# บทที่ 4

# การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก

## 4.1 หลักการสร้างตัวตรวจจับ

ตัวตรวจจับ (Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงรูปพลังงานรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งตัวตรวจจับที่สร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกนั้น จะมีอยู่ด้วยกัน 2 กระบวนการคือ การแปลงสัญญาณจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางตรงกันข้ามการแปลงสัญญาณจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เนื่องจากตัวตรวจจับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่จะใช้ตรวจสอบความผิดปกติหรือเสียหายของวัสดุ รวมทั้งระบุลักษณะต่างๆของที่เกิดจากการปล่อยคลื่นอะคูสติก ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจจับจึงต้องคำนึงถึงส่วนประกอบเป็นสำคัญ ดังนั้นสมบัติที่จำเป็นและเหมาะสมสำหรับการสร้างตัวตรวจจับเพื่อนำมาใช้งานและสิ่งที่จะระบุได้ว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณที่ดีนั้นมีดังต่อไปนี้

1) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดี โดยการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อพลังงานกล-ไฟฟ้า (Electromechanical coupling coefficients)
2) ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง (Acoustic impedance) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ
3) มีค่าความไวต่อการตอบสนอง (Sensitivity) ที่สูง
4) ขนาดของแอมปลิจูดที่ตรวจจับได้สูงกว่าขนาดของแอมปลิจูดของสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะใช้วงจรขยายสัญญาณเป็นอุปกรณ์ช่วยได้

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกส์จะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของสูงกว่าวัสดุชนิดโพลิเมอร์ เมื่อนำมาสร้างเป็นตัวตรวจจับเพื่อใช้ในการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก ซึ่งวัสดุที่ใช้สำหรับการตรวจสอบส่วนใหญ่เป็นโลหะ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงสูง ดังนั้นในการตรวจสอบจะต้องมีสารคู่ควบ (Couplant) เป็นตัวเชื่อมระหว่างวัสดุที่ต้องการตรวจสอบกับตัวตรวจจับ เพื่อช่วยลดความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับตัวกลางที่มีสัญญาณเคลื่อนที่ผ่าน และเนื่องจากการเข้ากันไม่ได้ของอิมพีแดนซ์ทางเสียงนี้จะส่งผลให้ความสามารถในการแยกรายละเอียดของสัญญาณค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้ตัวตรวจจับที่มีสมบัติที่ดี จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบตัวตรวจจับขึ้นใหม่เติมวัสดุที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงใกล้เคียงกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาเป็นตัวเสริมด้านหลังที่เรียกว่า วัสดุเสริมหลัง

(Backing material) ซึ่งจะช่วยให้ตัวตรวจจับมีความไวต่อการตอบสนองของสัญญาณได้ดีขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนองด้วย

## 4.2 การหาค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง

จากสมการ (2.65) เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุ โดยการหาค่าผลคูณระหว่างความเร็วเสียงในตัวกลางกับค่าความหนาแน่นของวัสดุนั้น เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของฟิล์ม PVDF มีค่าประมาณ 3.91 Mrayl ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างตัวตรวจจับโดยใช้วัสดุเสริมหลังคือกาวอีพอกซีซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงอยู่ที่ 2.971 Mrayl โดยวิธีการหาค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุหาได้จากการวัดค่าความหนาแน่นของสารละค่าความเร็วของเสียงในวัสดุ [15,16] ซึ่งจากสมการที่ (2.75) และ (2.76). พบว่า ถ้าวัสดุทั้งสองชนิดที่ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่ไม่ใกล้เคียงกันจะส่งผลให้คลื่นที่ส่งมาไม่สามารถส่งผ่านต่อไปได้ หรือสามารถส่งผ่านไปได้น้อย ซึ่งจะส่งผลให้ความเข้มของสัญญาณ ความละเอียดของสัญญาณและค่าความไวของสัญญาณที่รับได้มีประสิทธิภาพน้อยลง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองเพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงโดยการเติมผงทังสเตน ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์สูง คือประมาณ 99.72 Mrayl [15] ลงไปที่สัดส่วนต่างๆ ผลของการเติมผงทังสเตนที่สัดส่วนต่างๆ กันนี้มีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเปลี่ยนแปลงไป ผลการทดลองแสดงค่าของความเร็วเสียง ความหนาแน่นและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง แสดงในตารางภาคผนวก ข ภาพที่ 4.1 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเฉลี่ยกับค่าสัดส่วนของปริมาณผงทังสเตนที่สัดส่วน 0% 2 % และ 5 % ผลของค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่สัดส่วนต่างๆ มีค่า ที่ 2.971 Mrayl 3.183 Mrayl และ 3.669 Mrayl ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่สัดส่วนของทังสเตนต่างๆ

| Volume fraction of tungsten (%) | Acoustic Impedance of composite (Mrayl) |
|---|---|
| 0 | 2.971 |
| 2 | 3.183 |
| 5 | 3.669 |

I2833A5123

## 4.3 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับ

### 4.3.1 ส่วนประกอบของตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก [4]

ตัวตรวจจับที่ใช้สำหรับตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1) วัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีคุณสมบัติสำหรับใช้ในการเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
2) ชั้นป้องกัน (Protective layer) เป็นชั้นที่ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
3) วัสดุเสริมหลัง (Backing material) เป็นวัสดุผสมระหว่างกาวอีพอกซีกับผงทังสเตนตามสัดส่วนต่างๆ ที่ต้องการ ซึ่งวัสดุส่วนนี้จะส่งผลต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนอง
4) กล่องอะลูมิเนียม เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เป็นโครงสร้างของตัวตรวจจับ
5) หัวต่อ BNC (BNC connector) เป็นอุปกรณ์สำหรับนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

### 4.3.2 การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์ม PVDF

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นด้วยฟิล์ม PVDF อธิบายขั้นตอนของการสร้าง ได้ดังนี้

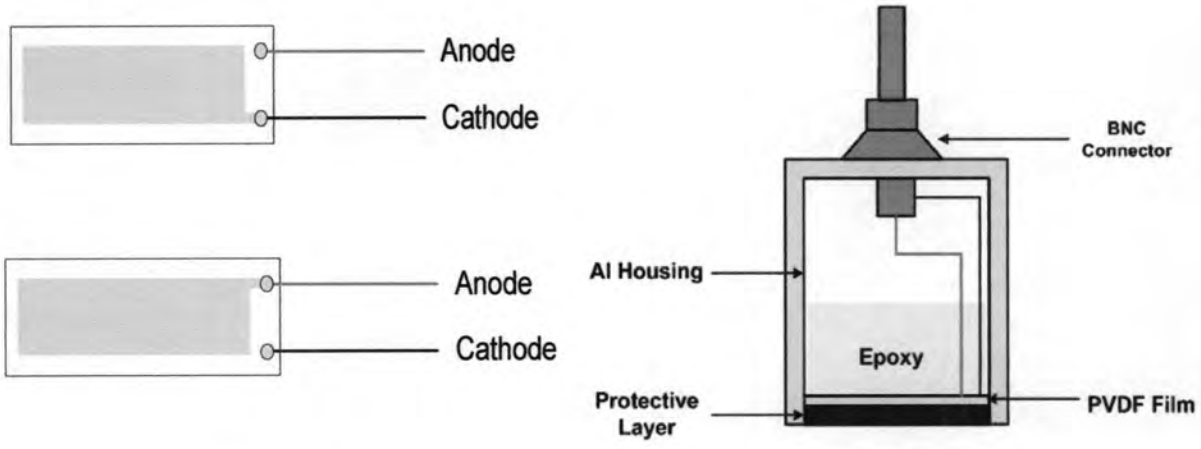
1) วางกล่องอะลูมิเนียมขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และความยาว 3.5 เซนติเมตร ที่จะใช้เป็นโครงสร้างของตัวตรวจจับลงบนกระจกที่ติดสกอตเทปไว้เพื่อป้องกันการยึดติดกันระหว่างกาวอีพอกซีกับกระจก แล้วใช้สกอตเทปยึดระหว่างกระจกกับกล่องอะลูมิเนียมให้แข็งแรง หลังจากนั้นเทกาวอีพอกซีลงไปให้ได้ความหนาตามที่ต้องการเพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
2) รอจนกาวแห้งประมาณ 10 ชม. หลังจากนั้นนำฟิล์ม PVDF ที่มีขั้วอิเล็กโทรดเรียบร้อยแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 4.2 (ก) ติดบนกาวสองหน้าแล้ววางไว้บนชั้นป้องกัน โดยจัดตำแหน่งให้ฟิล์ม PVDF อยู่ตรงกลางของกล่องอะลูมิเนียม

3) ผสมกาวอีพอกซีกับผงทังสเตนให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเทกาวอีพอกซีที่ผสมแล้วลงไปในกล่องอะลูมิเนียมตามความหนาที่ต้องการ เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมหลัง

4) รอจนกาวอีพอกซีแข็งตัวประมาณ 10 ชั่วโมง หลังจากนั้นดึงกล่องอะลูมิเนียมออกจากกระจก แล้วทำการบัดกรีสายไฟที่ต่อกับแผ่นฟิล์ม PVDF เข้ากับขั้ว BNC ที่ติดอยู่ที่ฝาของกล่องอะลูมิเนียม โดยให้สายไฟสีแดงเป็นสายสัญญาณและสายไฟสีดำเป็นสายดิน

5) ติดฝากล่องเข้ากับตัวกล่องอะลูมิเนียม แล้วนำไปทดสอบการใช้งาน

รูปถ่ายและแผนภาพของโครงสร้างของตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม PVDF แสดงดังรูป 4.2 (ข) และ รูป 4.3




(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะของตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF (ก) ลักษณะของแผ่นฟิล์ม PVDF (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับ

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.2 รูปถ่ายของตัวตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับ T1 (ข) ตัวตรวจจับ T2 (ค) ตัวตรวจจับ T3

ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่นฟิล์ม PVDF และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างผงทังสเตนกับกาวอีพอกซี ที่มีผลต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนอง ซึ่งได้สร้างตัวตรวจจับจากฟิล์ม PVDF ขึ้นมาทั้งหมด 3 ตัวด้วยกัน ซึ่งตัวตรวจจับทุกตัวมีขนาดและรูปร่างเหมือนกันทุกตัว โดยตัวตรวจจับ 2 ตัวแรกจะสร้างโดยใช้ฟิล์ม PVDF ที่มีขนาดความหนาเท่ากันคือ 28 ไมโครเมตร แต่มีค่าสัดส่วนของปริมาตรของผงทังสเตนแตกต่างกัน โดยใช้ค่าสัดส่วนของปริมาตรของผงทังสเตนที่ 0 % และ 5% ตามลำดับ ซึ่งจะเรียกเป็นตัวตรวจจับตัวที่ T1 และ T2 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวตรวจจับอีกตัวหนึ่งสร้างโดยใช้ค่าสัดส่วนของปริมาตรของผงทังสเตนที่ 0 % แต่ใช้ฟิล์ม PVDF ที่มีขนาดความหนาคือ 52 ไมโครเมตร จะเรียกว่าเป็นตัวตรวจจับตัวที่ T3 โดยคุณลักษณะของตัวตรวจจับทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของตัวตรวจจับ PVDF แต่ละตัว

| ตัวที่ | ความหนาของฟิล์ม PVDF (μm) | ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง (Mrayl) |
|---|---|---|
| T1 | 28 | 3.669 |
| T2 | 28 | 2.971 |
| T3 | 52 | 2.971 |

รายละเอียดของผลการทดลองของตัวตรวจจับทั้งสามจะแสดงในบทถัดไป

### 4.3.3 การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยสาร PZT [3,4,17,18]

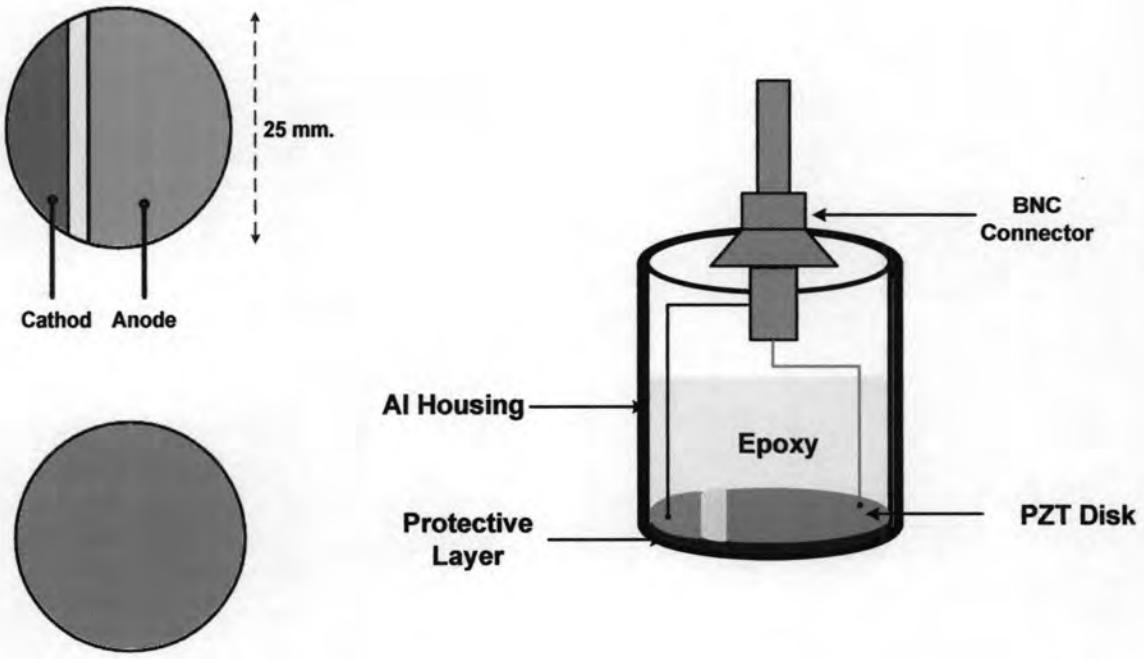
การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นด้วยสาร PZT อธิบายขั้นตอนของการสร้าง ได้ดังนี้

1) นำชิ้นงาน PZT ขนาดความหนา 1.0 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร มาเตรียมขั้วอิเล็กโทรดโดยให้มีลักษณะดังรูป 4.4 (ก) โดยที่ด้านหน้าหนึ่งของแผ่นสาร PZT ทำเป็นขั้วลบอย่างเดียว (ด้านสีเทาเข้ม) ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวก (สีแดง) โดยใช้ Ag-paste ทาลงแผ่นสาร PZT เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว
2) วางอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.75 เซนติเมตร และ สูง 3.40 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นโครงสร้างของตัวตรวจจับลงบนกระจกที่ติดสกอตเทปไว้เพื่อป้องกันการยึดติดกันระหว่ากาวอีพอกซีกับกระจก แล้วใช้สกอตเทปยึดระหว่าง

กระจกกับกล่องอะลูมิเนียมให้แข็งแรง หลังจากนั้นเทกาวอีพอกซีลงไปให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

3) รอจนกาวแห้งประมาณ 10 ชั่วโมง. หลังจากนั้นนำแผ่นสาร PZT มาทำการบัดกรีติดกับสายไฟฟ้า แล้วติดบนกาวสองหน้าแล้ววางไว้บนชั้นป้องกัน โดยจัดตำแหน่งให้แผ่นสาร PZT วางอยู่ตรงกลางของกล่องอะลูมิเนียม
4) ผสมกาวอีพอกซีกับผงทังสเตนให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเทกาวอีพอกซีที่ผสมแล้วลงไปในกล่องอะลูมิเนียมตามความหนาที่ต้องการ เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมหลัง
5) รอจนกาวอีพอกซีแข็งตัวประมาณ 10 ชม. หลังจากนั้นดึงกล่องอะลูมิเนียมออกจากกระจก แล้วทำการบัดกรีสายไฟที่ต่อกับแผ่นสาร PZT เข้ากับขั้ว BNC ที่ติดอยู่ที่ฝาของกล่องอะลูมิเนียม โดยให้สายไฟสีแดงเป็นสายสัญญาณและสายไฟสีดำเป็นสายดิน
6) ติดฝากล่องเข้ากับตัวกล่องอะลูมิเนียม แล้วนำไปทดสอบการใช้งาน

แผนภาพของโครงสร้างและรูปถ่ายของตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจากสาร PZT แสดงดังรูป 4.4 (ข) และ รูป 4.5




(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 ลักษณะของตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT (ก) ลักษณะของโครงสร้างของสาร PZT (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับ [4,17]

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.4 รูปถ่ายของตัวตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับ T4 (ข) ตัวตรวจจับ T5 (ค) ตัวตรวจจับ T6

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างตัวตรวจจับจากสาร PZT ทั้งหมด 3 ตัวด้วยกัน ซึ่งตัวตรวจจับทุกตัวมีขนาดและรูปร่างเหมือนกันทุกตัว เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่นสาร PZT และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลัง ที่มีผลต่อความถี่ต่อการตอบสนองโดยตัวตรวจจับตัวที่ 1 สร้างจากแผ่นสาร PZT ที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 3.669 Mrayl โดยให้สัญลักษณ์เป็น T4 ในขณะที่ตัวตรวจจับตัวที่ T5 สร้างจากแผ่นสาร PZT ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร และมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 3.669 Mrayl ส่วนตัวตรวจจับตัวสุดท้ายคือ T6 สร้างจากแผ่นสาร PZT ที่มีความหนาเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 2.971 Mrayl โดยคุณลักษณะของตัวตรวจจับทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

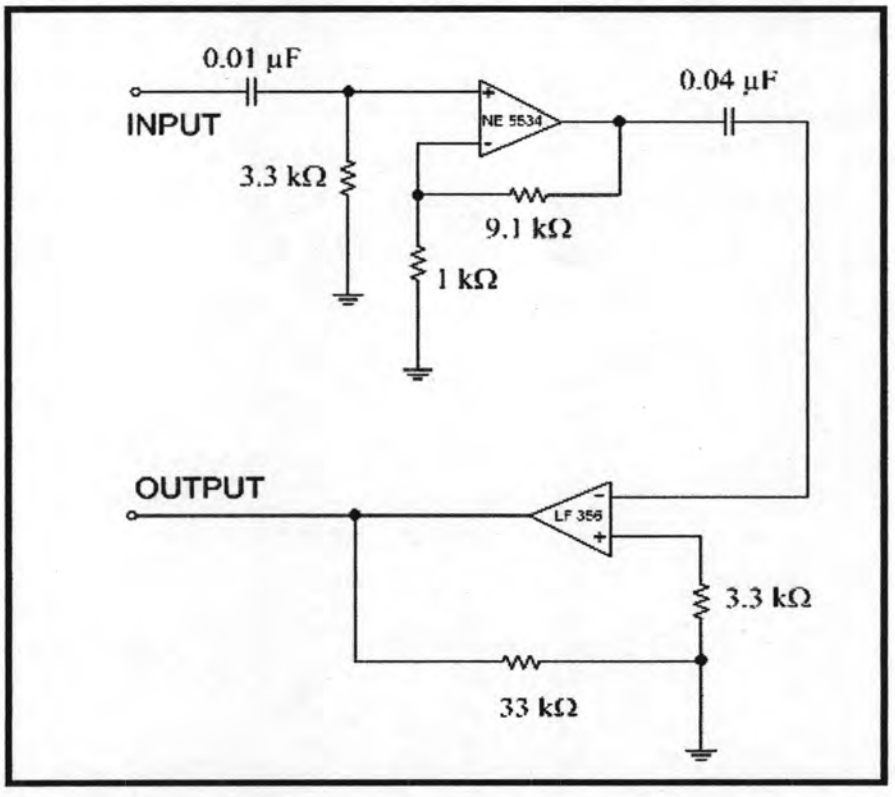
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของตัวตรวจจับ PZT แต่ละตัว

| ตัวที่ | ความหนาของสาร PZT (mm) | ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง (Mrayl) |
|---|---|---|
| T4 | 1.0 | 3.669 |
| T5 | 0.8 | 3.669 |
| T6 | 0.5 | 2.971 |

ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองจะแสดงในบทถัดไป

## 4.4 การสร้างวงจรขยายสัญญาณอะคูสติก

เนื่องจากสัญญาณอะคูสติกเป็นสัญญาณที่มีขนาดของแอมปลิจูดที่เล็กมาก คือ อยู่ในระดับไมโครโวลต์ถึงมิลลิโวลท์ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกเพื่อใช้ในการช่วยขยายสัญญาณนี้เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ผล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างวงจรขยายสัญญาณอะคูสติก ซึ่งวงจรขยายสัญญาณที่สร้างขึ้นนี้มีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน โดยส่วนแรกจะเป็นวงจรที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณชนิดสูง (High pass filter) ที่ความถี่ประมาณ 8.00 kHz โดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน เพื่อทำการตัดสัญญาณรบกวน (Noise) ออกไป ในส่วนที่สองและส่วนที่สามจะเป็นส่วนของการขยายสัญญาณซึ่งใช้ออปแอมป์ (Op-amp) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกที่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสัญญาณที่ผ่านการขยายจากส่วนนี้แล้วจะมีขนาดของแอมปลิจูดเพิ่มขึ้นประมาณ 100 เท่า หรือ 20 dB ซึ่งรายละเอียดของวงจรขยายสัญญาณแสดงดังรูป 4.6 ดังนั้น สัญญาณที่ผ่านวงจรนี้ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบประมวลผลต่อไปนั้น ก็จะเป็นสัญญาณที่มีค่าความถี่ที่สูงกว่า 8 kHz โดยขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นจากเดิม 100 เท่า




รูปที่ 4.5 วงจรขยายสัญญาณอะคูสติก [19]