (received) สัญญาณคลื่น

ลักษณะการแผ่กระจายของคลื่นสามารถทำการตรวจจับโดยอาศัยปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. โหมดการแผ่กระจายของคลื่นในตัวกลางจะสามารถแผ่กระจายออกไปในบางโหมดเท่านั้นขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของตัวกลาง เช่น ของแข็งที่มีลักษณะเป็นก้อนเป็นแผ่น หรือเป็นเส้นลวดถ้าการแผ่กระจายของคลื่นผ่านตัวกลางที่เป็นก้อนของแข็ง จะมีอยู่ 2 โหมด คือ ตามแนวยาว (longitudinal mode) หรือแนวแรงอัด (compression mode) และตามขวาง (transverse mode) หรือแนวแรงเฉือน (shear mode) ซึ่งชนิดของความเร็วที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกและความยืดหยุ่นของวัสดุ ถ้าตัวกลางมีลักษณะเป็นแผ่น โหมดของการแผ่กระจายจะมี 2 แบบ คือ เป็นคลื่น

[1] อิมพิแดนซ์ทางไฟฟ้า (electrical impedance) มีอยู่ 2 ส่วน คือ real และ imaginary parts ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ในแต่ละช่วงการใช้งาน นอกจากนี้ค่าอิมพิแดนซ์ยังขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก พื้นที่อุปกรณ์ รวมทั้งค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติกของวัสดุ และการออกแบบเพิ่มเติมที่เรียกว่า matching ด้วย

แบบ “Lamb” ซึ่งเป็นคลื่นที่มีการเคลื่อนที่ตามแนวยาวและตามแนวดัด (flexural) และเป็นคลื่นแบบ “Love” ซึ่งเป็นคลื่นแรงเฉือนซึ่งเคลื่อนที่ตามแนวนอน ถ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ตามเส้นลวด จะมีอยู่ 3 โหมด คือ ตามแนวยืด (extensional) ตามแนวดัด (flexural) และตามแนวบิด (torsional)

2. ความเร็วคลื่นสามารถพิจารณาได้จากความยืดหยุ่น (elastic moduli) ของตัวกลางและโหมดในการแผ่กระจายของคลื่น ความเร็วของคลื่นในโหมดหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นของตัวกลางทำให้สามารถตรวจสมบัติทางกลบางอย่างของตัวกลางได้

3. การลดทอนของคลื่นสามารถพิจารณาได้จากการกระเจิง (scattering) และการดูดกลืน (absorption) ซึ่งเป็นสมบัติของของตัวกลาง รวมทั้งการกระจายของลำเสียงจากแหล่งกำเนิดที่จำกัด

4. การสะท้อนกลับคลื่นในทุกโหมดจะมีการสะท้อนกลับบางส่วนโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพิแดนซ์ทางอะคูสติกไปตามทางที่คลื่นมีการเคลื่อนที่ผ่าน

5. การหักเห (refraction) ของคลื่นเสียงอาศัยกฎของสเนลล์ (Snell’s law) เช่นเดียวกับการหักเหของแสง

2.4 เซรามิกต่างๆที่มีสมบัติไพโซอิเล็กตริกอุทกสถิต

2.4.1 แบเรียมไทเทเนต ($BaTiO_3$)

แบเรียมไทเทเนต เป็นสารที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันกับพวกสารประกอบในกลุ่ม เพอร์รอฟสไกต์ (perovskite) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.3 โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ขึ้นกับอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากช่วง -90 °C ไปจนถึงอุณหภูมิสูงกว่า 120 °C แบเรียมไทเทเนต จะมีเฟสเปลี่ยนแปลงจากรอมโบฮีดรอลไปเป็น ออร์ธอรอมบิก (orthorhombic) เตตระกอนอล (tetragonal) และคิวบิก (cubic) ในที่สุด

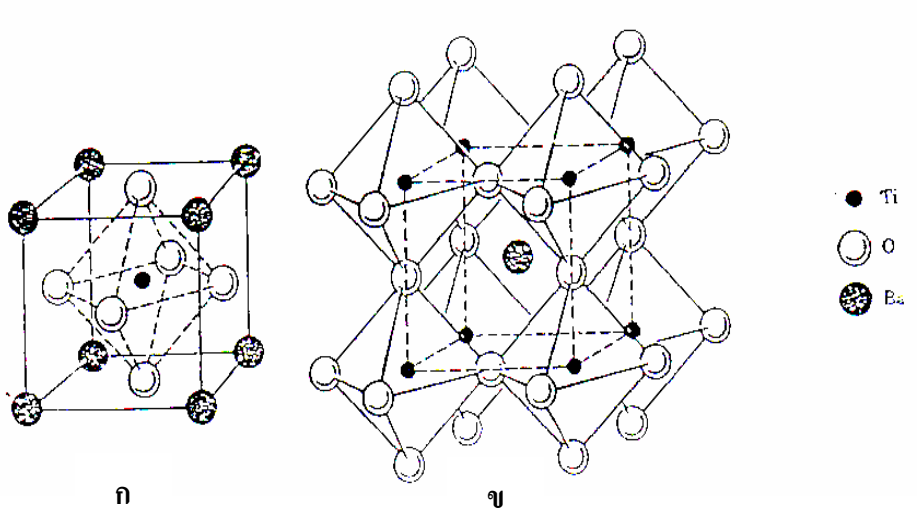
โครงสร้างผลึกเป็นเพอรอฟสไกต์ ไอออนบวกของโลหะจะอยู่ที่มุมทั้งสี่ ไอออนบวกของโลหะอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีขนาดเล็กกว่า อยู่ตรงกลางโครงผลึกและไอออนลบซึ่งมักเป็นของออกซิเจนจะ อยู่ที่ตรงกลางผิวทั้งหกของโครงผลึก แสดงดังภาพประกอบที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของแบเรียมไททาเนตในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ช่วงอุณหภูมิ (^{o}C)	โครงสร้างผลึก
ต่ำกว่า -90	รอมโบฮีดรอล
ตั้งแต่ -90 ถึง 5	ออร์ธอรอมบิก
สูงกว่า 5 ถึง 120	เตตระโกนอล
สูงกว่า 120	คิวบิก

(ที่มา : Newnham, 1997)

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี (T_c) แบเรียมไทเทเนต มีลักษณะของหน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก โดยมีอิออนของ Ba^{2+} อยู่ที่มุมทั้งแปด มีไอออนของ O^{2-} อยู่ที่จุดใจกลางผิวหน้าทั้งหก และมีไอออนของ Ti^{4+} อยู่ที่ใจกลาง ของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ซึ่งมีความสมดุลของประจุไฟฟ้าจึงไม่เกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชันขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างผลึกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปโดยที่ไอออนของ Ba^{2+} และ Ti^{4+} จะเกิดการเลื่อนขึ้นไปจากตำแหน่งสมดุลเล็กน้อย เสมือนหนึ่งว่าไอออนของ O^{2-} เกิดการเลื่อนลงมาแสดงดังภาพประกอบที่ 2.3 ข และทำให้เกิดความไม่สมดุลทางไฟฟ้าขึ้นในหน่วยเซลล์ และเรียกกระบวนการดังกล่าวนี้ว่าโพลาไรเซชัน

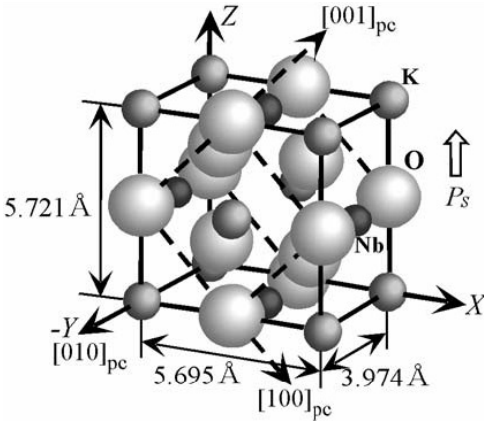


ภาพประกอบที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟไกต์ของ $BaTiO_3$

(ที่มา : Newnham, 1997)

2.4.2 โปแทสเซียมไนโอเบต ($KNbO_3$)

โปแทสเซียมไนโอเบตจะมีการเปลี่ยนเฟสภายใต้ความดันสูงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก คิวบิคเป็น เตตระโกนอล ที่ 435^{o}C จากโครงสร้างเตตระโกนอลเป็นออโธรอมบิคที่ 225 ^{o}C ภาพประกอบที่ 2.4 และจากโครงสร้าง ออโธรอมบิคเป็น รอมโบฮีดรอล ที่ -10 ^{o}C (Hewat et al.,1973)



ภาพประกอบที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ ออโธรอมบิคของ $KNbO_3$

(ที่มา : Kiyoshi Nakamura, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan)

วิธีการเตรียม $KNbO_3$ ที่นิยมวิธีการหนึ่งซึ่งใช้ปฏิกิริยาตรง จากสารตั้งต้น K_2CO_3 กับ Nb_2O_5 ดังนี้

$$K_2CO_3 + Nb_2O_5 \longrightarrow 2KNbO_3 + CO_2 \qquad (2.12)$$

2.4.3 ลิเทียมแทนทาเลต (Lithium tantalate, $LiTaO_3$)

ในงานวิจัยนี้ใช้ $LiTaO_3$ เป็นสารมาตรฐานในการปรับเทียบ (ดูตารางที่ 2.4) ลิเทียมแทนทาเลต มีโครงสร้างสมสัณฐาน (isomorphic)[2] จุดหลอมเหลวและอุณหภูมิคูรีอยู่ที่ 1,650 ^{o}C และ 660 ^{o}C เฟสเฟอร์โรอิเล็กตริกของความเป็นสมมาตร อยู่ที่กลุ่มผลึก 3m และสามารถเกิดโพลาไรเซชันได้โดยตัวมันเองในแนวแกน c

โดยทั่วไปผลึกลิเธียมแทนทาเลตจะมีบทบาทที่สำคัญในการทำเป็นชิ้นงานทางด้านคลื่น อะคูสติกพื้นผิวโครงสร้างพื้นฐานในสารนั้นประกอบด้วยออกซิเจนที่มีการจัดเรียงตัวเป็นทรงแปดหน้าร่างตาข่าย ในช่วงแรกของการศึกษานั้น พบว่าโครงสร้างนี้มีลักษณะที่เหมือนกับโครงสร้างแบบ ilmenite ($FeTiO_3$) ต่อมามีการศึกษาค้นคว้า และพบว่าแท้จริงแล้วโครงสร้างดังกล่าวนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน การเรียงตัวของไอออนลบที่เกิดขึ้นตามแนวแกน c คือ Li-Nb-v-Li-Nb-v ตามลำดับ ขณะที่ใน ilmenite จะเป็นแบบ Fe-Ti-v-Ti-Fe-v โดยตำแหน่ง v เป็นตำแหน่งที่ไม่เกิดพันธะ

---

[2] Isomorphic –สมสัณฐาน ที่มาศัพท์วิทยาศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พิมพ์ครั้งที่ ๕

ผลึกสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยวิธีการ pulling method จุดหลอมเหลวของ $LiTaO_3$ สูงเกินกว่าที่จะทำให้เกิดผลึกโดยใช้ถ้วยครูซิเบิล Pt นั้นแสดงให้เห็นว่าถ้าใช้ถ้วยครูซิเบิลPt-Rh แทนที่ถ้วยครูซิเบิล Ir ในการเตรียมสารนี้ที่เป็นผลึกแบบไพอิโซอิเล็กตริกได้ คุณสมบัติไพอิโซอิเล็กตริกของผลึก $LiTaO_3$ ทั้งหมดได้ถูกค้นพบขึ้น ดังตารางที่ 2.4 ซึ่งแสดงค่าคงที่ต่าง ๆ ที่บ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพของผลึกสารนั้น

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าคงที่ทางไพอิโซอิเล็กตริกของ $LiTaO_3$

ค่าคงที่ต่างๆ	$LiTaO_3$
$\rho\left[10^3\,\mathrm{kg.m^{-3}}\right]$	5.3
$\varepsilon_{11}^{T}/\varepsilon_0$	51
$c_{11}^{E}\left[10^{11}\,\mathrm{N.m^{-2}}\right]$	2.33
$d_{33}\left[10^{-12}\,\mathrm{C.N^{-1}}\right]$	8
d_{31}	-2
k_t	0.18
k_{15}	0.19

(ที่มา : Ikeda, 1990)

2.5 ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (Solid-state reaction)

ปฏิกิริยาสถานะของแข็ง คือกระบวนการเตรียมสารตัวอย่างด้วยเทคนิค การผสมออกไซด์แบบดั้งเดิม โดยการนำสารออกไซด์ที่เป็นสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะของแข็งมาทำปฏิกิริยากัน โดยใช้อุณหภูมิหรือความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารตั้งต้นจนกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่นการเกิดปฏิกิริยาของ $KNbO_3$ ดังสมการ (2.12)

$BaTiO_3$ เป็นสารกึ่งตัวนำแบบเฟร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric semiconductor) และแสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก

$BaTiO_3$ มีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์ อุณหภูมิคูรีของ $BaTiO_3$ มีค่า 130 ^{o}C อุณหภูมิคูรีมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของการเติมตัวเติมลงไปผสมกับ $BaTiO_3$ ทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมพีทีซี (PTC behavior) ก็จะเปลี่ยนแปลงหน่วยเซลล์ของ $BaTiO_3$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอรอฟสไกต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหน่วยเซลล์ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไปหน่วยเซลล์เป็นรูปลูกบาศก์ที่อุณหภูมิคูรี (130 ^{o}C) หรือมากกว่า หน่วยเซลล์เป็นรูปเตตระโกนอลในช่วง130 ^{o}C ถึง 0 ^{o} C หน่วยเซลล์เป็นรูปออร์ธอรอมบิลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 ^{o}C อุณหภูมิคูรีเป็นอุณหภูมิที่สารเปลี่ยนโครงผลึก

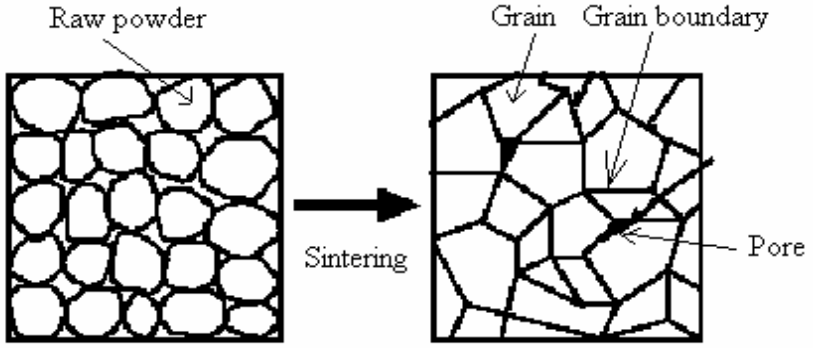
จากเตตระโกนอลไปเป็นคิวบิค สภาพการนำไฟฟ้าของสารเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนและไอออนบวก-ไอออนลบของอะตอมและเกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงานของสาร

2.6 การเผาแคลไซน์ (calcination)

จุดประสงค์ของการเผาแคลไซน์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการแพร่ (diffusion) ภายในไอออน และลดระดับการแพร่ ซึ่งมีปรากฏขึ้นระหว่างขั้นตอนการซินเตอร์ เพื่อที่จะมีโครงสร้างเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ซึ่งสามารถใช้พิจารณาถึงกระบวนการบดผสมได้ เงื่อนไขของการเผาแคลไซน์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะควบคุมการหดตัวระหว่างการซินเตอร์ได้ โดยนำสารที่ผ่านผสมและอบแห้งแล้วมาเผาแคลไซน์ เพื่อให้สารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารประกอบ การเผาแคลไซน์จะใช้ระบบปิดเพื่อป้องกันการสูญเสียสารระหว่างการเผาโดยบรรจุสารผสมลงในอลูมินาครูซิเบิล ปิดผาและนำไปเผาตามอุณหภูมิที่ต้องการ (Moulson et al ,2003)

2.7 กระบวนการเผาอบผนึก (sintering process)

กระบวนการเผาอบผนึกเป็นกระบวนการที่ผ่านการขึ้นรูปเกิดการแน่นตัว ทำให้เป็นเซรามิกส์ที่มีความแข็งแรงพอที่จะคงรูปได้ เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิ เพื่อให้อะตอมของสารเกิดการแพร่เข้าไปยึดเกาะกันแน่นมากขึ้น ที่เรียกว่า คอ (neck) มีความ หนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยกระบวนการเผาอบผนึกที่เป็นแบบสถานะของแข็งแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะด้วยกันคือ ระยะแรก ผิวหน้าของอนุภาคที่มีความเรียบ จะเกิดเส้นขอบเกรนเกิดคอ มีการเชื่อมต่อเกิดขึ้นที่รอบๆ อนุภาค ความพรุนลดน้อยลง ระยะกลางจะมีการหดตัวของรูที่เปิดเชื่อมต่อ ระหว่างเส้นขอบเกรน นั่นคือเกิดรูพรุนมากขึ้น มีการเติบโตของเกรนอย่างช้าๆ ส่วนระยะสุดท้ายเกรนส่วนใหญ่จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น รูพรุนที่อยู่ระหว่างเกรนขนาดใหญ่นั้นจะมี การหดตัวลงอย่างช้าๆดังภาพประกอบที่ 2.5



ภาพประกอบที่ 2.5 แสดงกระบวนการเผาอบผนึก

(ที่มา: Uchino, 2000)

สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอบผนึก ถ้าผงสารไม่บริสุทธิ์อาจทำให้มีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิจำกัด และเวลาที่ใช้ในการเผาอบผนึกก็เป็นปัจจัยที่สำคัญมาก กล่าวคือ ที่อุณหภูมิสูงๆ อะตอมของสารจะเกิดการแพร่อย่างรวดเร็ว จึงใช้เวลาในการเผาอบผนึกสั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำ การแพร่จะเป็นไปอย่างช้าๆ จึงต้องใช้เวลาในการเผาเพิ่มขึ้น

2.8 กระบวนการโพลิง (poling process)

สารเซรามิกส์มีโดเมนต่างๆ เป็นแบบสุ่ม (random) ทำให้ค่าโพลาไรเซชันสุทธิเท่ากับศูนย์และไม่แสดงสมบัติทางไพอิโซอิเล็กตริก สารเซรามิกจะมีสมบัติไพอิโซอิเล็กตริกก็ต่อเมื่อได้รับสนามไฟฟ้ากระแสตรงความเข้มสูงเพื่อทำให้ทิศทางโพลาไรเซชันแต่ละโดเมนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ในทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้ากระบวนการดังกล่าว เรียกว่า กระบวนการโพลิง (poling process) โดยค่าสนามไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่ทำให้โพลาไรเซชันหมดไป เรียกว่า สนามไฟฟ้าบังคับ (coercive field) กระบวนการโพลิงจะป้อนสนามไฟฟ้าที่มากกว่าสนามไฟฟ้าบังคับ

ไดอิเล็กตริกเป็นวัสดุที่มีความต้านทานสูง แสดงสมบัติของความจุไฟฟ้าและใช้ทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ตัวอย่างของไดอิเล็กตริก เช่น กระดาษ พลาสติก ยาง และไมกา

ฉนวนไฟฟ้า (insulator) เป็นสารที่มีความต้านทานสูง ใช้ยึดตัวนำให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและป้องกันตัวนำสัมผัสกัน จนเกิดการลัดวงจรทางไฟฟ้าตัวอย่างของฉนวนไฟฟ้า เช่น พลาสติก ยาง แก้ว พอร์ซเลน (procelain) และไมกา

ข้อดีของการนำเซรามิกส์ไปใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าคือสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง โดยปราศจากการเสื่อมในสมบัติเชิงเคมี สมบัติเชิงกล และสมบัติไดอิเล็กตริก

ฉนวนไฟฟ้าที่จะศึกษานี้เป็นไดอิเล็กตริกเชิงเส้น (linear dielectrics) ฉนวนที่เป็นอิเล็กตริกเชิงเส้นจะมีการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement, D) เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้า (electric field, E) ในไดอิเล็กตริก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเป็นปริมาณที่แสดงถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า สมบัติไดอิเล็กตริกมีความสำคัญชี้บอกเงื่อนไขการทำงานของฉนวน

ไดอิเล็กตริกและฉนวน เป็นวัสดุที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ไดอิเล็กตริกที่ดีก็จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีด้วย ปริมาณที่น่าสนใจในไดอิเล็กตริกและฉนวนไฟฟ้าได้แก่สภาพการนำไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก สภาพยอมผ่านได้ ตัวประกอบการสูญเสีย (dissipation factor) การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกและแนวที่เป็นสัดส่วนกับความถี่ ความแข็งแรงทางไดอิเล็กตริก (dielectric strength) และความต้านทานเทอร์มอลชอก (thermal shock resistance) เงื่อนไขการ

ทดสอบ คือ พิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าตรง พิจารณาความถี่และรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าสลับ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างขั้วที่อยู่ห่างกับขั้วที่อยู่ใกล้

เบรกดาวน์ (breakdown) คือปรากฏการณ์ที่เกิดการพังทลายของไดอิเล็กตริก เป็นปริมาณที่มีความสำคัญต่อฉนวนไฟฟ้า ความแข็งแรงของไดอิเล็กตริก คือ ปริมาณที่แสดงความแรงของสนามไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดเบรกดาวน์ในไดอิเล็กตริก ความต้านทานไดอิเล็กตริกจะขึ้นกับความสม่ำเสมอของวัสดุรูปร่างของสารตัวอย่าง รูปร่างของขั้วและระยะห่างระหว่างขั้ว กลไกเบรกดาวน์มีหลายแบบ ดังนี้ (Moulson, 1990;Buchanan, 1991)

1) อินทรินซิคเบรกดาวน์ (intrinsic breakdown) คือ การพังทลายของไดอิเล็กตริกเนื่องจากได้รับสนามไฟฟ้าสูงเกินไป เป็นเบรกดาวน์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมแล้วย้ายจากแถบการนำ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้น

2) เทอร์มอลเบรกดาวน์ (thermal breakdown) คือ การพังทลายของไดอิเล็กตริกเมื่อได้รับความร้อนมากเกินไปทำให้ความต้านทานของสารลดลง กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงทางไฟฟ้า (electric strength) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

3) ดิสชาร์จเบรกดาวน์ (discharge breakdown) คือ การพังทลายของไดอิเล็กตริกเนื่องจากเกิดการปลดปล่อยประจุในบริเวณรูพรุนของสารเซรามิกส์ที่มีเนื้อไม่สม่ำเสมอจะมีรูพรุน เกิดการปลดปล่อยประจุของก๊าซ (gas discharge) ภายในรูพรุน เบรกดาวน์เกิดขึ้นที่รูพรุนความแข็งแรงของไดอิเล็กตริกจึงขึ้นกับความหนาและความหนาแน่นของสาร

2.9 การประยุกต์ใช้งานเป็นไฮโดรโฟน

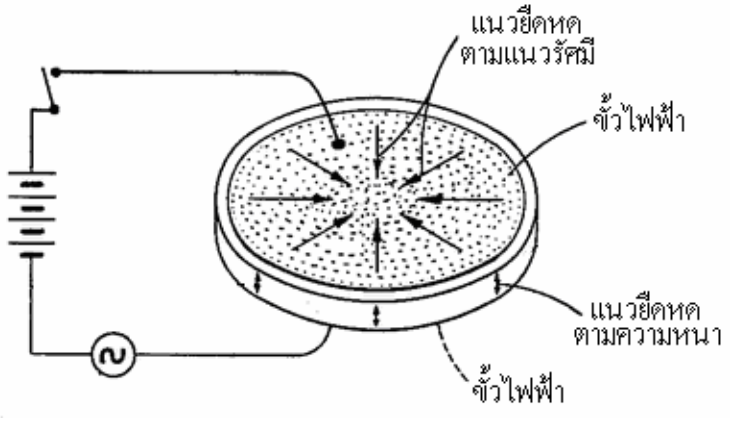
การเปลี่ยนคลื่นอะคูสติกเป็นสัญญาณไฟฟ้า และการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้ากลับเป็นคลื่นอะคูสติก ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อเรียกว่า ทรานสดิวเซอร์มี 2 แบบ คือ

2.9.1 ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สมบัติแม่เหล็กของโลหะบางชนิด (transducer magneto-striction) ใช้หลอดนิกเกิลรูปทรงกระบอกจำนวนมากยึดติดแผ่นไดอะแฟรมบางๆ หลอดนิกเกิลทุกหลอดมีขดลวดพันอยู่โดยรอบ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หลอดนิกเกิลจะหดตัว ตามจังหวะสัญญาณไฟฟ้า การยืดและหดตัวสลับกันไปนี้ จะทำให้แผ่นไดอะแฟรมเคลื่อนไหวและจะทำให้เกิดคลื่นอะคูสติก แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีคลื่นอะคูสติกสะท้อนเข้ามา ก็จะเกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวด ทรานสดิวเซอร์แบบนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานวัดระยะ

2.9.2 ทรานสดิวเซอร์ที่อาศัยสมบัติของผลึกแร่บางชนิด เช่น แร่ควอตซ์ หรือโรเชลล์ซอลต์ (rochelle salt) เป็นเกลือทาเทรตของโซเดียมและโพแทสเซียม จำนวนมากติดกับแผ่นไดอะแฟรม

เมื่อมีไฟฟ้าผ่านเข้าผลึก จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเป็นเสียงขึ้น ในทางตรงข้ามถ้ามีคลื่นอะคูสติกมากระทบแผ่นไดอะแฟรม จะทำให้เกิดไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของผลึก ทรานสดิวเซอร์แบบนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเฝ้าฟังคลื่นอะคูสติก แต่มีข้อเสียตรงที่ส่งคลื่นได้ไม่แรง และผลึกอาจแตกได้ง่าย ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านผลึกแรงเกินไป

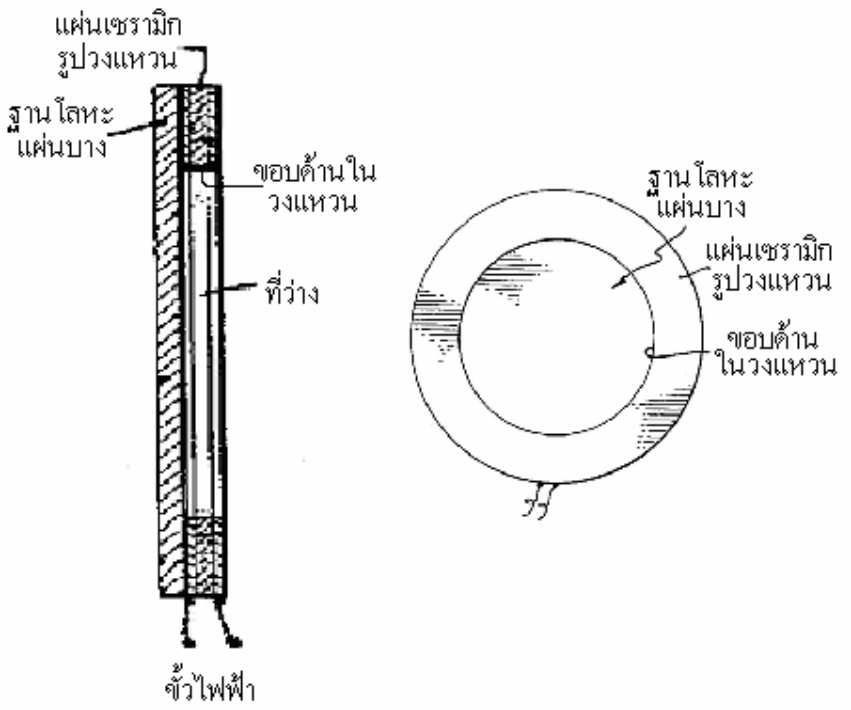
1952 Hans Jaffe (U.S. Pat. No. 2,592,703) ได้ปรับปรุงทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้ากลจากแต่เดิมที่มีเกลือ Rochelle เป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีปัญหาในการประยุกต์ใช้กับงานในน้ำ และที่ที่มีความชื้นสูง เพราะว่าเกลือ Rochelle เป็นสารที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น Hans จึงหันมาใช้สารไดอิเล็กตริกแทน ซึ่งเป็นสารผลึกเดี่ยวที่ไม่สมมาตร และมีการยืดหดได้ภายในสนามไฟฟ้า แต่การตอบสนองต่อสนามไฟฟ้านี้ยังมีค่าน้อย และไม่ได้เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณอินพุตทางไฟฟ้าตรงที่ให้ แต่ Hans ก็ค้นพบว่าสารไดอิเล็กตริกที่มีโพลาไรเซชันจะมีการตอบสนองทางกลเป็นเชิงเส้นกับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และได้ทำวัสดุไดอิเล็กตริกประเภทเซรามิกที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแบเรียมติตาเนต ซึ่งมีค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับสารที่มีค่าสูง มาทำเป็นทรานสดิวเซอร์ทางไฟฟ้ากล โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมคล้ายเหรียญ และมีขั้วไฟฟ้าที่ผิวหน้าทั้งสองของสาร ดังภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 แสดงการจ่ายสัญญาณไฟฟ้าให้กับสารแบเรียมติตาเนต
(ที่มา: U.S. Pat. No.,1952)

1958 Joseph W. Crownover (U.S. Pat. No. 2,836,738) ได้ทำทรานสดิวเซอร์ประเภทไฟฟ้ากลที่เป็นตัวกระตุ้นจากวัสดุเซรามิกประเภทอิเล็กโตรสตริกทีฟ (electrostrictive) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการหดตัวเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสารที่ใช้อยู่ในกลุ่ม แบเรียม (Ba) หรือ สทรอนเทียมไทเทเนต ($SrTiO_3$) การทำงานของทรานสดิวเซอร์จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแผ่นโลหะกับการโก่งงอของวัสดุเซรามิกส์เมื่อให้แรงดันไฟฟ้ากับสารเซรามิก ซึ่งวิธีนี้เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพ

ของตัวกระตุ้น (actuator) ในการประยุกต์มาใช้งานเป็นไมโครโฟน ลำโพง เป็นต้น ลักษณะของทรานสดิวเซอร์แผ่นโลหะบางเป็นฐานรูปวงกลม และมีแผ่นเซรามิกรูปวงแหวนยึดติดกับแผ่นโลหะที่เป็นฐานด้วย epoxide resin โดยมีขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ผิวหน้าของสารดังภาพประกอบที่ 2.7 เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเซรามิก จะมีการหดตัวในแนวรัศมีแล้วดึงให้แผ่นโลหะที่เป็นฐานเกิดการโก่งงอ



ภาพประกอบที่ 2.7 แสดงลักษณะทรานสดิวเซอร์ของ Joseph W. Crownover ซ้ายเป็นภาคตัดขวางขางทรานสดิวเซอร์ ขวาเป็นด้านบนของทรานสดิวเซอร์ (ที่มา: U.S. Pat. No.,1958)

1959 Frank R. Abbott (U.S. Pat. No. 2,895,062) ได้ทำทรานสดิวเซอร์ประเภทอิเล็กโตรสตริกทีฟ (electrostrictive) เพื่อการใช้งานที่ความถี่ต่ำ เช่น เป็นส่วนประกอบในลำโพง เป็นต้น

2.9.3 ตัวอย่างทราสดิวเซอร์ทางด้านคลื่นอะคูสติกที่ใช้งานในของเหลว

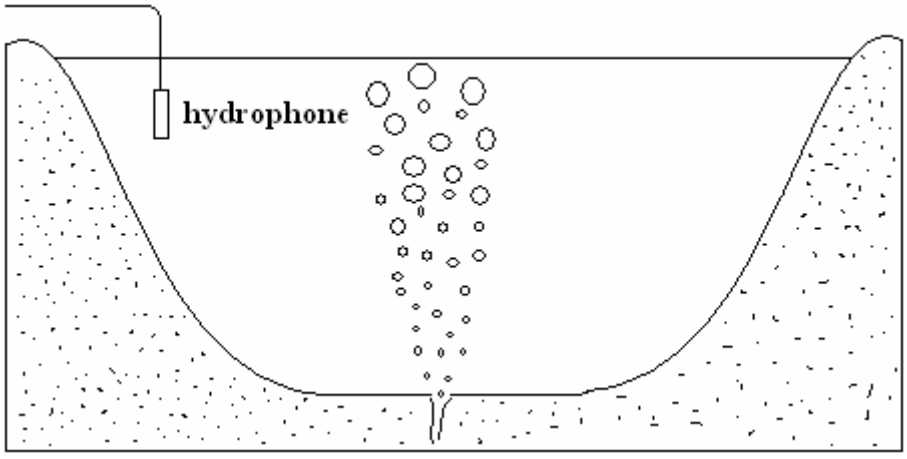
ไฮโดรโฟน

ไฮโดรโฟน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีเซรามิก ทรานสดิวเซอร์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานนั่นเอง ไฮโดรโฟนที่มีคุณภาพสูงจะบรรจุวงจรพรีแอมปลิไฟเออร์ที่มีสัญญาณรบกวน (noise) น้อยอยู่ภายใน วงจรนี้จะทำหน้าที่เพิ่ม

แอมปลิจูดของสัญญาณที่เกิดจากไฮโดรโฟน และลดอิทธิพลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเพื่อให้สัญญาณที่ต้องการมีความคมชัดมากที่สุด พลังงานที่วงจรพรีแอมปลิไฟเออร์ (preamplifier)ใช้ปกติจะมาจากแหล่งพลังงานภายนอกที่มาตามสายเคเบิล ไฮโดรโฟนที่ใช้งานโดยทั่วไปมีหลายชนิด สามารถแบ่งดังนี้

1) ไดเร็กชันนัลไฮโดรโฟน (directional hydrophone) จะมีทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิกรูปทรงกระบอกเดี่ยวอยู่ภายใน ซึ่งจะให้รูปแบบการแผ่ของคลื่นอะคูสติกในทิศต่าง ๆ ได้สมบูรณ์ที่สุด ไดเร็กชันนัลไฮโดรโฟนที่รับส่งคลื่นจะใช้เทคนิคพื้นฐาน 2 อย่างในการเพิ่มความไวในการตรวจจับสัญญาณในทิศทางหนึ่ง ๆ ทำสามารถแบ่งไฮโดรโฟนประเภทนี้ได้อีก 2 แบบตามวิธีที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณดังนี้

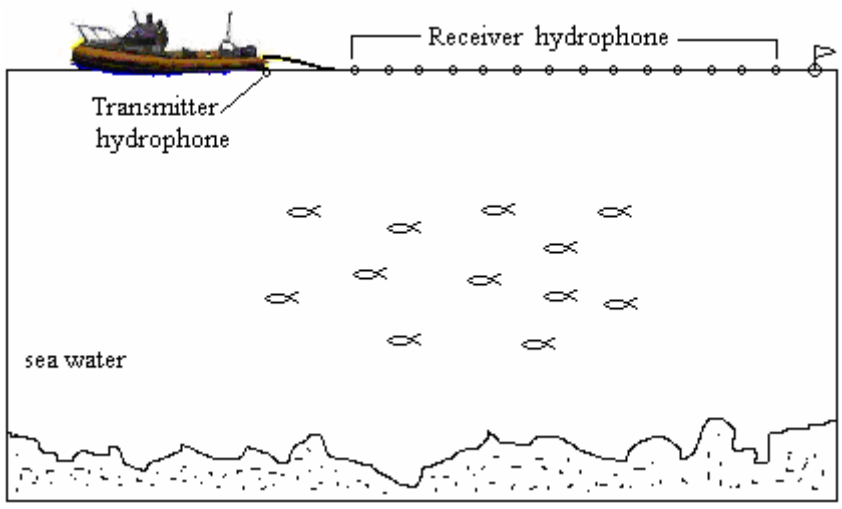
1.1) วิธีการหน่วง และการสะท้อน (damping and reflective method) ของคลื่นอะคูสติกซึ่งจะประกอบด้วยชิ้นส่วนของ ทรานสดิวสเซอร์เพียงชิ้นเดียวเป็นแบบแผ่นจาน หรือกรวยอยู่ภายใน สิ่งที่สะท้อนคลื่นอะคูสติกจะมีรูปร่างที่สามารถโฟกัสสัญญาณคลื่นอะคูสติกได้ วิธีนี้สามารถนำไปสร้างไดเร็กชันนัลไฮโดรโฟนที่มีราคาต่ำได้ อย่างไรก็ตามไฮโดรโฟนประเภทนี้จะใช้ได้เฉพาะกับสิ่งที่อยู่นิ่งเท่านั้น ตัวสะท้อนไม่สามารถเคลื่อนที่ในน้ำได้



ภาพประกอบที่ 2.8 แสดงไฮโดรโฟนแบบหน่วง และลดทอนใช้วัดคลื่นแผ่นดินไหวใต้น้ำ

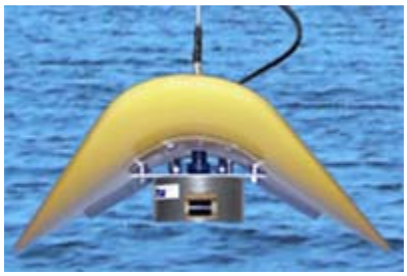
1.2) วิธีอาเรย์ (array mehtod) ซึ่งเรียกไฮโดรโฟนประเภทนี้ว่า ไฮโดรโฟนแบบอาเรย์ (array hydrophone) เป็นไฮโดรโฟนที่มีกรรมวิธีที่ซับซ้อนขึ้นแต่ยังอาศัยหลักการตรวจจับการหน่วง และการสะท้อนของสัญญาณคลื่นอะคูสติกอยู่ มีการรวมทรานสดิวเซอร์จำนวนมากมาเรียงเป็นแถวยาวในการตรวจจับคลื่นอะคูสติก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดทางธรณีวิทยาหรือ

ด้านอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นแนวโดยไฮโดรโฟนจะได้รับการออกแบบให้สามารถรวมสัญญาณจากทิศทางที่ต้องการได้ ในขณะเดียวกันจะมีการเอาสัญญาณจากทิศทางอื่นที่ไม่ต้องการออกไป



ภาพประกอบที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงตัวของไฮโดรโฟนแบบอาเรย์

2) ไฮโดรโฟนแบบเมาติง (Mounting hydrophone) เป็นไฮโดรโฟนที่พัฒนาจากไดเร็กชันนัลไฮโดรโฟน มีลักษณะเป็นโดมคล้ายภูเขา และมีทรานสดิวเซอร์อยู่ภายในที่สามารถหมุนปรับเพื่อหาของสัญญาณที่มีความเข้มมากที่สุด ไฮโดรโฟนประเภทนี้จะถูกติดไว้ที่ใต้ท้องเรือซึ่งช่วยให้มีความสะดวกในการติดต่อสื่อสารของเรือ



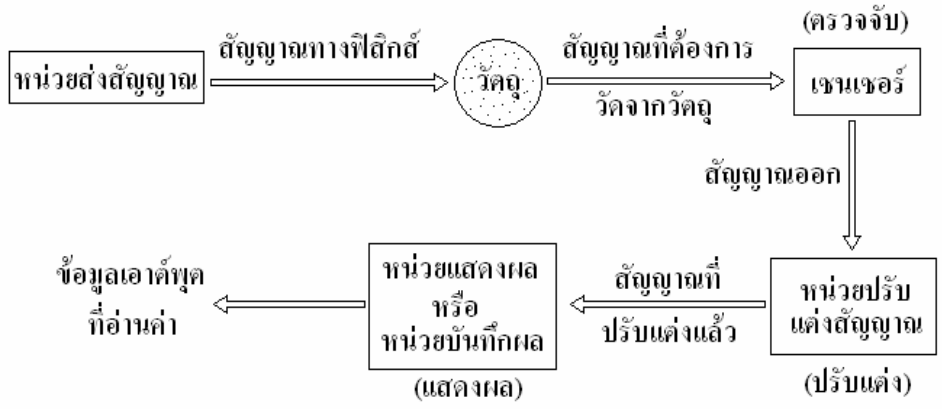
ภาพประกอบที่ 2.10 แสดงลักษณะของไฮโดรโฟนรูปภูเขา

(ที่มา: http://www.vemco.com/resources/l_hydro.php)

2.9.4 ระบบการวัด วงจรและสัญญาณรบกวน

ระบบการวัด ทำหน้าที่แสดงผลหรือบันทึกข้อมูลของปริมาณเอาต์พุตซึ่งได้จากปริมาณอินพุต ซึ่งอินพุตที่เข้ามานี้จะเป็นสัญญาณที่มาจากสิ่งที่จะวัดหรือมาจากการสัญญาณที่ได้จากการตอบสนองต่อสัญญาณที่ส่งออกไปจาดระบบวัด (วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, 2548)

องค์ประกอบสำคัญในการวัด



ภาพประกอบที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบสำคัญในการวัด

ส่วนส่งสัญญาณ (transmitting unit) จะส่งสัญญาณที่เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ไปยังวัตถุที่จะวัดเพื่อให้วัตถุตอบสนองต่อสัญญาณที่ส่งไปแล้วสัญญาณที่เกิดจากการตอบสนองของวัตถุจะถูกตรวจจับส่วนจับสัญญาณต่อไป ส่วนส่งสัญญาณนี้อาจจะไม่มีก็ได้ ถ้าสิ่งที่วัตถุที่วัดนั้นสามารถที่จะส่งสัญญาณที่เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ออกมาได้

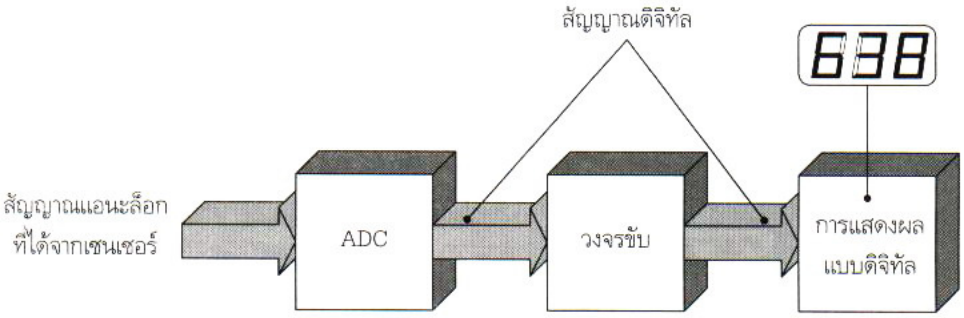
ส่วนตรวจจับสัญญาณ (sensing unit) มีหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่มาจากวัตถุ

ส่วนปรับแต่งสัญญาณ (signal conditioning unit) มีหน้าที่ปรับแต่งสภาพของสัญญาณที่ออกมาจากส่วนตรวจจับสัญญาณให้มีรูปแบบเหมาะสม เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้กับหน่วยแสดงผลหรือหน่วยบันทึกข้อมูล ถ้าสัญญาณที่ได้จากส่วนตรวจจับสัญญาณมีขนาดที่ต่ำส่วนปรับสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณนั้นให้แรงขึ้น และถ้าสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน (noise) ที่ไม่ต้องการปนมาด้วย ส่วนปรับแต่งสัญญาณจะทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวน (noise filter) นั้นออกไป

ส่วนแสดงผล หรือบันทึกสัญญาณ (display or recorder unit) มีหน้าที่ในการแสดงผลของสัญญาณที่ได้จากการปรับแต่งให้มาอยู่ในรูปที่สามารถอ่านค่าได้ หรือนำมาแปลผลเป็นข้อมูลได้ เช่น แสดงเป็นตัวเลข กราฟของสัญญาณ เป็นต้น ส่วนของการแสดงผล และบันทึกสัญญาณสามารถแบ่งเป็น 3 แบบดังนี้

1) หน่วยแสดงผลแบบแอนาล็อก (analog display) คืออุปกรณ์ในการบ่งชี้หรือแสดงค่าที่ได้จากการวัดด้วยเซนเซอร์อย่างใดอย่างหนึ่งทันทีทันใดแต่จะไม่มีการบันทึกข้อมูลการวัดไว้เพื่อนำกลับมาตรวจสอบหรืออ้างอิงในภายหลังหน่วยแสดงผลในลักษณะนี้มีการทำงานแบบเวลาจริงหรือการทำงานแบบตามเวลาจริง (real time) หน่วยแสดงผลแบบแอนาล็อกจำเป็นต้องอาศัยทักษะและความชำนาญของผู้ใช้มากกว่าหน่วยแสดงผลแบบดิจิทัล แต่ก็มีความสะดวกและใช้งานง่ายกว่า รวมทั้งยังมีส่วนการปรับแต่งสัญญาณน้อยกว่าหน่วยแสดงผลแบบดิจิทัล ตัวอย่างเช่น มิเตอร์แบบขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ (moving coil meter) ออสซิลโลสโคปแบบแคโทดเรย์ (cathode ray oscilloscope) เป็นต้น

2) หน่วยแสดงผลแบบดิจิทัล (digital display) คืออุปกรณ์ที่สามารถแสดงผลการตรวจวัดเป็นตัวเลข ดิจิทัลโวลต์มิเตอร์ ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ และดิจิทัลมัลติมิเตอร์ เป็นต้น ผังการทำงานพื้นฐานของการแสดงผลแบบดิจิทัลแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 2.12



ภาพประกอบที่ 2.12 แสดงผังการทำงานพื้นฐานของการแสดงผลแบบดิจิทัล
(ที่มา: วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, 2548)

3) หน่วยบันทึกผล (recording unit) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ บันทึก จัดเก็บข้อมูลหรือสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัด โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อให้สามารถที่จะนำเอาข้อมูลดังกล่าวกลับมาวิเคราะห์ตรวจสอบได้ในภายหลัง ตัวอย่างการใช้งานเช่น การบันทึกเกี่ยวกับการสึกหรอของเครื่องจักรกลในสายการผลิตเพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับกำหนดระยะเวลาที่ต้องซ่อมแซมและบำรุงรักษา

วงจรขยายสัญญาณ

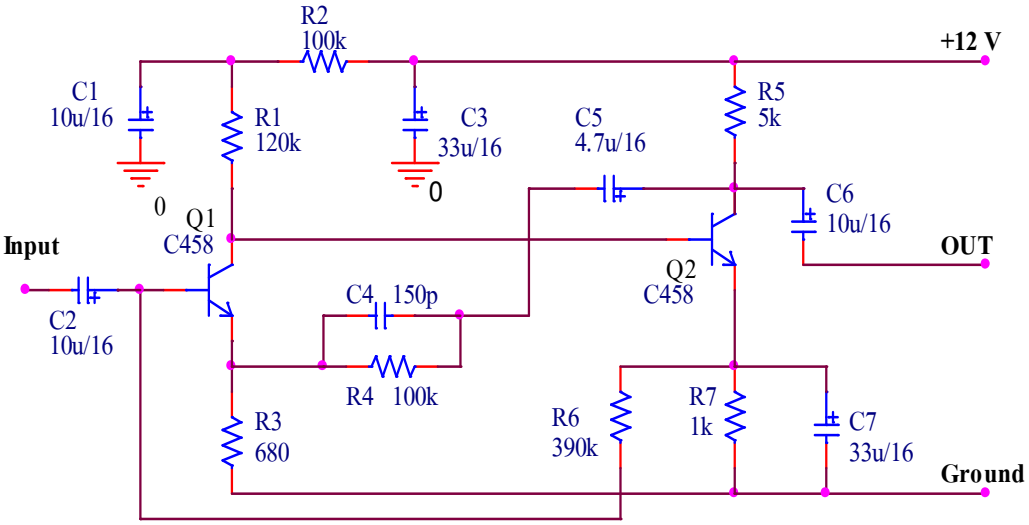
การนำวงจรไปขยายสัญญาณไฟฟ้าจำเป็นจะต้องรู้อัตราขยายของวงจรนั้น ๆ เสียก่อนโดยสามารถหาได้จากสมการ (กัมพล ทองเรือง, 2547)

$$\text{อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า } A_v = \frac{\text{แรงดันเอาต์พุต}}{\text{แรงดันอินพุต}} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \qquad (2.14)$$

ในหน่วยเดซิเบล (dB)

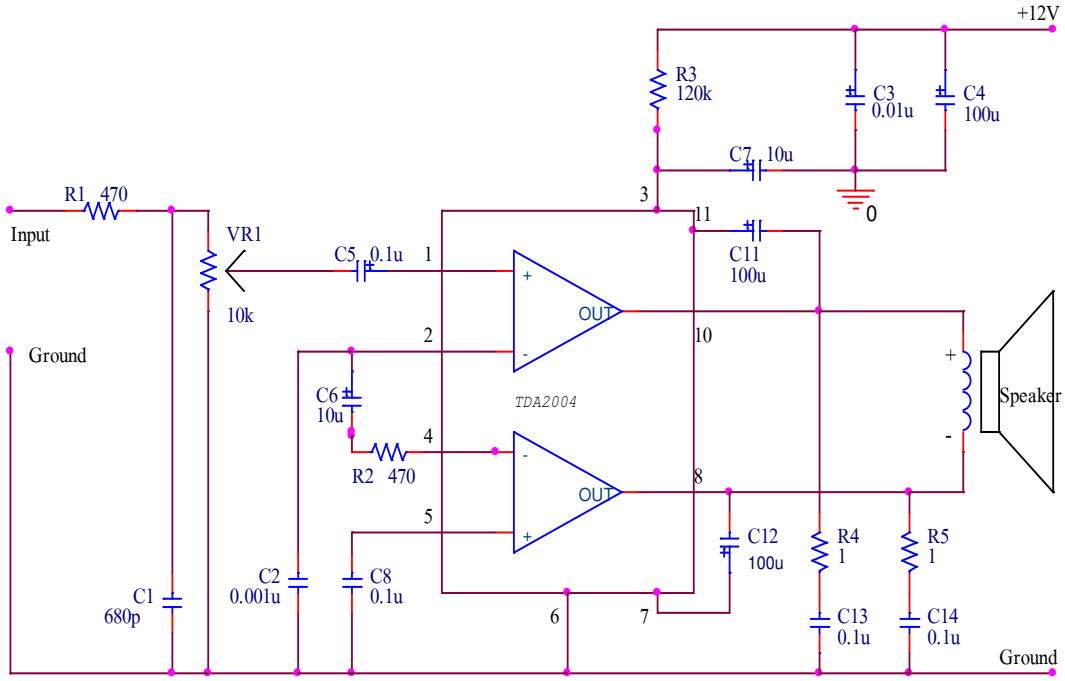
$$\text{อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า } A_v \text{ (dB)} = 20 \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \qquad (2.15)$$

1) วงจรพรีแอมปลิไฟเออร์ (preamplifier) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ทรานสดิวเซอร์ผลิตออกมาให้ความแรงของสัญญาณสูงขึ้นโดยปราศจากการผิดเพี้ยน วงจรพรีแอมปลิไฟเออร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ (สายันต์ ชื่นอารมย์, 2549) แสดงดังภาพประกอบที่ 2.13



ภาพประกอบที่ 2.13 แสดงวงจรพรีแอมปลิไฟเออร์

2) วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) เป็นวงจรที่สามารถขยายกำลังไฟฟ้าของสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากวงจรขยายก่อนหน้านี้วงจรขยายมีรูปแบบที่หลากหลาย แต่ในโครงงานนี้เลือกใช้วงจรแบบ BTL (bridge-tied load) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือสามารถให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ทางด้านเอาต์พุตได้ประมาณ 2 เท่าของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเลี้ยงให้กับวงจร รูปของวงจรนี้แสดงดังภาพประกอบที่ 2.14



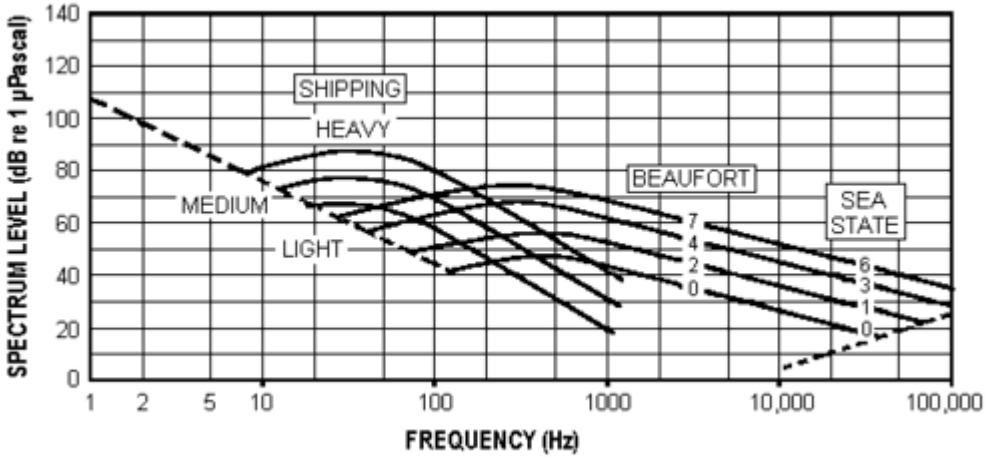
ภาพประกอบที่ 2.14 แสดงวงจรขยายกำลังไฟฟ้าแบบ BTL

สัญญาณรบกวน(Noise)

ในระบบการวัดความสามารถในการตรวจจับสัญญาณจะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระหว่างแอมปลิจูดของสัญญาณกับแอมปลิจูดของสัญญาณรบกวน ดังนั้นจึงต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวน ซึ่งมีดังนี้

คลื่นเสียงรบกวนในมหาสมุทร

จะมีผลกับระบบการวัดในระยะไกลที่ใช้ความถี่ต่ำเพราะที่ความถี่ต่ำนั้นระดับของสัญญาณรบกวนจะมีมาก



ภาพประกอบที่ 2.15 แสดงระดับของคลื่นเสียงรบกวนในมหาสมุทรที่ความถี่ต่าง ๆ

(ที่มา : http://www.vemco.com/resources/l_noise.php)

สัญญาณรบกวนเนื่องจากการไหล จะเกิดขึ้นกับไฮโดรโฟนที่เคลื่อนที่ติดไปกับเรือ โดยสัญญาณรบกวนนั้นเกิดจากน้ำที่ไหลผ่านไฮโดรโฟน โดยทั่วไปสัญญาณรบกวนประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของเรือที่เคลื่อนโดยจะเพิ่มขึ้น18dB ทุกๆ 2 เท่าของความเร็วที่เพิ่มขึ้น

สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณทางเสียงที่ถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยไฮโดรโฟน จะถูกรบกวนหลายแหล่งดังนี้

- สัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดพลังงาน
- สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทางไฟฟ้า
- สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการขยายสัญญาณไฟฟ้า

ซึ่งไฮโดรโฟนที่ดีนั้นจะต้องมีการออกแบบป้องกันสัญญาณรบกวนให้ดี อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบจะถูกจำกัดด้วยคลื่นเสียงรบกวนที่มีอยู่ในน้ำและประสิทธิภาพของสารที่นำมาทำเป็นตัวทรานสดิวเซอร์