

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติคด้วยฟิล์มพีวีดีเอฟและสารพีแซดที

นายสิทธิชัย อนุภาพอุดม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

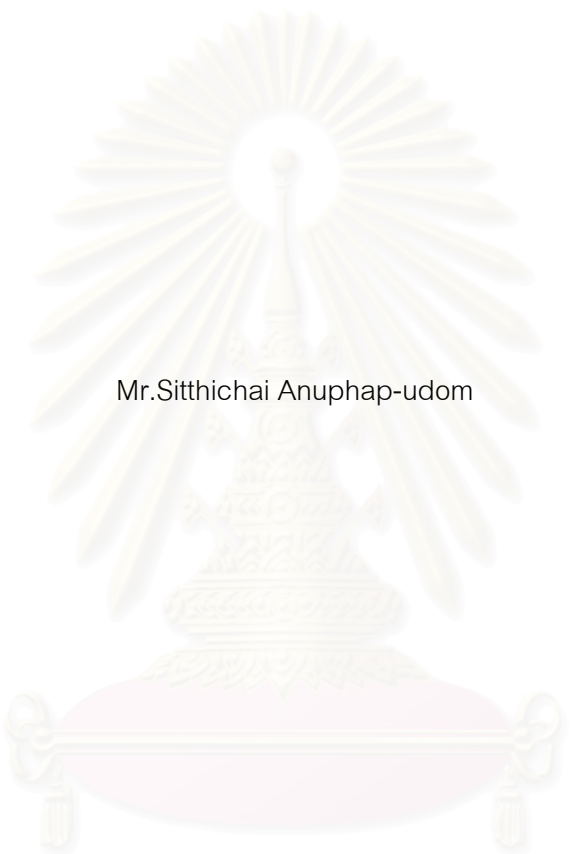
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF ACOUSTIC EMISSION TRANSDUCER USING PVDF FILM AND PZT MATERIAL



Mr.Sitthichai Anuphap-udom

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์มพีวีดีเอฟและสาร
พีแซดที

โดย

นายสิทธิชัย อนุภาพอุดม

สาขาวิชา

ฟิสิกส์

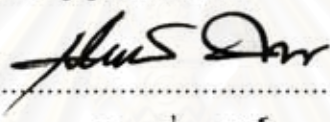
อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา

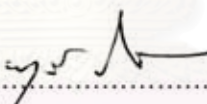
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์

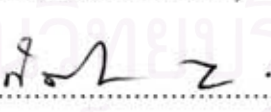
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

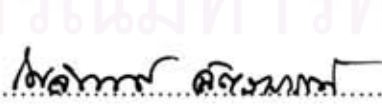

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

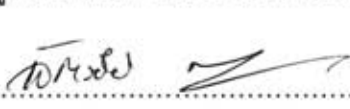
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มยุรี เนตรนภิส)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิพงศ์ ขัตตราภรณ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ศรีนิตวรวงศ์)

สิทธิชัย อนุภาพอุดม : การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์มพีวีดีเอฟและสารพีแซดที. (FABRICATION OF ACOUSTIC EMISSION TRANSDUCER USING PVDF FILM AND PZT MATERIAL) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. ดันพงส์ แก้วคงคา, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ จำนวน 77 หน้า

งานนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิดคือ ฟิล์มพีวีดีเอฟและวัสดุเลเซอร์โคเนคไททานเนด(พีแซดที) โดยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มพีวีดีเอฟ มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตรและ ความยาว 3.5 เซนติเมตร จำนวนทั้งสิ้น 3 ตัว และตัวตรวจจับที่สร้างจากสารพีแซดที ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.75 เซนติเมตร และ สูง 3.40 เซนติเมตร โดยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มพีวีดีเอฟ แต่ละตัวที่สร้างขึ้นมีขนาดความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงแตกต่างกันได้แก่ ความหนา 28 และ 52 ไมโครเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 2.971 และ 3.669 เมกะเรออล ตามลำดับ ส่วนตัวตรวจจับที่สร้างจากสารพีแซดที มีขนาดความหนาเท่ากับ 0.5 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 2.971 และ 3.669 เมกะเรออล เมื่อนำตัวตรวจจับทั้งสองชนิดไปตรวจจับสัญญาณอะคูสติกเพื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณและค่าความถี่ต่อการตอบสนอง พบว่าตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มพีวีดีเอฟ ซึ่งมีค่าความหนาของแผ่นฟิล์มเท่ากับ 28 ไมโครเมตร มีค่าความถี่ต่อการตอบสนองสูงที่สุด คือ 48.3 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนตัวตรวจจับที่สร้างจากสารพีแซดที ใช้ความหนาของแผ่นสารเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จะมีค่าความถี่สูงที่สุด คือ 209 กิโลเฮิร์ตซ์ ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 3.669 เมกะเรออล จะให้ค่าพลังงานสูงที่สุด ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันทั้งสองชนิด และเมื่อนำตัวตรวจจับทั้งสองไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการเฝ้าระวังสภาพหล่อลื่นของตลับลูกปืน และการเฝ้าระวังการรั่วของท่อ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถระบุความเสียหายและความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก

ภาควิชา.....ฟิสิกส์.....
สาขาวิชา.....ฟิสิกส์.....
ปีการศึกษา....2549.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4672441623 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: ACOUSTIC EMISSION/ PZT TRANSDUCER/ PVDF TRANSDUCER

SITTHICHAIR ANUPHAP-UDOM : FABRICATION OF ACOUSTIC EMISSION
TRANSDUCER USING PVDF FILM AND PZT MATERIAL. THESIS ADVISOR :
TONPHONG KAEWKONGKA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF.KIRANANT
RATANATHAMMAPAN, 77 pp.

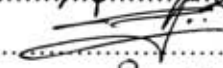
The fabrication of acoustic emission (AE) transducers using polyvinylidene fluoride (PVDF) films and lead zirconate titanate (PZT) materials is presented. The PVDF transducer, which is of a rectangular shape with 2.5 cm. of width and 3.5 cm. of length. Three pieces of PVDF transducer have been fabricated at different thicknesses; which are 28 and 52 micrometer of thickness, and 2.971 and 3.669 Mrayl of acoustic impedance, respectively. While the PZT transducer is a cylindrical shape with 2.75 cm. of diameter and 3.40 cm. of height. Three pieces of PZT transducer have also been fabricated at different thicknesses; which are 0.5, 0.7 and 1.0 mm. of thickness, and 2.971 and 3.669 Mrayl of acoustic impedance. The acoustic emission properties such as AE energy and its resonance frequency were measured. The results show that the PVDF transducer with a thickness of 28 micrometer has the highest resonance frequency at 48.3 kHz while the PZT transducer with a thickness of 0.5 mm. has the highest resonance frequency at 209 kHz. In addition, both PVDF and PZT transducers have the highest AE energy values at the same acoustic impedance of 3.669 Mrayl. The application of the fabricated PVDF and PZT transducers is monitoring process of lubrication bearing and pipeline leakage. The fabricated AE transducers can detect and identify the damage in bearing and the leakage in pipeline. Therefore, the fabricated PVDF and PZT transducers can be used as acoustic emission technique for nondestructive testing in various applications.

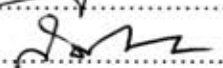
Department.....Physics.....

Field of study.....Physics.....

Academic year2006.....

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งได้รับคำแนะนำและความรู้ รวมทั้งความคิดเห็นต่างๆ แนวคิดในการทำงานวิจัย รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองและการตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์นี้จาก อาจารย์ ดร. ต้นพงศ์ แก้วคงคา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มยุรี เนตรนภิส ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสจิพงศ์ นัฏราภรณ์ และอาจารย์ ดร. นัทรชัย ศรีนิตวรวงศ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการตรวจทานวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร. พัทธชัย เหล่ารัตนกุล นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) อาจารย์ ดร. นิศานารถ ไตรผล อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และอาจารย์ ดร. เบญญา เชิดหิรัญกร อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์สำหรับอุปกรณ์เครื่องมือและแผ่นสาร PZT เพื่อใช้สำหรับสร้างตัวตรวจจับ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วิจิต ศรีโชติ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องพัลส์เซอร์ รีซีฟเวอร์และหัววัดอัลตราโซนิก สำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ปกรณ์ ปรีชาบุรณะ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผู้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับฟิล์ม PVDF และขั้นตอนในการสร้างตัวตรวจจับ เรือโทอนุชา เรืองสวัสดิ์ ผู้เอื้อเฟื้อแผ่นสาร PZT และคำแนะนำในการเตรียมสาร PZT ให้มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก คุณวิมล แสนอ้อม ผู้ให้คำแนะนำในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณและการเขียนงานวิจัย ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือ และความสนุกสนานในการเรียนการสอน และการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทางด้านการเงินสำหรับการทำวิจัย ได้แก่ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่สำคัญขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือคุณแม่ ที่เป็นกำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการศึกษาครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ

บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3	ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.4	เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีการปล่อยคลื่นอะคูสติก

2.1	ความหมายของการปล่อยคลื่นอะคูสติก	
2.1.1	แหล่งกำเนิดจุลภาค.....	4
2.1.2	แหล่งกำเนิดมหภาค.....	4
2.2	การปล่อยคลื่นอะคูสติก	
2.2.1	คลื่นอะคูสติกในตัวกลางที่ยืดหยุ่น.....	5
2.2.2	การเคลื่อนที่ของคลื่นอะคูสติกบริเวณผิวของของแข็ง.....	12
2.3	ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง.....	16
2.4	อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดการปล่อยคลื่นอะคูสติก	
2.4.1	ตัวตรวจวัดชนิดอิเล็กโทรแมกเนติก.....	18
2.4.2	ตัวตรวจวัดชนิดคาปาซิแตนซ์.....	18
2.4.3	ตัวตรวจวัดชนิดเพียโซอิเล็กทริก.....	18

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	
3.1.1	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง.....	19
3.1.2	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม.....	20
3.2	สภาพเพียโซอิเล็กทริก.....	21
3.3	วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	
3.3.1	พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	27
3.3.2	เลดเซอร์โคเนตไททานต.....	30

บทที่ 4 การตรวจวัดการปล่อยคลื่นอะคูสติก

4.1	หลักการสร้างตัวตรวจวัด.....	34
4.2	การหาค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง.....	35
4.3	ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจวัด	
4.3.1	ส่วนประกอบของตัวตรวจวัดการปล่อยคลื่นอะคูสติก.....	36
4.3.2	การสร้างตัวตรวจวัดการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์ม PVDF.....	36
4.3.3	การสร้างตัวตรวจวัดการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยสาร PZT.....	38
4.4	การสร้างวงจรขยายสัญญาณอะคูสติก.....	41

บทที่ 5 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก

5.1	การทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัดที่สร้างจากฟิล์ม PVDF.....	43
5.2	ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของฟิล์ม PVDF กับ ค่าความถี่ต่อการตอบสนอง.....	46
5.3	การทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัดที่สร้างจากสาร PZT.....	47
5.4	ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของสาร PZT กับ ค่าความถี่ต่อการตอบสนอง.....	51
5.5	ผลการทดสอบการทำงานของตัวตรวจวัดจากบริษัท PAC.....	52

บทที่ 6 การประยุกต์ใช้งาน

6.1	การเฝ้าระวังสภาพหล่อลื่นของตลับลูกปืนด้วยวิธีการปล่อยคลื่น อะคูสติกจาก ตัวตรวจวัดที่สร้างจากฟิล์มPVDF.....	53
6.2	การเฝ้าระวังการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจวัดการปล่อยคลื่นอะคูสติก	

6.2.1	การแผ่รังสีการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อย คลื่นอะคูสติกด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF.....	57
6.2.2	การแผ่รังสีการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อย คลื่นอะคูสติกด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT.....	60
บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง		
7.1	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	63
7.2	งานวิจัยที่สามารถดำเนินการต่อไปได้อีกในอนาคต.....	65
รายการอ้างอิง.....		66
ผลงานตีพิมพ์.....		69
ภาคผนวก.....		70
ภาคผนวก ก.	ตารางแสดงสมบัติของฟิล์ม PVDF.....	71
ภาคผนวก ข.	สมการ AE_{RMS}	72
ภาคผนวก ค.	สมการ Fourier Transform และ algorithm ของ FFT.....	73
ภาคผนวก ง.	ผลการวัดค่าความหนาแน่น อัตราเร็วเสียงและค่าอิมพีแดนซ์ ทางเสียงในวัสดุผสมกาวอีพอกซีและถังสแตน.....	74
ภาคผนวก จ.	ผลการวัดค่าพลังงาน AE_{RMS} และค่าความถี่ต่อการตอบสนอง ที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ PVDF แต่ละตัว.....	75
ภาคผนวก ฉ.	ผลการวัดค่าพลังงาน AE_{RMS} และค่าความถี่ต่อการตอบสนอง ที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ PZT แต่ละตัว.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		77

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ความเค้นที่กระทำบนรูปทรงสี่เหลี่ยมด้านขนานเล็กๆ.....	5
รูปที่ 2.2	ลักษณะของคลื่นตามยาว.....	11
รูปที่ 2.3	ลักษณะของคลื่นตามขวาง.....	12
รูปที่ 2.4	ลักษณะของคลื่นที่ผิว.....	13
รูปที่ 2.5	การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นเสียงระหว่างรอยต่อของตัวกลาง.....	16
รูปที่ 3.1	การเกิดโพลาไรเซชันเพื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น.....	20
รูปที่ 3.2	การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า.....	21
รูปที่ 3.3	ทิศทางของแรงกระทำและพื้นที่ที่ถูกกระทำของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	23
รูปที่ 3.4	โครงสร้างของฟิล์ม PVDF.....	27
รูปที่ 3.5	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของฟิล์ม PVDF.....	28
รูปที่ 3.6	โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสแอลฟา.....	28
รูปที่ 3.7	โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสเบตา.....	29
รูปที่ 3.8	เปรียบเทียบโครงสร้างการเรียงตัว (ก) โครงสร้างของผลึก PVDFแบบเฟสแอลฟา (ข) โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสเบตา.....	29
รูปที่ 3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับค่าโพลาไรเซชันของฟิล์ม PVDF.....	30
รูปที่ 3.10	โครงสร้างของสาร PZT แบบลูกบาศก์.....	31
รูปที่ 3.11	โครงสร้างของสาร PZT แบบเตตระโกนอล.....	31
รูปที่ 3.12	การเกิดโพลาไรเซชันภายในผลึกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (ก) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันที่มีสภาพไร้ทิศทางของแต่ละโดเมน (ข) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง (ค) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันหลังหยุดให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง.....	32
รูปที่ 3.13	การเกิดโพลาไรเซชันและการเกิดความเครียดทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมื่อให้สนามไฟฟ้า (ก) แสดงวงจรฮีสเทอรีซิส (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง....	33
รูปที่ 4.1	ลักษณะของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์ม PVDF (ก) ลักษณะของแผ่นฟิล์ม PVDF (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า.....	37

รูปที่ 4.2	รูปถ่ายของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T1 (ข) ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T2 (ค) ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T3.....	37
รูปที่ 4.3	ลักษณะของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างจากสาร PZT (ก) ลักษณะของโครงสร้างของสาร PZT (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า.....	39
รูปที่ 4.4	รูปถ่ายของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T4 (ข) ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T5 (ค) ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T6.....	40
รูปที่ 4.5	วงจรรขยายสัญญาณอะคูสติก.....	41
รูปที่ 5.1	การสร้างสัญญาณอะคูสติกจากแหล่งกำเนิดเสียงเทียมด้วยวิธีหักใส่ดินสอ.....	42
รูปที่ 5.2	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T1.....	43
รูปที่ 5.3	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T2.....	44
รูปที่ 5.4	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T3.....	44
รูปที่ 5.5	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T1.....	45
รูปที่ 5.6	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T2.....	45
รูปที่ 5.7	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T3.....	46
รูปที่ 5.8	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T4.....	48
รูปที่ 5.9	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T5.....	48
รูปที่ 5.10	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T6.....	49
รูปที่ 5.11	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T4.....	49
รูปที่ 5.12	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T5.....	50
รูปที่ 5.13	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า T6.....	50
รูปที่ 5.14	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนามไฟฟ้าได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า R15.....	52
รูปที่ 5.15	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า R15.....	52
รูปที่ 6.1	รูปถ่ายของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้ในการตรวจสอบ.....	54
รูปที่ 6.2	โครงสร้างของระบบของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้ในการตรวจสอบ.....	54
รูปที่ 6.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับจำนวนรอบ ของเครื่องจักรกลหมุนที่เงื่อนไขต่างๆ.....	56
รูปที่ 6.4	โครงสร้างของระบบการตรวจจับสนามไฟฟ้าของท่อด้วยตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า PVDF.....	58
รูปที่ 6.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันที่เงื่อนไขต่างๆ.....	59
รูปที่ 6.6	โครงสร้างของระบบการตรวจจับสนามไฟฟ้าของท่อด้วยตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า PZT.....	60
รูปที่ 6.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันที่เงื่อนไขต่างๆ.....	62

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1	รายละเอียดของค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่สัดส่วนของทั้งสแตนต่างๆ.....	35
ตารางที่ 4.2	รายละเอียดของความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง ของตัวตรวจจับสน PVDF แต่ละตัว.....	38
ตารางที่ 4.3	รายละเอียดของความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง ของตัวตรวจจับสน PZT แต่ละตัว.....	40
ตารางที่ 6.1	ค่า AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของประเภทของดัลบูคป็นและจำนวนรอบของการหมุน....	55
ตารางที่ 6.2	ค่า AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของประเภทของความดันและรูรั่วที่ขนาดต่างๆ จากตัวตรวจจับสน PVDF.....	59
ตารางที่ 6.3	ค่า AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของประเภทของความดันและรูรั่วที่ขนาดต่างๆ จากตัวตรวจจับสน PZT.....	61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งในโรงงานอุตสาหกรรม คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบการผลิต มีสาเหตุจากหลายประการ เช่น การเสื่อมสภาพจากใช้งานเป็นเวลานาน สภาวะแวดล้อม อาทิ ความชื้นสูง สภาวะการเกิดกรดต่าง การกัดกร่อน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของโลหะ การสึกหรอเนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องจักรกลหมุนที่ไม่ได้ศูนย์เกิดการเสียดสีกัน เป็นต้น ดังนั้นการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นก่อนที่วัสดุจะเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing) ด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก (Acoustic emission) ซึ่งเป็นการตรวจสอบที่สามารถพบรอยบกพร่องที่กำลังเกิดหรือกำลังขยายตัวภายในเนื้อของวัสดุทั้งในระดับจุลภาค (Microscopic) และระดับมหภาค (Macroscopic) [1] ได้ การตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกนี้มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอื่นๆ คือ เป็นการตรวจสอบ ณ เวลาจริง (Real Time) ซึ่งสามารถใช้เตือนภัยได้ล่วงหน้าก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้นและยังสามารถตรวจสอบได้เป็นบริเวณกว้าง รวมทั้งในบริเวณที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ [2]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีรายงานการสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกไว้หลายฉบับด้วยกัน ได้แก่ Inacio และคณะ [3] ได้เสนอการสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกจากสาร PTCa:P(VDF-TrFE) โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ใช้ความหนาของสาร 0.55 มิลลิเมตร เมื่อวัดค่าความถี่ต่อการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 2.3 MHz ในขณะที่ Or และคณะ [4] ได้เสนอการสร้างตัวตรวจจับจากสาร P(VDF-TrFE) ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเช่นเดียวกัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร ใช้ความหนาของสาร 0.8 มิลลิเมตร เมื่อทำการวัดค่าความถี่ต่อการตอบสนองมีค่าอยู่ในช่วง 250 – 400 kHz

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างอุปกรณ์สำหรับตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก ซึ่งเรียกว่าตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติก (Acoustic emission transducer) ซึ่งตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นนี้เป็นสารประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ที่จะทำหน้าที่รับพลังงานกลที่อยู่ในรูปของคลื่นอะคูสติกแล้วเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นไฟฟ้าโดยสร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิดด้วยกันคือ สารเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate) หรือ PZT ซึ่งเป็นวัสดุ

เซรามิกส์ และโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride) หรือ PVDF ซึ่งเป็นวัสดุโพลีเมอร์ จากนั้นนำไปตรวจจับสัญญาณคลื่นอะคูสติก แล้ววิเคราะห์สัญญาณที่ได้ต่อไป

ปัจจุบันวัสดุทั้งสองชนิดนี้กำลังเป็นที่สนใจและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย จากงานวิทยานิพนธ์ของ เรือโทอนุชา เรืองสวัสดิ์ [5] ซึ่งได้ทำการเตรียมสาร PZT ให้มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกและสามารถนำมาสร้างเป็นตัวตรวจจับคลื่นอัลตราโซนิกได้ ซึ่งตัวตรวจจับที่ใช้งานในทางอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุเซรามิกส์ คือ PZT ต่อมาเมื่อได้มีการค้นพบวัสดุโพลีเมอร์ที่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก เช่น พอลิเมอร์ PVDF ได้มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเพราะพอลิเมอร์ PVDF มีลักษณะที่ยืดหยุ่น สามารถโค้งงอได้ รวมทั้งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงต่ำ (Acoustic impedance) จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้สร้างเป็นตัวตรวจจับคลื่นอะคูสติก จากงานวิทยานิพนธ์ของ ชัชชัย พุ่มซ้อน [6] ได้ทำสร้างและพัฒนาแผ่นฟิล์มโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์จะทำการสร้างตัวตรวจจับและนำตัวตรวจจับที่สร้างไปประยุกต์ใช้งานเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากแหล่งกำเนิดต่างตามที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกมีราคาที่สูงเกินไป อีกทั้งยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างตัวตรวจจับขึ้นเองเพื่อลดต้นทุนในการตรวจสอบ โดยใช้ฟิล์ม PVDF และสาร PZT หลังจากนั้นทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นในการใช้งานจริงสำหรับการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกจากการแผ่รังสีสภาพหล่อลื่นของตลับลูกปืนและการแผ่รังสีการรั่วของท่อ

1.3 ขั้นตอนการวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF และสาร PZT
- 2) ออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- 3) สร้างตัวตรวจจับด้วยฟิล์ม PVDF และทำการทดลองวัดสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- 4) สร้างตัวตรวจจับด้วยสาร PZT และทำการทดลองวัดสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- 5) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้มีเนื้อหาทั้งหมด 7 บท โดยบทแรกจะพูดถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์นี้ หลังจากนั้นจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยการตรวจจับสนามไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งกล่าวในบทที่ 2 ส่วนเนื้อหาในบทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับสภาพเพียโซอิเล็กทริก และสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF และสาร PZT ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงขั้นตอนในการสร้างตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าสถิตย์ ส่วนเนื้อหาในบทที่ 5 จะเป็นการหาความสัมพันธ์ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าสถิตย์ ในบทที่ 6 จะเป็นการประยุกต์นำตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าสถิตย์ไปใช้ในการตรวจสอบจริง และบทที่ 7 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายได้สรุป วิจัยการทดลองและเสนอแนะงานวิจัยที่ควรจะทำต่อเพื่อปรับปรุงผลการตรวจจับสนามไฟฟ้าสถิตย์ให้ดีขึ้นในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีการปล่อยคลื่นอะคูสติก

2.1 ความหมายของการปล่อยคลื่นอะคูสติก

การปล่อยคลื่นอะคูสติก [1] เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นเกิดความยืดหยุ่นแบบชั่วคราวแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วของแหล่งพลังงานจากภายในเนื้อหรือผิวของวัสดุ ซึ่งคลื่นที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง โดยมีสาเหตุของการปล่อยคลื่นอะคูสติกมาจากความไม่สมบูรณ์ของวัสดุรวมทั้งกลไกการเสียรูปทรงและการแตกหักของวัสดุซึ่งได้แก่ การคราก (Yielding) การเคลื่อนตัว (Dislocation motion) การขยายตัวของรอยร้าว (Crack propagation) เป็นต้น โดยปรากฏการณ์และคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยคลื่นอะคูสติก สามารถพิจารณาได้ทั้งแหล่งกำเนิดจุลภาคและมหภาค [2] ดังนี้

2.1.1 แหล่งกำเนิดจุลภาค จะพิจารณาถึงอะตอมและโครงสร้างของผลึกที่ไม่สมบูรณ์ เช่น มีอะตอมขาดหายไป (Vacancy) อะตอมเกิน (Interstitials) อะตอมผิดตำแหน่ง (Frankel defect) หรือมีอะตอมแปลกปลอม (Impurity) ซึ่งการปล่อยคลื่นอะคูสติกจะเป็นดังนี้ คือ เมื่อความเค้นที่กระทำต่อวัสดุมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงระดับหนึ่งที่สามารถชนะความต้านทานของแลตทิซ (Lattice) ก็จะทำให้เกิดการขยับตัวของอะตอม เมื่อขอบเขตของการขยับตัว มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะปรากฏเห็นที่ผิววัสดุในลักษณะของการไถลระหว่างระนาบ (Slip line) นอกจากนี้การเคลื่อนตัวทั้งบล็อกของอะตอมเช่นเดียวกันกับการไถล ก็อาจจะเกิดการเสียรูปทรง ที่เรียกว่า การบิด (Twinning) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของอะตอม ทำให้บริเวณที่ได้รับความเค้นนั้นเกิดรอยร้าวและเมื่อรอยร้าวมีการขยายตัวมากขึ้น ก็จะปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมา

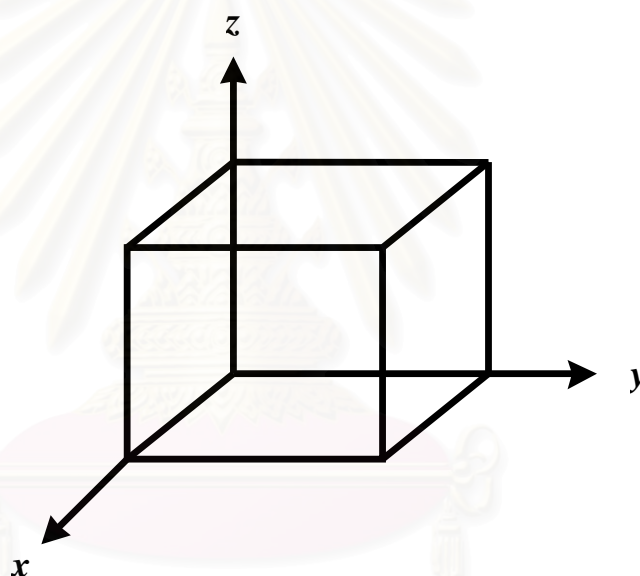
2.1.2 แหล่งกำเนิดมหภาค หมายถึง การพิจารณาในส่วนต่างๆ ที่ค่อนข้างใหญ่ของวัสดุที่จะตรวจสอบทั้งภายในและที่บริเวณผิวซึ่งปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมา เช่น การเสียรูปทรงแบบพลาสติก (Plastic deformation) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของการปล่อยคลื่นอะคูสติก กล่าวคือ เมื่อวัสดุได้รับความเค้น จนกระทั่งทำให้บริเวณที่ได้รับความเค้นนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบพลาสติกแล้วจะเกิดรอยร้าว เกิดขึ้นเฉพาะที่หรือใกล้ๆ กับบริเวณจุดคราก (Yield point) และเมื่อรอยร้าวมีการขยายตัวมากขึ้น การปล่อยคลื่นอะคูสติกจะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุด ซึ่งจะสัมพันธ์

กับความยาวของรอยร้าว โดยพบว่าเมื่อรอยร้าวเพิ่มขึ้น จะมีค่าแอมพลิจูด ของการปล่อยคลื่นอะคูสติกสูงขึ้น

2.2 การปล่อยคลื่นอะคูสติก

2.2.1 คลื่นอะคูสติกในตัวกลางที่ยึดหยุ่น

ในการหาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอะคูสติกที่ปล่อยออกมาจากตัวกลางที่ยึดหยุ่น เรา จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค้นที่กระทำต่อวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยมีทิศทางของ ความเค้นที่กระทำจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเค้นที่กระทำบนรูปลูกบาศก์เล็กๆ [7]

ในการพิจารณาหาค่าของแรงที่กระทำต่อผิวแต่ละด้านของวัสดุรูปลูกบาศก์ สามารถพิจารณาได้ด้วยการนำค่าความเค้นคูณกับพื้นที่ผิวของด้านนั้นๆ ที่ออกแรงกระทำ ซึ่งจะพิจารณา ผลของแรงที่กระทำในทิศทาง x ได้ดังนี้

$$F_x = \left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2.1)$$

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน จะได้

$$\left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz = (\rho dx dy dz) \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ	ρ	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุ
	u_x	คือ	การกระจัดในทิศทาง x
	T_{xx}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง x บนพื้นที่ผิวด้าน x
	T_{xy}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง x บนพื้นที่ผิวด้าน y
	T_{xz}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง x บนพื้นที่ผิวด้าน z
	T_{yx}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง y บนพื้นที่ผิวด้าน x
	T_{yy}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง y บนพื้นที่ผิวด้าน y
	T_{yz}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง y บนพื้นที่ผิวด้าน z
	T_{zx}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง z บนพื้นที่ผิวด้าน x
	T_{zy}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง z บนพื้นที่ผิวด้าน y
	T_{zz}	คือ	ความเค้นที่กระทำในทิศทาง z บนพื้นที่ผิวด้าน z

จากสมการ (2.2) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\left(\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลของแรงที่กระทำในทิศทาง y และ z จะสามารถเขียนสมการแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นได้ ดังนี้

$$\left(\frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

$$\left(\frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ	u_y	คือ	การกระจัดในทิศทาง y
	u_z	คือ	การกระจัดในทิศทาง z

เราสามารถเขียนค่าความเค้นที่กระทำต่อวัสดุรูปสี่เหลี่ยมให้อยู่ในรูปของ Δ ซึ่งใช้แทนความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมของวัสดุ และค่าคงที่ความยืดหยุ่น λ และ μ ซึ่งเรียกว่า ค่าคงที่ของ ลามเ (Lame' Constant) ได้ดังนี้

$$T_{xx} = \lambda\Delta + 2\mu S_{xx} \quad (2.6)$$

$$T_{yy} = \lambda\Delta + 2\mu S_{yy} \quad (2.7)$$

$$T_{zz} = \lambda\Delta + 2\mu S_{zz} \quad (2.8)$$

$$T_{xy} = \mu S_{xy}, T_{yx} = \mu S_{yx} \quad (2.9)$$

$$T_{xz} = \mu S_{xz}, T_{zx} = \mu S_{zx} \quad (2.10)$$

$$T_{yz} = \mu S_{yz}, T_{zy} = \mu S_{zy} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, S_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, S_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ S_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, S_{yx} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \\ S_{xz} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, S_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ S_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}, S_{zy} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.12)$$

เมื่อ	S_{xx}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง x เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง x
	S_{xy}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง x เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง y
	S_{xz}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง x เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง z
	S_{yx}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง y เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง x
	S_{yy}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง y เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง y
	S_{yz}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง y เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง z
	S_{zx}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง z เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง x
	S_{zy}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง z เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง y
	S_{zz}	คือ	ความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทาง z เมื่อออกแรงกระทำในทิศทาง z

เมื่อแทนค่าสมการ (2.6) – (2.12) ลงในสมการ (2.3) , (2.4) และ (2.5) จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda\Delta + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

$$\lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y \partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z \partial x} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$\lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y \partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z \partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

$$\lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y \partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z \partial x} + \mu \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

เมื่อ
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

และ
$$\Delta = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

สมการ (2.16) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right] + \mu \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

ดังนั้น เมื่อจัดรูปสมการ (2.17) ใหม่จะได้เป็น

$$\lambda \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

$$(\mu + \lambda) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกัน สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นในทิศทาง y และ z สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่ (2.19) ได้เป็น

$$(\mu + \lambda) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 u_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

และ
$$(\mu + \lambda) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 u_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.19) เมื่อพิจารณาลักษณะของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยสมมติให้คลื่นระนาบ (Plane wave) เคลื่อนที่ในตัวกลางทิศทาง x ซึ่งความเร็วในทิศทาง x , y และ z สามารถเขียนแทนด้วย u_x , u_y , u_z ตามลำดับ โดยกำหนดให้ ฟังก์ชันของตัวแปร $\zeta = x - vt$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่ค่าของ x และ t เพียงอย่างเดียว ดังนั้น จะได้

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial u_x}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial u_x}{\partial \zeta} \cdot (-v) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \quad (2.24)$$

และ

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial \zeta} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \quad (2.26)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณา y และ z จะได้

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} \quad (2.30)$$

จากสมการ (2.19)

$$(\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.31)$$

เมื่อ $\frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0, \frac{\partial \zeta}{\partial z} = 0$

$$(\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.32)$$

แทนสมการ (2.22) – (2.26) ลงใน สมการ (2.32) จะได้

$$(\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \quad (2.33)$$

$$(2\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.20) จะได้

$$(\mu + \lambda) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (2.35)$$

เมื่อ $\frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0, \frac{\partial \zeta}{\partial z} = 0$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \quad (2.36)$$

แทนสมการ (2.27) และ (2.28) ลงใน สมการ (2.36) จะได้

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} \quad (2.37)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} \quad (2.38)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$(2\mu + \lambda) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} \quad (2.39)$$

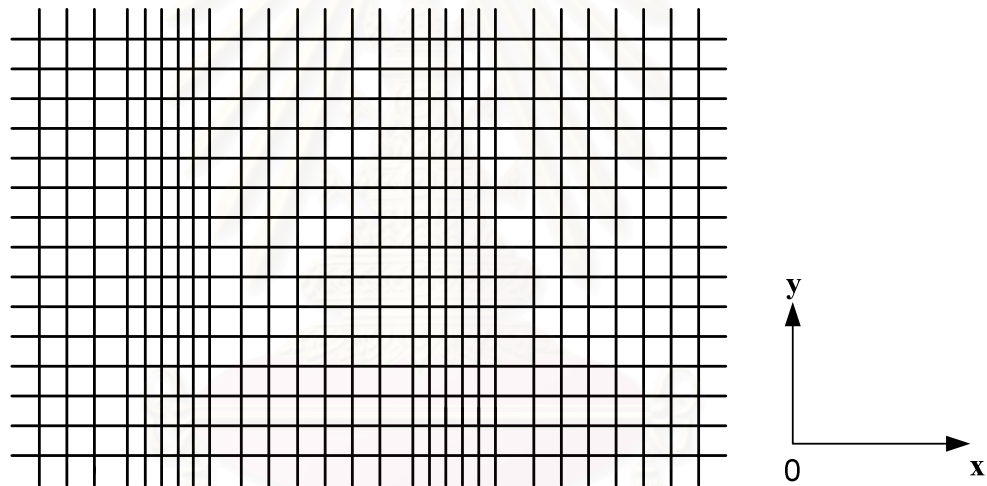
$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} \quad (2.40)$$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} \right) = \rho v^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.39) , (2.40) และ (2.41) เงื่อนไขของคำตอบทั้งสามสมการที่เป็นได้ คือ

$$\begin{aligned} 1) \quad & \text{เมื่อ} \quad v^2 = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 u_y}{\partial \zeta^2} = 0, \frac{\partial^2 u_z}{\partial \zeta^2} = 0 \\ 2) \quad & \text{เมื่อ} \quad v^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial^2 u_x}{\partial \zeta^2} = 0 \end{aligned}$$

จากเงื่อนไขแรก อธิบายถึงลักษณะของการเกิดคลื่นตามยาว (Longitudinal wave) กล่าวคือ เมื่ออนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ในทิศทาง x ซึ่งมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่น ลักษณะของคลื่นตามยาว แสดงดังรูป 2.2

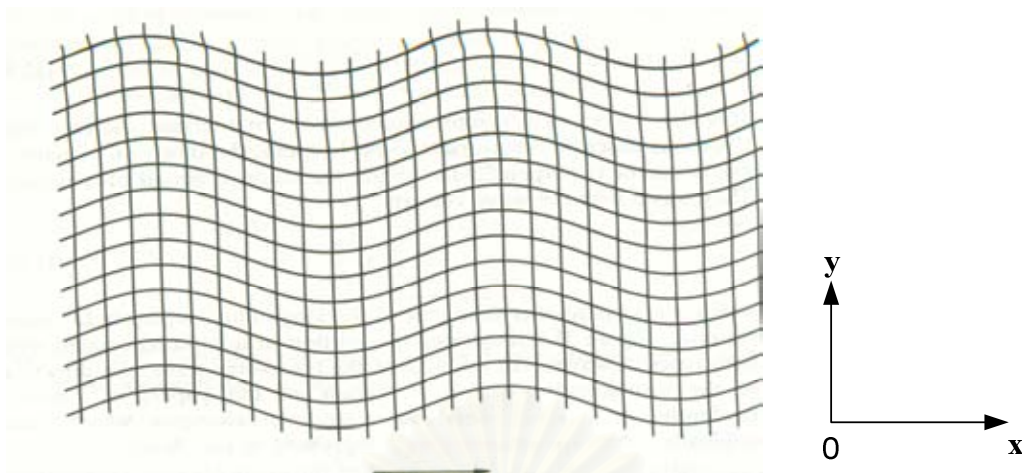


รูปที่ 2.2 ลักษณะของคลื่นตามยาว [7,8]

ดังนั้น จะได้ค่าความเร็วของคลื่นตามยาวที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง แสดงดังสมการ (2.42)

$$v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.42)$$

และเมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขของคำตอบที่สอง จะเป็นสมการที่อธิบายถึงลักษณะของการเกิดคลื่นตามขวาง (Transverse wave) กล่าวคือ เมื่ออนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ในทิศทาง y และ z ซึ่งมีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งเคลื่อนที่ในทิศทาง x ลักษณะของคลื่นตามขวางแสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของคลื่นตามขวาง [7,8]

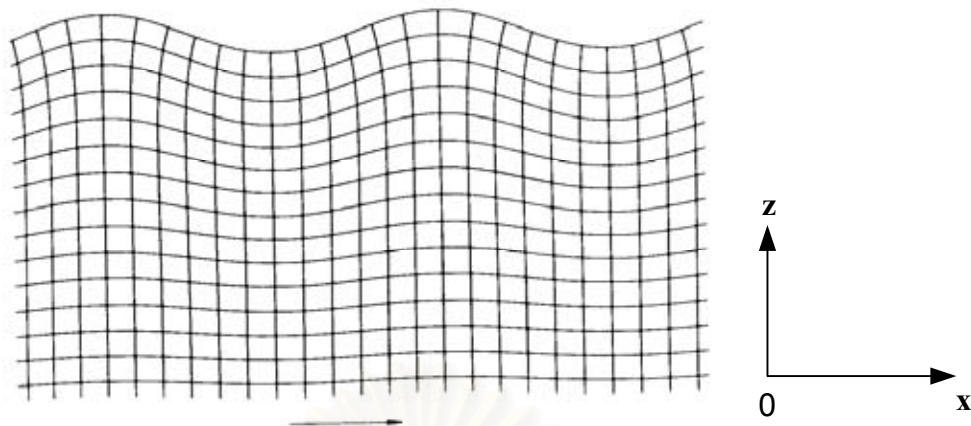
ดังนั้น จะได้ว่าความเร็วของคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง แสดงดังสมการ (2.43)

$$v_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.43)$$

2.2.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นอะคูสติกบริเวณผิวของของแข็ง (Surface acoustic wave)

คลื่นอะคูสติกที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของของแข็งเป็นลักษณะของคลื่นที่ผสมกันระหว่างคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง กล่าวคือ เมื่อคลื่นอะคูสติกเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดจะเป็นคลื่นตามยาว และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาบริเวณที่ผิวรอยต่อ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ดังนั้นจึงเป็นคลื่นตามขวาง ดังนั้นการปล่อยคลื่นอะคูสติกจึงเป็นคลื่นที่เกิดขึ้นแบบคลื่นที่ผิวหรือเรียกว่า คลื่นเรย์เลIGH (Rayleigh wave) รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของคลื่นเรย์เลIGHที่เกิดจากการผสมกันระหว่างคลื่นตามยาวในรูปที่ 2.2 และคลื่นตามขวางในรูปที่

2.3



รูปที่ 2.4 ลักษณะของคลื่นที่ผิว [7,8]

ดังนั้นเราสามารถเขียนเวกเตอร์การกระจัดของอนุภาคตัวกลางได้เป็น

$$\vec{u} = \vec{u}_L + \vec{u}_T \quad (2.44)$$

หรือเขียนอยู่ในรูปของศักย์เวกเตอร์ $\vec{\varphi}$ (Vector potential, $\vec{\varphi}$) และศักย์สเกลาร์ (Scalar potential, ϕ) ได้เป็น

$$\vec{u} = \nabla \phi + \nabla \times \vec{\varphi} \quad (2.45)$$

เมื่อให้คลื่นเรย์เลห์เคลื่อนที่ในทิศทาง $+x$ และแอมพลิจูดลดลงในทิศ $+z$ พบว่า ค่า ϕ และ φ จะไม่ขึ้นกับตัวแปร y สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\phi = \phi(x, z)e^{i\omega t} \quad (2.46)$$

$$\varphi = \varphi(x, z)\hat{y}e^{i\omega t} \quad (2.47)$$

จะเรียกค่า ϕ ว่าเป็นศักย์ของคลื่นตามยาวและค่า φ ว่าเป็นศักย์ของคลื่นตามขวาง โดยศักย์ทั้งสองจะสอดคล้องกับสมการของคลื่นดังนี้

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} k_L^2 = 0 \quad (2.48)$$

และ

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} k_T^2 = 0 \quad (2.49)$$

เมื่อ $k_L = \frac{\omega}{V_L}$ และ $k_T = \frac{\omega}{V_T}$ โดยที่ k_L และ k_T คือเลขคลื่นของคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวาง ตามลำดับ

คำตอบของสมการที่ (2.48) และ (2.49) สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi = A(z)e^{i(kx-\omega t)} \quad (2.50)$$

$$\varphi = B(z)e^{i(kx-\omega t)} \quad (2.51)$$

โดยที่ค่า $A(z)$ และ $B(z)$ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของ z

เมื่อนำสมการ (2.50) แทนลงใน (2.48) จะได้เป็น

$$-k^2 A(z)e^{i(kx-\omega t)} + e^{i(kx-\omega t)} \frac{\partial^2 A(z)}{\partial z^2} + k_L^2 A(z)e^{i(kx-\omega t)} = 0 \quad (2.52)$$

หรือ
$$\frac{\partial^2 A(z)}{\partial z^2} - (k^2 - k_L^2)A(z) = 0 \quad (2.53)$$

ในทำนองเดียวกันแทนสมการ (2.51) ลงในสมการ (2.49) จะได้

$$\frac{\partial^2 B(z)}{\partial z^2} - (k^2 - k_T^2)B(z) = 0 \quad (2.54)$$

คำตอบของสมการ (2.53) และ (2.54) จะได้ค่า $A(z)$ และ $B(z)$ อยู่ในรูปของ

$$A(z) = Ce^{\pm(\sqrt{k^2 - k_L^2})z} \quad (2.55)$$

และ
$$B(z) = De^{\pm(\sqrt{k^2 - k_T^2})z} \quad (2.56)$$

เมื่อ C และ D เป็นค่าคงที่ใดๆ

โดยเครื่องหมายบวกและลบบ่งบอกถึงลักษณะของแอมพลิจูดของคลื่น กล่าวคือ คำตอบที่มีเครื่องหมายเป็นบวก หมายถึง ขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความลึกของตัวกลาง ส่วนคำตอบที่มีเครื่องหมายเป็นลบ หมายถึง ขนาดของแอมพลิจูดจะมีค่าลดลงตามค่า

ความลึกของตัวกลาง ซึ่งลักษณะของคลื่นเรย์เล่ย์ จะเป็นแบบที่มีคำตอบเป็นลบ ดังนั้นสมการคำตอบที่เป็นคำตอบในกรณีนี้คือ

$$A(z) = Ce^{-\left(\sqrt{k^2 - k_L^2}\right)z} \quad (2.57)$$

และ

$$B(z) = De^{-\left(\sqrt{k^2 - k_T^2}\right)z} \quad (2.58)$$

แทนค่าสมการ (2.57) และ (2.58) ในสมการ (2.50) และ (2.51) ตามลำดับ

$$\phi = Ce^{-\left(\sqrt{k^2 - k_L^2}\right)z} e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.59)$$

$$\varphi = De^{-\left(\sqrt{k^2 - k_T^2}\right)z} e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.60)$$

พิจารณารอยต่อ (ระนาบ $z = 0$) เราจะได้เงื่อนไขค่าขอบ คือ

$$T_{zz} = 0$$

$$T_{xz} = 0$$

ดังนั้นจากสมการ (2.59) และ (2.60) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ C และ D ได้เป็น

$$D = \frac{-2ik\sqrt{k^2 - k_L^2}C}{k^2 + \sqrt{k^2 - k_T^2}} \quad (2.61)$$

ดังนั้น สมการที่ (2.60) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\phi = +Ce^{i(kx - \omega t) - \left(\sqrt{k^2 - k_L^2}\right)z} \quad (2.62)$$

$$\varphi = -iC \frac{2k\sqrt{k^2 - k_L^2}}{k^2 + \sqrt{k^2 - k_T^2}} e^{i(kx - \omega t) - \left(\sqrt{k^2 - k_T^2}\right)z} \quad (2.63)$$

เมื่อใช้สมการ (2.63) จะสามารถหาคำตอบสุดท้ายของสมการ ได้เป็น

$$\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_T}\right)^4 + 8\left[3 - 2\left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right]\left(\frac{V_R}{V_T}\right) - 16\left[1 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2\right] = 0 \quad (2.64)$$

เมื่อ $V_R = \frac{\omega}{k}$ คือค่าอัตราเร็วของคลื่นเรย์เล่ย์

2.3 ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง (Acoustic Impedance)

ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงความสามารถในการส่งผ่านพลังงานของคลื่นเสียงในตัวกลาง กล่าวคือถ้าคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างผิววัสดุสองชนิดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงไม่ใกล้เคียง ผลก็คือจะทำให้พลังงานที่ส่งผ่านจากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 มีค่าน้อยลง ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงนี้สามารถนิยามได้ว่าเป็นผลคูณระหว่างค่าความหนาแน่นของตัวกลางกับค่าอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางนั้น

นิยาม $Z = \rho v$ (2.65)

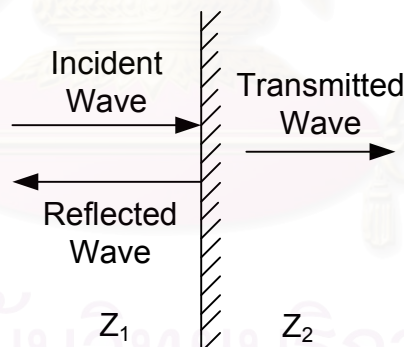
เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของตัวกลาง มีหน่วยเป็น kg/m^3

v คือ ค่าความเร็วเสียงในตัวกลาง มีหน่วยเป็น m/s

Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง มีหน่วยเป็น $\text{kg/m}^2\text{s}$

โดยปกติค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงจะใช้ในหน่วย Mrayl โดยที่ 1 Mrayl มีค่าเท่ากับ $1 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$

การสะท้อนและการส่งผ่านของเสียงระหว่างรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง



รูปที่ 2.5 การสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นเสียงระหว่างรอยต่อของตัวกลาง [9]

จากรูปที่ 2.5 เมื่อคลื่นระนาบเคลื่อนที่จากตัวกลางที่หนึ่งไปตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง พบว่าจะมีคลื่นบางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองได้ และมีคลื่นบางส่วนที่จะสะท้อนกลับมายังตัวกลางที่หนึ่ง สามารถเขียนสมการระยะกระจัดแทนการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้งสามได้ดังนี้

$$\begin{aligned} y_i &= A_i e^{i(kx - \omega t)} \\ y_r &= A_r e^{i(kx + \omega t)} \\ y_t &= A_t e^{i(kx - \omega t)} \end{aligned} \quad (2.66)$$

โดย การกระจัดของคลื่นจะเป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) [9]

$$y_i + y_r = y_t \quad (2.67)$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ $x=0$ สมการที่ (2.66) และ (2.67) จะได้ว่า

$$A_i + A_r = A_t \quad (2.68)$$

และเงื่อนไขขอบเขตที่ $x=0$ ค่าความดันจะเป็นไปตามสมการความต่อเนื่อง

$$P_1 \frac{d}{dx}(y_i + y_r) = P_2 \frac{d}{dx}(y_t) \quad (2.69)$$

$$P_1(A_i(-k_1)) + P_1(A_r(k_1)) = P_2(A_t(-k_2)) \quad (2.70)$$

เมื่อ $k_1 = \frac{\omega}{v_1}$ และ $k_2 = \frac{\omega}{v_2}$

ดังนั้น สมการที่ (2.70) สามารถเขียนได้เป็น

$$-\frac{P_1}{v_1} A_i + \frac{P_1}{v_1} A_r = -\frac{P_2}{v_2} A_t \quad (2.71)$$

เพราะว่า $\frac{P_1}{v_1} = \rho_1 v_1 = Z_1$ และ $\frac{P_2}{v_2} = \rho_2 v_2 = Z_2$

ดังนั้น สมการที่ (2.71) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$-Z_1 A_i + Z_1 A_r = -Z_2 A_t \quad (2.72)$$

หรือ

$$Z_1 A_i - Z_1 A_r = Z_2 A_t \quad (2.73)$$

$$Z_1 (A_i - A_r) = Z_2 A_t \quad (2.74)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (2.68) และ สมการ (2.74) จะได้สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)

$$R = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.75)$$

และ จากสมการ (2.68) และ สมการ (2.74) จะได้สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient)

$$T = \frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.76)$$

2.4 อุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบการปล่อยคลื่นอะคูสติก

ตัวตรวจจับเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณจากพลังงานรูปแบบหนึ่งไปยังอีก รูปแบบหนึ่ง ซึ่งตัวตรวจจับที่ใช้ในการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกโดยทั่วไปสามารถแบ่งออก ตามวิธีการวัดได้ 3 วิธี [1,2] คือ

2.4.1 ตัวตรวจจับชนิดอิเล็กโทรแมกเนติก (Electromagnetic Transducer)

เป็นตัวตรวจจับชนิดที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบซึ่งวิธีการ ตรวจจับจะใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดเหนี่ยวนำกระแสไหลวน เมื่อพื้นผิวมีการขยับ เคลื่อนที่ ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยวงจรบริดจ์อิมพีแดนซ์

2.4.2 ตัวตรวจจับชนิดคาปาซิแตนซ์ (Capacitance Transducer)

เป็นตัวตรวจจับแบบที่ไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบอีกชนิดหนึ่งซึ่ง วิธีการตรวจจับจะใช้ค่าความจุไฟฟ้าของช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนที่มีความไวต่อการตอบสนองของ ตัวตรวจจับกับพื้นที่ผิวของชิ้นงาน เมื่อพื้นผิวมีการขยับเคลื่อนที่ ค่าความจุไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไป ซึ่ง สามารถตรวจวัดได้ด้วยวงจรบริดจ์ความจุไฟฟ้า

2.4.3 ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer)

เป็นตัวตรวจจับที่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งวิธีการตรวจจับ จะ ใช้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก คือ เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับพลังงานในรูปของสัญญาณ คลื่นอะคูสติก จะสามารถเปลี่ยนพลังงานนั้นให้เป็นพลังงานในรูปของพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัย สมบัติของเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะสร้างตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริก

บทที่ 3

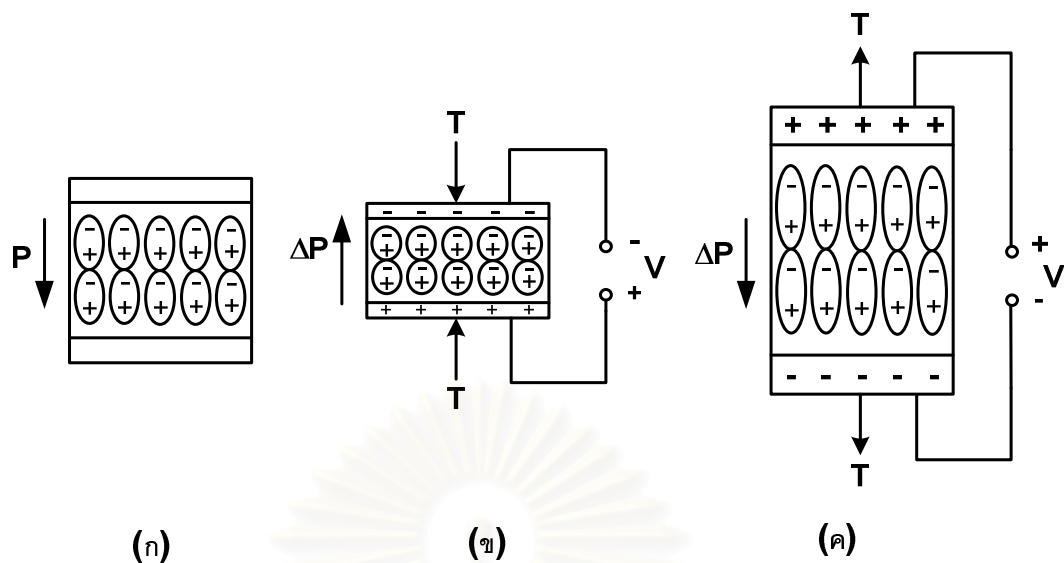
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

คำว่า “ เพียโซ (Piezo) ” มาจากภาษากรีกมีความหมายว่า แรงดันหรือการกด ส่วน “ อิเล็กทริก (Electric) ” มีความหมายว่า ไฟฟ้า ดังนั้นคำว่า “ เพียโซอิเล็กทริก ” จึงมีความหมายว่า ไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน กล่าวคือ เมื่อออกแรงหรือมีความเค้นมากกระทำกับวัสดุจะสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุได้ โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งการที่วัสดุเปลี่ยนแรงเค้นที่อยู่ในรูปของพลังงานกลให้กลายเป็นศักย์ไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า ลักษณะดังกล่าวนี้จะเรียกว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct effect)” และในทางตรงกันข้าม เมื่อให้สนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปในตัววัสดุ จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดแก่วัสดุขึ้น ผลก็คือจะทำให้วัสดุมีความยาวเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ลักษณะดังกล่าวนี้ก็จะเรียกว่า “ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม (Indirect effect)”

3.1.1) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยตรง

เมื่อวัสดุได้รับความเค้นแล้วจะเกิดความเครียดซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ลดลง การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ของวัสดุนี้จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าและความแตกต่างของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณปลายของวัสดุทั้งสองด้านเกิดการเปลี่ยนแปลง เกิดประจุโพลาไรเซชันที่เป็นลบบริเวณผิวด้านบนและบวกบริเวณผิวด้านล่าง ประจุโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุไฟฟ้าอิสระที่ขั้วไฟฟ้าด้านบนเป็นประจุบวกและขั้วไฟฟ้าด้านล่างเป็นประจุลบ สามารถวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านบนต่อด้านล่างได้ ดังรูป 3.1



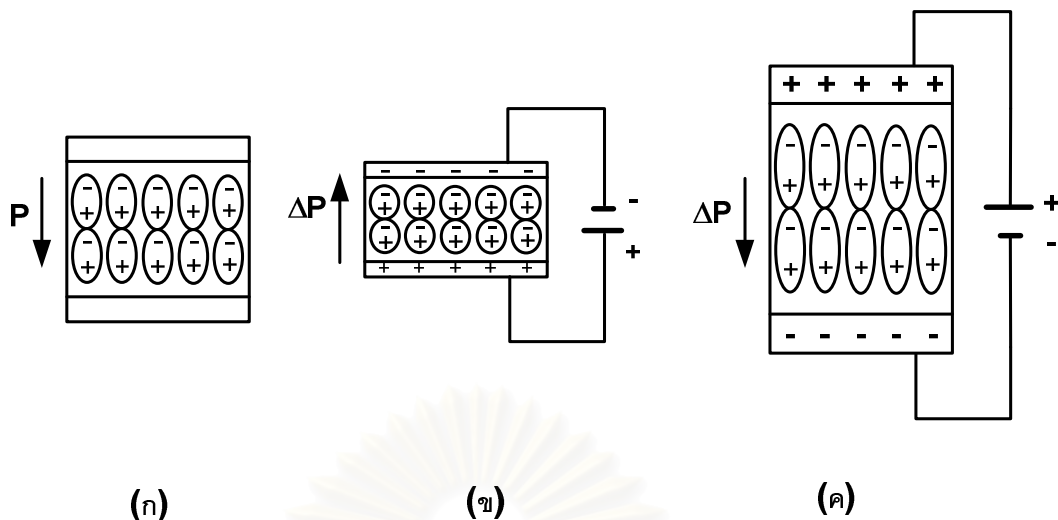
รูปที่ 3.1 การเกิดโวลตาไรเซชันเพื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับความเค้น [10]

จากสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถนำวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์สำหรับรับคลื่นเสียงได้

3.1.2) ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้ว โวลตาไรเซชันที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุ โดยต่อขั้วไฟฟ้าลบเข้ากับขั้วไฟฟ้าด้านบนของวัสดุและให้ขั้วไฟฟ้าบวกต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้านล่างของวัสดุ จะทำให้ประจุอิสระบนขั้วไฟฟ้าจะผลักประจุโวลตาไรเซชัน ผลคือเกิดความเครียดขึ้นกับวัสดุ ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่หดสั้นลง ในทางตรงกันข้าม ถ้ากลับขั้วแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวัสดุ ผลคือโมเมนต์ขั้วคู่จะยืดออกทำให้วัสดุยาวขึ้น ดังรูป 3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า [10]

จากสมบัติดังกล่าวนี้นี้ทำให้เราสามารถนำวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้ไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์กำเนิดคลื่นเสียงได้

3.2 สภาพเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถนิยามโดยอาศัยทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) โดยพิจารณาการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสมบัติทางกล ทางไฟฟ้า และความร้อนของวัสดุ โดยสมการเพียโซอิเล็กทริกสามารถเขียนได้ในรูปสมการเชิงเส้น (Linear equation) ดังนี้

$$D = P\Delta T + dX + eE \quad (3.1)$$

$$x = \alpha\Delta T + sX + dE \quad (3.2)$$

จากสมการ (3.1) แสดงถึงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง พิจารณาเมื่อมีความเค้นมากระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยไม่มีการป้อนสนามไฟฟ้า ($E = 0$) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ดังนั้นค่าการกระจัดทางไฟฟ้าในสมการที่ (3.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$D = dX \quad (3.3)$$

และในทางกลับกัน สมการ (3.2) แสดงถึงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดยอ้อม โดยเมื่อนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกวางไว้ในสนามไฟฟ้า จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นกับวัสดุ ถ้าไม่มีความเค้นมากระทำต่อวัสดุ ($X = 0$) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ดังนั้นค่าความเครียดที่จะเกิดขึ้นในวัสดุในสมการที่ (3.2) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x = dE \quad (3.4)$$

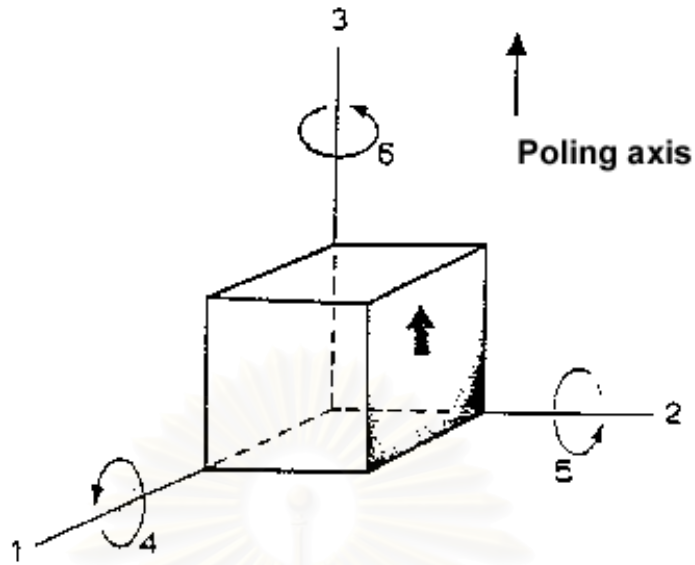
ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งจากสมการ (3.3) และ (3.4) จะเขียนความเค้นและความเครียดให้อยู่ในรูปเทนเซอร์อันดับ 2 และค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกจะเขียนให้อยู่ในรูปเทนเซอร์อันดับ 3

เทนเซอร์ความเค้น (Stress tensor) ใช้สัญลักษณ์ คือ X_{kl} คือปริมาณทางฟิสิกส์ที่อธิบายลักษณะของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งความหมายของความเค้นคือ แรงต้านภายในเนื้อของวัสดุซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรงภายนอกที่กระทำต่อพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากของวัสดุ

นิยาม
$$X_{kl} = \frac{F_k}{A_l} \quad (3.5)$$

เมื่อ	X_{kl}	คือ	เทนเซอร์ความเค้น
	F_k	คือ	แรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุ
	A_l	คือ	พื้นที่ผิวตั้งฉากที่ถูกกระทำ

ความเค้นสามารถแบ่งได้หลายประเภท ได้แก่ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด (Compressive stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) โดยแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงที่กระทำ ซึ่งดัชนีล่างคือ k, l จะเป็นตัวระบุทิศทางของแรงที่กระทำต่อวัสดุและพื้นที่ที่ถูกแรงกระทำ โดย k, l จะมีค่าเป็น 1, 2 และ 3 ซึ่งแสดงตามแนว x, y และ z ในปริภูมิสามมิติ ดังนั้นจะได้องค์ประกอบของความเค้น 9 องค์ประกอบด้วยกันดังแสดงในรูป



รูปที่ 3.3 ทิศทางของแรงกระทำและพื้นที่ที่ถูกกระทำของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [8]

จากรูปสามารถเขียนความเค้นที่อยู่ในแต่ละองค์ประกอบได้รูปของเมตริกซ์ที่มีมิติ 3×3 ได้ดังนี้

$$X_{kl} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

เมื่อพิจารณารูปร่างแบบสมมาตรจะได้ $X_{kl} = X_{lk}$

และจากเมตริกซ์ที่แสดงความเค้น ในสมการ (3.6) สามารถพิจารณาประเภทของความเค้นได้ดังต่อไปนี้

ความเค้นดึงเขียนแทนโดย

$$X_1 = X_{11}$$

$$X_2 = X_{22}$$

$$X_3 = X_{33}$$

ความเค้นเฉือนเขียนแทนโดย

$$X_4 = X_{23} = X_{32}$$

$$X_5 = X_{13} = X_{31}$$

$$X_6 = X_{12} = X_{21}$$

ดังนั้นสามารถเขียนองค์ประกอบของความเค้น 9 องค์ประกอบในสมการ (3.6) ใหม่ได้เป็น

$$X_t = \begin{pmatrix} X_1 & X_6 & X_5 \\ X_6 & X_2 & X_4 \\ X_5 & X_4 & X_3 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

ดังนั้น จากสมการ (3.3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$D_n = d_{nt} X_t \quad (3.8)$$

เมื่อ n คือ ทิศทางของโพลาริเซชัน
และ t คือ ทิศทางของความเค้นที่กระทำต่อวัสดุ

ดังนั้นค่าการกระจัดทางไฟฟ้าซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบ จะขึ้นกับขนาดและทิศทางของความเค้น ดังนี้

$$\begin{aligned} D_1 &= d_{11}X_1 + d_{12}X_2 + d_{13}X_3 + d_{14}X_4 + d_{15}X_5 + d_{16}X_6 \\ D_2 &= d_{21}X_1 + d_{22}X_2 + d_{23}X_3 + d_{24}X_4 + d_{25}X_5 + d_{26}X_6 \\ D_3 &= d_{31}X_1 + d_{32}X_2 + d_{33}X_3 + d_{34}X_4 + d_{35}X_5 + d_{36}X_6 \end{aligned} \quad (3.9)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.9) แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความเค้น ซึ่งอยู่ในรูปเมตริกซ์ที่มีองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบกระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันขึ้น ดังนั้น ค่าการกระจัดทางไฟฟ้าจึงเปลี่ยนแปลงตามปริมาณโพลาริเซชัน ซึ่งขึ้นกับขนาดและทิศทางของความเค้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในทางตรงกันข้าม เทนเซอร์ความเครียด (Strain tensor) เป็นปริมาณที่บ่งบอกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งจะนิยามความเครียดคือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิมของวัสดุ สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$x_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial P_j} \quad (3.10)$$

เมื่อ x_{ij} คือ เทนเซอร์ความเครียด
 u_i คือ การกระจัดในทิศทาง i
 P_j คือ ตำแหน่งอ้างอิงในทิศทาง j

ค่าดัชนี i และ j บอกถึงทิศทางในระบบผลึกเช่นเดียวกับกรณีของเทนเซอร์ความเค้น และเนื่องจากเทนเซอร์ความเครียดมีสมบัติความเป็นสมมาตรในระบบผลึก ดังนั้น

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 & , i = j \\ -x_{ji} & , i \neq j \end{cases} \quad (3.11)$$

โดยที่ค่า i, j มีค่าเป็น 1, 2, 3 ซึ่งแสดงตามแนว x, y และ z ในปริภูมิเวกเตอร์ ตามลำดับ ดังนั้นจะได้องค์ประกอบของเทนเซอร์ความเครียด 9 องค์ประกอบด้วยกัน ดังสมการ

$$x_{ij} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

และสามารถเขียนองค์ประกอบของเทนเซอร์ความเครียดได้ใหม่ในรูปของเมตริกซ์ โดยอาศัยความเป็นสมมาตรของผลึกได้เป็น

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} x_1 & x_6 & x_5 \\ x_6 & x_2 & x_4 \\ x_5 & x_4 & x_3 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ดังนั้นจากสมการ (3.13) อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบกลับ ซึ่งเขียนสมการในรูปเทนเซอร์ใหม่ได้เป็น

$$x_s = d_{is} E_i \quad (3.14)$$

โดยที่ s และ i บอกถึงทิศทางการเกิดความเครียดและทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุ ตามลำดับ เมื่อนำสารวางไว้ในสนามไฟฟ้า E_i ซึ่งอยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบตามแนวแกน x, y และ z ในระบบปริภูมิเวกเตอร์ จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรชัน ผลคือทำให้วัสดุที่ได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดการหดหรือขยายตัวของผลึกแล้วเกิดความเครียด x_s ขึ้น ซึ่งมีองค์ประกอบอยู่ด้วยกัน 6 องค์ประกอบ ดังสมการ (3.15) ซึ่งสามารถเขียนค่าความเครียดให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับการขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้า ดังนี้

$$\begin{aligned} x_1 &= d_{11}E_1 + d_{12}E_2 + d_{13}E_3 + d_{14}E_4 + d_{15}E_5 + d_{16}E_6 \\ x_2 &= d_{21}E_1 + d_{22}E_2 + d_{23}E_3 + d_{24}E_4 + d_{25}E_5 + d_{26}E_6 \\ x_3 &= d_{31}E_1 + d_{32}E_2 + d_{33}E_3 + d_{34}E_4 + d_{35}E_5 + d_{36}E_6 \end{aligned} \quad (3.15)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

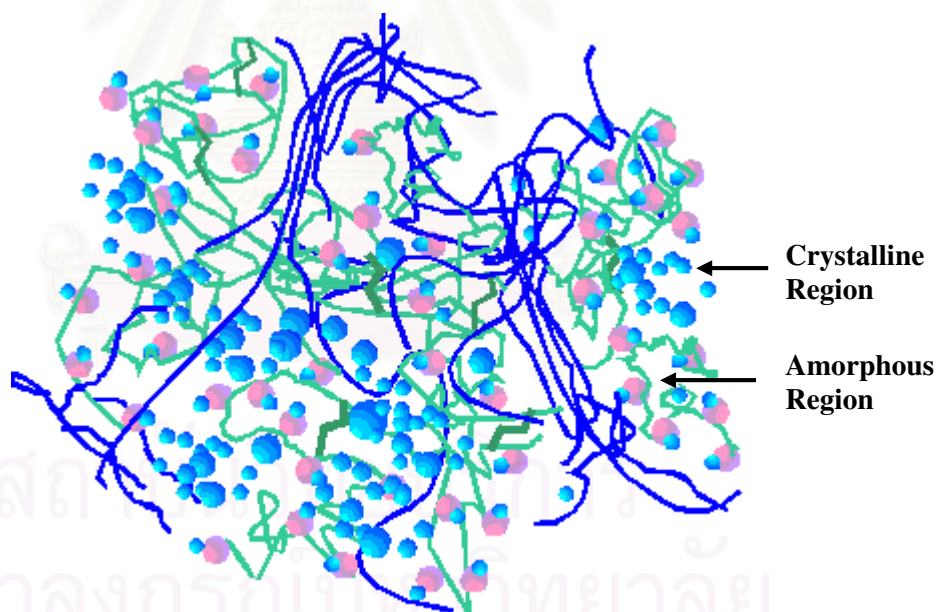
3.3 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

3.3.1 พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride)

ในปี ค.ศ.1969 นักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่นชื่อคาวาอิ ได้ค้นพบว่าเมื่อทำให้แผ่นฟิล์ม PVDF ผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ได้ฟิล์ม PVDF ที่มีสภาพเพียโซอิเล็กทริกสูง ต่อจากนั้นก็ได้มีการศึกษาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดโพลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย จนปัจจุบันทราบถึงข้อมูลสำคัญที่ทำให้เข้าใจสมบัติต่างๆ ของสารชนิดนี้เป็นอย่างดี

โครงสร้างของ PVDF

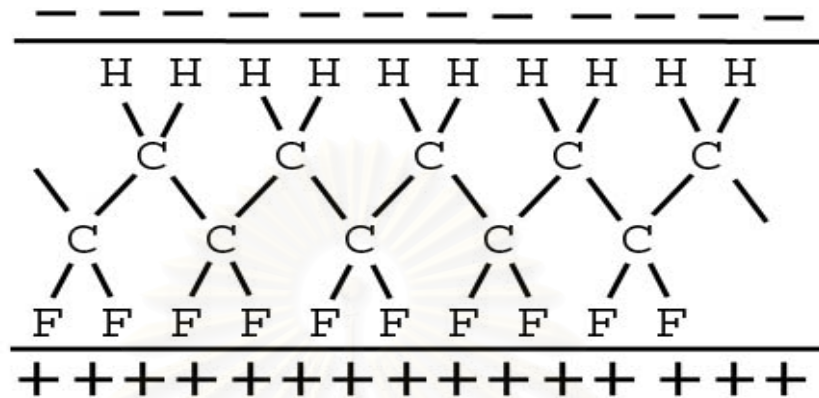
PVDF มีชื่อเต็มว่า “พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene Fluoride)” ซึ่งโพลิเมอร์ PVDF จัดเป็นโพลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline) คือมีส่วนที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และแบบผลึก (Crystal) ปนกัน ดังรูป 3.4



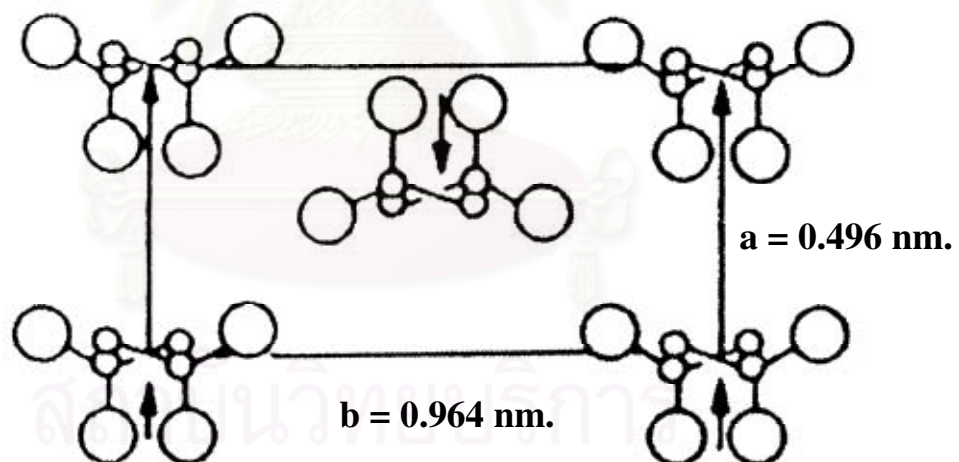
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของฟิล์ม PVDF [11]

โดยจะประกอบด้วย มอนอเมอร์ของ CH_2 เรียงตัวกันเป็นสายโซ่ยาว มีสูตรโครงสร้างเป็น $(-\text{CH}_2\text{CF}_2-)_n$ ดังรูปที่ 3.5 ฟิล์ม PVDF ถูกเตรียมโดยวิธีทำให้หลอมเหลว ณ อุณหภูมิสูง เมื่อฟิล์มอยู่ในรูปของเหลวแล้วก็นำไปหล่อ (Casting) ลงในแท่นพิมพ์ หลังจากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงให้

ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ PVDF จะเกิดการแข็งตัว จะได้ฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างแบบเฟสแอลฟา (α -phase) ซึ่งโครงสร้างของแต่ละเซลล์หน่วย (Unit cell) จะเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ที่มีค่า $a = 4.96 \text{ \AA}$, $b = 9.64 \text{ \AA}$ และ $c = 4.62 \text{ \AA}$ ดังรูป 3.6



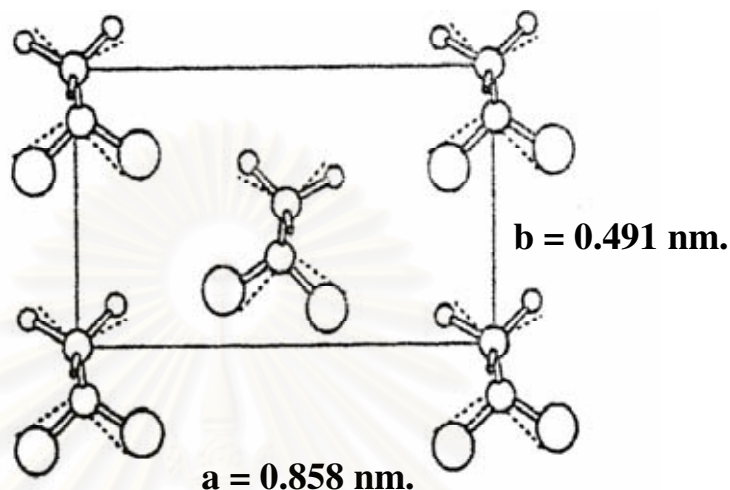
รูปที่ 3.5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของฟิล์ม PVDF [11]



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสแอลฟา [6,11]

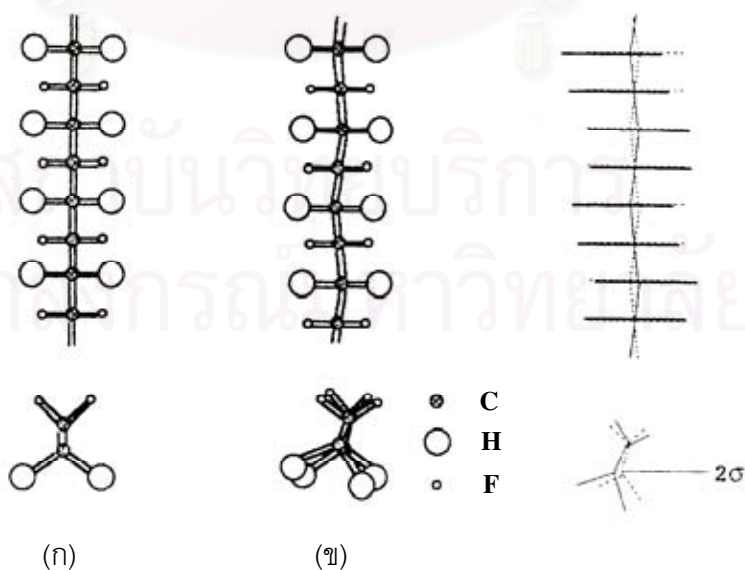
เมื่อพิจารณาในแต่ละเซลล์หน่วยจะประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลสองสาย และทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของทั้งสองสายนี้มีทิศตรงข้ามกัน จึงทำให้ขั้วหักล้างกันหมด ผลก็คือทำให้ผลึก PVDF แบบนี้เป็นผลึกแบบไม่มีขั้ว มีโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิเป็นศูนย์ จึงทำให้ฟิล์มแบบเฟสแอลฟา ไม่แสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ถ้าดึงฟิล์ม PVDF แบบเฟสแอลฟา ให้ยืดออกประมาณ 3-6 เท่าของความยาวเดิม จะทำให้สายโซ่โมเลกุลคาร์บอนยืดออกไปตามความยาว ซึ่งจะได้ผลึกที่มีโครงสร้างใหม่เป็นแบบเฟสเบตา (β -phase) ที่มีการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและมีเซลล์หน่วยแบบออร์ทอโรมบิก ที่มีค่า $a = 0.858 \text{ nm}$, $b = 0.491 \text{ nm}$ และ $c = 2.56 \text{ nm}$ ดังรูป 3.7



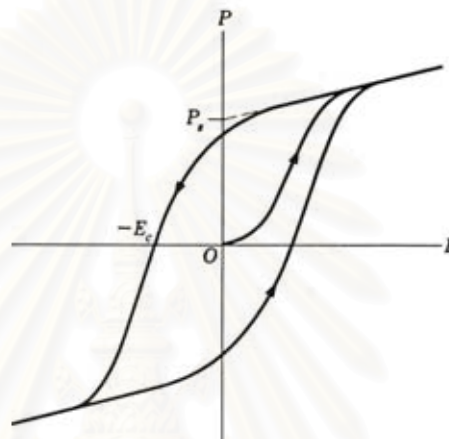
รูปที่ 3.7 โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสเบตา [6,11]

จากการศึกษาโดยรังสีเอกซ์พบว่า รัศมีแวนเดอร์วาลส์ของอะตอมฟลูออรีนเท่ากับ $1.35 \text{ \AA}$ และระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของอะตอมฟลูออรีนมีค่าเท่ากับ $2.56 \text{ \AA}$ ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินไปที่จะบรรจุลงในสายโซ่โมเลกุลนี้ ดังนั้นอะตอมคาร์บอนจึงต้องวางตัวบิดไปมาเล็กน้อยเพื่อให้อะตอมของฟลูออรีนสามารถบรรจุลงในสายโซ่โมเลกุลนี้ได้ ดังรูป 3.8 (ข)



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบโครงสร้างการเรียงตัว (ก) โครงสร้างของผลึก PVDFแบบเฟสแอลฟา (ข) โครงสร้างของผลึก PVDF แบบเฟสเบตา [12]

เมื่อพิจารณาโมเมนต์ขั้วคู่ของสายโซ่โมเลกุลจะมีทิศเดียวกัน ทำให้ค่าโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิไม่เป็นศูนย์ ผลึกแบบนี้จึงเป็นผลึกแบบมีขั้ว แต่ทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ของแต่ละผลึก จะวางตัวในระนาบของฟิล์มซึ่งมีทิศทางแบบสุ่ม ผลึกคือค่าโพลาไรเซชัน (Polarization) ของฟิล์มมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นหลังจากการยัดฟิล์ม PVDF แล้ว จะยังไม่มีไดโพลถาวรและยังไม่ใช่สารเพียโซอิเล็กทริก วิธีที่จะทำให้สารนี้เป็นสารเพียโซอิเล็กทริก ทำได้โดยการจัดเรียงขั้ว (Polling) โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงให้กับฟิล์ม เพื่อให้ฟิล์มมีค่าโพลาไรเซชันและสามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ ดังรูป 3.9

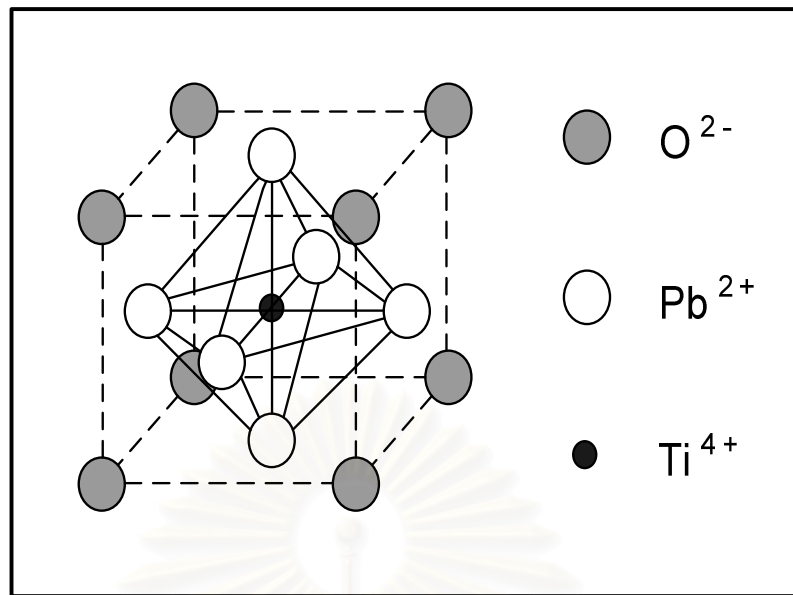


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามไฟฟ้ากับค่าโพลาไรเซชันของฟิล์ม PVDF [13]

3.3.2 เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate)

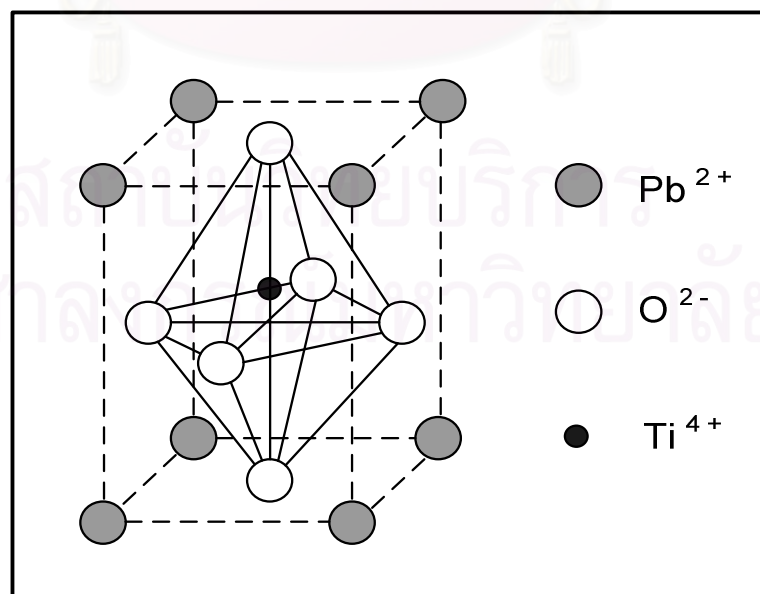
โครงสร้างของเลดเซอร์โคเนตไททาเนต

สาร PZT มีชื่อเต็มว่า “ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate) “ มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3)$ ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่มีโครงสร้างของผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งประกอบด้วยไอออนของโลหะเตตระวาเลนต์ไอออน (Tetravalent ion) ได้แก่ ไททาเนียมไอออน (Ti^{4+}) ที่มีอะตอมขนาดเล็กอยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้างของผลึก และมีไอออนของโลหะขนาดใหญ่กว่าเป็นพวกไดวาเลนต์ไอออน (Divalent) ได้แก่ ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) อยู่ที่กึ่งกลางทั้งหกหน้าของโครงสร้างของผลึก และมีไดวาเลนต์ไอออนของตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) อยู่ที่มุมทั้งแปดของโครงสร้างของผลึก นักวิทยาศาสตร์พบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี โครงสร้างของผลึกที่ผ่านการซินเทอร์ (Sinter) แล้วเป็นแบบลูกบาศก์ (Cubic) ซึ่งไม่มีไดโพลโมเมนต์ (Dipole moment) เกิดขึ้น ผลของการไม่มีไดโพลโมเมนต์นี้จะทำให้ผลึกของ PZT สามารถแสดงคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ ดังรูป 3.10



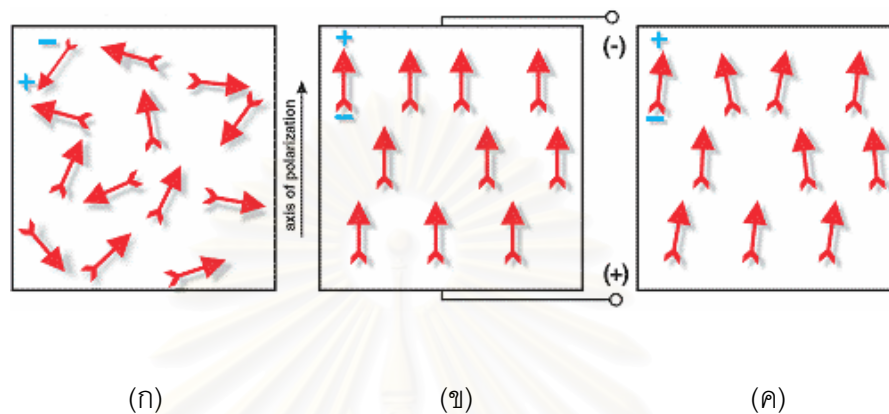
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของสาร PZT แบบลูกบาศก์ [5,14]

เมื่อทำให้ผลึกมีอุณหภูมิลดต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ไอออนของไททาเนียมจะเลื่อนออกจากตำแหน่งศูนย์กลางที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งจะทำให้ไดโพลโมเมนต์ภายในผลึกเกิดขึ้น ผลของการมีไดโพลโมเมนต์คือจะทำให้ผลึกสามารถแสดงคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้ จากการเลื่อนของไอออนของไททาเนียมทำให้โครงสร้างของผลึกเปลี่ยนจากรูปลูกบาศก์กลายเป็นรูปเตตระโกนอล (Tetragonal) ดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสาร PZT แบบเตตระโกนอล [5,14]

เมื่อทำให้ผลึกเกิดไดโพลโมเมนต์แล้ว จะทำให้มีโพลาริเซชันเกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกันเป็นกลุ่มๆ เรียกว่า โดเมน (Domain) แต่ทิศทางของแต่ละโดเมนในผลึกจะกระจายกระจายไม่มีทิศทางที่แน่นอน ซึ่งทำให้ไม่สามารถระบุทิศทางของโพลาริเซชันรวมภายในผลึกได้ ดังรูป 3.12

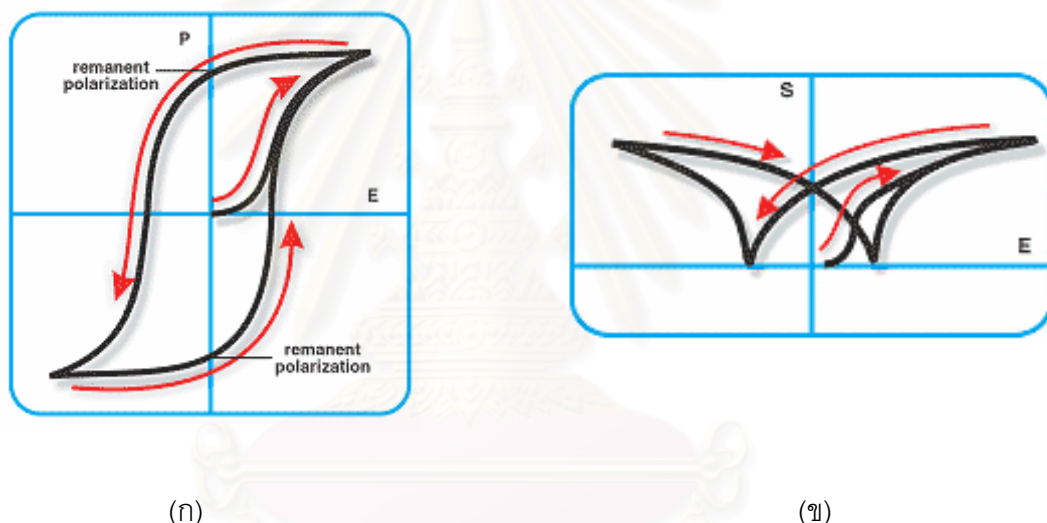


รูปที่ 3.12 การเกิดโพลาริเซชันภายในผลึกของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก [14]

- (ก) แสดงทิศทางของโพลาริเซชันที่มีสภาพไร้ทิศทางของแต่ละโดเมน
- (ข) แสดงทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง
- (ค) แสดงทิศทางของโพลาริเซชันหลังหยุดให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

ทิศทางของโดเมนแต่ละโดเมนภายในผลึกของเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกันเพื่อให้เกิดโพลาริเซชันภายในผลึกได้ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่าความต่างศักย์สูงๆ โดยกระทำภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิคูรี ทั้งนี้เนื่องจากการให้สนามไฟฟ้าสูงกับผลึกนั้น จะทำให้โดเมนภายในผลึกที่เดิมเรียงตัวอยู่ในทุกทิศทางเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ไปในทิศทางเดียวกันโดยเป็นทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ซึ่งส่งผลให้ขนาดความยาวของโครงสร้างของผลึกยาวมากขึ้น (เปลี่ยนจากโครงสร้างแบบลูกบาศก์ไปเป็นแบบเททราโกนอล) ดังรูป 3.11 และเมื่อทำการหยุดป้อนสนามไฟฟ้า โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโดเมนภายในผลึกนั้นจะไม่กลับสู่สภาพเดิม ดังรูป 3.12

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านการโพล (Polling) แล้ว จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นกับค่าสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวัสดุเป็นลักษณะวงจรรีชีส (Hysteresis) กล่าวคือ เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้ว จะทำให้วัสดุเกิดโพลาริเซชันเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่มีค่าโพลาริเซชันที่คงที่ ซึ่งสนามไฟฟ้า ณ จุดนี้เป็นสนามไฟฟ้าที่สามารถให้ได้มากที่สุด และเมื่อลดค่าสนามไฟฟ้าลง ค่าโพลาริเซชันจะไม่ลดลงตามเส้นโค้งเดิม และเมื่อลดค่าสนามไฟฟ้าลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าโพลาริเซชันจะไม่เป็นศูนย์ด้วย ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนี้มีค่าโพลาริเซชันเกิดขึ้นในตอนต้นแล้ว เรียกว่า โพลาริเซชันถาวร เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางในตอนแรกจะทำให้ค่าโพลาริเซชันเกิดในลักษณะเดียวกัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโพลาริเซชันกับค่าสนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การเกิดโพลาริเซชันและการเกิดความเครียดทางกล (Mechanical strain) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เมื่อให้สนามไฟฟ้า [14]

- (ก) แสดงวงจรรีชีส (Hysteresis loop) หรือการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า
- (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความเครียดทางกลตามทิศทางของโพลาริเซชันของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

บทที่ 4

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก

4.1 หลักการสร้างตัวตรวจจับ

ตัวตรวจจับ (Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงรูปพลังงานรูปแบบหนึ่งไปยังอีก รูปแบบหนึ่ง ซึ่งตัวตรวจจับที่สร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกนั้น จะมีอยู่ด้วยกัน 2 กระบวนการคือ การแปลงสัญญาณจากพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางตรงกันข้าม การแปลงสัญญาณจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เนื่องจากตัวตรวจจับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่จะใช้ตรวจสอบความผิดปกติหรือเสียหายของวัสดุ รวมทั้งระบุ ลักษณะต่างๆของที่เกิดจากการปล่อยคลื่นอะคูสติก ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจจับจึงต้องคำนึงถึง ส่วนประกอบเป็นสำคัญ ดังนั้นสมบัติที่จำเป็นและเหมาะสมสำหรับการสร้างตัวตรวจจับเพื่อนำมาใช้งานและสิ่งที่จะระบุได้ว่าสัญญาณที่ตรวจจับได้เป็นสัญญาณที่ดีนั้นมีดังต่อไปนี้

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

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิกส์จะมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของสูงกว่าวัสดุชนิดโพลิเมอร์ เมื่อนำมาสร้างเป็นตัวตรวจจับเพื่อใช้ในการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติก ซึ่งวัสดุที่ใช้สำหรับการตรวจสอบส่วนใหญ่เป็นโลหะ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงสูง ดังนั้นในการตรวจสอบจะต้องมีสารคู่ควบ (Couplant) เป็นตัวเชื่อมระหว่างวัสดุที่ต้องการตรวจสอบกับตัวตรวจจับ เพื่อช่วยลดความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับตัวกลางที่มีสัญญาณเคลื่อนที่ผ่าน และเนื่องจากการเข้ากันไม่ได้ของอิมพีแดนซ์ทางเสียงนี้ จะส่งผลให้ความสามารถในการแยกรายละเอียดของสัญญาณค่อนข้างต่ำ 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 โดยวิธีการหาค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุหาได้จากการวัดค่าความหนาแน่นของสารละลายค่าความเร็วเสียงในวัสดุ [15,16] ซึ่งจากสมการที่ (2.75) และ (2.76). พบว่า ถ้าวัสดุทั้งสองชนิดที่ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่ไม่ใกล้เคียงกันจะส่งผลให้คลื่นที่ส่งมาไม่สามารถส่งผ่านต่อไปได้ หรือสามารถส่งผ่านไปได้น้อย ซึ่งจะส่งผลให้ความเข้มของสัญญาณ ความละเอียดของสัญญาณและค่าความไวของสัญญาณที่รับได้มีประสิทธิภาพน้อยลง ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองเพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงโดยการเติมผงทังสเตน ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์สูง คือประมาณ 99.72 Mrayl [15] ลงไปที่สัดส่วนต่างๆ ผลของการเติมผงทังสเตนที่สัดส่วนต่างๆ กันนี้มีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเปลี่ยนแปลงไป ผลการทดลองแสดงค่าของความเร็วเสียง ความหนาแน่น และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง 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

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) ก่อออะลูมิเนียม เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้เป็นโครงสร้างของตัวตรวจจับ
- 5) หัวต่อ BNC (BNC connector) เป็นอุปกรณ์สำหรับนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ

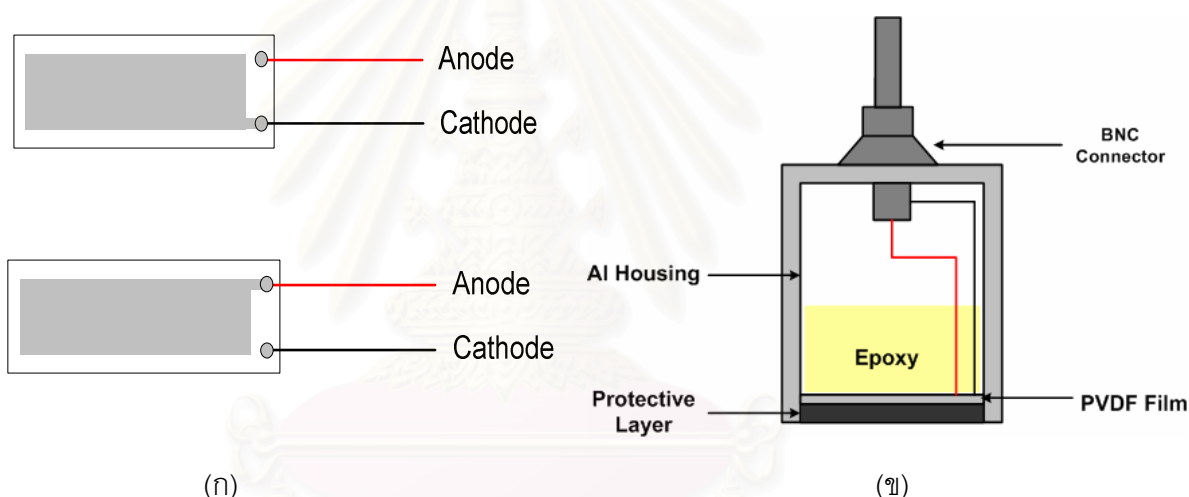
4.3.2 การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์ม PVDF

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นด้วยฟิล์ม PVDF อธิบายขั้นตอนของการสร้าง ได้ดังนี้

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

- 3) ผสมกาอีพอกซีกับผงทั้งสแตนให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเทกาอีพอกซีที่ผสมแล้วลงไปในกล่องอะลูมิเนียมตามความหนาที่ต้องการ เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมหลัง
- 4) รอจนกาอีพอกซีแข็งตัวประมาณ 10 ชั่วโมง หลังจากนั้นดึงกล่องอะลูมิเนียมออกจากกระจก แล้วทำการบัดกรีสายไฟที่ต่อกับแผ่นฟิล์ม PVDF เข้ากับหัว BNC ที่ติดอยู่ที่ฝาของกล่องอะลูมิเนียม โดยให้สายไฟสีแดงเป็นสายสัญญาณและสายไฟสีดำเป็นสายดิน
- 5) ติดฝากล่องเข้ากับตัวกล่องอะลูมิเนียม แล้วนำไปทดสอบการใช้งาน

รูปถ่ายและแผนภาพของโครงสร้างของตัวตรวจจับสนที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม PVDF แสดงดังรูป 4.2 (ก) และ รูป 4.3



รูปที่ 4.1 ลักษณะของตัวตรวจจับสนที่สร้างจากฟิล์ม PVDF (ก) ลักษณะของแผ่นฟิล์ม PVDF (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับสน



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายของตัวตรวจจับสนที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับสน T1 (ข) ตัวตรวจจับสน T2 (ค) ตัวตรวจจับสน T3

ขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่นฟิล์ม PVDF และค่าสัดส่วนของปริมาตรระหว่างผงทั้งสเดนกับกาวอีพอกซี ที่มีผลต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนอง ซึ่งได้สร้างตัวตรวจจับสนจากฟิล์ม PVDF ขึ้นมาทั้งหมด 3 ตัวด้วยกัน ซึ่งตัวตรวจจับสนทุกตัวมีขนาดและรูปร่างเหมือนกันทุกตัว โดยตัวตรวจจับสน 2 ตัวแรกจะสร้างโดยใช้ฟิล์ม PVDF ที่มีขนาดความหนาเท่ากันคือ 28 ไมโครเมตร แต่มีค่าสัดส่วนของปริมาตรของผงทั้งสเดนแตกต่างกัน โดยใช้ค่าสัดส่วนของปริมาตรของผงทั้งสเดนที่ 0 % และ 5% ตามลำดับ ซึ่งจะเรียกเป็นตัวตรวจจับสนตัวที่ T1 และ T2 ตามลำดับ ในขณะที่ตัวตรวจจับสนอีกตัวหนึ่งสร้างโดยใช้ค่าสัดส่วนของปริมาตรของผงทั้งสเดนที่ 0 % แต่ใช้ฟิล์ม PVDF ที่มีขนาดความหนาคือ 52 ไมโครเมตร จะเรียกว่าเป็นตัวตรวจจับสนตัวที่ T3 โดยคุณลักษณะของตัวตรวจจับสนทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของตัวตรวจจับสน PVDF แต่ละตัว

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

รายละเอียดของผลการทดลองของตัวตรวจจับสนทั้งสามจะแสดงในบทถัดไป

4.3.3 การสร้างตัวตรวจจับสนการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยสาร PZT [3,4,17,18]

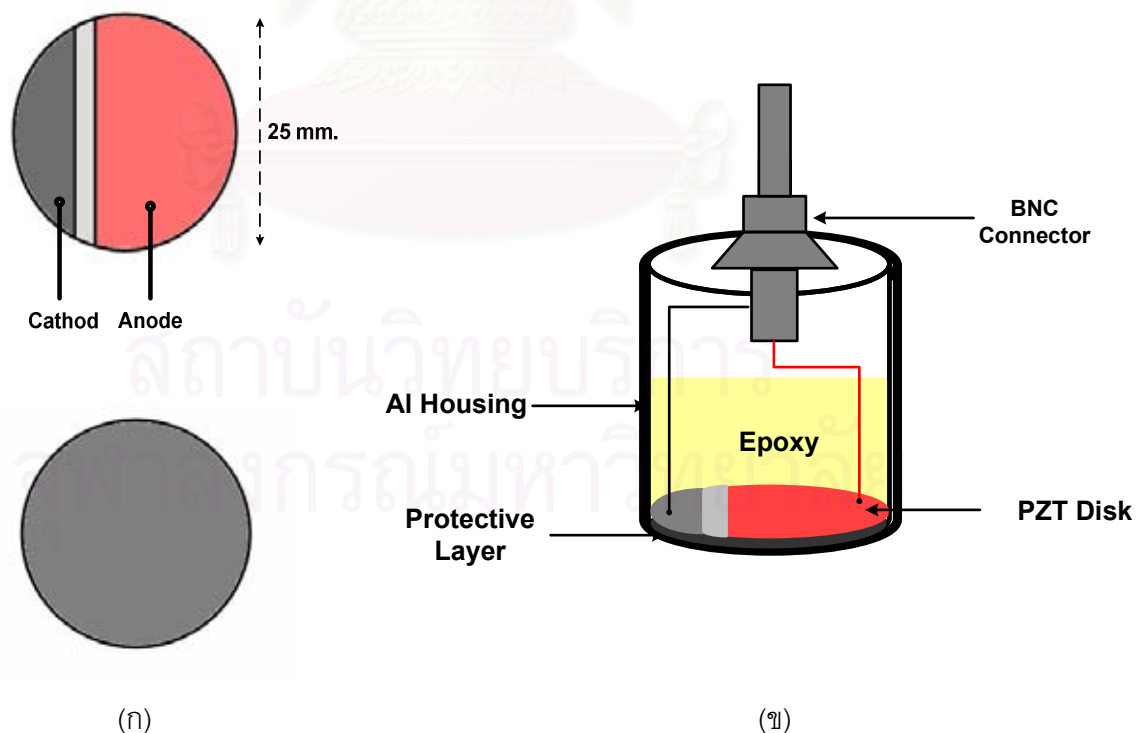
การสร้างตัวตรวจจับสนการปล่อยคลื่นด้วยสาร PZT อธิบายขั้นตอนของการสร้าง ได้ดังนี้

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

กระจกกับกล่องอะลูมิเนียมให้แข็งแรง หลังจากนั้นเทกาวอีพอกซีลงไปให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

- 3) รอจนกาวแห้งประมาณ 10 ชั่วโมง. หลังจากนั้นนำแผ่นสาร PZT มาทำการบัดกรีติดกับสายไฟฟ้า แล้วติดบนกาวสองหน้าแล้ววางไว้บนชั้นป้องกัน โดยจัดตำแหน่งให้แผ่นสาร PZT วางอยู่ตรงกลางของกล่องอะลูมิเนียม
- 4) ผสมกาวอีพอกซีกับผงทังสเตนให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเทกาวอีพอกซีที่ผสมแล้วลงไปบนกล่องอะลูมิเนียมตามความหนาที่ต้องการ เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมหลัง
- 5) รอจนกาวอีพอกซีแข็งตัวประมาณ 10 ชม. หลังจากนั้นดึงกล่องอะลูมิเนียมออกจากกระจก แล้วทำการบัดกรีสายไฟที่ต่อกับแผ่นสาร PZT เข้ากับหัว BNC ที่ติดอยู่ที่ฝาของกล่องอะลูมิเนียม โดยให้สายไฟสีแดงเป็นสายสัญญาณและสายไฟสีดำเป็นสายดิน
- 6) ติดฟลักซ์เข้ากับตัวกล่องอะลูมิเนียม แล้วนำไปทดสอบการใช้งาน

แผนภาพของโครงสร้างและรูปถ่ายของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสาร PZT แสดงดังรูป 4.4 (ข) และ รูป 4.5



รูปที่ 4.3 ลักษณะของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากสาร PZT (ก) ลักษณะของโครงสร้างของสาร PZT (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า [4,17]



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4 รูปถ่ายของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก T4 (ข) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก T5 (ค) ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก T6

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กจากสาร PZT ทั้งหมด 3 ตัวด้วยกัน ซึ่งตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทุกตัวมีขนาดและรูปร่างเหมือนกันทุกตัว เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่นสาร PZT และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลัง ที่มีผลต่อความถี่ต่อการตอบสนองโดยตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กตัวที่ 1 สร้างจากแผ่นสาร PZT ที่มีความหนา 1.0 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 3.669 Mrayl โดยให้สัญลักษณ์เป็น T4 ในขณะที่ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กตัวที่ T5 สร้างจากแผ่นสาร PZT ที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร และมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 3.669 Mrayl ส่วนตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กตัวสุดท้ายคือ T6 สร้างจากแผ่นสาร PZT ที่มีความหนาเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 2.971 Mrayl โดยคุณลักษณะของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กทั้ง 3 ตัวที่สร้างขึ้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

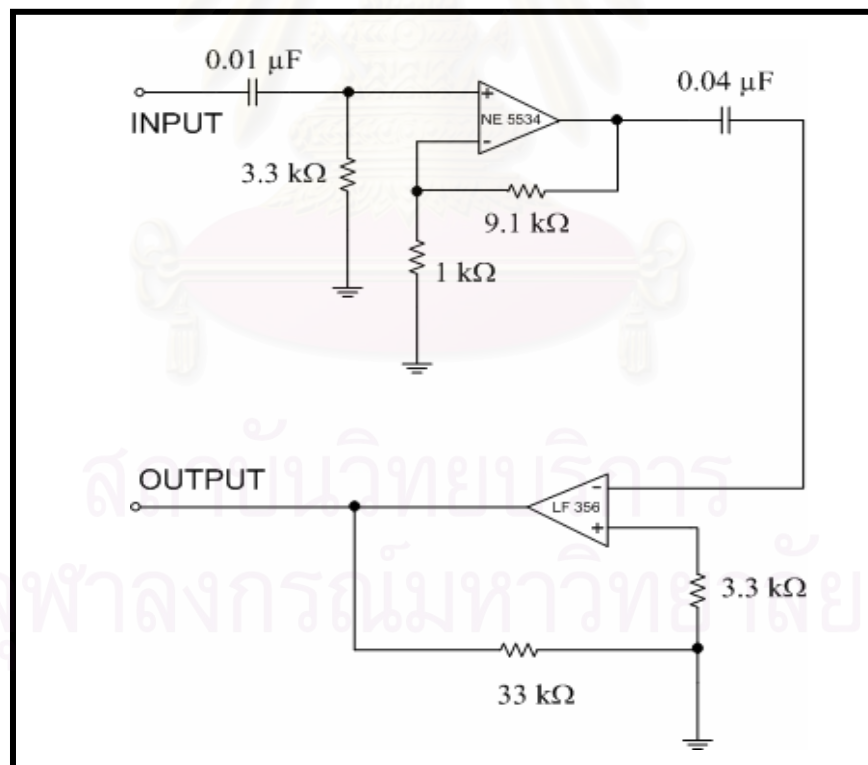
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก PZT แต่ละตัว

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

เนื่องจากสัญญาณอะคูสติกเป็นสัญญาณที่มีขนาดของแอมพลิจูดที่เล็กมาก คือ อยู่ในระดับไมโครโวลต์ถึงมิลลิโวลต์ ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการช่วยขยายสัญญาณนี้เพื่อต่อการวิเคราะห์ผล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างวงจรขยายสัญญาณอะคูสติก ซึ่งวงจรขยายสัญญาณที่สร้างขึ้นนี้มีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนด้วยกัน โดยส่วนแรกจะเป็นวงจรที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณชนิดสูง (High pass filter) ที่ความถี่ประมาณ 8.00 kHz โดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน เพื่อทำการตัดสัญญาณรบกวน (Noise) ออกไป ในส่วนที่สองและส่วนที่สามจะเป็นส่วนของการขยายสัญญาณซึ่งใช้ออปแอมป์ (Op-amp) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยในการขยายสัญญาณ โดยสัญญาณที่ผ่านการขยายจากส่วนนี้แล้วจะมีขนาดของแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นประมาณ 100 เท่า หรือ 20 dB ซึ่งรายละเอียดของวงจรขยายสัญญาณแสดงดังรูป 4.6 ดังนั้น สัญญาณที่ผ่านวงจรมานี้ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบประมวลผลต่อไปนั้น ก็จะเป็นสัญญาณที่มีค่าความถี่ที่สูงกว่า 8 kHz โดยขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้นจากเดิม 100 เท่า

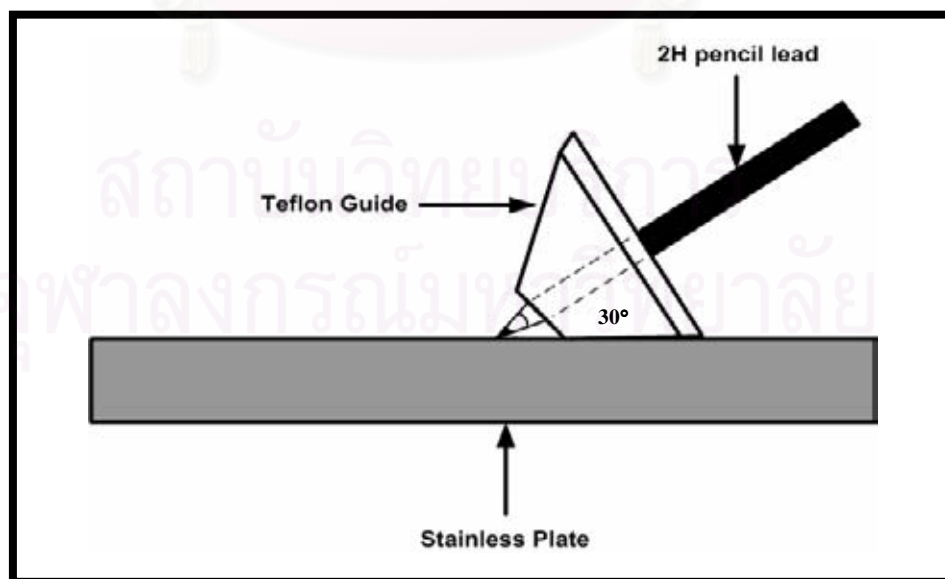


รูปที่ 4.5 วงจรขยายสัญญาณอะคูสติก [19]

บทที่ 5

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก

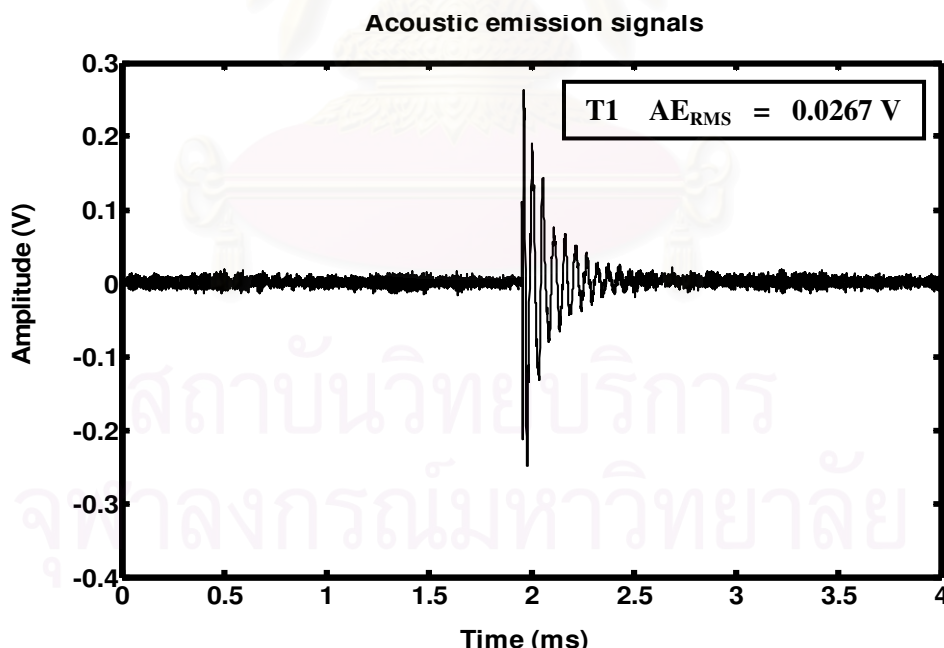
ในการตรวจสอบการทำงานของตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจำเป็นต้องมีการสอบเทียบค่ามาตรฐาน (Calibration) เพื่อทราบคุณสมบัติของตัวตรวจจับก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการสอบเทียบตามมาตรฐาน American Standard Testing Material (ASTM) หมายเลข E976-85 โดยเป็นการสร้างสัญญาณอะคูสติกจากแหล่ง AE artificial source ด้วยวิธีการหักไล่ดินสอแกรไฟต์ ความแข็งมาตรฐาน 2H ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ความยาว 3 มิลลิเมตร เที่ยงทำมุม 30 องศา กับแนวระดับ บนแผ่นเพลท ดังรูปที่ 5.1 เนื่องจากการหักไล่ดินสอเป็นวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกที่มีค่าความถี่ในช่วงกว้าง รวมทั้งยังเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการหาค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ แต่เนื่องจากสัญญาณที่เกิดจากการหักไล่ดินสอมีขนาดของแอมพลิจูดที่เล็กมาก จึงต้องนำสัญญาณผ่านวงจรขยายสัญญาณดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาทำการวิเคราะห์ทั้งในแกนเวลาและแกนความถี่ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจจับจากวัสดุทั้งสองชนิดคือ ฟิล์ม PVDF จำนวน 3 ตัวด้วยกัน โดยแต่ละตัวมีรูปแบบเดียวกันแต่มีค่าความหนาของฟิล์มและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่แตกต่างกันและจากสาร PZT จำนวน 3 ตัวเป็นรูปทรงกระบอกโดยมีค่าความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 และตาราง 4.2



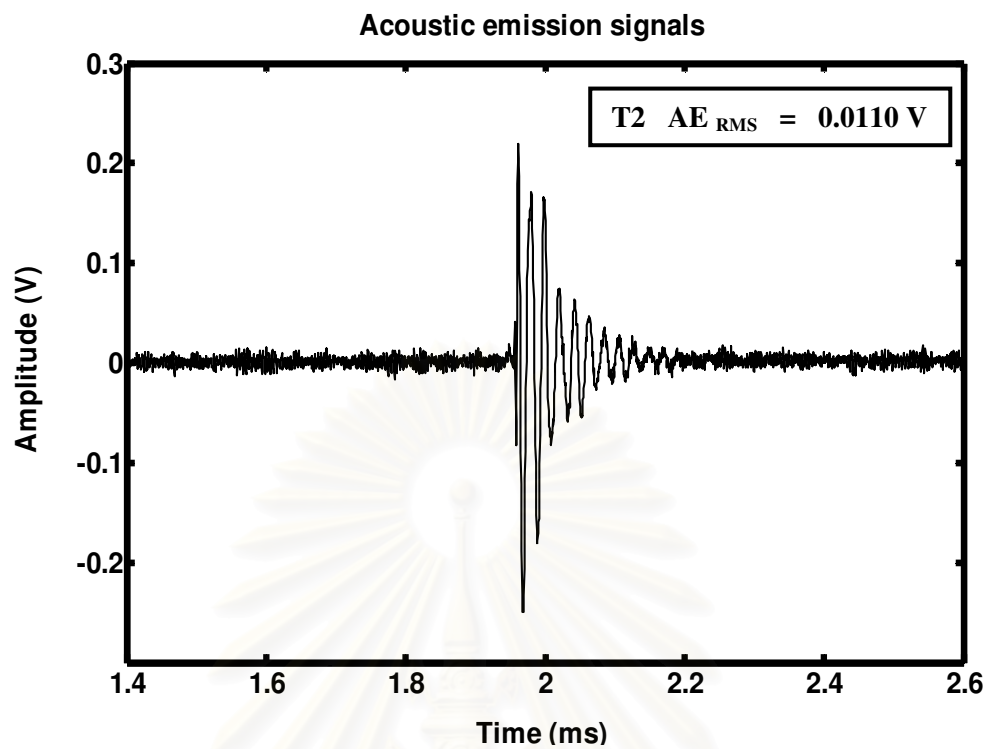
รูปที่ 5.1 การสร้างสัญญาณอะคูสติกจากแหล่งกำเนิดเสียงเทียมด้วยวิธีหักไล่ดินสอ [20]

5.1 การทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF

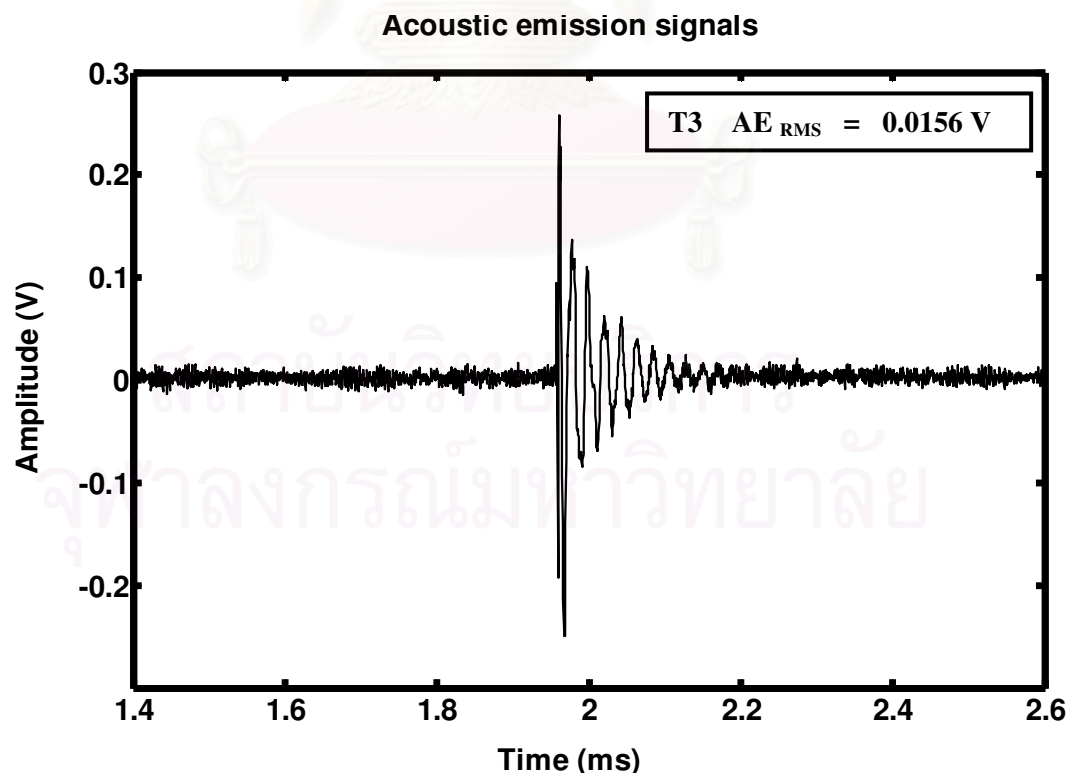
เมื่อนำตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF ทั้งสามตัว ได้แก่ ตัวตรวจจับ T1 ตัวตรวจจับ T2 และตัวตรวจจับ T3 ไปทำการทดสอบการใช้งานด้วยการตรวจจับคลื่นอะคูสติกจากการหักได้ดินสอ โดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปทำการเก็บสัญญาณในรูปของสัญญาณดิบ (Raw signal) หลังจากนั้นนำข้อมูลที่เก็บได้ ไปทำการวิเคราะห์ผลโดยการเขียนกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ในแกนเวลาผลการทดลองพบว่าลักษณะของสัญญาณในแกนเวลาที่ตรวจจับได้เป็นลักษณะของสัญญาณอะคูสติกแบบ burst กล่าวคือ เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ และเมื่อนำสัญญาณที่เก็บได้ซึ่งอยู่ในแกนเวลามาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพลังงานของคลื่นอะคูสติกที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของ RMS (Root mean square) [21] ดังสมการในภาคผนวกที่ ผลของสัญญาณและค่าพลังงาน RMS แสดงดังรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำสัญญาณในแกนเวลาไปวิเคราะห์โดยใช้การแปลงฟูเรียร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณในแกนความถี่ รายละเอียดของโปรแกรมและการแปลงฟูเรียร์แสดงไว้ในภาคผนวก ค. ลักษณะกราฟของสัญญาณอะคูสติกที่แปลงได้แสดงดังรูปที่ 5.5, 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ



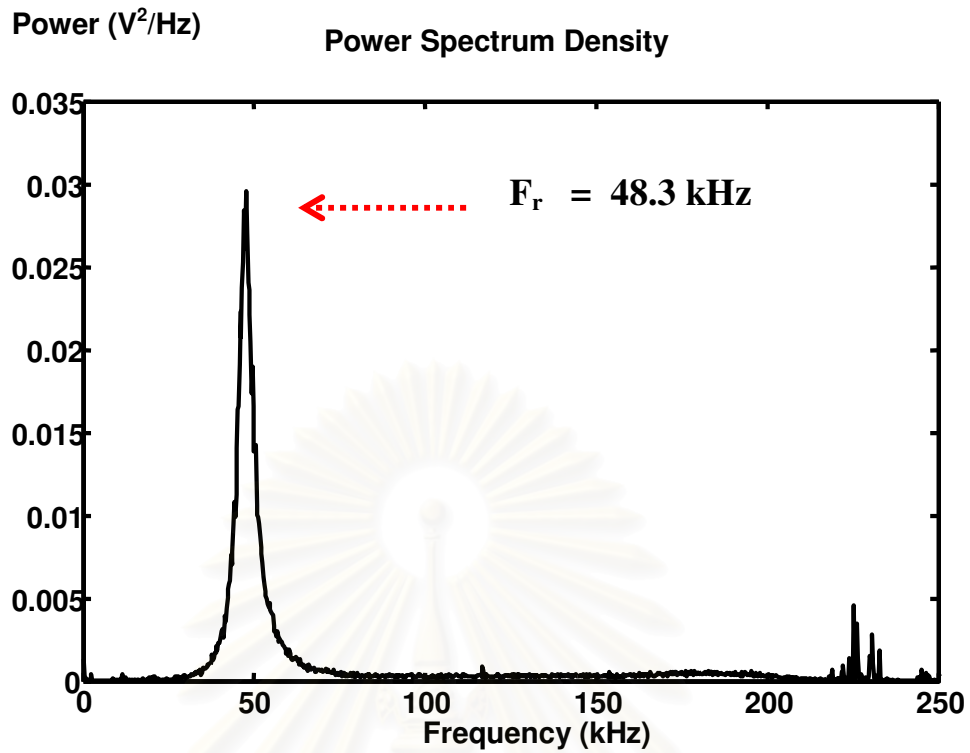
รูปที่ 5.2 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ T1



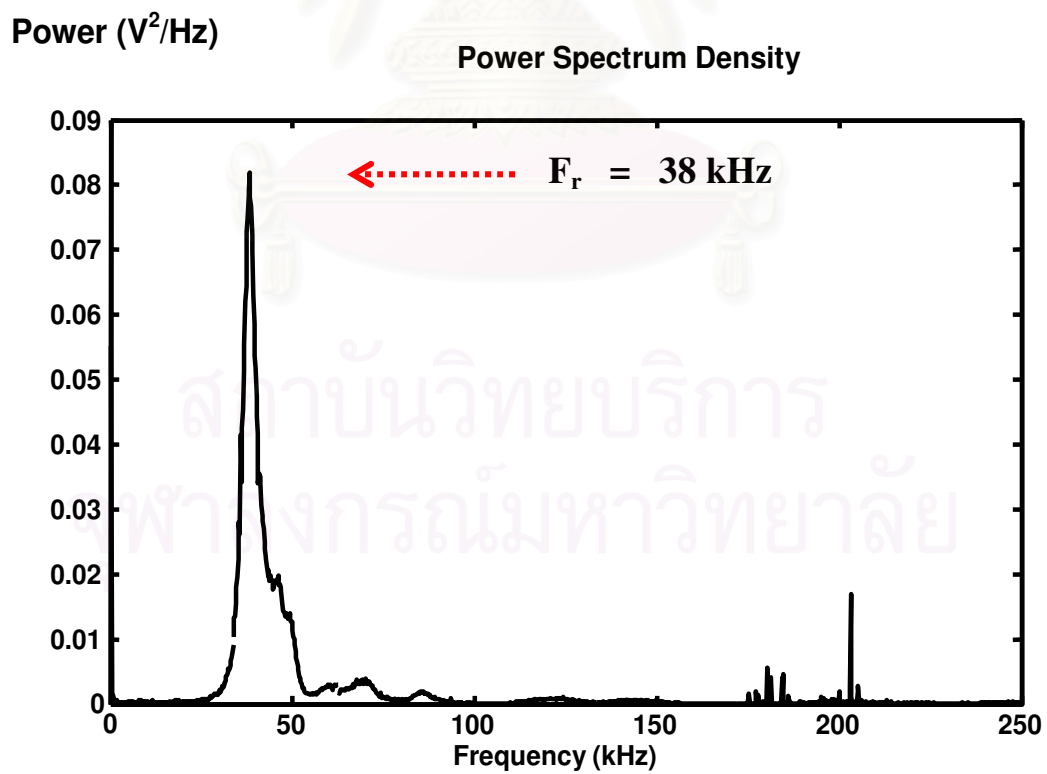
รูปที่ 5.3 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ T2



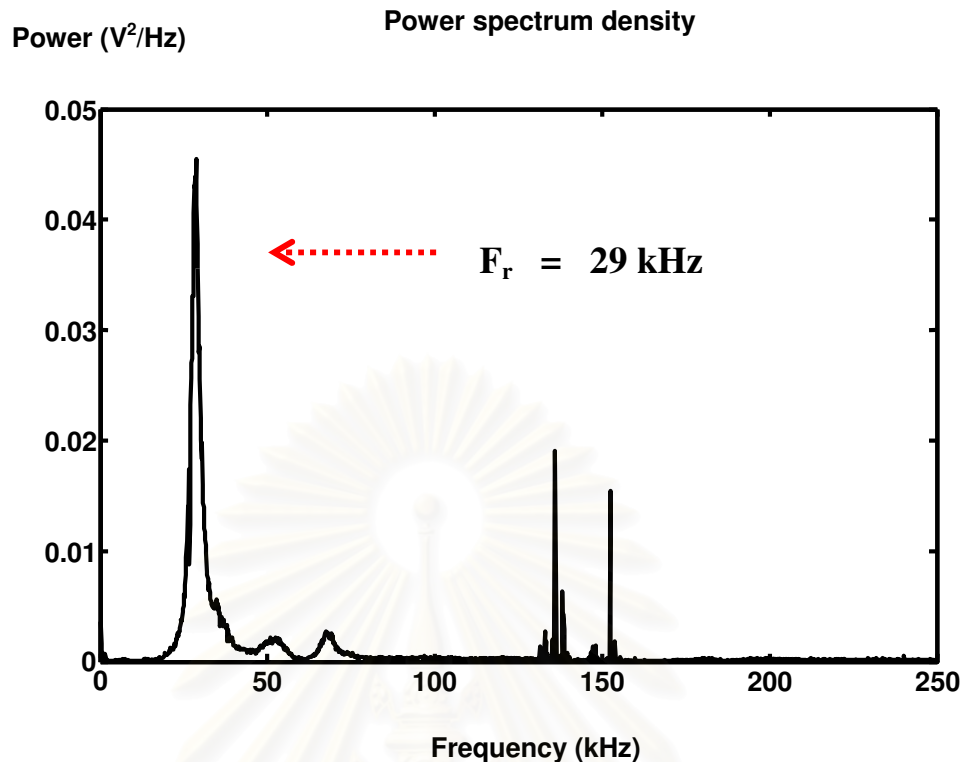
รูปที่ 5.4 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ T3



--รูปที่ 5.5 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T1



รูปที่ 5.6 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T2



รูปที่ 5.7 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T3

5.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของฟิล์ม PVDF กับค่าความถี่ต่อการตอบสนอง

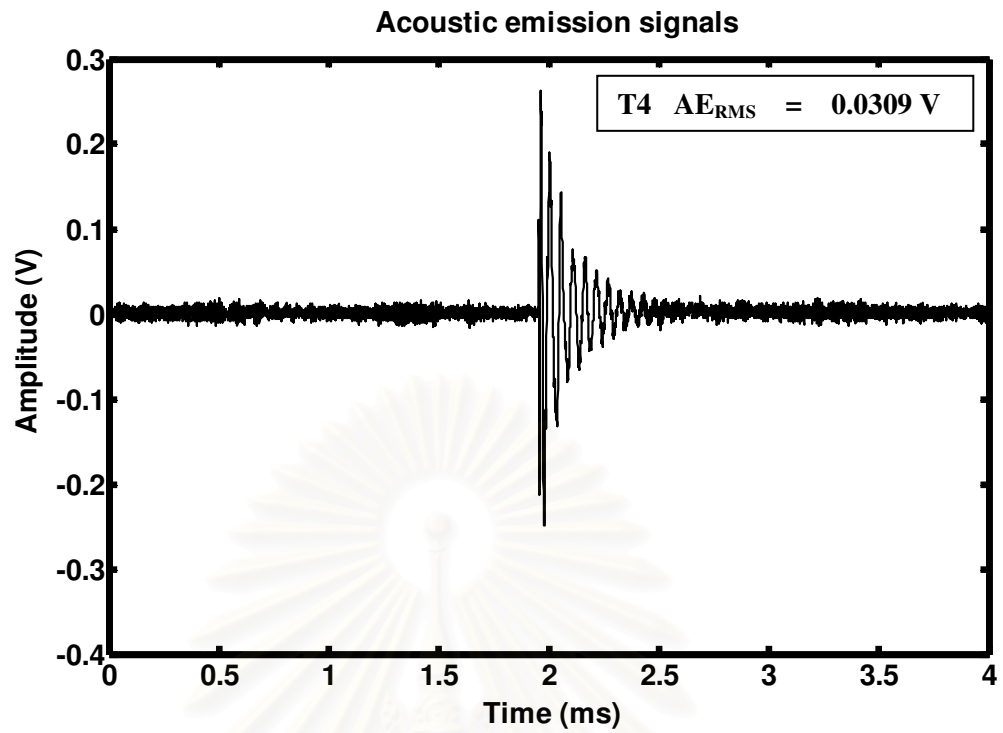
จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาสัญญาณที่ตรวจจับได้ทั้งในแกนเวลาและแกนความถี่จากตัวตรวจจับทั้งสามตัวพบว่า เมื่อพิจารณาตัวตรวจจับที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากัน แต่ความหนาของฟิล์มไม่เท่ากัน พบว่าตัวตรวจจับตัวที่ T2 ซึ่งใช้ฟิล์ม PVDF ที่มีความหนา 28 ไมโครเมตร มีค่าของความถี่ต่อการตอบสนองอยู่ที่ 38 kHz เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับตัวที่ T3 ซึ่งใช้ฟิล์มที่มีความหนา 52 ไมโครเมตร และมีค่าความถี่ต่อการตอบสนองที่ 29 kHz จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ฟิล์ม PVDF ที่มีความหนาน้อยกว่ามาสรางเป็นตัวตรวจจับ จะสามารถตรวจจับสัญญาณในช่วงความถี่ต่อการตอบสนองที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความสัมพันธ์ดังสมการ $f = \frac{v_s}{2d}$ [3] เมื่อ f คือ ความถี่, v_s คือ ความเร็วเสียงในวัสดุ และ d คือความหนาของวัสดุกล่าวคือ เมื่อความหนาของฟิล์มที่ใช้มีค่าน้อยกว่าจะทำให้ค่าความถี่ต่อการตอบสนองมีค่ามากกว่า ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาสัญญาณที่ตรวจจับได้ในแกนเวลา จากตัวตรวจจับตัวที่ T1 และ T2 ซึ่งสรางจากฟิล์ม PVDF ที่มีความหนาเท่ากันคือ 28 ไมโครเมตร แต่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงต่างกัน โดยตัวตรวจจับ

ตัวที่ T1 มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 3.669 Mrayl ขณะที่ตัวตรวจจับตัวที่ T2 มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 2.971 Mrayl จากรูปที่ 5.2 5.3 และ 5.4 แสดงค่า AE_{RMS} ของสัญญาณที่ตรวจจับจากตัวตรวจจับแต่ละตัว จะเห็นได้ว่า ค่า AE_{RMS} ของสัญญาณที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับตัวที่ T1 มีค่าสูงกว่า ค่า AE_{RMS} ของสัญญาณที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับตัวที่ T2 ทั้งนี้เนื่องจากตัวตรวจจับตัวที่ T1 มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่ใกล้เคียงกับฟิล์ม PVDF จากสมการที่ (2.75) และ (2.76) ซึ่งพบว่าถ้าค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการส่งผ่านของคลื่นมีค่าสูงด้วย ทำให้ตัวตรวจจับสามารถจับสัญญาณที่ส่งผ่านมาได้มากกว่า ผลก็คือค่า AE_{RMS} มีค่าสูงกว่าตัวตรวจจับตัวที่ T2 ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่ไม่ใกล้เคียงกับฟิล์ม PVDF และสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ จากรูปที่ 5.5 พบว่าค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T1 มีค่าสูงที่สุด คือ 48.3 kHz ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่านอกจากความหนาของฟิล์มที่ใช้แล้ว ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงก็จะส่งผลต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนองด้วย

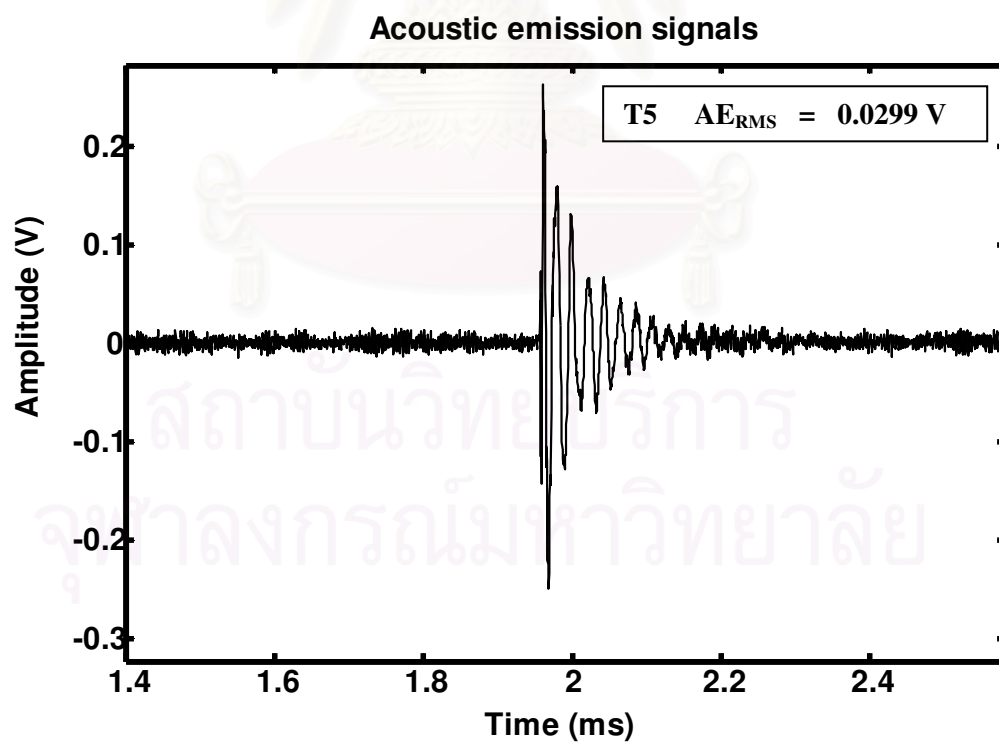
5.3 การทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT

เมื่อนำตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT ทั้งสามตัวคือ ตัวตรวจจับ T4 T5 และ T6 ไปทดสอบการใช้งานโดยการตรวจจับคลื่นอะคูสติกจากการหักใส่ดินสอ แล้วใช้เครื่องออสซิลโลสโคปเก็บสัญญาณ จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของสัญญาณในแกนเวลาที่ตรวจจับได้เป็นลักษณะของสัญญาณอะคูสติกแบบชั่วคราว เหมือนกับสัญญาณที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF แสดงดังรูปที่ 5.8, 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ และเมื่อนำสัญญาณที่เก็บได้ซึ่งอยู่ในแกนเวลามาทำการวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะของสัญญาณในแกนความถี่ ซึ่งผลของสัญญาณที่แปลงได้แสดงดังรูปที่ 5.11, 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ

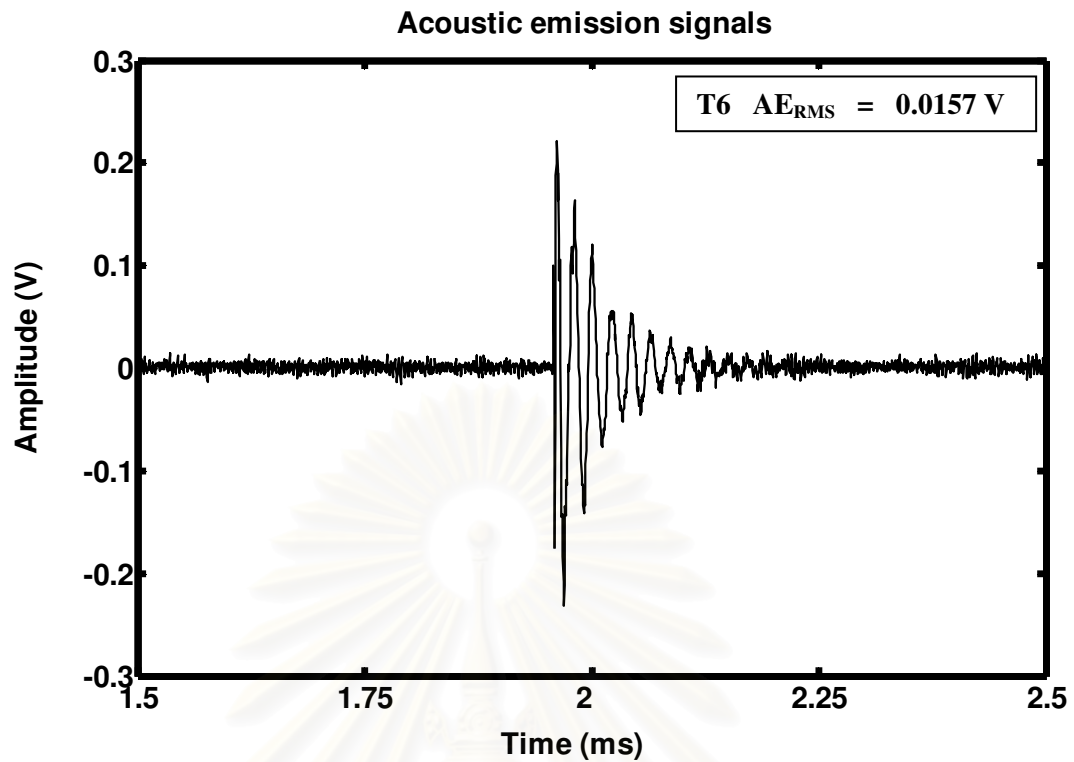
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



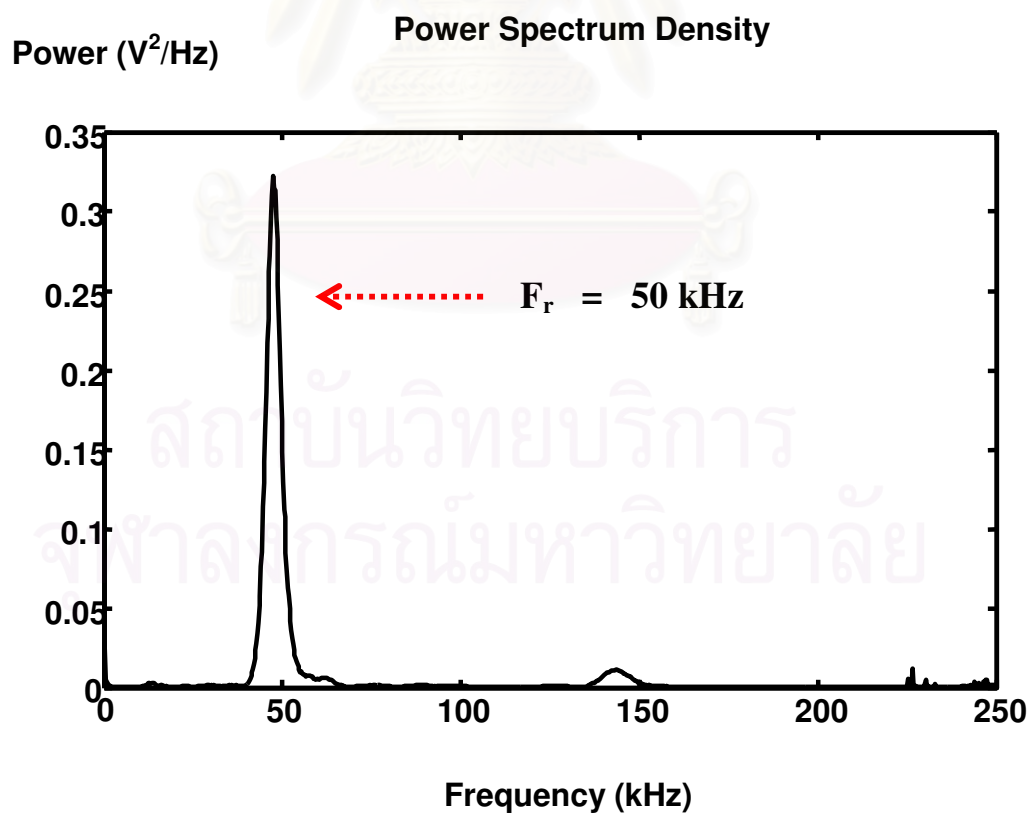
รูปที่ 5.8 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ T4



รูปที่ 5.9 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ T5



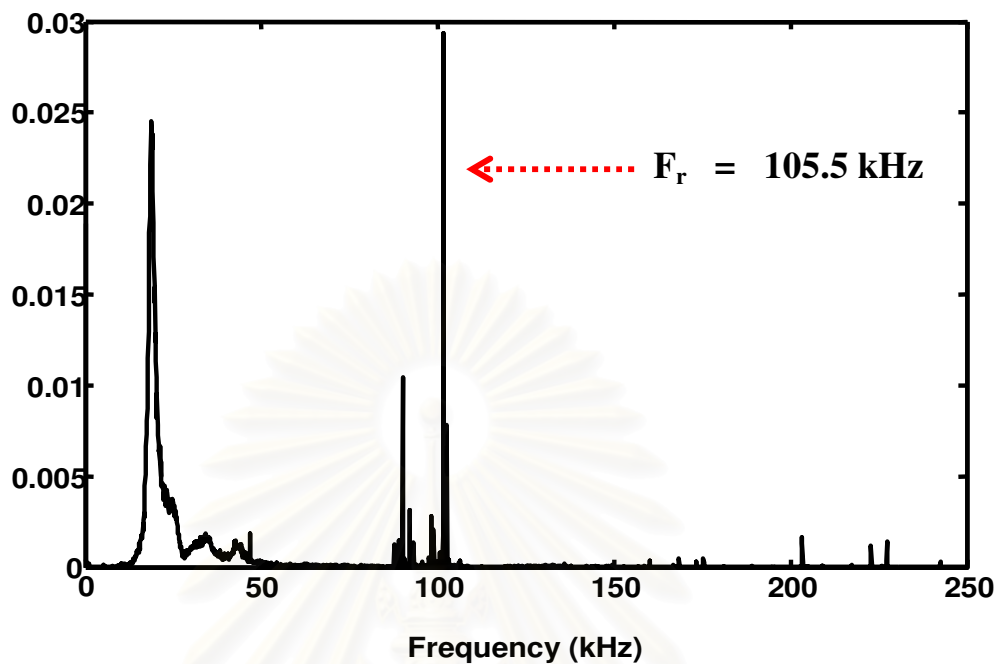
รูปที่ 5.10 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ T6



รูปที่ 5.11 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T4

Power (V^2/Hz)

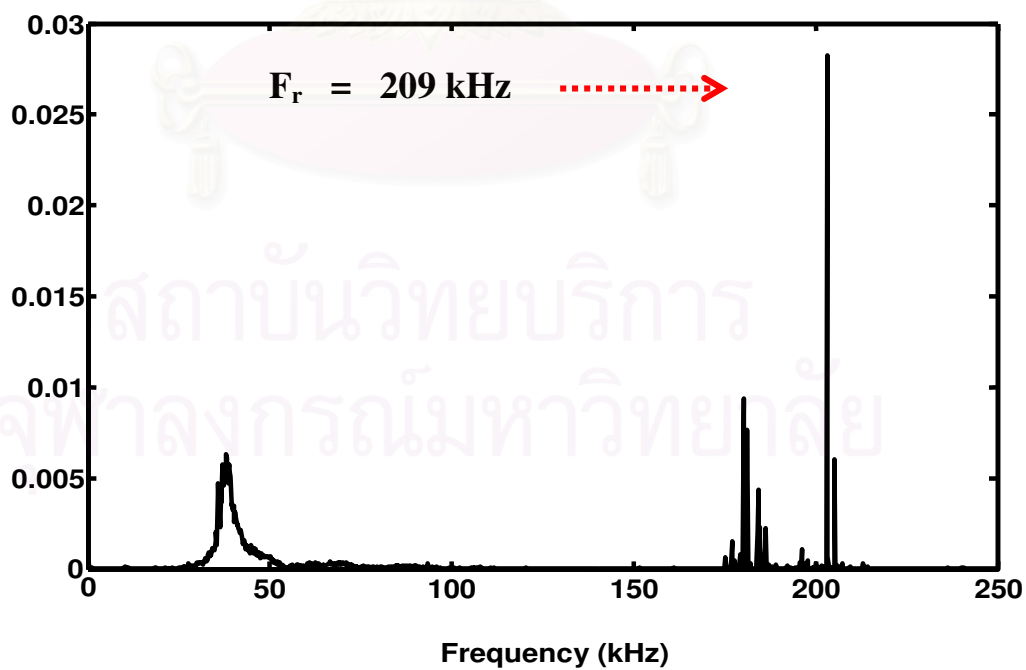
Power Spectrum Density



รูปที่ 5.12 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T5

Power (V^2/Hz)

Power Spectrum Density



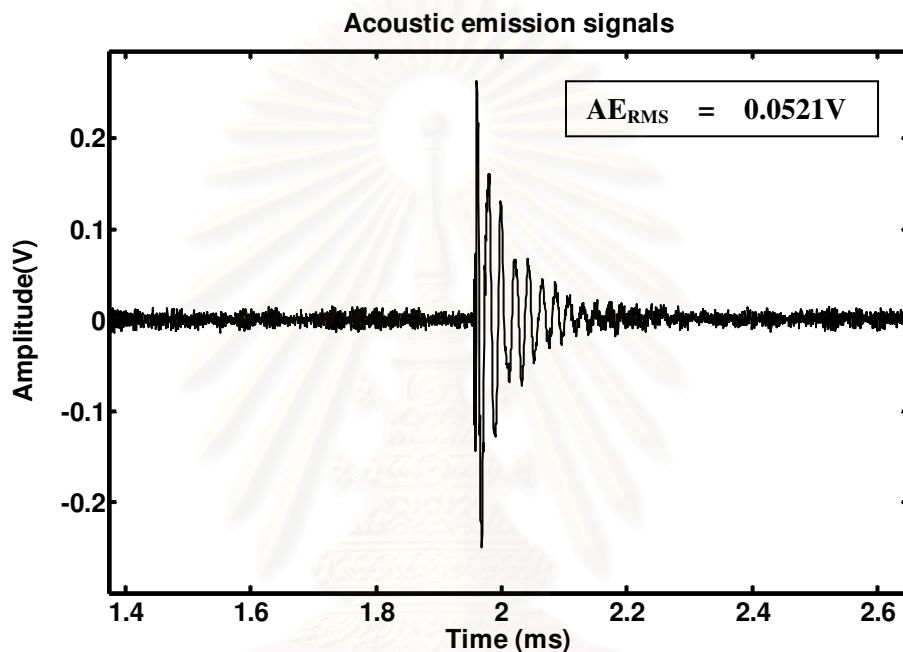
รูปที่ 5.13 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับ T6

5.4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของสาร PZT กับค่าความถี่ต่อการตอบสนอง

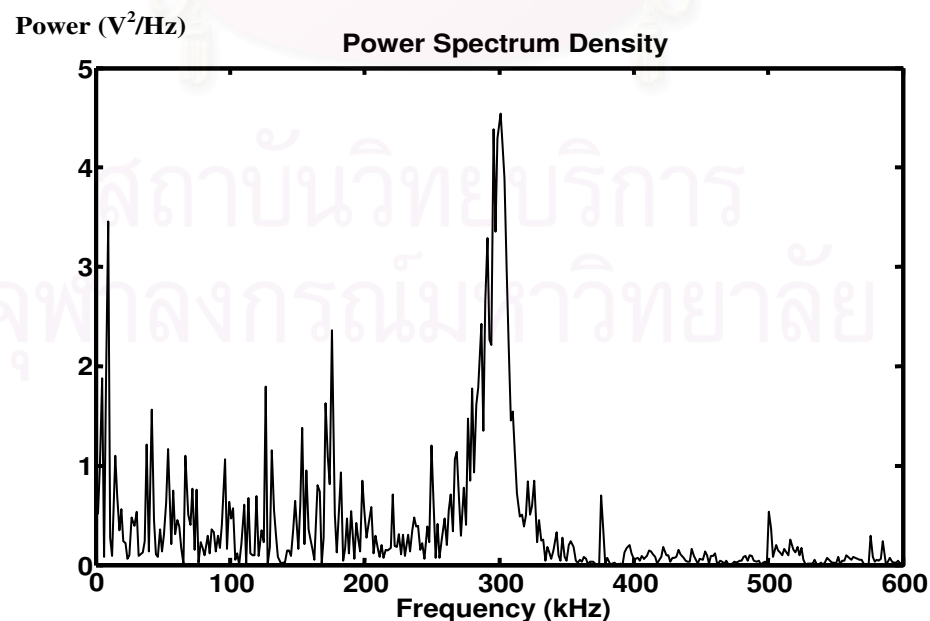
จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาสัญญาณที่ตรวจจับได้ทั้งในแกนเวลาและแกนความถี่จากตัวตรวจจับทั้งสามตัว เมื่อพิจารณาตัวตรวจจับตัวที่ T4 ซึ่งใช้สาร PZT ที่มีความหนา 1.0 mm. พบว่ามีค่าของความถี่ต่อการตอบสนองที่ประมาณ 50 kHz ดังรูปที่ 5.11 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับตัวที่ T5 ซึ่งใช้สาร PZT ที่มีความหนา 0.8 mm. ซึ่งมีค่าความถี่ต่อการตอบสนองที่ 105.5 kHz ดังรูปที่ 5.12 และเมื่อพิจารณาตัวตรวจจับตัวที่ T6 ซึ่งใช้สาร PZT ที่มีความหนา 0.5 mm มีค่าความถี่ต่อการตอบสนองที่ 209 kHz จะเห็นได้ว่าเมื่อสาร PZT ที่มีขนาดความหนาน้อยกว่ามาสร้างเป็นตัวตรวจจับ จะสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกในช่วงความถี่ต่อการตอบสนองที่สูงกว่า เช่นเดียวกันกับฟิล์ม PVDF และ เมื่อพิจารณาถึงค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงซึ่ง ตัวตรวจจับตัวที่ T4 และ T5 มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่า พบว่าค่า AE_{RMS} ของสัญญาณที่ตรวจจับจากตัวตรวจจับแต่ละตัว มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อพิจารณาตัวตรวจจับตัวที่ T6 จะเห็นได้ว่า ค่า AE_{RMS} ของสัญญาณที่ตรวจจับได้มีค่าต่ำกว่าตัวตรวจจับอื่นๆ ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกันกับฟิล์ม PVDF กล่าวคือ ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการส่งผ่านของคลื่นมีค่าสูงด้วย ทำให้ตัวตรวจจับสามารถจับสัญญาณที่ส่งผ่านมาได้มากกว่า ผลก็คือค่า AE_{RMS} มีค่าสูงกว่าตัวตรวจจับตัวที่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่ไม่ใกล้เคียงสาร PZT

5.5 ผลการทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับสนอกจากบริษัท PAC

เมื่อนำตัวตรวจจับสนอกจากบริษัท PAC (Physical Acoustics Corporation) หมายเลข R15 ที่สร้างจากสาร PZT มาทำการตรวจจับสนกสัญญาณอะคูสติกจากการหักไส้ดินสอ เมื่อทำการแปลงสัญญาณจากแกนเวลาให้อยู่ในแกนความถี่ จากผลการทดลองพบว่า ค่าของความถี่ต่อการตอบสนองมีค่าเท่ากับ 300 kHz ซึ่งตรงกับข้อมูลที่ทางบริษัท PAC ระบุไว้ ผลของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.14 และ 5.15



รูปที่ 5.14 ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน R15



รูปที่ 5.15 ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน R15

บทที่ 6

การประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเฝ้าระวังเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ตัวตรวจจذب ซึ่งปัจจุบันตัวตรวจจذبที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ ตัวตรวจจذبที่สร้างจากสาร PZT ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำตัวตรวจจذبที่สร้างขึ้นจากสาร PZT และฟิล์ม PVDF ไปประยุกต์ใช้งานจริงในการเฝ้าระวังสภาพหล่อลื่นของตลับลูกปืนในเครื่องจักรกลหมุนและการเฝ้าระวังการรั่วของท่อ

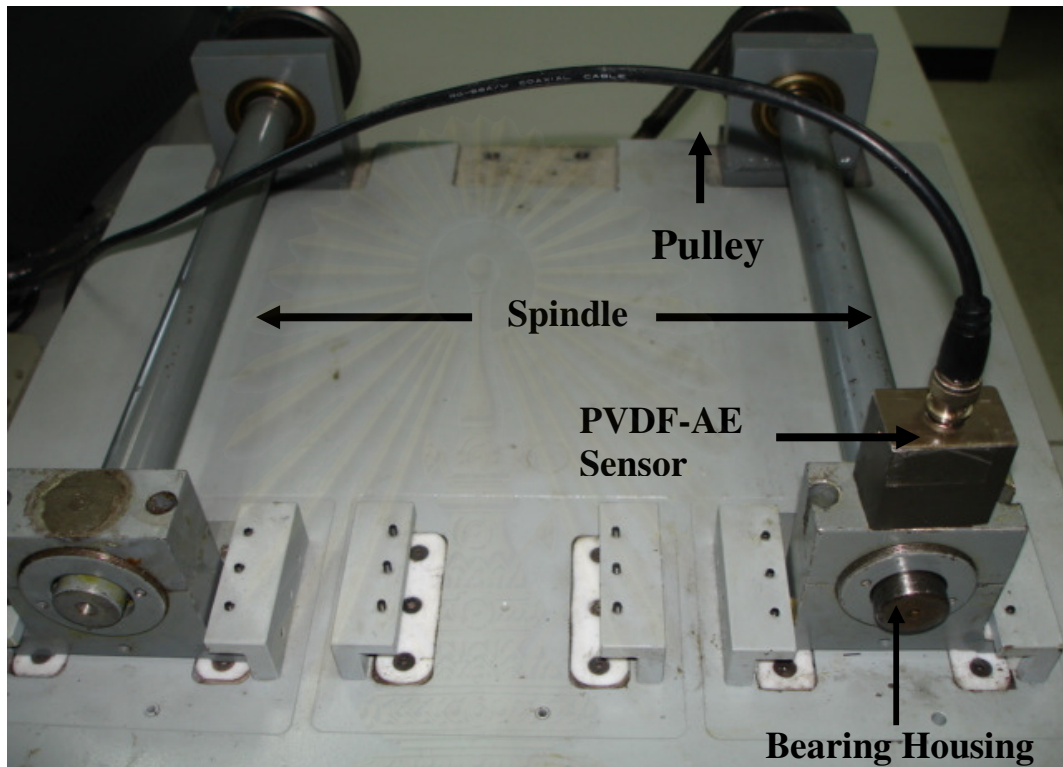
6.1 การเฝ้าระวังสภาพหล่อลื่นของตลับลูกปืนด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกจากตัวตรวจจذبที่สร้างจากฟิล์ม PVDF [22,23,24]

ตลับลูกปืนเป็นส่วนสำคัญสำหรับเครื่องจักรกลประเภทเครื่องจักรหมุน เมื่อเครื่องจักรกลใช้งานเป็นเวลานาน จะมีผลทำให้ตลับลูกปืนเกิดการสึกหรอและแตกร้าวเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระทบกันของลูกปืน ซึ่งจากผลของการแตกร้าวนี้ จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นอะคูสติก เราสามารถที่จะตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืนได้ก่อนที่ตลับลูกปืนนั้นจะเกิดการแตกร้าวซึ่งจะนำสู่ความเสียหายต่อเครื่องจักรกลหมุน ฉะนั้นการทราบความเสียหายก่อนโดยการเปลี่ยนตลับลูกปืนที่เสื่อมสภาพ เพื่อลดความเสียหายโดยการใส่สารหล่อลื่น (Lubricant) จะช่วยให้ลูกปืนเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาสภาพการหล่อลื่นของตลับลูกปืน โดยใช้ตลับลูกปืน 3 ประเภทด้วยกัน คือ ตลับลูกปืนที่ไม่มีการใส่สารหล่อลื่น ตลับลูกปืนที่ใส่สารหล่อลื่นและตลับลูกปืนที่ใส่สารหล่อลื่นผสมแท่งกราไฟต์ ทั้งนี้ได้ใช้ตลับลูกปืนชนิดเดียวกันและมีขนาดเท่ากัน หลังจากนั้นทำการศึกษาเพื่อหาค่าพลังงานของคลื่นอะคูสติกที่ปลดปล่อยออกมา โดยพิจารณาในค่าของ AE_{RMS} จากตลับลูกปืนทั้ง 3 ประเภท

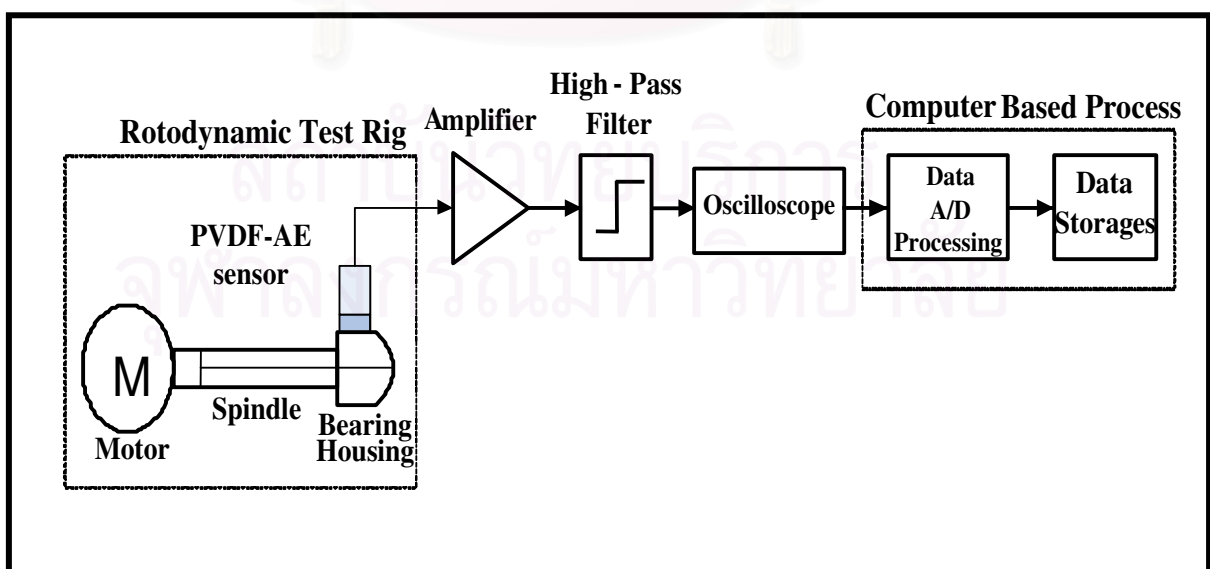
ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 6.1 โดยรูปที่ 6.2 เป็นรูปโครงสร้างของระบบที่ใช้ในการตรวจสอบ โดยใช้ตลับลูกปืนประเภทที่ไม่ใส่สารหล่อลื่น
2. เปิดเครื่องจักรกลหมุน โดยตั้งค่าการหมุนไว้ที่ 99 rpm ,1,500 rpm และ 3,000 rpm ตามลำดับ
3. เก็บข้อมูลโดยใช้ Data acquisition เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์

4. นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าพลังงาน AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของความถี่ของเครื่องจักรกลหมุนต่างๆ กัน
6. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 5 โดยใช้ตลับลูกปืนประเภทที่ใส่สารหล่อลื่นและตลับลูกปืนประเภทที่ใส่สารหล่อลื่นผสมแท่งกราไฟต์



รูปที่ 6.1 รูปถ่ายของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้ในการตรวจสอบ [23]



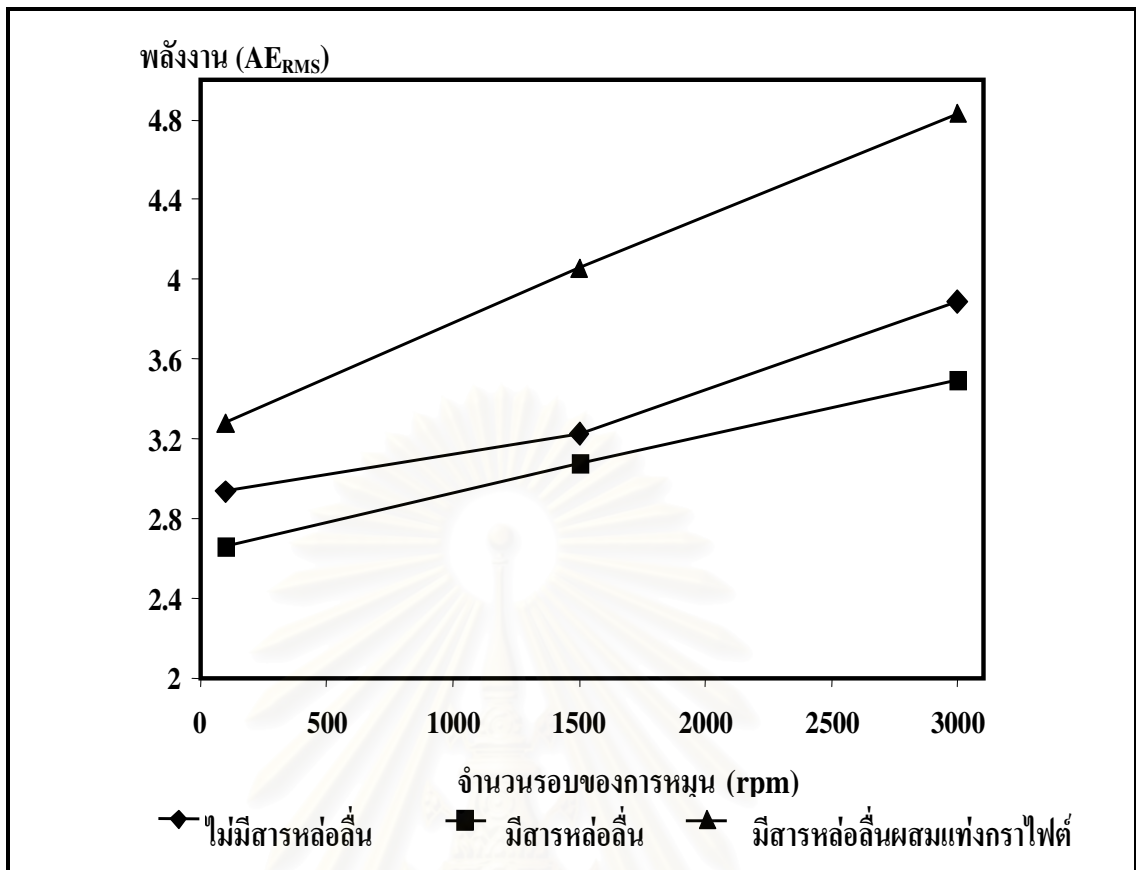
รูปที่ 6.2 โครงสร้างของระบบของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้ในการตรวจสอบ [23]

ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.1 แสดงค่า AE_{RMS} ที่เงื่อนไขต่างๆ กัน และรูปภาพที่ 6.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับจำนวนรอบของเครื่องจักรกลหมุนที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาตลับลูกปืนประเภทเดียวกันพบว่า ที่จำนวนรอบของเครื่องจักรกลหมุนที่ค่า 3,000 rpm จะมีค่า AE_{RMS} มากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อทำให้เครื่องจักรกลหมุนเร็วขึ้น จะทำให้ตลับลูกปืนเกิดการกระทบกันมากขึ้น จึงส่งผลให้มีการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมามากขึ้นเช่นกัน ส่วนจำนวนรอบของการหมุนที่ 1,500 rpm และ 99 rpm จะมีค่า AE_{RMS} ต่ำลงไปตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบของการหมุนมีค่าเท่ากัน แต่ประเภทของตลับลูกปืนต่างกัน พบว่า ตลับลูกปืนประเภทที่ใส่สารหล่อลื่นผสมแท่งกราไฟต์มีค่า AE_{RMS} สูงที่สุด ส่วนตลับลูกปืนประเภทที่ไม่มีสารหล่อลื่นมีค่า AE_{RMS} รองลงมาและตลับลูกปืนประเภทที่มีสารหล่อลื่นมีค่า AE_{RMS} ต่ำที่สุด สาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อเครื่องจักรกลหมุนจะทำให้ตลับลูกปืนเกิดการเสียดสีกัน ดังนั้นตลับลูกปืนประเภทที่มีสารหล่อลื่นผสมกับแท่งกราไฟต์ จะเกิดการกระทบกันระหว่างตัวตลับลูกปืนกับแท่งกราไฟต์ จึงทำให้ปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมามากที่สุด ส่วนตลับลูกปืนประเภทที่ไม่มีสารหล่อลื่น จะทำให้ตลับลูกปืนเกิดการกระทบกัน จึงปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมาแต่ที่ค่าน้อยกว่าประเภทที่มีแท่งกราไฟต์ ส่วนตลับลูกปืนประเภทที่ใส่สารหล่อลื่นจะปลดปล่อยคลื่นอะคูสติกน้อยที่สุด เนื่องจากสารหล่อลื่นที่ใส่เข้าไปนั้นจะช่วยลดผลการเสียดสีกันของตลับลูกปืน

ตารางที่ 6.1 AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของประเภทของตลับลูกปืนและจำนวนรอบของการหมุนต่างๆ [23]

ประเภทของตลับลูกปืน	ค่าพลังงานของการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติก (AE_{RMS})		
	99 rpm	1500 rpm	3000 rpm
ไม่มีสารหล่อลื่น	2.94	3.23	3.89
มีสารหล่อลื่น	2.66	3.08	3.50
มีสารหล่อลื่นผสมแท่งกราไฟต์	3.28	4.06	4.83



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับจำนวนรอบของเครื่องจักรกลหมุนที่เงื่อนไขต่างๆ [23]

6.2 การเฝ้าระวังการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก [25,26]

ในระบบอุตสาหกรรม อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการขนส่งอย่างหนึ่งก็คือ ท่อ (Pipeline) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงสสารซึ่งอยู่ในรูปของของเหลวและก๊าซจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น การส่งน้ำมันและก๊าซธรรมชาติจากกลางทะเลมาที่ชายฝั่ง ดังนั้นถ้าท่อที่ใช้ในการลำเลียงเกิดการรั่วหรือเกิดรอยร้าวขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบการผลิตอย่างมากและเกิดการสูญเสียเปล่า วิธีการตรวจสอบด้วยการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกจึงนำมาใช้เพื่อเฝ้าระวังปัญหาดังกล่าวที่จะเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกมีข้อดีคือ สามารถตรวจสอบได้ในบริเวณที่ไม่สามารถเข้าไปถึงได้ ใช้พื้นที่สำหรับติดตั้งตัวตรวจจับเพียงเล็กน้อย อีกทั้งยังสามารถเฝ้าระวัง ณ เวลาที่เกิดขึ้นจริง จึงสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที ก่อนที่ท่อจะเกิดความเสียหาย ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม PVDF และสาร PZT มาใช้งานสำหรับเฝ้าระวังการรั่วของท่ออากาศขนส่ง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถี่ของการเกิดการรั่วอยู่ในช่วงประมาณ 30 – 400 kHz ซึ่งค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับทั้งสองชนิดอยู่ในช่วงความถี่ของการรั่ว จึงสามารถที่จะตรวจสอบการรั่วได้ โดยใช้เงื่อนไขสำหรับการทดลองคือ การรั่วที่ขนาดต่างๆ กัน และค่าความดันของลมที่อัดให้กับท่อที่ค่าต่างๆ กัน

6.2.1 การเฝ้าระวังการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF

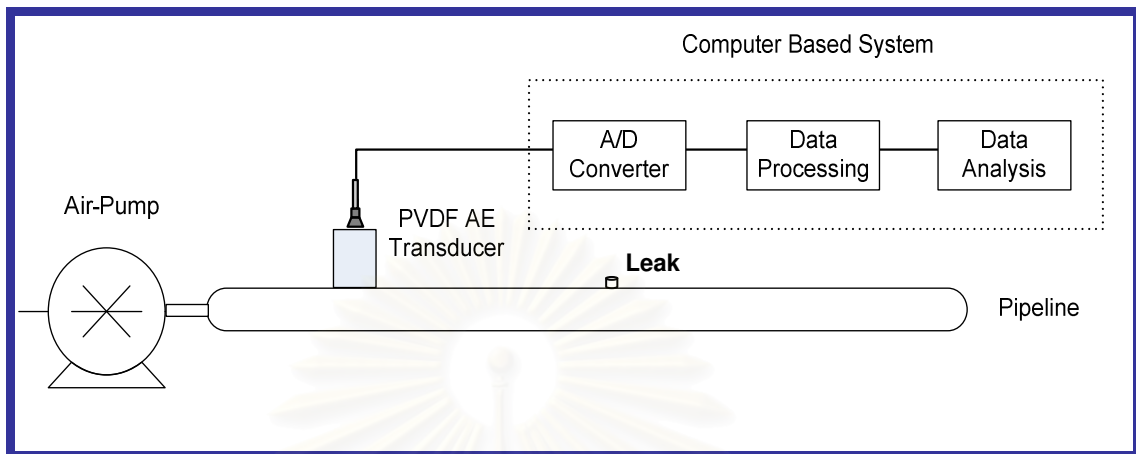
ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปั๊มลม ชุดอุปกรณ์ท่อที่ต้องการตรวจสอบ ตัวตรวจจับ PVDF วงจรขยายสัญญาณ Data acquisition และคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่

6.4

2. ตั้งค่าขนาดของรูรั่วของท่อที่ต้องการตรวจสอบ โดยใช้ขนาดของรูรั่วที่ 0.5 เซนติเมตร
3. ตั้งค่าความดันจากเครื่องปั๊มลมไว้ที่ 1 bar หลังจากนั้นเปิดเครื่องปั๊มเข้าสู่ท่อลม
4. เก็บข้อมูลโดยใช้ Labview card นำข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์
5. เปลี่ยนค่าเงื่อนไขของความดันจากปั๊มลมไปที่ 2 bar และ 3 bar ตามลำดับ
6. เปลี่ยนขนาดของรูรั่วของท่อลมจาก 0.5 เซนติเมตร ไปเป็นขนาด 1.0 เซนติเมตร
7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3 – 6

8. นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าพลังงาน AE_{RMS} โดยใช้โปรแกรม Matlab ที่เงื่อนไขของค่าความดัน และขนาดของรูรั่วต่างๆ กัน



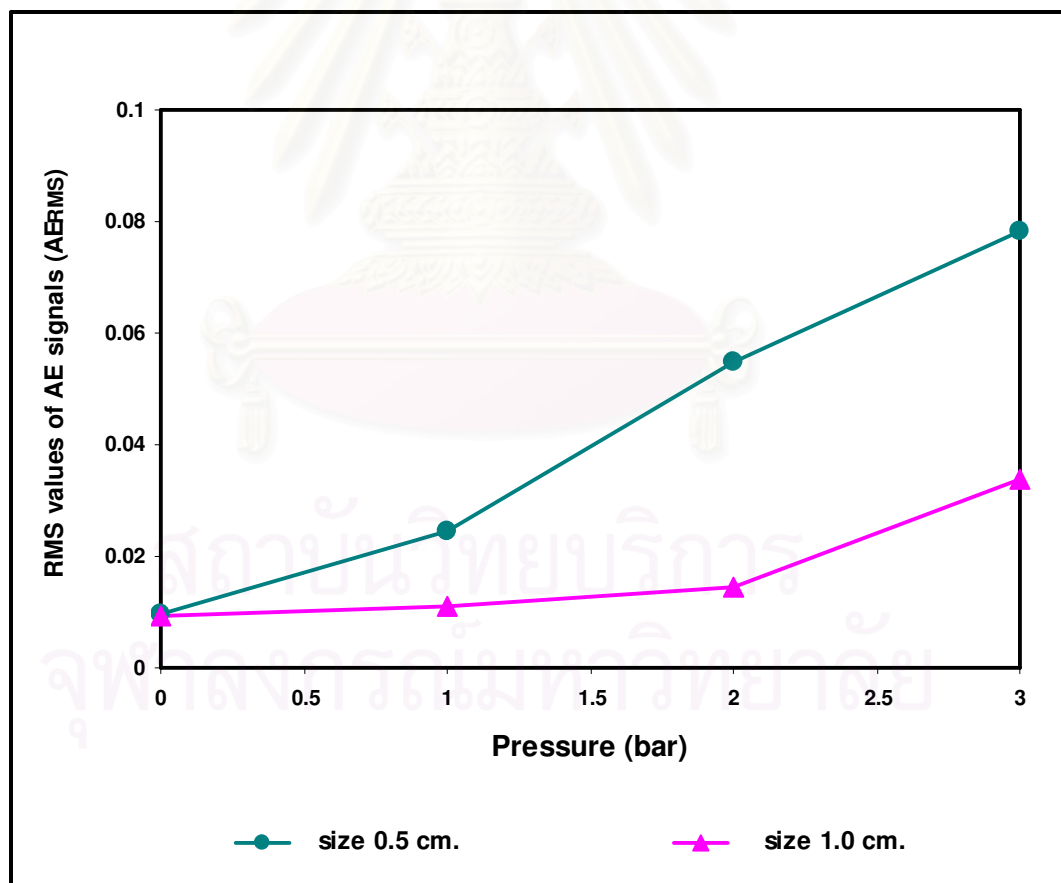
รูปที่ 6.4 โครงสร้างของระบบการตรวจจับรูรั่วของท่อ [25]

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า AE_{RMS} ที่เงื่อนไขความดันและขนาดของรูรั่วของท่อต่างกัน จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ขนาดของรูรั่วเดียวกันพบว่า ความดันที่ 3 bar เมื่อใช้ตัวตรวจจับตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก จะมีค่า AE_{RMS} มากที่สุด สาเหตุเนื่องมาจากเมื่อขนาดของความดันเพิ่มขึ้นในขณะที่ขนาดรูรั่วเท่าเดิมนั้น แรงแดันภายในท่อซึ่งแปรผันตรงกับความดันจะมีค่ามากขึ้น ค่าพลังงานของคลื่นอะคูสติกที่ตรวจจับได้มีค่ามากที่สุด ส่วนค่าความดันที่ 2 bar และ 1 bar จะมีค่า AE_{RMS} ต่ำลงมา ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ความดันมีค่าเท่ากัน แต่ขนาดของรูรั่วของท่อต่างกัน พบว่า ขนาดของรูรั่วที่มีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร จะมีค่า AE_{RMS} สูงที่สุด ส่วนขนาดของรูรั่วที่ 1.0 เซนติเมตรจะมีค่า AE_{RMS} รองลงมา สาเหตุเนื่องมาจาก เมื่ออัตราการไหลของอากาศในท่อมี่ค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อพื้นที่หน้าตัดของการไหลมีค่าน้อยจะทำให้ความเร็วของอากาศภายในท่อมี่ค่ามาก จึงทำให้ความเข้มของสัญญาณอะคูสติกที่ปล่อยออกมามากด้วย ส่วนขนาดของรูรั่วของท่อที่ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของการไหลใหญ่กว่าจึงส่งผลให้ความเร็วของอากาศที่ส่งออกมาในรูปคลื่นอะคูสติกมีค่าน้อยกว่า ซึ่งรูปภาพที่ 6.5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันจากปั๊มลมที่เงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 6.2 AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของประเภทของความดันและรูปร่างที่ขนาดต่างๆ [25]

ขนาดของรูปร่าง (เซนติเมตร)	ค่าพลังงานของการปล่อยคลื่นอะคูสติก (AE_{RMS})			
	ความดันของอากาศภายในท่อ (bar)			
	0	1	2	3
0.5	0.0095	0.0244	0.0549	0.0782
1	0.0094	0.0110	0.0144	0.0339

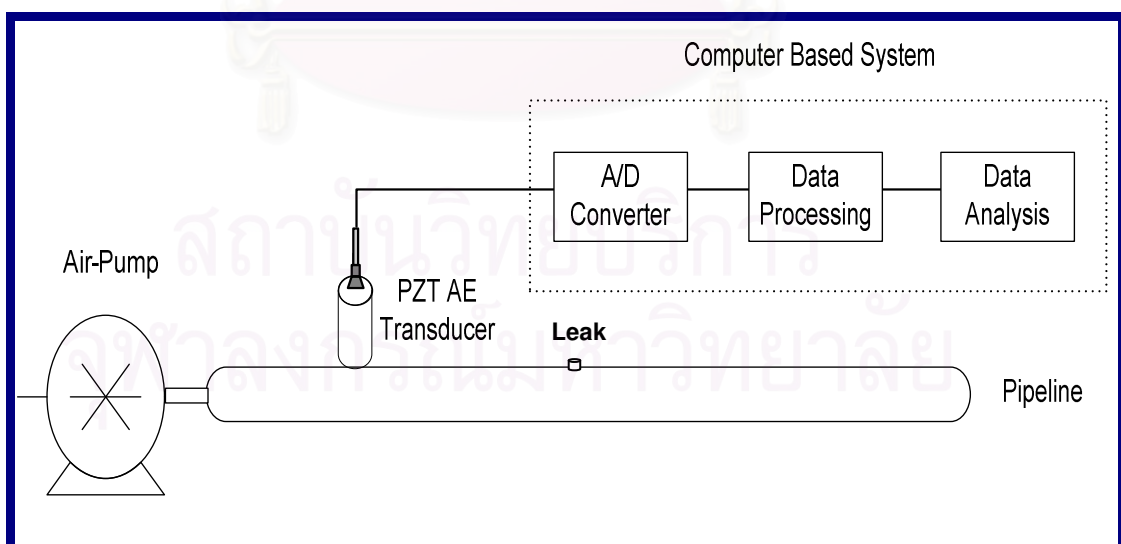


รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันที่เงื่อนไขต่างๆ [25]

6.2.2 การเฝ้าระวังการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก ด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT

ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปั๊มลม ชุดอุปกรณ์ท่อที่ต้องการตรวจสอบ ตัวตรวจจับ PZT วงจรขยายสัญญาณ Data acquisition และคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 6.6
2. ตั้งค่าขนาดของรูรั่วของท่อที่ต้องการตรวจสอบ โดยใช้ขนาดของรูรั่วที่ 0.5 เซนติเมตร
3. ตั้งค่าความดันจากเครื่องปั๊มลมไว้ที่ 2 bar หลังจากนั้นเปิดเครื่องปั๊มเข้าสู่ท่อลม
4. เก็บข้อมูลโดยใช้ Data acquisition นำข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์
5. เปลี่ยนค่าเงื่อนไขของความดันจากปั๊มลมไปที่ 1.5 bar 1.0 bar 0.75 bar 0.5 bar และ 0.25 bar ตามลำดับ
6. เปลี่ยนขนาดของรูรั่วของท่อลมจาก 0.5 เซนติเมตร ไปเป็นขนาด 0.7 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร ตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 3 – 6
8. นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาค่าพลังงาน AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของความดัน และขนาดของรูรั่วต่างๆ กัน



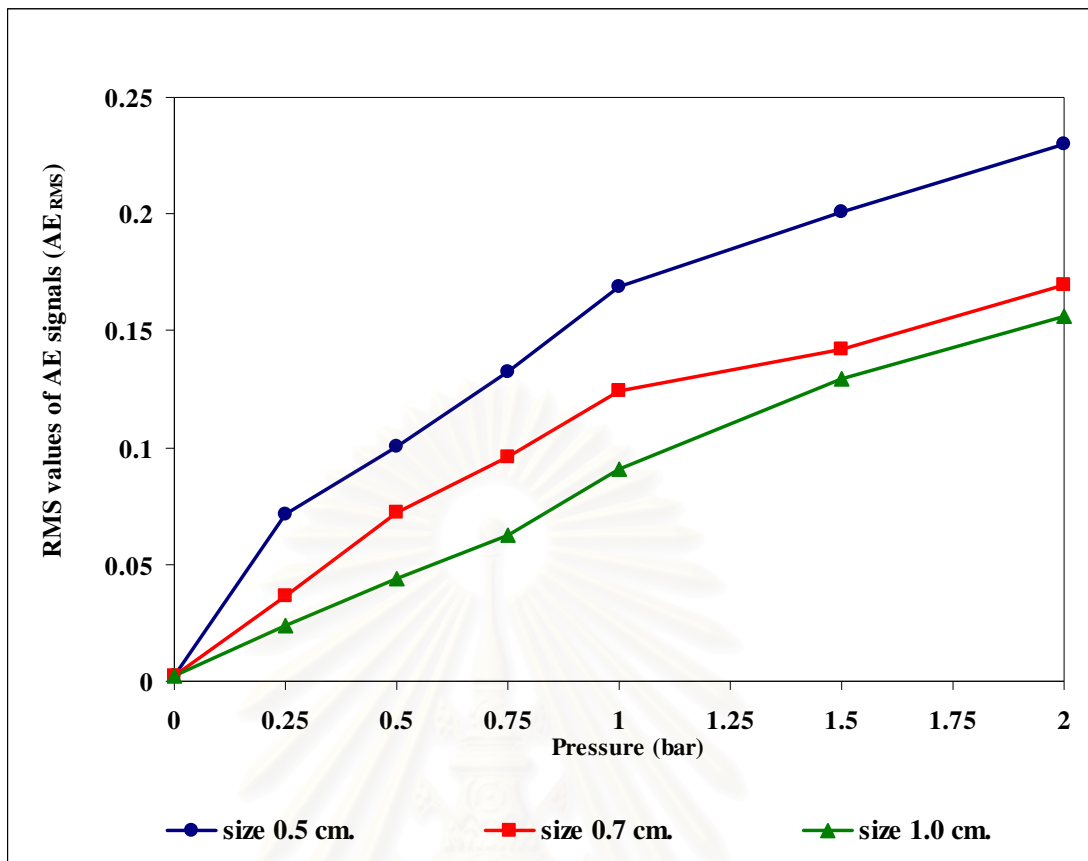
รูปที่ 6.6 โครงสร้างของระบบการตรวจจับรูรั่วของท่อ [26]

ผลการทดลอง

ตารางที่ 6.3 แสดงค่า AE_{RMS} ที่เงื่อนไขความดันและขนาดของรูรั่วของท่อต่างกัน จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ขนาดของรูรั่วเดียวกันพบว่า ที่ความดันสูงที่สุดคือ ความดันที่ 2 bar เมื่อใช้ตัวตรวจจับตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก จะมีค่า AE_{RMS} มากที่สุด ซึ่งมีสาเหตุเช่นเดียวกันกับการตรวจจับด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF ส่วนค่าความดันที่ 1.5 bar 1.0 bar 0.75 bar 0.5 bar และ 0.25 bar จะมีค่า AE_{RMS} ต่ำลงมา ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่ความดันมีค่าเท่ากัน แต่ขนาดของรูรั่วของท่อต่างกัน พบว่า ขนาดของรูรั่วที่มีค่าเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร จะมีค่า AE_{RMS} สูงที่สุด ส่วนขนาดของรูรั่วที่ 0.7 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตรจะมีค่า AE_{RMS} รองลงมา ตามลำดับ สาเหตุเนื่องมาจาก เมื่ออัตราการไหลของอากาศในท่อมี่ค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อพื้นที่หน้าตัดของการไหลมีค่าน้อยจะทำให้ความเร็วของอากาศภายในท่อมี่ค่ามาก จึงทำให้ความเข้มของสัญญาณอะคูสติกที่ปล่อยออกมามากด้วย ส่วนขนาดของรูรั่วของท่อที่ 1.0 เซนติเมตร ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดของการไหลใหญ่กว่าจึงส่งผลให้ความเร็วของอากาศที่ส่งออกมาในรูปคลื่นอะคูสติกมีค่าน้อยกว่า ซึ่งรูปภาพที่ 6.7 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันจากปั๊มลมที่เงื่อนไขต่างๆ

ตารางที่ 6.3 AE_{RMS} ที่เงื่อนไขของประเภทของความดันและรูรั่วที่ขนาดต่างๆ [26]

ขนาดของรูรั่ว (เซนติเมตร)	ค่าพลังงานของการปล่อยคลื่นอะคูสติก (AE_{RMS})						
	ความดันของอากาศภายในท่อ (bar)						
	0	0.25	0.5	0.75	1	1.5	2
0.5	0.0026	0.0712	0.1008	0.1327	0.1688	0.2011	0.2302
0.7	0.0020	0.0367	0.0721	0.0957	0.1240	0.1423	0.1700
1	0.0022	0.0238	0.0437	0.0626	0.0907	0.1294	0.1564



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันที่เงื่อนไขต่างๆ [26]

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

7.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้สำหรับตรวจจับสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ เนื่องจากการทำงานของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่งที่มีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ คือ สามารถตรวจสอบได้ ณ เวลาที่เกิดขึ้นจริง รวมทั้งสามารถตรวจสอบได้ทั่วทั้งโครงสร้าง ซึ่งตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้อาศัยคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก กล่าวคือ เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า โดยได้สร้างตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าจากวัสดุ 2 ชนิดด้วยกัน คือ พอลิเมอร์ PVDF ที่เป็นโพลิเมอร์ และสาร PZT ที่เป็นเซรามิก

โครงสร้างของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนหลักๆ 5 ส่วนด้วยกัน คือ ชั้นป้องกันวัสดุเสริมหลัง กล่องอะลูมิเนียม หัวต่อ BNC และวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทั้งฟิล์ม PVDF และสาร PZT ทั้งนี้เนื่องจาก ฟิล์ม PVDF และสาร PZT มีข้อดีที่แตกต่างกัน คือ ฟิล์ม PVDF เป็นโพลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น สามารถโค้งงอได้ จึงสามารถสร้างเป็นตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าในลักษณะรูปแบบที่ซับซ้อนได้ อีกทั้งยังมีค่าความต้านทานทางเสียงที่ต่ำ คือ ประมาณ 3.91 Mrayl เมื่อนำมาประกอบเป็นตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าแล้ว ง่ายต่อการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงวัสดุเสริมหลังเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับฟิล์ม ในขณะที่สาร PZT มีค่า electromechanical coupling factor ที่สูงกว่า ฟิล์ม PVDF ซึ่งทำให้สาร PZT สามารถเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า แต่สาร PZT มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงที่สูง คือ ประมาณ 37 Mrayl ดังนั้นในการนำสาร PZT มาประกอบเป็นตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า จะมีความยากสำหรับการทำให้วัสดุเสริมหลังกับสาร PZT มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลถึงลักษณะของสัญญาณรับได้จากตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการการผสมผสานทั้งสแต็กกับกาวอีพอกซี เพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง

ในการทดสอบผลของค่าความหนาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลัง ที่มีผลต่อค่าความถี่ของการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า ได้สร้างตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าจากฟิล์ม PVDF และสาร PZT ขึ้นอย่างละ 3 ตัว โดยตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่สร้างจากฟิล์ม PVDF ตัวที่ T1 และ T2 มีค่าความหนาของฟิล์ม PVDF เท่ากันคือ 28 ไมโครเมตร แต่มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงไม่เท่ากัน คือ 3.669 และ 2.971 Mrayl ตามลำดับ ในขณะที่ตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าที่ T3 มีค่าความหนาของ

ฟิล์ม PVDF เท่ากับ 52 ไมโครเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลัง เท่ากับ 2.971 Mrayl ส่วนตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT ตัวที่ T4 T5 และ T6 มีค่าความหนาของสาร PZT เท่ากับ 1.0 0.8 และ 0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังมีค่าไม่เท่ากัน คือ ตัวตรวจจับตัวที่ T4 และ T5 มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 3.669 Mrayl ส่วนตัวตรวจจับตัวที่ T6 มีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังเท่ากับ 2.971 Mrayl หลังจากนั้นนำตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นไปทดสอบการทำงานจากการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยแหล่งกำเนิด AE artificial source

เมื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF แต่ละตัวพบว่า ตัวตรวจจับตัวที่ T1 ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังใกล้เคียงกับฟิล์ม PVDF มากที่สุด จึงทำให้สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของคลื่นอะคูสติกมีค่ามาก ดังนั้นค่าพลังงาน RMS จึงมีค่ามากที่สุด อีกทั้งยังใช้ความหนาของแผ่นฟิล์ม PVDF น้อยกว่า จึงทำให้ค่าความถี่ต่อการตอบสนอง มีค่าสูงที่สุด ส่วนลักษณะของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT แต่ละตัวมีลักษณะเช่นเดียวกับฟิล์ม PVDF กล่าวคือ ตัวตรวจจับตัวที่ T4 และ T5 ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังมากที่สุด มีค่าพลังงาน RMS จึงมีค่ามากที่สุด ส่วนตัวตรวจจับตัวที่ T6 ใช้แผ่นสาร PZT ที่มีความหนาน้อยที่สุด จึงมีค่าความถี่ต่อการตอบสนองสูงที่สุดเช่นกัน ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจจับเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ดี มีค่าพลังงาน RMS สูง จึงต้องทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกในช่วงความถี่สูงๆ จะต้องใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีความหนาน้อยๆ จะสามารถใช้งานได้เหมาะสมที่สุด

ในการประยุกต์ใช้งานจริงของตัวตรวจจับ ซึ่งได้นำไปใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของตลับลูกปืน พบว่าตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นจากฟิล์ม PVDF สามารถตรวจสอบความผิดปกติและระบุได้ว่าตลับลูกปืนตัวไหนมีความเสียหาย โดยการวัดสัญญาณอะคูสติกที่ปลดปล่อยออกมาซึ่งพิจารณาในรูปของค่าพลังงาน RMS รวมทั้งการนำตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF และ สาร PZT ไปใช้งานสำหรับการตรวจสอบการรั่วของท่ออากาศอัดความดัน ซึ่งตัวตรวจจับทั้งสองชนิดที่สร้างขึ้นก็สามารถตรวจจับความผิดปกติของรูรั่วที่ปรากฏบนท่ออัดความดันได้ จึงถือได้ว่าตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกได้

7.2 งานวิจัยที่สามารถดำเนินการต่อไปในอนาคต

- 1) สร้างตัวตรวจจับโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดความหนาหลายค่าเพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการระหว่างค่าความหนากับค่าความถี่ต่อการตอบสนอง
- 2) สร้างตัวตรวจจับโดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่หน้าตัดหลายค่า เพื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ต่อค่าความถี่ต่อการตอบสนอง
- 3) เพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุเสริมหลังให้มีค่าใกล้เคียงกับสาร PZT
- 4) ใช้ตัวตรวจจับหลายตัวเพื่อระบุตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นบนวัสดุได้อย่างแน่นอน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ. การตรวจสอบด้วยคลื่นอะคูสติก. วารสารเทคนิค 115 (กันยายน 2537): 133-139.
2. ซาโตะ ฟุจิอิ. การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) (2543):
3. P. Inacio, C. J. Dias and J. N. Marat-Mendes., Acoustic Emission Sensors Based on Ferroelectric Composites. 10th International Symposium on Electrets, IEEE, European Cultural Centre of Delphi, Greece. (1999)
4. S. Or, H. Chan and C. Choy., P(VDF-TrFE) copolymer acoustic emission sensors. J. Sensors and Actuators. 80 (2000): 237-241.
5. เรือโทอนุชา เรืองสวัสดิ์, การออกแบบและการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
6. ชัชชัย พุ่มซ้อน, การพัฒนาแผ่นฟิล์มโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์เพื่อเป็นตัวทรานสดิวเซอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
7. L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens and J. Sanders, Fundamentals of Acoustic, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1999
8. H. Kuttruff, Ultrasonic Fundamentals and Applications, Elsevier Science Publishers, 1988
9. H. Pollard, Sound Waves in Solids. London: Pion Limited, 1977.
10. W. Smith, Materials Science and Engineering 2nd ed. McGraw-Hill, 1993
11. PVDF structure, Available from:
<http://www.chemistry.helsinki.fi/polylab/research/labkuvat.html>

12. PVDF beta phase, Piezoelectric Polymer. Available from:
<http://www.physics.montana.edu/piezopoly.htm>
13. Hysteresis loop, Available from:
<http://www.epfl.ch/people/foeth/images/hysteresis.html>
14. APC International. Ltd. Piezo Theory [online]. Available from:
http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html
15. W. Haifeng, R. Tim, C. Wenwu, and S. Kirk, High Frequency Properties Passive Materials for Ultrasonic Transducers. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr. 48 (2001): 78-84.
16. R. Selfridge., Approximate Material Properties in Isotropic Materials. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonic. 32 (1985): 381-384.
17. L. Dong and J. Mistry., Acoustic emission monitoring of composite cylinders. J. Composite Structures. 40 (1998): 43-53.
18. J. Park, J. Kong, D. Kim and D. Yoon., Nondestructive damage detection and interfacial evaluation of single-fibers/epoxy composites using PZT, PVDF and P(VDF-TrFE) copolymer sensors J.Composites Science and Technology. 65 (2005): 241-256.
19. M. Duncan and J. Whittaker., Acoustic Emission Calibration Instrumentation J. Instrumentation & Measurement. 38 (1989): 827-831.
20. Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM Standard (1984), No. E 976-84
21. S. Haykin and B. Veen., Signals and Systems (1999): 20-21.
22. T. Kaewkongka and Y. Joe, Application of acoustic emission to condition monitoring of rolling element bearings J. Measurement & Control. 32 (2001): 245-247

23. S. Anuphap-udom, K. Ratanathammapan and T. Kaewkongka., Fabricated PVDF Acoustic Emission Sensor for Lubrication Bearing Monitoring J. Scientific Research. Chulalongkorn 30 No. 2 (2006): 115-119
24. S. Anuphap-udom, T. Kaewkongka and K. Ratanathammapan., A novel fabricated acoustic emission sensors using PVDF film. 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology. (2005)
25. S. Anuphap-udom, K. Ratanathammapan, and T. Kaewkongka., Pipeline leak monitoring using PVDF acoustic emission sensor. 2nd Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, National University of Singapore. (2006)
26. S. Anuphap-udom, K. Ratanathammapan, N. Traiphol, P. Laoratanakul and T. Kaewkongka., A fabricated PZT acoustic emission sensor for pipeline leakage monitoring. 32nd Congress on Science and Technology of Thailand, Queen Sirikit National Convention Center. (2006)

ผลงานตีพิมพ์

วารสาร

1. S. Anuphap-udom, K. Ratanathammapan and T. Kaewkongka “Fabricated PVDF Acoustic Emission Sensor for Lubrication Bearing Monitoring” J. Scientific Research Chulalongkorn University Vol.31 No.2 (2006): 115-119

การประชุมวิชาการ

1. S. Anuphap-udom, T. Kaewkongka and K. Ratanathammapan
A novel fabricated acoustic emission sensors using PVDF film” 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology (2005).
2. S. Anuphap-udom, K. Ratanathammapan, N. Traiphol, P. Laoratanakul and T. Kaewkongka “A fabricated PZT acoustic emission sensor for pipeline leakage monitoring” 32nd Congress on Science and Technology of Thailand, Queen Sirikit National Convention Center (2006).
3. S. Anuphap-udom, K. Ratanathammapan, and T. Kaewkongka
“Pipeline leak monitoring using PVDF acoustic emission sensor” 2nd Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, National University of Singapore (2006).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. ตารางแสดงสมบัติของฟิล์ม PVDF

Table 1. Typical properties of piezo film

Symbol	Parameter		PVDF	Copolymer	Units
t	Thickness		9, 28, 52, 110	<1 to 1200	μm (micron, 10^{-6})
d_{31}	Piezo Strain Constant		23	11	$10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}} \text{ or } \frac{\text{C/m}^2}{\text{N/m}^2}$
d_{33}			-33	-38	
g_{31}	Piezo Stress constant		216	162	$10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2} \text{ or } \frac{\text{m/m}}{\text{C/m}^2}$
g_{33}			-330	-542	
k_{31}	Electromechanical Coupling Factor		12%	20%	
k_t			14%	25-29%	
C	Capacitance		380 for 28 μm	68 for 100 μm	pF/cm ² @ 1KHz
Y	Young's Modulus		2-4	3-5	10^9 N/m^2
V_0	Speed of Sound	stretch:	1.5	2.3	10^3 m/s
		thickness:	2.2	2.4	
p	Pyroelectric Coefficient		30	40	$10^{-6} \text{ C/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$
ϵ	Permittivity		106-113	65-75	10^{-12} F/m
ϵ/ϵ_0	Relative Permittivity		12-13	7-8	
ρ_m	Mass Density		1.78	1.82	10^3 kg/m
ρ_θ	Volume Resistivity		$>10^{13}$	$>10^{14}$	Ohm meters
$R_\square$	Surface Metallization Resistivity		<3.0	<3.0	Ohms/square for NiAl
$R_\square$			0.1	0.1	Ohms/square for Ag Ink
$\tan \delta_e$	Loss Tangent		0.02	0.015	@ 1KHz
	Yield Strength		45-55	20-30	10^6 N/m^2 (stretch axis)
	Temperature Range		-40 to 80...100	-40 to 115...145	$^\circ\text{C}$
	Water Absorption		<0.02	<0.02	% H ₂ O
	Maximum Operating Voltage		750 (30)	750 (30)	V/mil(V/ μm), DC, @ 25 $^\circ\text{C}$
	Breakdown Voltage		2000 (80)	2000 (80)	V/mil(V/ μm), DC, @ 25 $^\circ\text{C}$

ภาคผนวก ข. สมการ AE_{RMS}

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

เมื่อ	AE_{RMS}	คือ พลังงานของคลื่นอะคูสติก
	$v(t)$	คือ ค่าแอมพลิจูดของคลื่นอะคูสติก
	T	คือ คาบของสัญญาณ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค. สมการ Fourier Transform และ algorithm ของ FFT

สมการ Fourier Transform

$$Y(t) = \int_0^t y(t) e^{-j\omega t} dt$$

เมื่อ	$Y(t)$	คือ แอมพลิจูดในแกนความถี่
	$y(t)$	คือ แอมพลิจูดในแกนเวลา
	T	คือ คาบของสัญญาณ
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม

รายละเอียดของ Algorithm ของ FFT

```
>> load test1.txt;           // โหลดข้อมูลชื่อ test1
>> fs = 500000;             // กำหนดค่า sampling rate เท่ากับ 500000
>> t = 0:1/fs:1.25;         // กำหนดตัวแปร t คือ เวลา
>> A = test1(:,2);          // กำหนดตัวแปร A คือ แอมพลิจูดจากข้อมูลชื่อ test1
>> subplot(121)
>> plot(1000*t(1:2500),A(1:2500)) // เขียนกราฟระหว่าง t กับ A โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 2500 จุด
>> title('Acoustic emission raw signal') // กำหนดชื่อเรื่อง
>> xlabel('time (ms)')       // กำหนดชื่อแกน x
>> ylabel('Amplitude(V)')    // กำหนดชื่อแกน y
>> n = length(A);            // กำหนดตัวแปร n คือจำนวนข้อมูลของตัวแปร A
>> Y = fft(A,n);             // กำหนดตัวแปร Y คือค่าที่ได้จากการแปลง FFT ของ A
>> Py = Y.*conj(Y)/n;        // กำหนดตัวแปร Py คือ ค่ากำลัง
>> f = (1:n/2)*fs/(n);       // กำหนดตัวแปร f คือค่าความถี่
>> subplot(122)
>> plot(f/1000,Py(1:n/2))    // เขียนกราฟระหว่าง f กับ Py
>> title('Power spectrum density')
>> xlabel('Frequency (kHz)')
>> ylabel('Power (V2/Hz)')
```

ภาคผนวก ง. ผลการวัดค่าความหนาแน่น อัตราเร็วเสียงและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงใน
วัสดุผสมกาวยีพอกซีและทังสเทน

สัดส่วนปริมาตร ของทังสเทน (%)	วัดครั้งที่	ความหนาแน่น (kg/m ³)	อัตราเร็วเสียง (m/s)	อิมพีแดนซ์ทางเสียง (MRayl)
0	1	1,125.40	2,635.63	2.96614
	2	1,133.90	2,631.71	2.98409
	3	1,138.41	2,619.46	2.98201
	4	1,141.12	2,605.01	2.97262
	5	1,123.25	2,637.89	2.96301
2	1	1,988.34	1,596.92	3.17522
	2	1,983.75	1,603.81	3.18156
	3	1,941.20	1,639.23	3.18207
	4	1,944.62	1,639.06	3.18735
	5	1,917.87	1,660.46	3.18455
5	1	2,939.45	1,245.67	3.66158
	2	3,026.32	1,221.45	3.69650
	3	2,955.87	1,231.83	3.64113
	4	3,017.04	1,226.64	3.70082
	5	2,966.15	1,228.37	3.64353

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ. ผลการวัดค่าพลังงาน AE_{RMS} และค่าความถี่ต่อการตอบสนองที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ PVDF แต่ละตัว

ตัวตรวจจับ	วัดครั้งที่	ค่า AE _{RMS} (V)	ความถี่ต่อการตอบสนอง (kHz)
T1	1	0.0292	48.34
	2	0.0261	48.29
	3	0.0309	48.35
	4	0.0244	48.34
	5	0.0234	48.42
T2	1	0.0155	38.02
	2	0.0111	37.88
	3	0.0088	38.00
	4	0.0092	38.15
	5	0.0105	37.67
T3	1	0.0133	29.15
	2	0.0170	29.25
	3	0.0138	28.99
	4	0.0198	29.12
	5	0.0143	28.87

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ. ผลการวัดค่าพลังงาน AE_{RMS} และค่าความถี่ต่อการตอบสนองที่ตรวจจับได้จากตัวตรวจจับ PZT แต่ละตัว

ตัวตรวจจับ	วัดครั้งที่	ค่า AE_{RMS} (V)	ความถี่ต่อการตอบสนอง (kHz)
T4	1	0.0334	50.04
	2	0.0237	50.05
	3	0.0256	50.05
	4	0.0337	49.98
	5	0.0383	49.93
T5	1	0.0247	105.25
	2	0.0343	105.31
	3	0.0243	105.77
	4	0.0409	105.63
	5	0.0252	105.40
T6	1	0.0216	209.11
	2	0.0189	209.03
	3	0.0156	208.85
	4	0.0140	209.54
	5	0.0086	208.68

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสิทธิชัย อนุภาพอุดม เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2523 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบ้านฉางกาญจนกุลวิทยา จังหวัดระยอง ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2542 ในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หลังจากจบการศึกษาในระดับปริญญาตรีแล้ว ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย