

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติคด้วยฟิล์มพีวีดีเอฟและสารพีแซดที



นายสิทธิชัย อนุภาพอุดม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF ACOUSTIC EMISSION TRANSDUCER USING PVDF FILM AND PZT MATERIAL

Mr.Sitthichai Anuphap-udom

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

491324

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์มพีวีดีเอฟและสาร
พีแซดที

โดย

นายสิทธิชัย อนุภาพอุดม

สาขาวิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

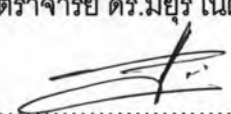
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์

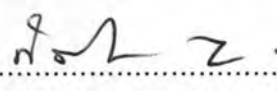
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

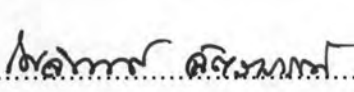

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิพงศ์ ฉัตรภรณ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ศรีนิติวรวงศ์)

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

งานนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกจากวัสดุที่มีคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก 2 ชนิดคือ ฟิล์มพีวีดีเอฟและวัสดุเลดเซอร์โคเนตไททานเนต(พีแซคที) โดยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มพีวีดีเอฟ มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตรและ ความยาว 3.5 เซนติเมตร จำนวนทั้งสิ้น 3 ตัว และตัวตรวจจับที่สร้างจากสารพีแซคที ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.75 เซนติเมตร และ สูง 3.40 เซนติเมตร โดยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มพีวีดีเอฟ แต่ละตัวที่สร้างขึ้นมีขนาดความหนาและค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงแตกต่างกันได้แก่ ความหนา 28 และ 52 ไมโครเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 2.971 และ 3.669 เมกะเรออด ตามลำดับ ส่วนตัวตรวจจับที่สร้างจากสารพีแซคที มีขนาดความหนาเท่ากับ 0.5 0.7 และ 1.0 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 2.971 และ 3.669 เมกะเรออด เมื่อนำตัวตรวจจับทั้งสองชนิดไปตรวจจับสัญญาณอะคูสติกเพื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณและค่าความถี่ต่อการตอบสนอง พบว่าตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มพีวีดีเอฟ ซึ่งมีค่าความหนาของแผ่นฟิล์มเท่ากับ 28 ไมโครเมตร มีค่าความถี่ต่อการตอบสนองสูงสุดคือ 48.3 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนตัวตรวจจับที่สร้างจากสารพีแซคที ใช้ความหนาของแผ่นสารเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร จะมีค่าความถี่สูงสุดคือ 209 กิโลเฮิร์ตซ์ ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงเท่ากับ 3.669 เมกะเรออด จะให้ค่าพลังงานสูงสุด ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันทั้งสองชนิด และเมื่อนำตัวตรวจจับทั้งสองไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการเฝ้าระวังสภาพหล่อลื่นของคลัตช์ลูกปืน และการเฝ้าระวังการรั่วของท่อ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถระบุความเสียหายและความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นนี้มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก

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

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

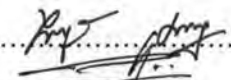

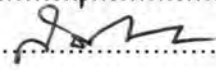
4672441623 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: ACOUSTIC EMISSION/ PZT TRANSDUCER/ PVDF TRANSDUCER

SITTHICHAJ 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. คันทพงศ์ แก้วคงคา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภิรมณ์ต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มยุรี เนตรนภิส ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสจิพงษ์ ฉัตรภรณ์ และอาจารย์ ดร. ฉัตรชัย ศรีนิติวงษ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการตรวจทานวิทยานิพนธ์

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

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชติ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องพัลส์เซอร์ รีซีฟเวอร์และหัววัดอัลตราโซนิค 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

สุดท้ายผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาสำหรับการทำวิจัย 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	อุปกรณ์สำหรับการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก	
2.4.1	ตัวตรวจจับชนิดอิเล็กทรอนิกส์.....	18
2.4.2	ตัวตรวจจับชนิดคาปาซิแตนซ์.....	18
2.4.3	ตัวตรวจจับชนิดเพียโซอิเล็กทริก.....	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	พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์.....	27
3.3.2	เลดเซอร์โคเนตไททานเต.....	30

บทที่ 4 การตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก

4.1	หลักการสร้างตัวตรวจจับ.....	34
4.2	การหาค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียง.....	35
4.3	ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจจับ	
4.3.1	ส่วนประกอบของตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก.....	36
4.3.2	การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยฟิล์ม PVDF.....	36
4.3.3	การสร้างตัวตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติกด้วยสาร PZT.....	38
4.4	การสร้างวงจรรขยายสัญญาณอะคูสติก.....	41

บทที่ 5 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติก

5.1	การทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF.....	43
5.2	ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของฟิล์ม PVDF กับ ค่าความถี่ต่อการตอบสนอง.....	46
5.3	การทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT.....	47
5.4	ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของสาร PZT กับ ค่าความถี่ต่อการตอบสนอง.....	51
5.5	ผลการทดสอบการทำงานของตัวตรวจจับจากบริษัท PAC.....	52

บทที่ 6 การประยุกต์ใช้งาน

6.1	การแผ่รังสีสภาพหล่อลื่นของตลับลูกปืนด้วยวิธีการปล่อยคลื่น อะคูสติกจาก ตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์มPVDF.....	53
6.2	การแผ่รังสีการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อยคลื่นอะคูสติก	

6.2.1	การเฝ้าระวังการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อย คลื่นอะคูสติกด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากฟิล์ม PVDF.....	57
6.2.2	การเฝ้าระวังการรั่วของท่อด้วยวิธีการตรวจจับการปล่อย คลื่นอะคูสติกด้วยตัวตรวจจับที่สร้างจากสาร PZT.....	60

บทที่ 7 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

7.1	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	63
7.2	งานวิจัยที่สามารถดำเนินการต่อได้ในอนาคต.....	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 ทางเสียงในวัสดุผสมกาวอีพอกซีและทังสเตน.....	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	ลักษณะของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้าจากฟิล์ม PVDF (ก) ลักษณะของแผ่นฟิล์ม PVDF (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับสนามไฟฟ้า.....	37

รูปที่ 4.2	รูปถ่ายของตัวตัวตรวจจับสนที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับสน T1 (ข) ตัวตรวจจับสน T2 (ค) ตัวตรวจจับสน T3.....	37
รูปที่ 4.3	ลักษณะของตัวตรวจจับสนที่สร้างจากสาร PZT (ก) ลักษณะของโครงสร้างของสาร PZT (ข) ส่วนประกอบหลักของตัวตรวจจับสน.....	39
รูปที่ 4.4	รูปถ่ายของตัวตัวตรวจจับสนที่สร้างขึ้นทั้งสามตัว (ก) ตัวตรวจจับสน T4 (ข) ตัวตรวจจับสน T5 (ค) ตัวตรวจจับสน T6.....	40
รูปที่ 4.5	วงจรรขยายสัญญาณอะคูสติค.....	41
รูปที่ 5.1	การสร้างสัญญาณอะคูสติคจากแหล่งกำเนิดเสียงเทียมด้วยวิธีหักใส่ดินสอ.....	42
รูปที่ 5.2	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน T1.....	43
รูปที่ 5.3	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน T2.....	44
รูปที่ 5.4	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน T3.....	44
รูปที่ 5.5	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน T1.....	45
รูปที่ 5.6	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน T2.....	45
รูปที่ 5.7	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน T3.....	46
รูปที่ 5.8	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน T4.....	48
รูปที่ 5.9	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน T5.....	48
รูปที่ 5.10	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน T6.....	49
รูปที่ 5.11	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน T4.....	49
รูปที่ 5.12	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน T5.....	50
รูปที่ 5.13	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน T6.....	50
รูปที่ 5.14	ลักษณะสัญญาณคลื่นอะคูสติคที่ตรวจจับสนได้จากตัวตรวจจับสน R15.....	52
รูปที่ 5.15	ค่าความถี่ต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับสน R15.....	52
รูปที่ 6.1	รูปถ่ายของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้ในการตรวจสอบ.....	54
รูปที่ 6.2	โครงสร้างของระบบของเครื่องจักรกลหมุนที่ใช้ในการตรวจสอบ.....	54
รูปที่ 6.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับจำนวนรอบ ของเครื่องจักรกลหมุนที่เสียนไขต่างๆ.....	56
รูปที่ 6.4	โครงสร้างของระบบการตรวจจับสนร้าวของท่อด้วยตัวตรวจจับสน PVDF.....	58
รูปที่ 6.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันที่เสียนไขต่างๆ.....	59
รูปที่ 6.6	โครงสร้างของระบบการตรวจจับสนร้าวของท่อด้วยตัวตรวจจับสน PZT.....	60
รูปที่ 6.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า AE_{RMS} กับค่าความดันที่เสียนไขต่างๆ.....	62

สารบัญตาราง

หน้า

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