

การออกแบบและการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคแทรนส์ดีวเซอร์



เรือโทอนุชา เรืองสวัสดิ์


สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-1835-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND FABRICATION OF PIEZOELECTRIC ULTRASONIC TRANSDUCER



Lt.JG. Anucha Ruangsawad

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

Department of Materials Science
Faculty of Science

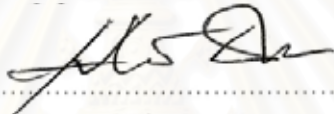
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

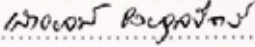
ISBN 974-14-1835-3


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิก
แทรนสดิวเซอร์
โดย เรือโทอนุชา เรืองสวัสดิ์
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล

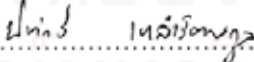
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



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

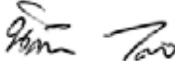
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัดน์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.นิตานาด ไตรผล)

อนุชา เรืองสวัสดิ์ : การออกแบบและการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์
(DESIGN AND FABRICATION OF PIEZOELECTRIC ULTRASONIC TRANSDUCER)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ศิริวัณว์ เจียมศิริเลิศ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล
95 หน้า ISBN 974-14-1835-3.

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ โดยศึกษา
ในส่วนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ส่วนท้ายของแทรนสดิวเซอร์ และต้นแบบเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิก
แทรนสดิวเซอร์ ส่วนแรกศึกษาวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยการนำผงสารเพียโซอิเล็กทริกสองชนิด คือ
hard PZT (APC 840) และ soft PZT (APC 850) มาขึ้นรูปโดยการอัดในแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง
ขนาดแตกต่างกันคือ 20.0 25.5 และ 35.0 mm แล้วเผาขึ้นเทอร์โมในเตาเผาบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ
1250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้มาตัดและขัดให้ได้เป็นแผ่นวงกลมหนา 1.0 1.5 และ 2.0
mm แล้วทำขั้วอิเล็กโทรดด้วย Ag-paste เผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 30 นาที
นำชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกแต่ละขนาดของทั้งสองชนิดมาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ที่เหมาะสำหรับการ
เตรียมเป็นอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ พบว่า PZT ทั้งสองชนิดมีสมบัติส่วนใหญ่สามารถนำมาเตรียม
เป็นอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ได้ แต่เมื่อพิจารณาในเรื่องของความถี่เรโซแนนซ์ในการใช้งาน K_p
และ Q_m แล้วพบว่า hard PZT เหมาะสมมากกว่า โดยความถี่ของชิ้นงานที่ได้จากการศึกษาอยู่ในช่วง
80-140 kHz ส่วนถัดไปทำการศึกษาค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ และ แอทเทนนิวเอชันของคอมพอสิต
ระหว่างผงโลหะสองชนิดคือ ทองแดง และ อะลูมิเนียม กับ อีพอกซีเรซิน เพื่อใช้เป็นวัสดุส่วนหลัง
ของแทรนสดิวเซอร์ที่จะเตรียม โดยการเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคของผงโลหะแต่ละชนิดในคอมพอสิต
พบว่าคอมพอสิตทั้งสองชนิด มีค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ และ แอทเทนนิวเอชันสูงขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของ
อนุภาคโลหะสูงขึ้น โดยทองแดงคอมพอสิตกับอีพอกซีเรซินจะมีค่าทั้งสองสูงกว่าอะลูมิเนียมอีพอกซี
เรซินเล็กน้อย แต่ทองแดงอีพอกซีเรซินคอมพอสิตไม่มีเสถียรภาพเนื่องจากมีออกไซด์เกิดขึ้นเมื่อทิ้งไว้
ดังนั้นอะลูมิเนียมอีพอกซีเรซินจึงเหมาะสำหรับเป็นวัสดุส่วนหลังของแทรนสดิวเซอร์มากกว่า ในส่วน
สุดท้ายเป็นการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ตัวอย่างจาก hard PZT ขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลาง 30 mm และหนา 1.0 mm โดยมี 5%อะลูมิเนียมอีพอกซีเรซิน เป็นวัสดุส่วนหลัง และมี
ตัวโครงแทรนสดิวเซอร์ทำมาจากพลาสติก พบว่าความถี่ที่ให้ออกมาอยู่ที่ประมาณ 80 kHz โดยมีค่า
 BW_{rel} และ waveform duration ทั้งการรับและการส่งที่ดีสามารถนำไปใช้งานได้

ภาควิชา วัสดุศาสตร์
สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อผู้ผลิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4672486923 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: ULTRASONIC / ULTRASONIC TRANSDUCER / PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

ANUCHA RUANGSAWAD: DESIGN AND FABRICATION OF PIEZOELECTRIC

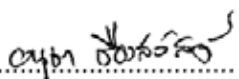
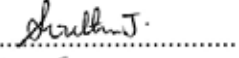
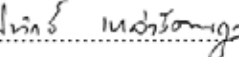
ULTRASONIC TRANSDUCER. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. SIRITHAN

JIEMSIRILERS, Ph.D., THESIS COADVISOR: PITAK LAORATANAKUL, Ph.D.,

95 pp. ISBN 974-14-1835-3.

Design and fabrication of piezoelectric ultrasonic transducer was proposed and studied in terms of piezoelectric materials, backing layer and the prototype of piezoelectric ultrasonic transducer. Firstly, specimens of piezoelectric materials were prepared by uniaxial pressing hard PZT (APC 840) and soft PZT (APC 850) into disc shape. The mold diameters are 20.0 mm, 25.5 mm and 35.0 mm. The specimens were sintered in air atmosphere furnace at a temperature of 1250 °C for 2 hours. Sintered specimens were cut and polished to 1.0, 1.5 and 2.0 mm in thickness, marked electrode with Ag-paste and cured in the air atmosphere furnace at a temperature of 550 °C for 1/2 hour. Both hard PZT and soft PZT having properties that could be used as ultrasonic transducer but the hard PZT was better for use as high efficiency ultrasonic transducer because it had higher resonance frequency, K_p and Q_m than the soft PZT. The resonance frequencies of PZT specimens were 80-140 kHz. Secondly, backing layer was fabricated by mixing metal powders and epoxy resin (Cu-epoxy resin and Al-epoxy resin). Attenuation and acoustic impedance of Cu-epoxy resin was higher than Al-epoxy resin, and the attenuation and acoustic impedance of both Cu and Al epoxy resins increased with increasing metal powder content. Since Cu-epoxy resin was oxidized in air atmosphere, only Al-epoxy resin was proper for the fabrication of transducer. The prototype transducers were fabricated by using hard PZT of a large diameter of 30 mm and 1.0 mm in thickness with 5%Al-epoxy resin as backing material and using plastic as transducer case. The resonance frequency of the obtained transducer was around 80 kHz with a good BW, good waveform duration and a high sensitivity.

Department Materials Science
Field of study Ceramic Technology
Academic year 2005

Student's signature..... 
Advisor's signature..... 
Co-advisor's signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดีไม่ได้หากขาดผู้มีพระคุณที่ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ ได้แก่ ผศ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การดูแลตั้งแต่หลักสูตรการเรียนการสอนจนกระทั่งการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดเวลาที่ทำการทำวิจัยที่ผ่านมา คณะอาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่กรุณาส่งสอนวิชาและให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆ ผศ.วชิระ มีทอง รองผู้อำนวยการฝ่ายบริการอุตสาหกรรม สวท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้การสนับสนุนเครื่องมือและห้องปฏิบัติการทางอัลตราโซนิกในการทำวิจัย ผศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒนา อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและแนะนำการวิเคราะห์ทางอัลตราโซนิก คุณเชิดพงษ์ จอมเดช นักวิจัยสำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยเหลือในการปฏิบัติการทำวิจัยและการวิเคราะห์ผลเป็นอย่างดี ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ กำลังใจ และความสนุกสนานในการเรียนการสอน และการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายที่ผู้เขียนจะต้องขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง คือสถาบันต่างๆ ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านบุคคลากร เครื่องมือและอื่นๆ ได้แก่ กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ กองทัพเรือ ที่เปิดโอกาสให้ผู้เขียนได้ลาศึกษาต่อโดยทุนส่วนตัว RU ของสาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุณาให้หัวข้อการทำวิจัยในครั้งนี้ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่กรุณาในเรื่องสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ และบุคคลากรที่มีความรู้ความสามารถในการทำงานวิจัย และ TGIST ที่กรุณาให้การสนับสนุนเงินทุนในงานวิจัยของผู้เขียนในครั้งนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมาชิกในครอบครัวของผู้เขียนทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฏ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์การทำวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการทำวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	3
2.1.1 โครงสร้างผลึกและสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก	3
2.1.2 ปฏิกิริยาการก่อตัวของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	6
2.1.3 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก	8
2.1.3.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	9
2.1.3.2 สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า	9
2.1.3.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียไดอิเล็กทริก	10
2.1.3.4 สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล	10
2.1.4 ความถี่เรโซแนนซ์	11
2.2 เพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคแทรนส์ดีวเซอร์	12
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคแทรนส์ดีวเซอร์	12
2.2.2 ส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคแทรนส์ดีวเซอร์	13
2.2.2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	13
2.2.2.2 วัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดีวเซอร์	13
2.2.2.3 วัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดีวเซอร์	14
2.2.2.4 ขั้วอิเล็กโทรดและการเชื่อมต่อของแทรนส์ดีวเซอร์	15

2.2.2.5	ตัวโครงแทรมนส์ดีวีเซอร์และสายไฟ	16
2.2.3	การเข้ากันได้ของอะคูสติคิมพีแดนซ์	16
2.2.4	การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแทรมนส์ดีวีเซอร์	18
2.2.4.1	การตอบสนองสัญญาณกับความถี่	18
2.2.4.2	การตอบสนองสัญญาณกับเวลา	19
2.2.4.3	ค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้า	20
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.4	ประโยชน์ของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรมนส์ดีวีเซอร์	26
บทที่ 3	วิธีการดำเนินวิจัย	27
3.1	เครื่องมือ	27
3.2	สารเคมี	28
3.3	วิธีการทำวิจัย	29
3.3.1	แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย	29
3.3.2	การเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติชิ้นงาน	31
3.3.2.1	การเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก	31
3.3.2.2	การเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติของส่วนหลังของ แทรมนส์ดีวีเซอร์	34
3.3.3	การเตรียมตัวโครงแทรมนส์ดีวีเซอร์และสายไฟ	36
3.3.3.1	การเตรียมโครงแทรมนส์ดีวีเซอร์	36
3.3.3.2	การเตรียมสายไฟ	36
3.4	การเตรียมและการวิเคราะห์สมบัติเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรมนส์ดีวีเซอร์	37
3.4.1	การเตรียมเพียโซอิเล็กทริกแทรมนส์ดีวีเซอร์	37
3.4.2	การตรวจวัดสมบัติของแทรมนส์ดีวีเซอร์ตัวอย่าง	39
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	43
4.1	การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงาน	43
4.1.1	การวิเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	43
4.1.1.1	การเปรียบเทียบสมบัติระหว่าง hard PZT กับ soft PZT	43
4.1.1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบความหนาและ ความยาวรัศมี ของแผ่นชิ้นงานเซรามิกต่อความถี่เรโซแนนซ์	49

4.1.2 ผลการวิจัยวัสดุส่วนหลังของแทรมส์ดีวีเซอร์จากอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิต และ ทองแดงอีพอกซีคอมพอสิต	51
4.1.2.1 ผลของสัดส่วนของโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงในคอมพอสิตที่มีต่อความหนาแน่นของคอมพอสิตและความเร็วเสียงในคอมพอสิต ..	52
4.1.2.2 ผลของสัดส่วนของโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงในคอมพอสิตที่มีต่อการกระจายตัวของอนุภาคโลหะในคอมพอสิต	52
4.1.2.3 ผลของสัดส่วนของโลหะอะลูมิเนียมและทองแดงที่มีต่อค่าแอมเพนนิวเอชันของคอมพอสิต	57
4.1.3 วัสดุส่วนหน้าของแทรมส์ดีวีเซอร์	58
4.1.4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างแต่ละชั้นของชิ้นงานในแทรมส์ดีวีเซอร์	58
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคแทรมส์ดีวีเซอร์	59
4.2.1 อิมพีแดนซ์ไฟฟ้า	60
4.2.2 การตอบสนองสัญญาณกับเวลา	62
4.2.3 การตอบสนองสัญญาณกับความถี่	62
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะในงานวิจัย	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก วิธีการการวิเคราะห์หาความหนาแน่นโดยวิธีของอะคิมิตัส	74
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์หาความเร็ว อะคูสติกอิมพีแดนซ์ และแอมเพนนิวเอชันของคลื่นเสียงในวัสดุ	75
ข-1 การวัดหาความเร็วคลื่นเสียงของวัสดุ	75
ข-2 การคำนวณหาอะคูสติกอิมพีแดนซ์	76
ข-3 การคำนวณหาค่าแอมเพนนิวเอชัน	77
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า	79
ภาคผนวก ง วิธีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล	81
ภาคผนวก จ วิธีการคำนวณหา bandwidth	82
ภาคผนวก ฉ วิธีการคำนวณ relative pulse-echo sensitivity	84

ภาคผนวก ช วิธีกรวิเคราะห์หา waveform duration	86
ภาคผนวก ซ ตารางแสดงการคำนวณหาสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงาน กล-ไฟฟ้า	87
ภาคผนวก ฉ ตารางแสดงข้อมูลในการหาค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT	88
ภาคผนวก ชฎ ตารางแสดงข้อมูลของชิ้นงานวัสดุส่วนท้ายของแทรนส์ดีวเซอร์	89
ภาคผนวก ฎ ข้อมูลแสดงการตอบสนองกับเวลาและความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของคอมพอสิตที่จัดทำเป็นวัสดุส่วนหลังของแตรนส์ดีวีเซอร์	14
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของวัสดุ	15
ตารางที่ 2.3 สมบัติของวัสดุส่วนหลังจากการศึกษาของ N.T. Nguyen และคณะ	20
ตารางที่ 2.4 สมบัติของวัสดุส่วนหลังจากการศึกษาของ S.K. Jain และคณะ	21
ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย	28
ตารางที่ 3.2 นำหนักของ PZT และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นงานตามขนาดของแม่พิมพ์	30
ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์และขนาดของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกตัวอย่าง	31
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนระหว่างโลหะกับอีพอกซีเรซิน	34
ตารางที่ 3.5 นำหนักของส่วนผสมที่ใช้เตรียมคอมพอสิตตัวอย่าง	35
ตารางที่ 3.6 ลักษณะต่างๆของแตรนส์ดีวีเซอร์ตัวอย่าง	39
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไฟฟ้า และ สัมประสิทธิ์ คุณภาพเชิงกล	47
ตารางที่ 4.2 อะคูสติคิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT	48
ตารางที่ 4.3 สมบัติต่างๆของชิ้นงาน PZT ตัวอย่าง	49
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างชั้นของชิ้นงาน	59

สารบัญรูปร่าง

รูปภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	3
รูปที่ 2.2 การเกิดโพลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	4
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง หรือเกิดแรงเค้นทางกล และ โพลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริก เซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการเกิดของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	7
รูปที่ 2.5 ตัวเลขทิศทางของสัญลักษณ์ตามแกน X Y และ Z ที่ใช้ในการหาสมบัติต่างๆของ สารเพียโซอิเล็กทริก	8
รูปที่ 2.6 ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	11
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคทรานส์ดีวเซอร์โดยทั่วไป	12
รูปที่ 2.8 ลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองของสัญญาณความถี่	19
รูปที่ 2.9 ลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองของสัญญาณกับเวลา	19
รูปที่ 2.10 การเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ และชิ้นงานของ Drothee Callens และคณะ	22
รูปที่ 2.11 การเรียงของชั้นเพียโซอิเล็กทริกของ A. Abrar and S. Cochran	23
รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดีวเซอร์แบบเฟล็กเทนชัน	23
รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างภายในของไบหมอบเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิค ทรานส์ดีวเซอร์	24
รูปที่ 2.14 โครงสร้าง และส่วนประกอบต่างๆของทรานส์ดีวเซอร์แบบสองทางของ Young Soo Yoon และคณะ	24
รูปที่ 2.15 โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของทรานส์ดีวเซอร์สองทางแบบสมบูร์น	25
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย	29
รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก	30
รูปที่ 3.3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการซินเทอร์ของชิ้นงาน และ เฝامنึกซ์อิเล็กโทรดของชิ้นงาน	33
รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการเตรียมและการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุส่วนหลังของ ทรานส์ดีวเซอร์	35
รูปที่ 3.5 ลักษณะของตัวโครงทรานส์ดีวเซอร์พลาสติกที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย	36
รูปที่ 3.6 ลักษณะของชิ้นงาน hard PZT และการประกอบทรานส์ดีวเซอร์ตัวอย่าง	37
รูปที่ 3.7 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างเทียบกันเหรียญ 10 บาทของไทย	38
รูปที่ 3.8 การเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดทรานส์ดีวเซอร์	40

รูปภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.9 ความเข้มสัญญาณความถี่	41
รูปที่ 3.10 ความเข้มสัญญาณที่เวลาต่างๆ	42
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นเฉลี่ยของ PZT ตัวอย่าง	43
รูปที่ 4.2 วงจรฮิสเทอรีซิสของ PZT	44
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกระหว่าง soft PZT กับ hard PZT	45
รูปที่ 4.4 การเกิดความถี่เรโซแนนซ์ แอนติเรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ของ hard PZT และ soft PZT ตัวอย่าง	46
รูปที่ 4.5 ความถี่เรโซแนนซ์ครั้งแรกของชิ้นงาน hard PZT ที่ความหนา 1.0 1.5 และ 2.0 mm	50
รูปที่ 4.6 ความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ของชิ้นงาน hard PZT ที่มีความหนา 1.0 mm และ ความยาวรัศมี R1 R2 และ R3	51
รูปที่ 4.7 ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นเสียงของชิ้นงานคอมพอสิต	53
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของ อะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิต	54
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของทองแดงอีพอกซีคอมพอสิต	55
รูปที่ 4.10 ความเข้มของสัญญาณที่ความหนาต่างๆของคอมพอสิต	56
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของสัดส่วนโลหะกับค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ และ ค่าเอกเทนนิวเอชันในคอมพอสิต	57
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์	60
รูปที่ 4.13 อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของแทรนสดิวเซอร์	61
รูปที่ 4.14 การตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนสดิวเซอร์ขณะส่งสัญญาณ	63
รูปที่ 4.15 การตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนสดิวเซอร์ขณะรับคลื่นสะท้อน	64
รูปที่ 4.16 การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนสดิวเซอร์ขณะส่งสัญญาณ	65
รูปที่ 4.16 การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนสดิวเซอร์ขณะรับคลื่นสะท้อน.....	66
รูปที่ 4.17 ตัวอย่างการเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ ในการใช้งานแทรนสดิวเซอร์ตัวอย่าง และ หน้าจอของ ultrasonic flaw detector ขณะใช้งาน	67

อักษรย่อและสัญลักษณ์

PVDF	พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์
PZT	เลดเซอร์โคเนตไททาเนียมออกไซด์
BW	ความยาวของช่วงความถี่ (bandwidth)
D	น้ำหนักแห้ง
I	น้ำหนักที่ชั่งในน้ำ หรือ น้ำหนักแขวนลอย
M	น้ำหนัก
R	สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ
T	สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน
V	ปริมาตร
W	น้ำหนักเปียก
s	ความเค้น
v	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก
ρ	ความหนาแน่น
C_p	ความจุไฟฟ้า
d, d_{33}	สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก
E_c	coercive field
f_c	ความถี่กลาง
f_m, f_a	ความถี่แอนติเรโซแนนซ์
f_n, f_r	ความถี่เรโซแนนซ์
f_p	ความถี่ที่พีคสูงสุด
f_U	ความถี่เหนือ
K_p	สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า
P_s	โพลาริเซชันอิมิตัว
P_r	โพลาริเซชันถาวร
Q_m	สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล
S_{rel}	ความไวสัมพัทธ์
Z	อิมพีแดนซ์
Z_a, Z_n	อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่แอนติเรโซแนนซ์
Z_r, Z_m	อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในระยะ 20 ปีที่ผ่านมาอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ได้รับการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เพื่อพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและความละเอียดในการใช้งานระดับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ สามารถพัฒนาไปใช้ในงานด้านต่างๆได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานและไม่ทำลายชิ้นงาน ไม่ว่าจะเป็นงานเกี่ยวกับเครื่องตรวจจับ งานด้านการตรวจลักษณะเฉพาะและวัดขนาดชิ้นงาน ใช้หาตำแหน่งและวัดระยะทาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานด้านการแพทย์สามารถใช้ได้ทั้งการวินิจฉัยโรคและการรักษาโดยตรงจากการใช้คลื่นอัลตราโซนิก

แทรนส์ดีวเซอร์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นชนิดเพียโซอิเล็กทริกแทรนส์ดีวเซอร์ ดังนั้นปัญหาที่สำคัญในการเตรียมตัวแทรนส์ดีวเซอร์ คือ เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่สูงมากทำให้ไม่สามารถหาวัสดุที่มีอะคูสติคิมพีแดนซ์เหมาะสมกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในการทำเป็นส่วนประกอบอื่นๆของแทรนส์ดีวเซอร์ได้ การมีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกที่ผิวรอยต่อไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานด้อยลงไป ส่วนประกอบอื่นๆของแทรนส์ดีวเซอร์ที่สำคัญได้แก่ วัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดีวเซอร์ เป็นวัสดุที่อยู่ระหว่างเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกับตัวกลางที่ใช้งานซึ่งจะต้องหาวัสดุ และออกแบบให้ลดความแตกต่างระหว่างตัวกลางกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเพื่อเพิ่มการส่งผ่านของคลื่นอัลตราโซนิกให้มากที่สุด และส่วนประกอบอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญมากคือ ส่วนท้ายของแทรนส์ดีวเซอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ต่อมาจากเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเข้ามาอีก ส่วนนี้ต้องมีอะคูสติคิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับเพียโซอิเล็กทริกมากที่สุดแต่ต้องมีค่าแอมเพนนิวเอชันมากด้วย ทั้งนี้เพื่อรับคลื่นจากเพียโซอิเล็กทริกได้มากแต่สามารถดูดซับคลื่นไม่ให้สะท้อนกลับไปรบกวนการรับคลื่นใหม่ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกได้อีก ปัจจุบันนี้มีการใช้วัสดุพวกโลหะมาทำคอมพอสิตกับพวกเรซิน ซึ่งเป็นการเพิ่มได้ทั้งอะคูสติคิมพีแดนซ์ และแอมเพนนิวเอชันเพื่อใช้เป็นวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดีวเซอร์ได้ด้วย นอกจากนี้ในการทำแทรนส์ดีวเซอร์ตัวเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีการพัฒนาให้มีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่ลดต่ำลงโดยการทำเป็นคอมพอสิตกับพอลิเมอร์ที่มีอะคูสติคิมพีแดนซ์ต่ำกว่า เช่น PVDF แทรนส์ดีวเซอร์ [1] เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบและสามารถหาวัสดุที่จะทำส่วนประกอบอื่นๆได้ง่ายขึ้น

ในการทาวิจัยในครั้งนี้จะเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์เพื่อใช้ในการทดสอบชิ้นงานและการวัดระยะจากส่วนประกอบต่างๆของแทรนส์ดีวเซอร์ดังต่อไปนี้ คือ เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ส่วนหลังของแทรนส์ดีวเซอร์ [2-4] ตัวโครงแทรนส์ดีวเซอร์และสายไฟ [5] โดยไม่มีส่วนหน้า

ของแทรนส์ดีวเซอร์ [6-7] ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงเริ่มจากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของ PZT ซึ่งเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกทั้งทางชนิดวัสดุที่ใช้และลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน เพื่อหา ลักษณะที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำแทรนส์ดีวเซอร์ต่อไป ก่อนจะศึกษาต่อในส่วนของวัสดุส่วนหลัง ของแทรนส์ดีวเซอร์จากการทำคอมพอสิตระหว่างโลหะกับอีพอกซีเรซิน เพื่อปรับปรุงค่าอะคูสติก อิมพีแดนซ์และค่าแอทเทนนิวเอชันที่เหมาะสมกับการเตรียมแทรนส์ดีวเซอร์ ก่อนจะประกอบส่วน ต่างๆกับตัวโครงแทรนส์ดีวเซอร์ที่ทำมาจากพลาสติก เพื่อเตรียมเป็นเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิก แทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างแล้วศึกษาการรับ-ส่งสัญญาณกับเครื่องรับ-ส่งสัญญาณ อัลตราโซนิกจาก การตอบสนองที่ความถี่และเวลาต่างๆของสัญญาณที่ให้และรับจากแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่าง เพื่อ ประเมินผลดูประสิทธิภาพของการกำเนิดสัญญาณและการรับสัญญาณของแทรนส์ดีวเซอร์ที่เตรียม มาจากวัสดุที่ทำวิจัยในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาวัสดุที่เหมาะสมในการเตรียมเป็นส่วนประกอบต่างของเพียโซอิเล็กทริก อัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ได้
2. เพื่อออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ที่จะใช้ในการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิก แทรนส์ดีวเซอร์ได้
3. เพื่อเตรียมตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์และสามารถวิเคราะห์ ลักษณะ เฉพาะของแทรนส์ดีวเซอร์ที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

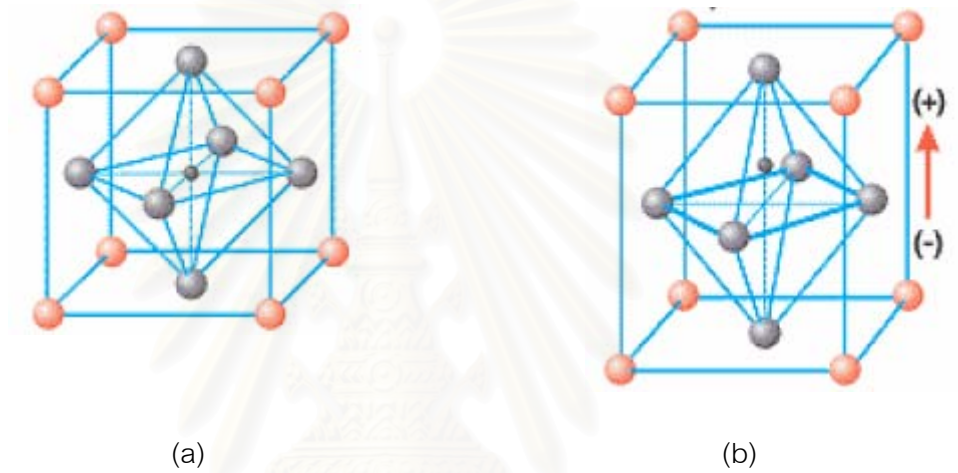
ขอบเขตของการวิจัยครั้งนี้คือ เปรียบเทียบสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสองชนิดที่ เตรียมเป็นชิ้นงานสำหรับเตรียมแทรนส์ดีวเซอร์ คือ hard PZT และ soft PZT และศึกษาสมบัติของ ส่วนหลังของแทรนส์ดีวเซอร์ที่เตรียมขึ้นมาจากการทำโลหะอะลูมิเนียมคอมพอสิตกับเรซิน และ ทองแดงคอมพอสิตกับเรซิน ก่อนนำส่วนที่เหมาะสมที่สุดไปเตรียมเป็นแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างโดย ไม่มีส่วนหน้าของแทรนส์ดีวเซอร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับ-ส่งสัญญาณจากเป้าหมายใน น้ำได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

2.1.1 โครงสร้างผลึกและสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก



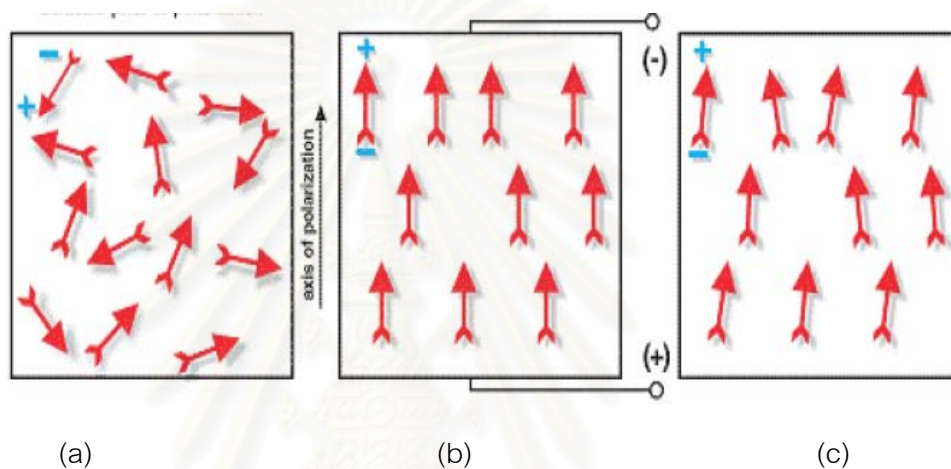
- $A^{2+} = Pb^{2+}$ (ตะกั่วไอออน) Ba^{2+} (แบเรียมไอออน) หรือ ไดวาเลนต์ไอออนขนาดใหญ่กว่า
- $O^{2-} =$ ออกซิเจนไอออน
- $B^{4+} = Ti^{4+}$ (ไททาเนียมไอออน) Zr^{4+} (เซอร์โคเนียมไอออน) หรือ เทตระวาเลนต์ไอออนที่ขนาดเล็กกว่า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [8]

(a) คุณหมึเหนือจุดวิกฤติ

(b) คุณหมึต่ำกว่าจุดวิกฤติ

เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) ซึ่งประกอบด้วยไอออนของโลหะทรานซิชันที่ไอออน (tetravalent ion) เช่น ไททานเนียมไอออน (Ti^{4+}) หรือ เซอร์โคเนียมไอออน (Zr^{4+}) ที่มีอะตอมขนาดเล็กอยู่กึ่งกลางโครงสร้างผลึก โดยมีขนาดไอออนโลหะที่ขนาดใหญ่กว่าเป็นพวกไดวาเลนต์ไอออน (divalent ion) คือ ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) อยู่ที่กึ่งกลางหน้าทั้งหกของโครงสร้างผลึก และมีไดวาเลนต์ไอออนพวกตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) หรือ แบเรียมไอออน (Ba^{2+}) อยู่ที่มุมทั้งแปดของโครงสร้างผลึกดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 การเกิดโพลาไรเซชัน (polarization) ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [8]

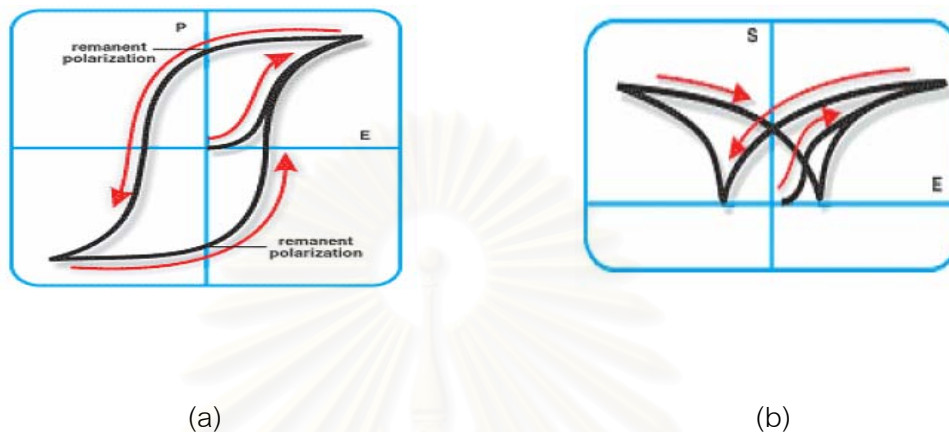
(a) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันที่เกิดจากสภาพไร้ทิศทางของแต่ละโดเมน (domains) ในเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

(b) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันขณะให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

(c) แสดงทิศทางของโพลาไรเซชันหลังหยุดให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

ที่อุณหภูมิเหนือจุดวิกฤติ (Curie point) โครงสร้างผลึกเพอร์รอฟสไกต์ในเซรามิกที่ผ่านการซินเทอ์ (sintering) แล้วจะเป็นแบบคิวบิกที่ไม่มีไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.1a เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดวิกฤติโครงสร้างผลึกเพอร์รอฟสไกต์จะเป็นแบบเทตระโกนอล (tetragonal) หรือ รอมโบฮีดรอล (rhombohedral) และมีไดโพลโมเมนต์เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.1b โครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ที่มีโพลาไรเซชันไปทิศทางเดียวกันเป็นกลุ่มๆ ในเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

เรียกว่า โดเมน (domains) ทิศทางของแต่ละโดเมนในเซรามิกจะกระจัดกระจายไร้ทิศทางที่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถระบุโพลาไรเซชันโดยรวมของเซรามิกได้ดังรูปที่ 2.2 a



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดแรงเค้นทางกล (mechanical strain, s) และโพลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้า [8]

- (a) แสดงวงจรัสเทอริซิส (Hysteresis loop) หรือการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเมื่อให้สนามไฟฟ้า
- (b) แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดแรงเค้นทางกล (mechanical strain, s) ตามทิศทางของโพลาไรเซชันเมื่อให้สนามไฟฟ้า

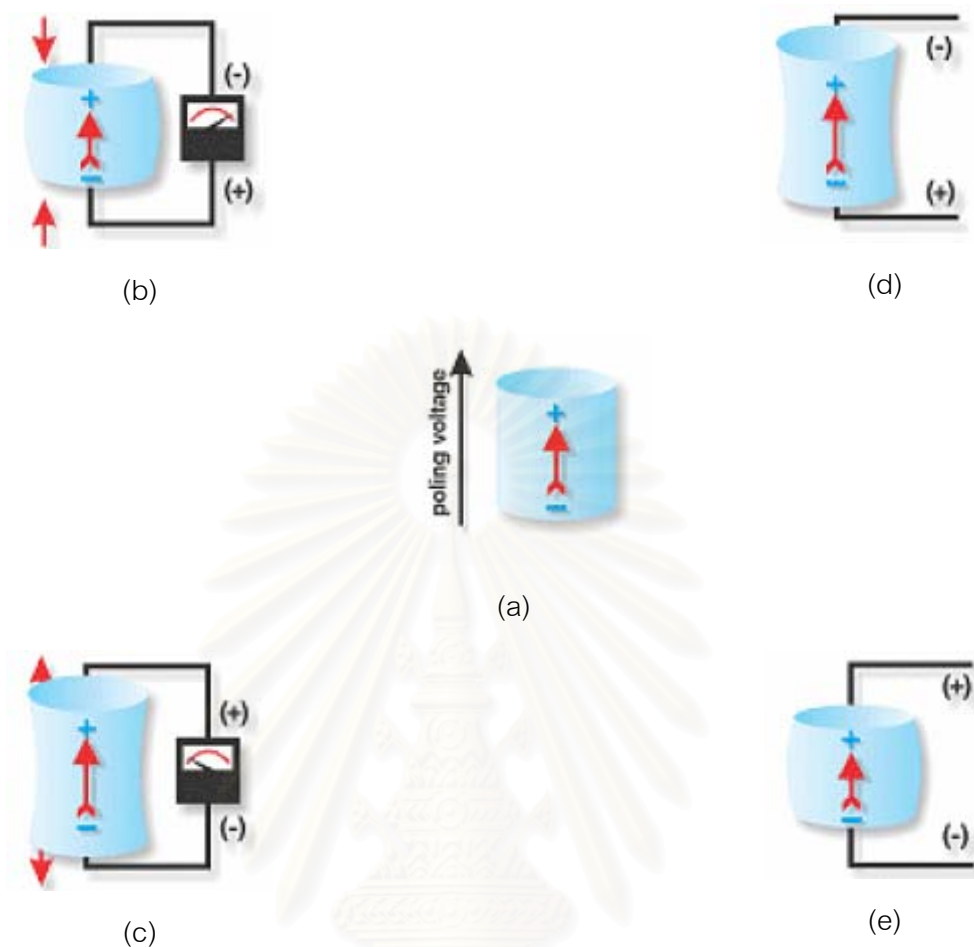
ทิศทางของโดเมนแต่ละโดเมนในเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถทำให้มีทิศทางไปในทิศทางเดียวกันเพื่อให้เกิดโพลาไรเซชันของเซรามิกได้ โดยการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงพอภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติดังแสดงในรูปที่ 2.2b ทั้งนี้เนื่องจากการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรงกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะทำให้โดเมนแต่ละโดเมนที่มีการจัดเรียงตัวแบบไร้ทิศทางเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ไปในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้ แต่ละโดเมนจึงมีทิศทางไปในทางเดียวกันเป็นผลทำให้ขนาดความยาวของเซรามิกตามทิศทางของโพลาไรเซชันยาวมากขึ้น (เปลี่ยนโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์จากแบบคิวบิกเป็นแบบเทตระโกนอล หรือ รอมโบฮีดรอล) และเมื่อหยุดให้สนามไฟฟ้า โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจากการจัดตัวใหม่ของโดเมนนั้นจะไม่กลับคืนสู่

สภาพเดิมก่อนที่จะให้สนามไฟฟ้าอีก เนื่องจากแต่ละโดเมนที่ถูกจัดเรียงตัวใหม่ไปในขณะที่อยู่ในสนามไฟฟ้าจะกีดขวางกันเองด้วยโดเมนข้างเคียง ทำให้คงแนวโน้มของทิศทางโดยรวมทั้งหมดของโดเมนอยู่ในทิศทางเดียวเหมือนขณะอยู่ในสนามไฟฟ้าแต่มีโพลาริเซชันลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.2c

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านการโพล (pole) แล้วจะมีความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นต่อขนาดของสนามไฟฟ้าที่เป็นลักษณะวงจรมีฮิสเทอรีซิสดังแสดงในรูปที่ 2.3a การให้สนามไฟฟ้ากับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะเพิ่มขึ้นจนทำให้เริ่มมีโพลาริเซชันเกิดขึ้น (coercive field, E_c) จนถึงจุดที่มีโพลาริเซชันคงที่ (saturation polarization, P_s) สนามไฟฟ้า ณ. จุดนี้จะเป็นสนามไฟฟ้าให้ได้มากที่สุด เมื่อลดสนามไฟฟ้าลงมาโพลาริเซชันที่เหลืออยู่จะไม่ลดลงตามแนวโน้มเดิม และเมื่อลดสนามไฟฟ้าจนมีค่าเป็นศูนย์จะทำให้โพลาริเซชันไม่ลดลงไปที่ศูนย์ด้วย เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้แล้วตอนต้นโพลาริเซชันจุดนี้เรียกว่า โพลาริเซชันถาวร (remanent polarization, P_r) เมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทางกลับกันต่อไปอีก ผลจะเกิดในลักษณะเดียวกันแต่จะมีทิศทางตรงข้ามกับครั้งแรก สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างหรือเกิดแรงเค้นทางกล (mechanical strain, s) ตามทิศทางของโพลาริเซชันเมื่อให้สนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.3b

2.1.2 ปรากฏการณ์ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

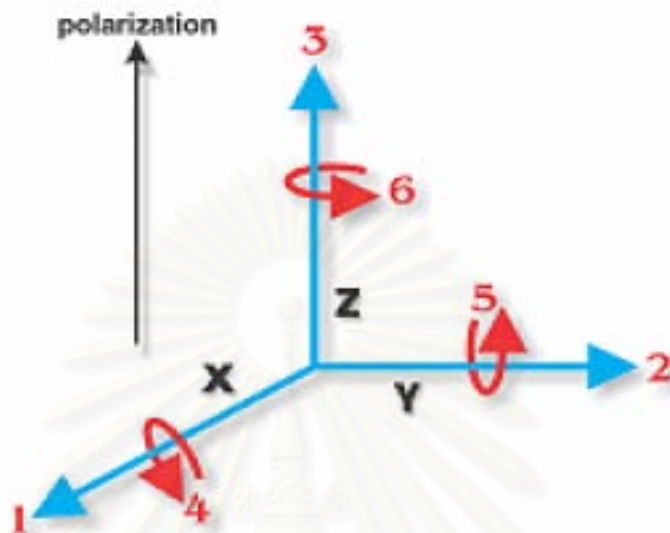
การให้แรงกดหรือแรงดึงและการสลับขั้วของสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่โพลแล้วจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและสนามไฟฟ้าในเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเกิดขึ้นตามสมบัติของโครงสร้างเพอร์รอฟสไกต์ ถ้าให้แรงกดกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับโพลาริเซชันของเซรามิกดังรูปที่ 2.4b แต่ถ้าให้แรงดึงกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับโพลาริเซชันของเซรามิกได้ดังรูปที่ 2.4c เรียกปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect) ในขณะที่ถ้าให้สนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะทำให้ขนาดเซรามิกสั้นลงดังรูปที่ 2.4e แต่เมื่อให้สนามไฟฟ้าตรงกันข้ามกับโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมีขนาดของรูปร่างยาวขึ้นดังรูปที่ 2.4d เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบกลับ (converse piezoelectric effect) ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงขนาดที่เกิดขึ้นจะเท่ากับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ให้



รูปที่ 2.4 ปราบกฎการณัของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [8]

- (a) โพลลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกหลังจากการโพล
- (b) เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับโพลลาไรเซชันของเซรามิกขณะให้แรงกด
- (c) เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกำเนิดสนามไฟฟ้าในทิศทางเดียวกันกับโพลลาไรเซชันของเซรามิกขณะให้แรงดึง
- (d) การยืดตัวของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะให้สนามไฟฟ้าทิศทางตรงข้ามกับโพลลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก
- (e) การหดตัวของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกขณะให้สนามไฟฟ้าทิศทางตรงกับโพลลาไรเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

2.1.3 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constants)



รูปที่ 2.5 ตัวเลขทิศทางของสัญลักษณ์ตามแกน X Y และ Z ที่ใช้ในการหาสมบัติต่างๆ ของสารเพียโซอิเล็กทริก [8]

สมบัติต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ให้ออกมาสัมพันธ์กับทิศทางของสนามไฟฟ้า และพลังงานกลต่างๆที่ให้กับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก โดยทั่วไปแล้วค่าคงที่ต่างๆจะเขียนแสดงโดยมีตัวเลขสองตัวห้อยใต้สัญลักษณ์ของสมบัตินั้นๆไว้ ตัวเลขนี้แสดงให้เห็นถึงทิศทางที่พลังงานกระทำกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกและพลังงานที่เซรามิกให้ออกมาว่ามีทิศทางใด ทิศทางตามแกน Z จะเป็นทิศทางตามโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในระบบแกน X Y และ Z ดังรูปที่ 2.5 โดยเขียนตัวเลขห้อยแสดงทิศตามแกนเป็น 1 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนพลังงานเฉือนตามแนวแกน X Y และ Z จะเขียนตัวเลขห้อยแสดงทิศตามแกนเป็น 5 6 และ 7 ตามลำดับ ตัวเลขห้อยตัวแรกจะแสดงถึงทิศทางที่ให้พลังงานกับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ส่วนตัวเลขตัวที่สองจะแสดงถึงทิศทางของพลังงานที่ขึ้นงานเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองออกมา

2.1.3.1 สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d)

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกเป็นค่าที่แสดงถึงความแรงของโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นต่อขนาดของพลังงานกลที่ให้กับชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก หรือในทางตรงกันข้ามเป็นขนาดของพลังงานกลที่ได้จากชิ้นงานต่อขนาดของสนามไฟฟ้าที่ให้กับเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ตัวอย่างเช่น d_{33} เป็นค่าที่แสดงถึงโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นในทิศทาง 3 (Z) ของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกซึ่งเป็นทิศทางที่ขนานกับทิศทางของโพลาริเซชันของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกต่อขนาดของพลังงานกลที่ให้ในทิศทาง 3 (Z) หรือขนาดของพลังงานกลที่ได้ ต่อขนาดของสนามไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกในลักษณะเดียวกัน

2.1.3.2 สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า

(electromechanical coupling factor, k_p)

สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าเป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการที่จะเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานในอีกรูปหนึ่ง ดังนั้น k_p เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานไป-มาระหว่างพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้าของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเมื่อให้สนามไฟฟ้าในทิศทาง 3 ต่อพลังงานที่เกิดขึ้นในทิศทาง 1 และ 2 ของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1[8]

$$K_p = \sqrt{[2.51\left(\frac{f_a - f_r}{f_a}\right) - \left(\frac{f_a - f_r}{f_a}\right)^2]} \dots\dots\dots 2.1)$$

เมื่อ k_p คือ สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (electromechanical coupling factor)

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

f_a คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (Hz)

2.1.3.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric dissipation factor)

สัมประสิทธิ์การสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric dissipation factor) เป็นค่าที่สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพของการนำไฟฟ้า (conductance) ของชิ้นงาน ต่อ effective susceptance จากการต่อวงจรขนานกับชิ้นงาน เป็นค่าที่แสดงถึงการสูญเสียของพลังงานที่ให้ไปในรูปของพลังงานอื่นที่ไม่ต้องการบางครั้งเรียกว่า dielectric loss tangent ($\tan \delta$) เนื่องจากสามารถหาได้จากค่า tangent ของ dielectric loss angle ($\tan \delta$) ซึ่งมักจะวัดค่าที่ความถี่ 1 kHz

2.1.3.4 สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor, Q_m)

สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลเป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของวัสดุ หรือในทางกลับกันก็เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพในการส่งผ่านจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลของวัสดุซึ่งค่าที่ทำให้เกิดการส่งผ่านพลังงานได้ดี หรือไม่ดีขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2[8]

$$Q_m = \frac{f_a^2}{(2\pi f_r C_p Z_r)(f_a^2 - f_r^2)} \dots\dots\dots 2.2)$$

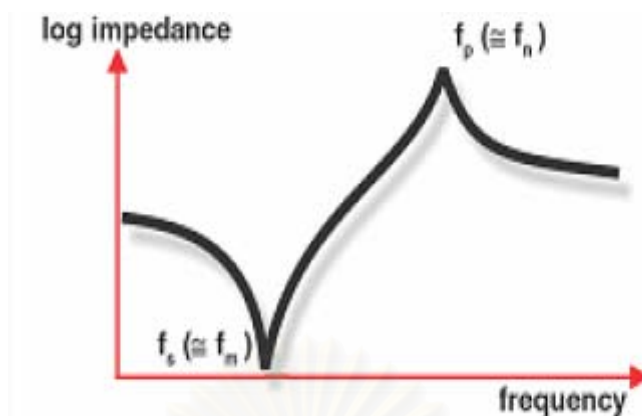
เมื่อ Q_m คือ สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor)

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

f_a คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (Hz)

Z_r คือ อิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Ω)

C_p คือ ความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz (F)



รูปที่ 2.6 ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance) ที่ความถี่ต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก [8]

2.1.4 ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency, f_r) [9]

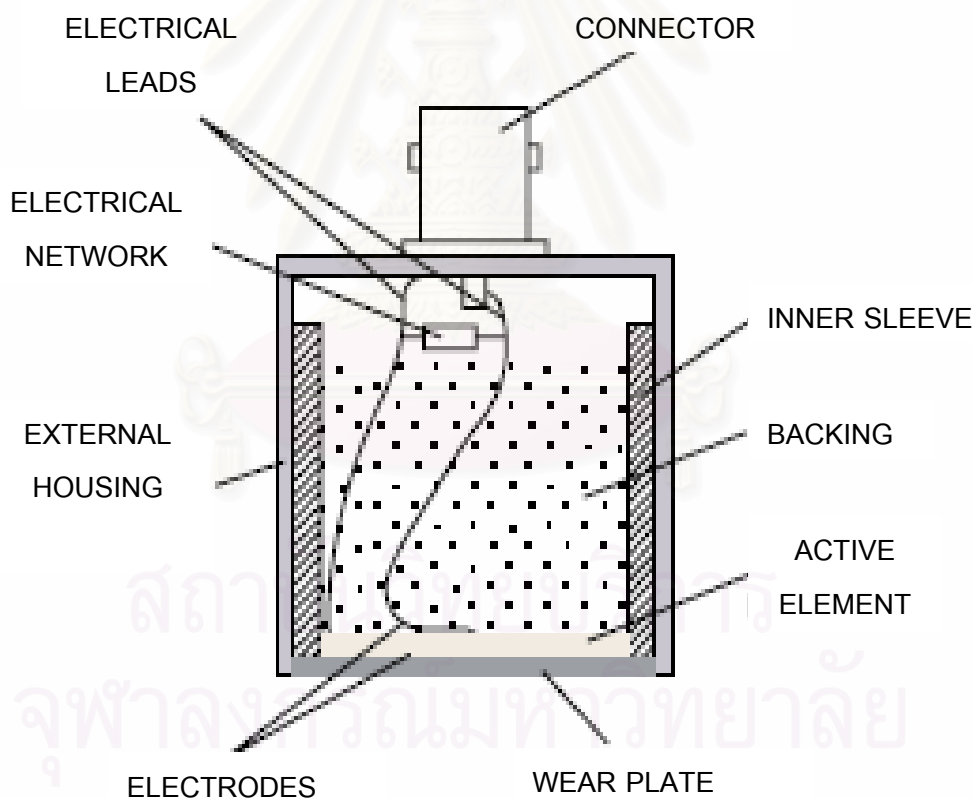
เมื่อต่อไฟฟ้ากระแสสลับกับชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก การเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างของชิ้นงานจะเป็นไปตามความถี่ของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นความถี่ที่ชิ้นงานเซรามิกสามารถสั่นได้ง่ายที่สุดและมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกลได้มากที่สุดคือ ความถี่เรโซแนนซ์ นั่นเอง

จากรูปที่ 2.6 เมื่อเพิ่มความถี่ให้กับชิ้นงานสูงขึ้นไปจนถึงชิ้นงานมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำลงที่สุดจุดแรก (minimum impedance, Z_m) ความถี่ที่จุดนี้เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 (resonance frequency, f_r หรือ f_m) และเมื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นอีกจะทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานไฟฟ้าสูงสุดจุดแรกเช่นกัน (maximum impedance, Z_n) ความถี่ที่จุดนี้เรียกว่าความถี่แอนติเรโซแนนซ์ ครั้งที่ 1 (antiresonance frequency, f_a หรือ f_n) ทั้งความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์สามารถเกิดได้มากกว่าหนึ่งความถี่ขึ้นอยู่กับชิ้นงาน

2.2 เพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric ultrasonic transducer)

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนจากจังหวะสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นการสั่นเชิงกล และการเปลี่ยนกลับจากการสั่นเชิงกลไปเป็นจังหวะสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นหัวใจของทรานสดิวเซอร์ก็คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนจากจังหวะสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นการสั่นเชิงกลและการเปลี่ยนกลับจากการสั่นเชิงกลไปเป็นจังหวะสัญญาณไฟฟ้านั่นเอง นอกจากนี้ยังต้องมีส่วนประกอบอื่นๆที่จะเป็นตัวช่วยให้ทรานสดิวเซอร์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์โดยทั่วไป [5]

2.2.2 ส่วนประกอบของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์

เพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ โดยทั่วไปที่ใช้ในการกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ในงานต่างๆ ส่วนประกอบที่สำคัญของทรานส์ดิวเซอร์ได้แก่ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric material) วัสดุส่วนหลัง (backing material) วัสดุส่วนหน้า (matching material) สายไฟ (Cable) และ ตัวโครงทรานส์ดิวเซอร์ (Case) เป็นต้น

2.2.2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric materials)

หลักพื้นฐานของทรานส์ดิวเซอร์ คือ การเปลี่ยนจากจังหวะสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นการสั่นเชิงกล และการเปลี่ยนกลับจากการสั่นเชิงกลไปเป็นจังหวะสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นหัวใจของการทำให้เกิดทรานส์ดิวเซอร์คือ วัสดุที่สามารถเปลี่ยนจากจังหวะสัญญาณไฟฟ้าไปเป็นการสั่นเชิงกล และการเปลี่ยนกลับจากการสั่นเชิงกลไปเป็นพัลส์สัญญาณไฟนั่นเอง หนึ่งในวัสดุที่ใช้ในปัจจุบันก็คือ เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกดังที่กล่าวมาแล้ว วัสดุที่ใช้ในการทำทรานส์ดิวเซอร์ส่วนใหญ่จึงมักเป็นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ซึ่งสามารถตัดได้หลายขนาดเพื่อให้มีการสั่นที่มีความถี่ต่างๆ เมื่อทำเป็นอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ [10-14] ความหนาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์ โดยทั่วไปสามารถหาได้จากครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่มีความถี่ที่ต้องการ ดังนั้นยิ่งความถี่ที่ต้องการมีสูงมากขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลงตาม เป็นเหตุให้ปัญหาหลักอย่างหนึ่งในการใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกขนาดที่บางมากๆคือ ทำให้ชิ้นงานแตกหักง่ายเนื่องจากการเปราะของความเป็นเซรามิกนั่นเอง ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาพวกเพียโซพอลิเมอร์คอมโพสิท (piezo-polymer composite) มาเตรียมทรานส์ดิวเซอร์ในงานเฉพาะด้านมากขึ้น รายละเอียดเกี่ยวกับสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้

2.2.2.2 วัสดุส่วนหลังของทรานส์ดิวเซอร์ (backing materials)

วัสดุที่สามารถเป็นวัสดุส่วนหลังได้ต้องมีการแอทเทนนูเอชัน (attenuation) และมีความหนาแน่นที่สูงเพื่อใช้ในการควบคุมการสั่นของทรานส์ดิวเซอร์ โดยต้องเป็นวัสดุที่สามารถให้คลื่นอัลตราโซนิกจากเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกผ่านไปได้มากที่สุด แต่ช่วยในการดูดกลืนพลังงานที่ส่งมาจากผิวหน้าของวัสดุเซรามิกไม่ให้สะท้อนกลับไปยังผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุเซรามิกอีก ถ้าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของวัสดุส่วนหลังเข้ากันได้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้

แทรนส์ดีวเซอร์มีความละเอียด (resolution) ในการใช้งานดี แต่อาจจะมี ความเข้มของสัญญาณต่ำได้ แต่ถ้าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของวัสดุส่วนหลังไม่เข้ากันกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำให้พลังงานคลื่นบางส่วนไม่ผ่านจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปยังวัสดุส่วนหลังได้ แต่สามารถสะท้อนกลับผ่านวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปยังเป้าหมายอีกทำให้ความละเอียดในการใช้งานลดลงและอาจทำให้ความเข้มของสัญญาณ และความไว (sensitivity) สูงกว่าได้จากกรณีที่ได้รับพลังงานคลื่นลูกเดิมที่สะท้อนกลับเข้ามาในวัสดุเพียโซอิเล็กทริกหลายครั้ง

วัสดุส่วนหลังในแทรนส์ดีวเซอร์ส่วนใหญ่ทำได้โดยการทำคอมพอสิตระหว่างผงโลหะหรือวัสดุอื่น ๆ [2, 3, 15] ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.1 โดยเฉพาะที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ คอมพอสิตระหว่างทังสเตน (W) กับอีพอกซีเรซิน

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสมบัติของคอมพอสิตที่ใช้ทำเป็นวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดีวเซอร์[4]

วัสดุที่ใช้เติม	ความหนาแน่น ของคอมพอสิต (g/cm ³)	ความหนาแน่น จากการคำนวณ (g/cm ³)	ความเร็วคลื่น (m/s)	อะคูสติก อิมพีแดนซ์ ($\times 10^6 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
เหล็ก (Fe)	3.8	3.5	2072	7.9
ทังสเตน (W)	6.6	6.1	1668	11.0
อะลูมิเนียม (Al)	1.42	1.75	2300	3.3
ไม้	1.21	-	1910	2.1
อีพอกซี (Epoxy)	1.15	-	2136	2.5

2.2.2.3 วัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดีวเซอร์ (matching materials)

วัสดุส่วนหน้าเป็นวัสดุที่มีอะคูสติกอิมพีแดนซ์อยู่ระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับตัวกลางหรือเป้าหมายที่ต้องการให้คลื่นผ่าน เพื่อลดความแตกต่างระหว่างค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของวัสดุทั้งสองชนิด ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแทรนส์ดีวเซอร์ดียิ่งขึ้น และยังเป็นส่วนที่สามารถ

ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วย ตัวอย่างของวัสดุที่สามารถทำเป็นวัสดุ ส่วนหน้าของทรานส์ดิวเซอร์แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของวัสดุ [15]

วัสดุ	อะคูสติคิมพีแดนซ์ (Mrayls)
อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin)	3.151
แก้ว (Glass Quartz)	14.50
อะลูมิเนียม (Aluminium)	17.10
เลดเซอร์โคเนตไททาเนียมออกไซด์ (PZT)	31.30
ทองเหลือง (Brass)	36.70
ทองแดง (Copper)	41.61
ทังสเตน (Tungsten)	99.72

2.2.2.4 ขั้วอิเล็กโทรดและการเชื่อมต่อของทรานส์ดิวเซอร์ (electrodes and connection)

การเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบของทรานส์ดิวเซอร์แต่ละชิ้นส่วนที่คลื่นส่งผ่าน ต้องดีมากๆ การเกิดช่องอากาศจากการเชื่อมต่อที่ไม่ดีเพียงแค่ขนาดไมโครเมตรสามารถทำให้มีผลกระทบต่อการส่งผ่านของคลื่นเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น การเชื่อมต่อระหว่างวัสดุที่ใช้ทำ ขั้วอิเล็กโทรดกับวัสดุ เพียโซอิเล็กทริก และ วัสดุส่วนหลังต้องดีทั่วทั้งหมดของพื้นที่

2.2.2.5 ตัวโครงแทนส์ติวเซอร์ (Case) และ สายไฟ (Cable)

ตัวโครงแทนส์ติวเซอร์ต้องเป็นส่วนที่สามารถประกอบส่วนอื่นๆ ของแทนส์ติวเซอร์ไว้ได้ โดยปกติแล้วตัวโครงแทนส์ติวเซอร์ทำมาจากโลหะหรือพลาสติกเป็นต้น นอกจากนี้ตัวโครงแทนส์ติวเซอร์ยังเป็นส่วนที่ต้องใช้ในการป้องกันส่วนอื่นๆ ได้ด้วย ดังนั้นตัวโครงแทนส์ติวเซอร์จึงจำเป็นต้องทนต่อสภาวะแวดล้อมที่ใช้งานได้ ป้องกันน้ำได้ และสามารถทำความสะอาดได้ง่าย นอกจากนี้สายไฟที่ใช้ควรมีความต้านทานต่ำและมีวัสดุหุ้มที่สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้ จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานของแทนส์ติวเซอร์เกิดได้ดี

2.2.3 การเข้ากันได้ของอะคูสติกอิมพีแดนซ์ [16] (acoustic impedance matching)

คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านวัสดุด้วยแรงดันของคลื่นเสียงได้ เนื่องจากการสั่นของอะตอม หรือ โมเลกุลของของแข็งไปยังอะตอม หรือ โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงต่อกันไป ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ โดยอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของวัสดุคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 [15]

$$Z = \rho v \dots\dots\dots 2.3)$$

เมื่อ Z คือ อะคูสติกอิมพีแดนซ์ ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

v คือ ความเร็วคลื่นเสียง (m/s)

ความสำคัญของอะคูสติกอิมพีแดนซ์ คือ

1. ใช้ในการหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน และการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงที่ผิวสัมผัสของวัสดุสองชนิดที่มีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน

2. ใช้ในการออกแบบอัลตราโซนิกเทรนส์ดิวเซอร์
3. เป็นค่าที่สามารถบอกความสามารถการดูดซับของคลื่นเสียงในตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่าน

สมการที่ 2.4 [15] เป็นสมการที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสามารถในการที่คลื่นเสียงจะสะท้อนกลับหรือส่งผ่านของวัสดุสองชนิด จากสมการจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น (reflection coefficient, R) มีค่าเท่ากับกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างผลต่างของอิมพีแดนซ์ของวัสดุทั้งสองชนิด ต่อ ผลรวมของอิมพีแดนซ์ของวัสดุทั้งสองชนิดที่คลื่นผ่าน

$$R = \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2 \dots\dots\dots 2.4)$$

ซึ่งผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกับสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านของคลื่น (transmission coefficient, T) จะมีค่าเท่ากับหนึ่งดังสมการที่ 2.5 [15]

$$T = 1 - R \dots\dots\dots 2.5)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านของคลื่น (transmission coefficient)

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น (reflection coefficient)

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 1

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ของตัวกลางที่ 2

การส่งผ่านของคลื่นอัลตราโซนิกจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปในตัวกลางที่คลื่นจะเดินทางผ่านได้ดีแค่ไหนขึ้นอยู่กับการส่งผ่านนั่นเอง โดยถ้าค่านี้สูงนั้นหมายถึง ความสามารถที่คลื่นจะเดินทางผ่านไปยังวัสดุที่สองได้ดี ถ้าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของทั้งสองมีความแตกต่างกันมากก็จะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านน้อย แต่หมายถึงสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมากนั่นเอง ดังนั้นการที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้งานกับตัวกลางที่เป็นน้ำ ซึ่งมีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากจึงมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแค่ 18 % เท่านั้นเอง ส่วน PVDF ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ปรับปรุงขึ้นมาโดยใช้สารพอลิเมอร์เป็นส่วนผสมด้วยสามารถทำให้มีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันน้อยลง ทำให้มีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงขึ้นไปเป็น 85 % ได้ ถ้ามีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากๆเช่น วัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับอากาศ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านเหลือเพียงประมาณ 6×10^{-3} % เท่านั้น

เราสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของวัสดุที่มีค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันมากได้โดยการใส่วัสดุที่มีค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ระหว่างวัสดุทั้งสองมาทำเป็นวัสดุส่วนหน้าได้ ซึ่งสามารถทำมากกว่าหนึ่งชั้นได้[6, 7]

2.2.4 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแทรนสดิวเซอร์ [5,17]

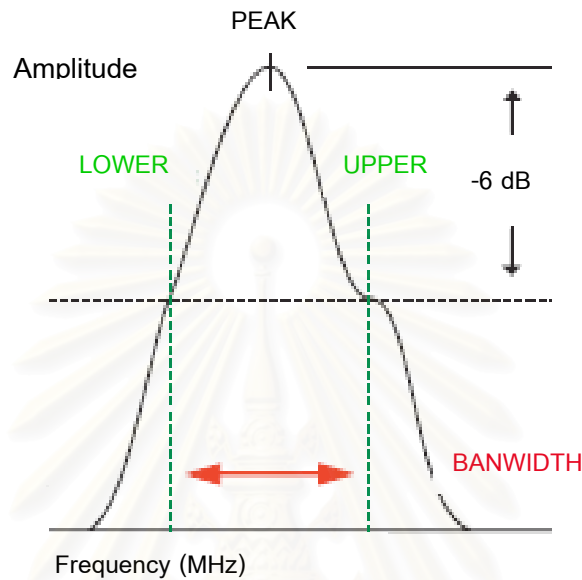
2.2.4.1 การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ (Frequency response)

การตอบสนองสัญญาณกับความถี่สามารถวัดได้จากค่าของความเข้มของสัญญาณ (amplitude) ของคลื่นที่สะท้อนกลับมาหลังจากส่งออกไปกระทบเป้าหมาย หรือจากแหล่งกำเนิดอื่นๆที่มีความถี่ต่างๆ สัญญาณที่ได้นี้จะเป็นตัวพื้นฐานที่จะใช้สำหรับการบอกลักษณะเฉพาะของแทรนสดิวเซอร์เช่น ความถี่ที่ทำให้มีความเข้มของสัญญาณสูงสุด f_p ความถี่กลาง f_c ความถี่เหนือ f_U และ ความถี่ล่าง f_l ซึ่งนำไปสู่การบอกความกว้างของช่วงความถี่ (bandwidth, BW) ที่สามารถใช้งาน และความละเอียดการใช้งานได้ การวัดสามารถทำได้สองวิธีคือ การวัดจากการปล่อยสัญญาณเป็นช่วงๆ (shock excitation) และ การปล่อยสัญญาณในรูปแบบต่อเนื่อง (sinusoidal burst) รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองสัญญาณกับความถี่

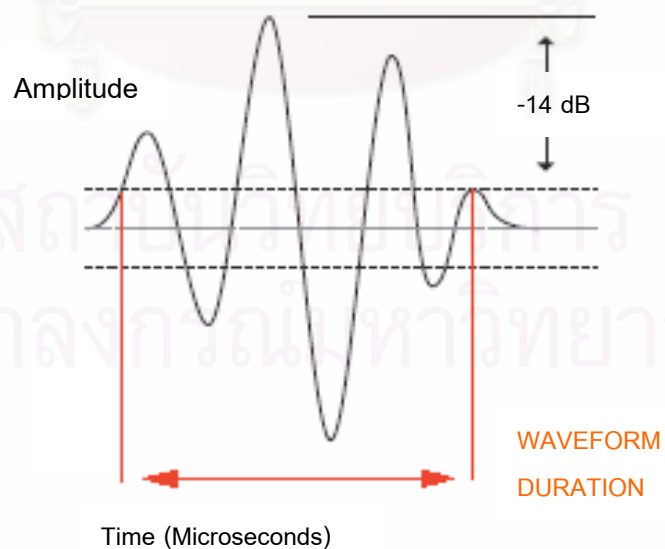
2.2.4.2 การตอบสนองสัญญาณกับเวลา (Time response)

การตอบสนองสัญญาณกับเวลาสามารถวัดได้จากค่าของความเข้มของสัญญาณ (amplitude) ของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากส่งออกไปกระทบเป้าหมายที่เวลาต่างๆ สัญญาณที่ได้นี้จะเป็นตัวพื้นฐานที่จะใช้สำหรับการบอกลักษณะเฉพาะของแทรนสดิวเซอร์ เช่น เวฟฟอร์มดูเรชั่น

(waveform duration) โดยทั่วไปจะเป็นช่วงเวลาที่อยู่ในระดับความเข้มสัญญาณที่ประมาณ -14 dB และ -20 dB เป็นต้น รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองสัญญาณกับเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าแอมพลิจูดเรชั่น



รูปที่ 2.8 ลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองสัญญาณความถี่ [5]



รูปที่ 2.9 ลักษณะของสเปกตรัมการตอบสนองสัญญาณกับเวลา [5]

2.2.4.3 ค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้า (electrical impedance)

ค่าความต้านทานเชิงไฟฟ้าของทรานส์ดิวเซอร์สามารถวัดได้จากเครื่องมือ โดยทั่วไปจะเป็นการวัดระหว่างความเข้มของสัญญาณ (magnitude) ของความต้านทานเชิงไฟฟ้า และ เฟสไฟฟ้า (phase) สามารถนำไปใช้ในการบอกถึงความถี่เรโซแนนซ์ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ และ คำนวณประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้าได้ดังได้กล่าวไปแล้ว

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเกี่ยวกับอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์มีด้วยกันหลายด้านด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการวิจัยในด้านของการออกแบบ เพื่อนำอัลตราโซนิกไปใช้ในงานด้านต่างๆ หรือ แม้แต่การวิจัยพัฒนาวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบต่างๆในการประดิษฐ์ทรานส์ดิวเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานให้ดีขึ้น และสามารถใช้ในหลากหลายงานมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ในปี 1995 N.T. Nguyen และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุส่วนหลังโดยการเพิ่มแอทเทนูเอชัน (attenuation) ของสารพวกอีพอกซี ที่จะใช้เป็นส่วนหลังของอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ การเพิ่มแอทเทนูเอชันของ N.T. Nguyen และคณะ ศึกษาจากการเติมอนุภาคของโลหะทั้งสแตน (W) ลงไปในเรซินที่อุณหภูมิ 60 °C แล้วนำคอมพอสิตที่ได้มาหาค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ได้ผลดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติของวัสดุส่วนหลังจากการศึกษาของ N.T. Nguyen และคณะ [3]

	Longitudinal wave velocity (m/s)	Acoustic impedance (10 ⁶ kg/m ² s)	Density (g/cm ³)
Material M ₂ + tungsten	1250	8.7	6.97
Pure epoxy + tungsten	1680	11.7	6.97

*หมายเหตุ M₂ = mixing Araldite D (Rubber) + Hy956 epoxy and Hycar CTBN 1300x31 (resin)

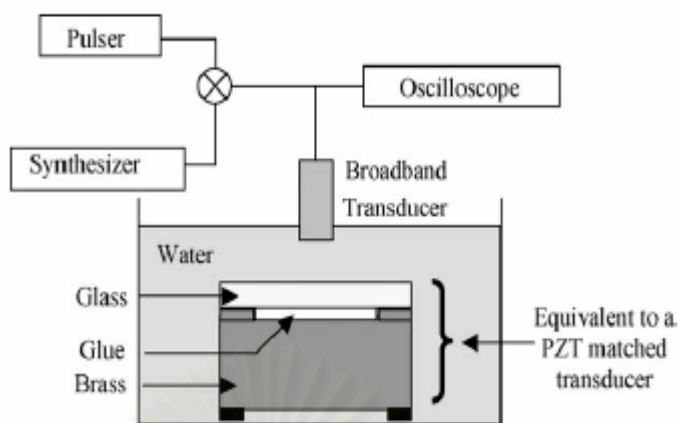
ต่อมาในปี 1998 S.K. Jain และคณะ [4] ก็มีการศึกษาในเรื่องนี้เหมือนกันแต่มีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการใช้โลหะพวกเหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นตัวเติมลงไปในเรซิน นอกเหนือจากที่ใช้เฉพาะทั้งสแตนอย่างเดียวนอกจากการศึกษาดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของวัสดุส่วนหลังจากการศึกษาของ S.K. Jain และคณะ [4]

Loading material	Density of composite (g/cm ³)	Computed density (g/cm ³)	Longitudinal velocity (m/s)	Acoustic impedance (10 ⁶ kg/m ² s)
Iron	3.8	3.5	2072	7.9
Tungsten	6.6	6.1	1668	11.0
Aluminium	1.42	1.75	2350	3.3

ในปี 2003 Farid El-Tantawy และ Yong kiel Sung [2] ได้ทำการศึกษาในส่วนของชนิดวัสดุส่วนหลังขึ้นมาจากการทำคอมพอสิตทูลูฟรอนระหว่างอีพอกซี ไททาเนียม และ พลาสติก โดยมีสารที่ช่วยในการเชื่อมเกาะเพื่อลดความเหนียว และเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคไททาเนียมในคอมพอสิตให้มากขึ้น พบว่าสามารถเพิ่มได้ทั้งค่าแอมเพนนิวเอชัน และ อะคูสติคิมพีแดนซ์ด้วย

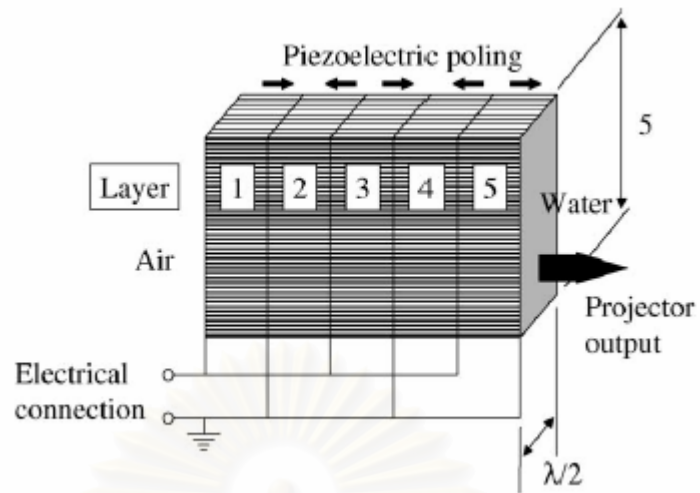
ปี ค.ศ. 2004 Drothee Callens และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาในส่วนของวัสดุส่วนหน้า เพื่อลดข้อจำกัดในการใช้ความหนาของวัสดุส่วนหน้าซึ่งมีค่าเท่ากับ 1/4 เท่าของความยาวคลื่นซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิม และสามารถหาวัสดุที่จะใช้ทำได้ง่ายยิ่งขึ้นเช่น แก้วเป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณจากความหนาและอะคูสติคิมพีแดนซ์ของวัสดุส่วนหน้าสองชนิดมาเชื่อมติดกัน โดยหนึ่งในวัสดุดังกล่าว คือ กาว ลักษณะการเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ และชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งพบว่าสามารถเทียบเคียงกับวิธีแบบดั้งเดิมได้



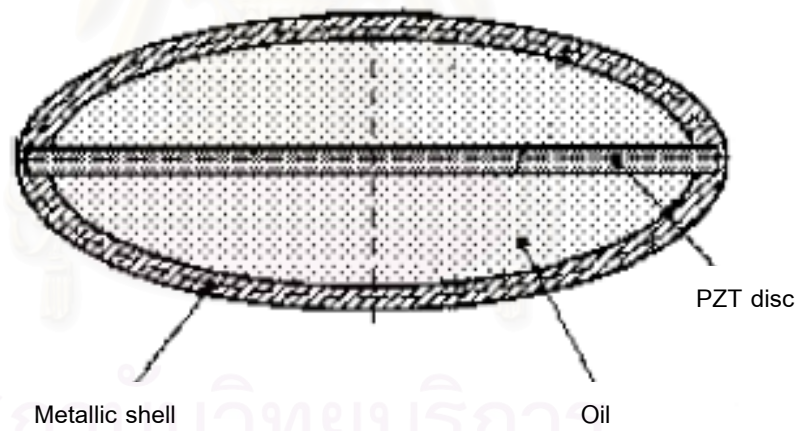
รูปที่ 2.10 การเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ และชิ้นงานของ Drothee Callens และคณะ[6]

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 เช่นเดียวกัน A. Abrar and S. Cochran [23] ได้แก้ปัญหาประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกคอมพอสิต์ชั้นเดียว โดยการทำให้มีหลายชั้นมากขึ้น โดยในแต่ละชั้นยังมีสัดส่วนของ เพียโซอิเล็กทริกแตกต่างกันไป ลักษณะการเรียงตัวในแต่ละชั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งก็สามารถทำให้ความกว้างของช่วงความถี่ที่ต้องการกว้างมากขึ้นเมื่อเทียบกับของเดิม

ในส่วนของการออกแบบ และการประดิษฐ์แทรนสดิวเซอร์นั้น ในปี 2000 Irinela Chillibon[18] ได้มีการประดิษฐ์แทรนสดิวเซอร์ที่มีความถี่ต่ำเพื่อการใช้งานได้น้ำจากเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก โดยการออกแบบเป็นแทรนสดิวเซอร์แบบเฟล็กเท็นชัน (flexensional piezoelectric transducer) ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญสามส่วน คือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (PZT) น้ำมัน (caster oil) และ ตัวครอบที่เป็นอะลูมิเนียม (shell) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งก็สามารถนำไปใช้เป็นแทรนสดิวเซอร์ที่ให้ ความถี่ต่ำในงานทางทะเลได้

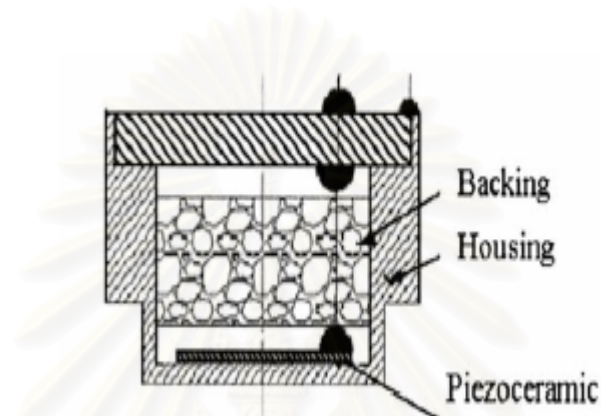


รูปที่ 2.11 การเรียงชั้นของเพียโซอิเล็กทริกของ A. Abrar and S. Cochran [23]

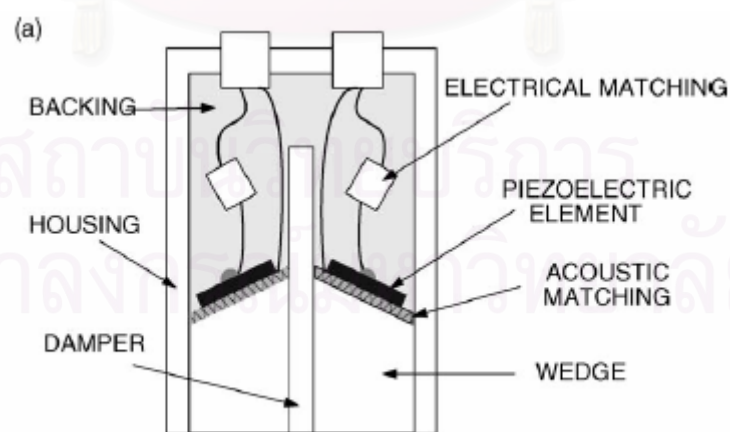


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์แบบเฟลกเทนชัน [18]

ส่วนในปี 2003 XiaoBing Hu และคณะ [19] ได้ปรับปรุงไบหมอบเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ เพื่อใช้ในการวัดระยะทางขึ้นมา ลักษณะของแทรนสดิวเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.13 นอกจากนี้คณะวิจัยยังมีการเปรียบเทียบสัญญาณกับการจำลอง โดยใช้โปรแกรมคำนวณพบว่าได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกันจึงสามารถใช้โปรแกรมจำลองช่วยในส่วนของ การออกแบบอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ ได้ด้วย

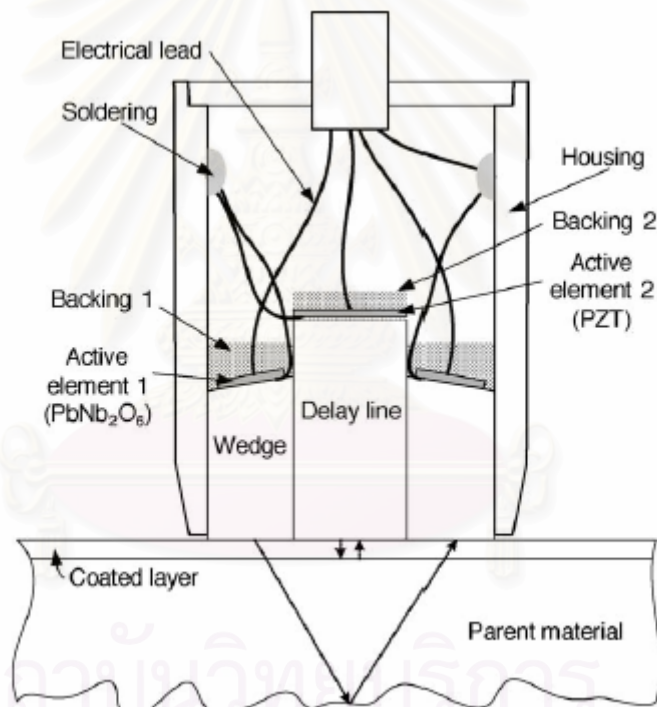


รูปที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างภายในของไบหมอบเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ [19]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของแทรนสดิวเซอร์แบบสองทางของ Young Soo Yoon และคณะ [20]

ในปี ค.ศ. 2005 Young Soo Yoon และคณะ [20] ได้ประดิษฐ์ทรานส์ดิวเซอร์แบบสองทาง (dual-ultrasonic transducer) โดยใช้ฟิล์มบาง PZT-5A ที่ดีโพสิท (deposit) บนแผ่นรองอลูมินา ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของทรานส์ดิวเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 พบว่าให้ผลที่ดี สามารถนำมาใช้งานทางอุตสาหกรรมได้ ต่อมา Man-Jong Lee และคณะ [14] ได้ประดิษฐ์ทรานส์ดิวเซอร์สองทางแบบสมบูรณ์ (complex ultrasonic transducer) ในลักษณะคล้ายกันโดยใช้แผ่น PbNb_2O_6 และ แผ่นฟิล์ม $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ดังรูปที่ 2.15 พบว่าสามารถให้ความแม่นยำในการวัดได้สูงซึ่งสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง



รูปที่ 2.15 โครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของทรานส์ดิวเซอร์สองทางแบบสมบูรณ์ [14]

2.4 ประโยชน์ของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทนส์ดีวีเซอร์ [21, 22, 24]

เพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทนส์ดีวีเซอร์สามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆด้าน โดยมีลักษณะเฉพาะตัวของการใช้ประโยชน์คือ ไม่ทำให้วัสดุเสียหาย หรือถูกทำลาย (Non-Destructive Tests) ในปัจจุบันแทนส์ดีวีเซอร์ที่สามารถผลิตขึ้นมาใช้ได้แล้วในงานด้านต่างๆ อาทิ เช่น

1. การตรวจสอบลักษณะเฉพาะ และตรวจสอบความผิดปกติของวัสดุ
2. การตรวจสอบอาหาร เครื่องดื่ม และยารักษาโรค
3. ใช้ในทางการแพทย์
4. เครื่องส่งสัญญาณที่มีความถูกต้องสูง
5. อื่นๆ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ

การวิจัยครั้งนี้ขึ้นรูปชิ้นงาน PZT แบบ biaxial die mold โดยใช้เครื่องอัดไฮโดรลิก รุ่น NT-100H แล้วใช้เตาเผาไฟฟ้า (Muffle furnace) ในการเผาชิ้นเทอร์ซิ่งงานและการเผาผนึกขั้วอิเล็กโทรด Ag-paste การตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่ต้องการทำได้โดยใช้เครื่องตัดที่มีความเที่ยงตรงสูง (Struers precision cutting machine) รุ่น Accutom-5 และตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัด Buehler รุ่น Phoenix 4000 ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) ทำการโพลาไรซ์ชิ้นงาน (polarization) ด้วยเครื่องแปลงศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage amplifier/supply) รุ่น 610 D ของ Pro-Pack โดยมีเครื่องควบคุมความร้อน (constant temperature bath) รุ่น GP-300 D ของ ASLAB เพื่อให้ความร้อนกับชิ้นงานขณะโพลา ศึกษาวงจรฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของชิ้นงาน PZT ด้วยโปรแกรม RT 66A ด้วยเครื่อง high voltage interface วัดสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ด้วยเครื่อง Piezo-meter system รุ่น PM 25 และใช้เครื่องอิมพีแดนซ์ เฟส อนาไลเซอร์ (impedance phase analyzer) รุ่น HP 4192 ของ Hewlett Packard ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ ความต้านทานไฟฟ้า (electrical impedance) เฟสไฟฟ้า (electrical phase) เป็นต้น ดูโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง Olympus รุ่น BX60M หาความเร็วคลื่นเสียง ออคูสติกอิมพีแดนซ์ (acoustic impedance) และ แอทเทนนูเอชัน (attenuation) ของชิ้นงานด้วย ultrasonic flaw detector ของ Krautkammer รุ่น USM22 ในส่วนการตรวจสอบตีเฉพาะของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นมาทั้งการตอบสนองของสัญญาณกับเวลา (time response) และการตอบสนองของสัญญาณกับความถี่ (frequency response) จะใช้ตัวส่งสัญญาณเป็น Krautkammer USM22 แล้วจับสัญญาณด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ของ Agilent รุ่น 54624A เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลด้วย MATLAB โดยใช้โปรแกรม FFT (Fast Fourier Transform)

3.2 สารเคมี

รายละเอียดเกี่ยวกับบริษัทผู้ขาย และ ลักษณะเฉพาะของวัสดุ และ สารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัยแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

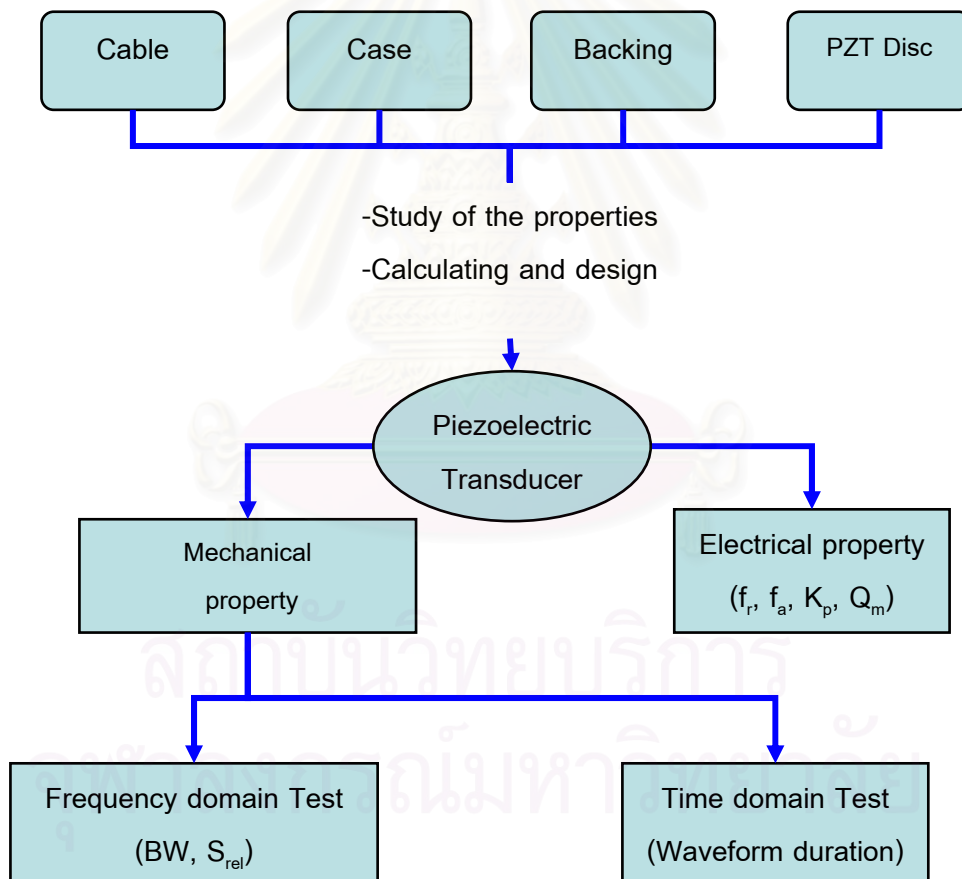
ตารางที่ 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย

ชื่อสารเคมี	บริษัท/ลักษณะเฉพาะ
1 Lead Zirconate Titanate Oxide (PZT)	APC International Ltd., USA
2 Ag-electrode	-
3 Bisphenola type epoxy resin (EPICLON 850)	Apply chemical Ltd., Thailand
4 Polyamide resin (LUCKAMIDE TD-982E)	Apply chemical Ltd., Thailand
5 Gamma-glycidoxy propyl trimethoxy silane	Alfa Aesar 96 %v/v d, 1.07 g/ml
6 Glycerin	UNIVAR Analytical grade 99.5 %v/v d, 1.257 g/ml
7 Al powder	Alfa Aesar -325 mesh, 99.5 % (7-15 micron)
8 Cu powder	Alfa Aesar -325 mesh, 99% (8-11 micron)
9 Cable	-
10 Glass	-

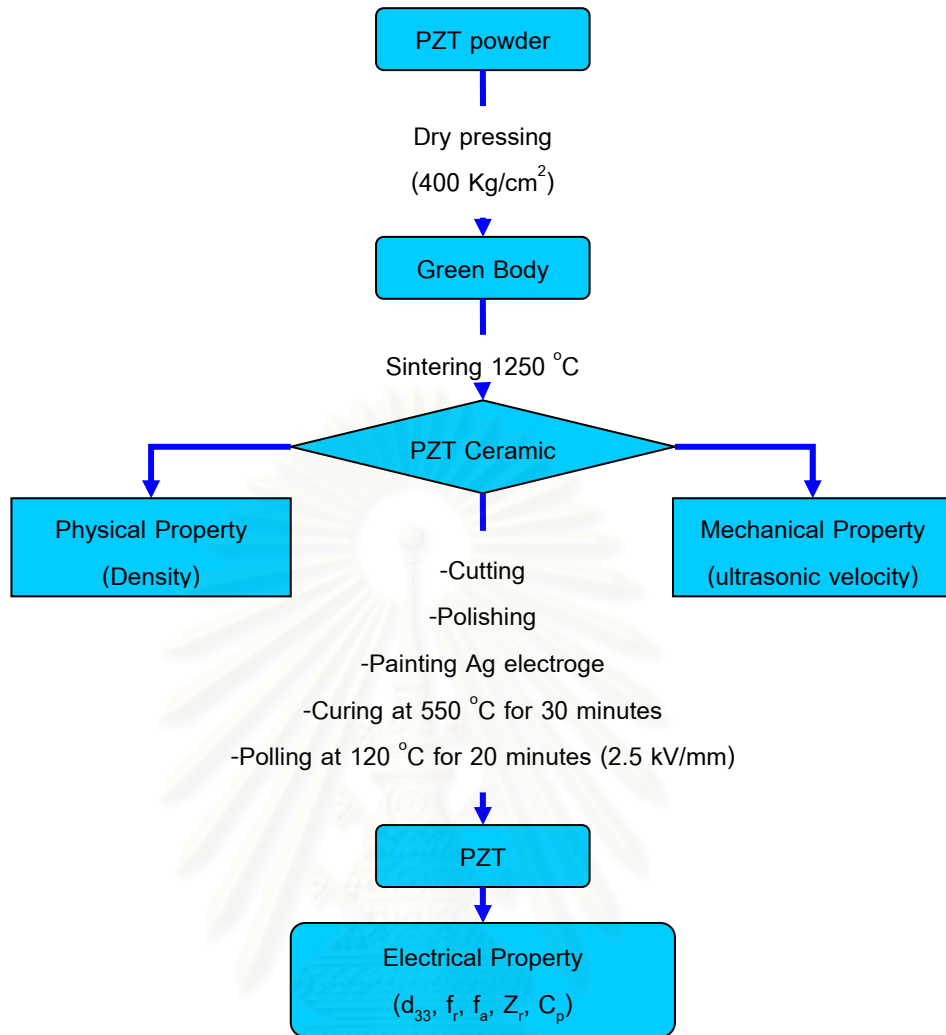
3.3 วิธีการทำวิจัย

3.3.1 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย

แผนผังขั้นตอนการทำวิจัยทำเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแพทรนส์ดีวเซอร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 เริ่มต้นการด้วยศึกษาสมบัติ และการออกแบบส่วนประกอบของแพทรนส์ดีวเซอร์ส่วนต่างๆ ได้แก่ สายไฟ (Cable) โครงแพทรนส์ดีวเซอร์ (Case) ส่วนท้าย (backing material) และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เซรามิก ยกเว้นส่วนหน้า (matching material) ซึ่งไม่ได้อยู่ในขอบเขตของการวิจัยครั้งนี้ โดยเน้นในส่วนของวัสดุที่สามารถนำมาประกอบเป็นเพียโซอิเล็กทริกแพทรนส์ดีวเซอร์ได้ เมื่อเตรียมเป็นแพทรนส์ดีวเซอร์แล้วจึงทำการวัดหาลักษณะเฉพาะของแพทรนส์ดีวเซอร์ต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทำวิจัย



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของ PZT และแรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นงานตามขนาดของแม่พิมพ์

		ขนาดเล็ก	ขนาดกลาง	ขนาดใหญ่
เส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์	(mm)	20.0	25.5	35.0
น้ำหนักของ PZT powder	(g)	18.6	30.0	57.0
แรงดัน	(kN)	13	20	38

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์และขนาดของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกตัวอย่าง

ชนิด	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความหนา (มม.)	จำนวน (ชิ้น)	สัญลักษณ์		
soft PZT	20.0	1.0	6	SP101R1 SP104R1	SP102R1 SP105R1	SP103R1 SP106R1
hard PZT	20.0	1.0	6	HP101R1 HP104R1	HP102R1 HP105R1	HP103R1 HP106R1
	25.5	1.0	3	HP101R2	HP102R2	HP103R2
	35.0	1.0	3	HP101R3	HP102R3	HP103R3
	20.0	1.5	3	HP151R1	HP152R1	HP153R1
	20.0	2.0	3	HP201R1	HP202R1	HP203R1

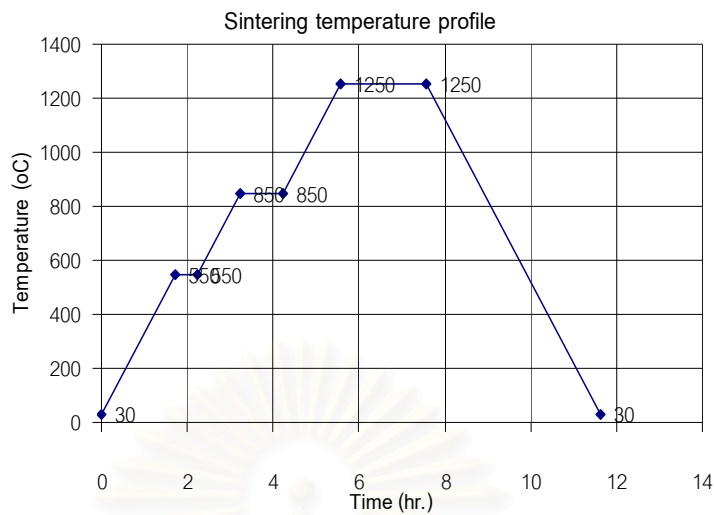
3.3.2 การเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติชิ้นงาน

3.3.2.1 การเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

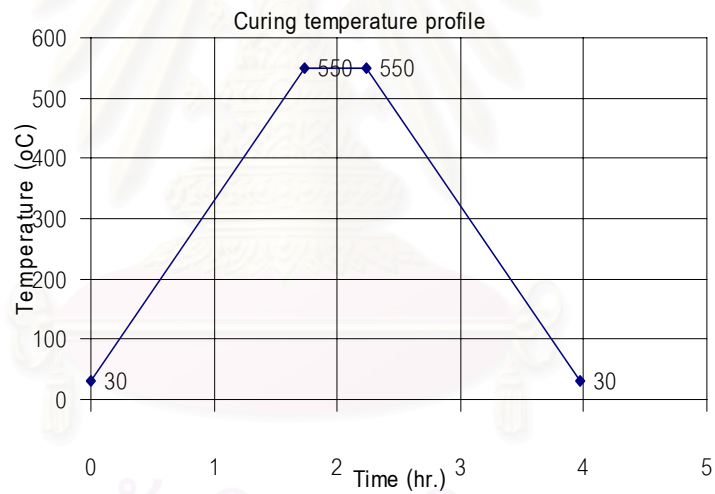
สารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ คือ เลดเซอร์โคเนตไททาเนียมออกไซด์ (PZT) สองชนิดคือ hard PZT (APC 840) และ soft PZT (APC 850) แผ่นผั่งขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยซังผง PZT ทั้งสองชนิดให้ได้ปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดของแม่พิมพ์ก่อนจะอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยแรงดัน 400 kg/cm^2 ดังที่แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 3.2 นำชิ้นงานที่ได้ไปขึ้นเทอร์ที่อุณหภูมิ $1,250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศปกติ ด้วยอัตราการเพิ่มและการลดอุณหภูมิเท่ากับ $300 \text{ }^{\circ}\text{C/hr}$ โดยใช้เวลาค้างเวลาที่อุณหภูมิต่างๆเป็นระยะดังแสดงอุณหภูมิและเวลาในการเผาในรูปที่ 3.3a นำชิ้นงานที่ได้มาวิเคราะห์หาความหนาแน่นหาโดยใช้วิธีของ

อะคิมีดีส (Archimedes's method) โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการชินเทอร์แล้วมาทำตามภาคผนวก ก และหาสมบัติเชิงกล (mechanical property) คือ ความเร็วคลื่นเสียง และ อะคูสติคอิมพีแดนซ์ ตามภาคผนวก ข ก่อนนำชิ้นงานที่ได้ไปตัดและขัดให้มีขนาดที่ต้องการดังตารางที่ 3.3 ให้มีความคลาดเคลื่อนเป็น ± 0.025 mm[17] แล้วทำความสะอาดด้วยเครื่อง ultrasonic cleaner ก่อนทำขั้วอิเล็กโทรดที่ผิวหน้าทั้งสองด้านด้วย Ag-paste นำชิ้นงานที่ทำขั้วอิเล็กโทรดไปเผาผนึก (curing) ที่ 550 °C ในบรรยากาศปกติ ด้วยอัตราการเพิ่มและการลดอุณหภูมิเท่ากับ 300 °C/hr โดยใช้การค้างเวลาที่ไว้ 30 นาที ดังแสดงอุณหภูมิและเวลาในการเผาในรูปที่ 3.3b นำชิ้นงานที่ได้หลังเผาผนึกขั้วอิเล็กโทรดไปวัดวงจรกิจต์ซิสด้วยโปรแกรม RT 66 A ในเครื่อง High voltage interface ก่อนนำชิ้นงานไปโพล (polarization) ที่ 120 °C ในซิลิโคนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง 2.5 kV/mm เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นดำเนินการวิเคราะห์หาสมบัติสมบัติทางไฟฟ้า (electrical property) ของชิ้นงานด้วยเครื่องอิมพีแดนซ์ เฟส อนาไลเซอร์ (impedance phase analyzer) เพื่อวัดหาความจุไฟฟ้า (C_p) ที่ความถี่ 1 kHz และวัดค่าอิมพีแดนซ์ (electrical impedance) และเฟสไฟฟ้า (phase) ที่ความถี่ต่างๆเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) อิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (minimum impedance) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (antiresonance frequency) เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหา:

1. สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) โดยการนำชิ้นงานที่มาวิเคราะห์หาค่า ด้วยเครื่อง Piezo-meter
2. สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (electromechanical coupling factor) โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการโพลแล้วทิ้งไว้ 1 วันมาวิเคราะห์ตามภาคผนวก ค
3. สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor) โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการโพลแล้วทิ้งไว้ 1 วันมาวิเคราะห์ตามภาคผนวก ง



(a)



(b)

รูปที่ 3.3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการซินเทอร์ชิ้นงาน และเผาผนึกขั้วอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน

a) การซินเทอร์ชิ้นงาน

b) การเผาผนึกขั้วอิเล็กทรอนิกส์ชิ้นงาน

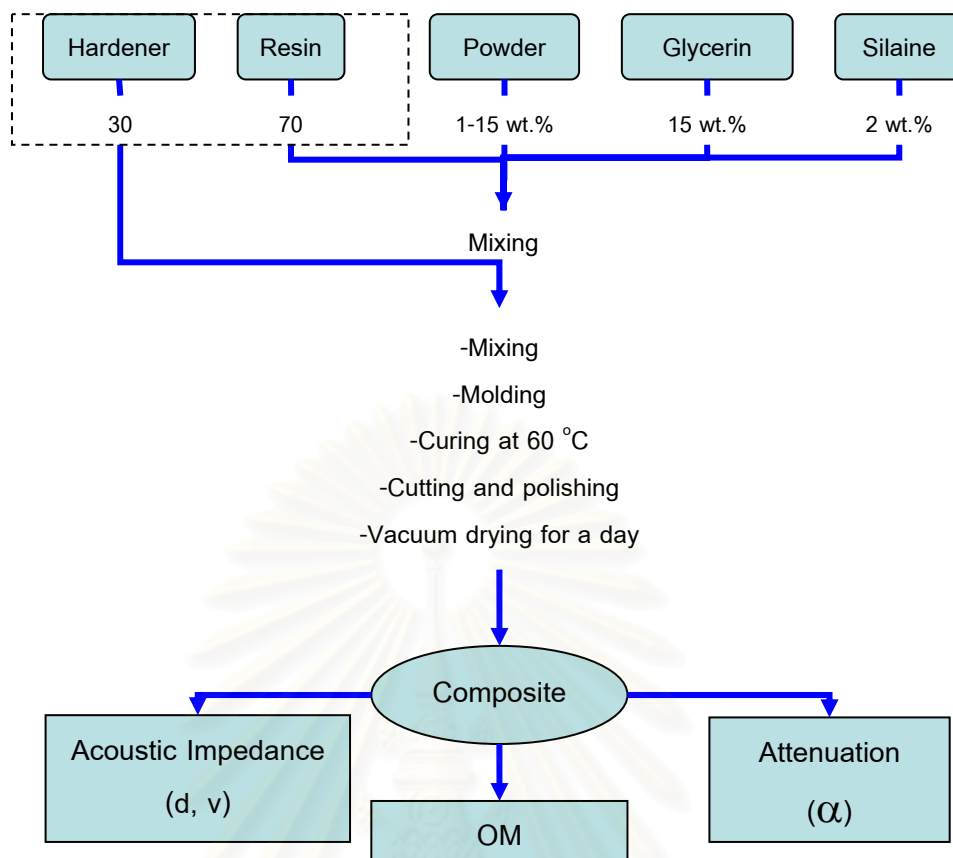
3.3.2.2 การเตรียมและการวิเคราะห์หาสมบัติส่วนหลังของแทรนส์ดีวีเซอร์ (backing material)

วัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดีวีเซอร์ (backing material) เป็นคอมพอสิตระหว่างอีพอกซีเรซิน กับอนุภาคโลหะสองชนิดคือ อะลูมิเนียม (Al) กับ ทองแดง (Cu) โดยมีแผนผังการเตรียมดังรูปที่ 3.4 เริ่มต้นจากการชั่งน้ำหนักให้สัดส่วนของโลหะต่อเรซินให้ได้เป็น 1 -15 wt.% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 ส่วนผสมที่ใช้ในการทำเรซินจะประกอบไปด้วยอีพอกซีเรซิน (bisphenol type epoxy resin) ต่อ hardener เป็น 70:30 โดยที่ในคอมพอสิตทั้งหมดจะต้องมี Glycerol 15 wt. % γ -glycidoxy propyl trimethoxy silane 2 wt.% และโลหะผสมอยู่ตามตารางที่ 3.4 จากสัดส่วนทั้งหมดคำนวณน้ำหนัก Glycerol γ -glycidoxy propyl trimethoxy silane และโลหะที่จะผสมในแต่ละสูตรได้ดังตารางที่ 3.5 แล้วผสมเข้าด้วยกันโดยเครื่องปั่นความเร็ว 850 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ก่อนเติม hardener ลงไปแล้วปั่นต่ออีกด้วยความเร็วเท่าเดิม 2 นาที เทลงในแม่พิมพ์พลาสติก นำไปวางไว้ในเครื่องดูดสุญญากาศต่ออีก 30 นาทีเพื่อไล่ฟองอากาศ แล้วนำไปทำให้แข็งตัวด้วยการอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 วัน วัดขนาดของชิ้นงานแล้วคำนวณปริมาตรและชั่งน้ำหนักของชิ้นงานโดยตรงเพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่น ในส่วนของความเร็วคลื่นเสียงอะคูสติคิมพีแดนซ์ และแอทเทนนูเอชัน (attenuation) ของชิ้นงานวิเคราะห์หาได้ตามภาคผนวก ค ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาคดูได้ด้วยกล้อง Olympus

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนระหว่างโลหะกับอีพอกซีเรซิน

Metal/resin %	1:99	2:98	3:97	4:96	5:95	10:90	15:85
Al-epoxy resin	Al1	Al2	Al3	Al4	Al5	Al10	Al15
Cu-epoxy resin	Cu1	Cu2	Cu3	Cu4	Cu5	Cu10	Cu15

*หมายเหตุ ก่อนนำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆต้องผ่านการดูดความชื้นด้วยเครื่องดูดสุญญากาศก่อนทุกครั้ง



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงการเตรียมและการวิเคราะห์สมบัติของ backing materials

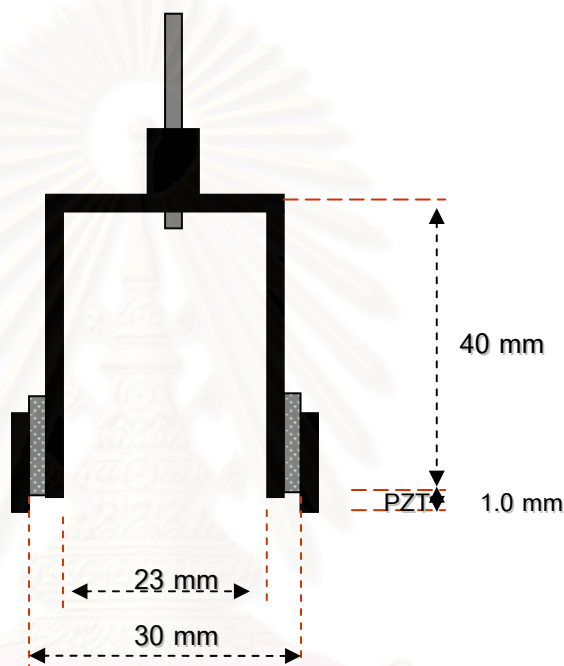
ตารางที่ 3.5 น้ำหนักของส่วนผสมที่ใช้เตรียมคอมพอสิตด้วยอย่าง

%Metal	Total (g)	Metal (g)	Silane 2 wt.% (g)	Glyceral 15 wt.% (g)	Hardener:Epoxy (g)	
					30 wt.%	70 wt.%
1%	100	1.0	2	15	24.6	57.4
2%	100	2.0	2	15	24.3	56.7
3%	100	3.0	2	15	24.0	56.0
4%	100	4.0	2	15	23.7	55.3
5%	100	5.0	2	15	23.4	54.6
10%	100	10.0	2	15	21.9	51.1
15%	100	15.0	2	15	20.4	47.6

3.3.3 การเตรียมตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์ (Case) และ สายไฟ (Cable)

3.3.3.1 การเตรียมโครงแทรนส์ดิวเซอร์ (Case)

ตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์เตรียมได้จากพลาสติก โดยการออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้ในการเตรียมเป็นแทรนส์ดิวเซอร์ต่อไปในหัวข้อ 3.4 ตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์มีลักษณะตาม รูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์พลาสติกที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

3.3.3.2 การเตรียมสายไฟ (Cable)

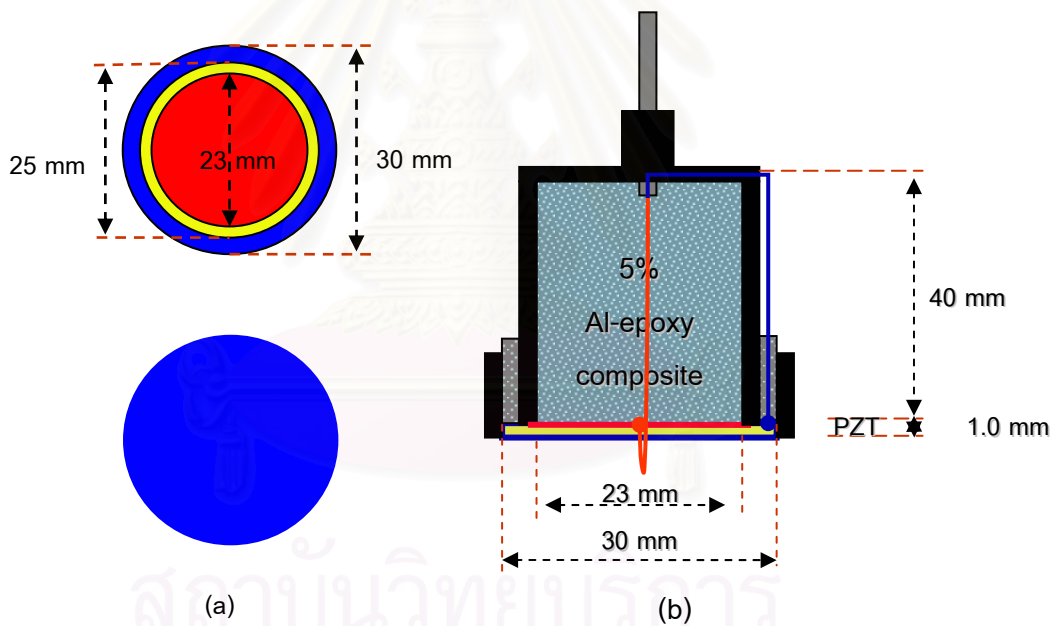
สายไฟที่ใช้ในการทำวิจัยทำมาจากลวดทองแดงหุ้มด้วยยางพอลิเมอร์เป็นสายไฟที่สามารถซื้อได้ทั่วไป

3.4 การเตรียมและการวิเคราะห์สมบัติเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิก แทรนสดิวเซอร์

3.4.1 การเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

(Piezoelectric transducer fabrication)

ขั้นตอนในการเตรียมเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ตัวอย่างดำเนินการตามแผนผังในรูปที่ 3.1 ซึ่งส่วนประกอบที่เป็นส่วนสำคัญคือ วัสดุเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก วัสดุส่วนหลังของทรานสดิวเซอร์ ตัวโครงทรานสดิวเซอร์ และสายไฟ ที่ได้ทำการศึกษาแล้ว หัวข้อ 3.3.2 ดังนั้นจึงเลือกเอาวัสดุที่ดีที่สุดมาออกแบบและเตรียมชิ้นงานทรานสดิวเซอร์ตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์สมบัติต่อไป



รูปที่ 3.6 ลักษณะของชิ้นงาน hard PZT และส่วนประกอบทรานสดิวเซอร์ตัวอย่าง

- (a) ลักษณะของชิ้นงาน hard PZT
- (b) ส่วนประกอบทรานสดิวเซอร์ตัวอย่าง

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

1. นำชิ้นงาน hard PZT ขนาดใหญ่ หน้า 1.0 mm มาเตรียมขั้วอิเล็กโทรดให้มีลักษณะตามรูปที่ 3.6a ซึ่งหน้าหนึ่งเป็นขั้วลบบอย่างเดียว (สีน้ำเงิน) ส่วนอีกด้านเป็นขั้วบวก (สีแดง) อยู่ตรงกลาง โดยมีขั้วลบบอยู่ขอบนอกซึ่งทำด้วย Ag-paste ต่อถึงกับอีกด้านไว้ก่อนนำไปผาฉีก และโพลชิ้นงานตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้ว

2. หล่อ 5 wt.% อะลูมิเนียมคอมพอสิตที่ผสมเสร็จแล้วกับตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์ปล่อยทิ้งไว้ตามขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิตที่กล่าวมาแล้ว เมื่อได้ชิ้นงานแล้วนำมาเจาะรูไว้สำหรับบัดกรีชิ้นงาน hard PZT ดังรูปที่ 3.6b ก่อนประกอบนำชิ้นงานกับตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์พลาสติกที่เตรียมไว้ด้วยอิพอกซีเรซินชนิดเดียวกันแล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แข็งตัว จะได้แทรนส์ดิวเซอร์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.7 เป็นแทรนส์ดิวเซอร์ T1

3. บัดกรีชิ้นงาน hard PZT กับสายไฟฟ้าก่อนประกอบชิ้นงานกับตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์พลาสติกที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นนำ 5 wt.% อะลูมิเนียมคอมพอสิตที่ผสมเสร็จแล้วเทหล่อเข้าทางด้านหลังของตัวโครงแทรนส์ดิวเซอร์ แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้แข็งตัวจะได้แทรนส์ดิวเซอร์ที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.7 เป็นแทรนส์ดิวเซอร์ T2

4. ชิ้นงานแทรนส์ดิวเซอร์ตัวอย่างจะใช้ในการตรวจสอบสมบัติต่างในขั้นตอนต่อไปหัวข้อ 3.4.2



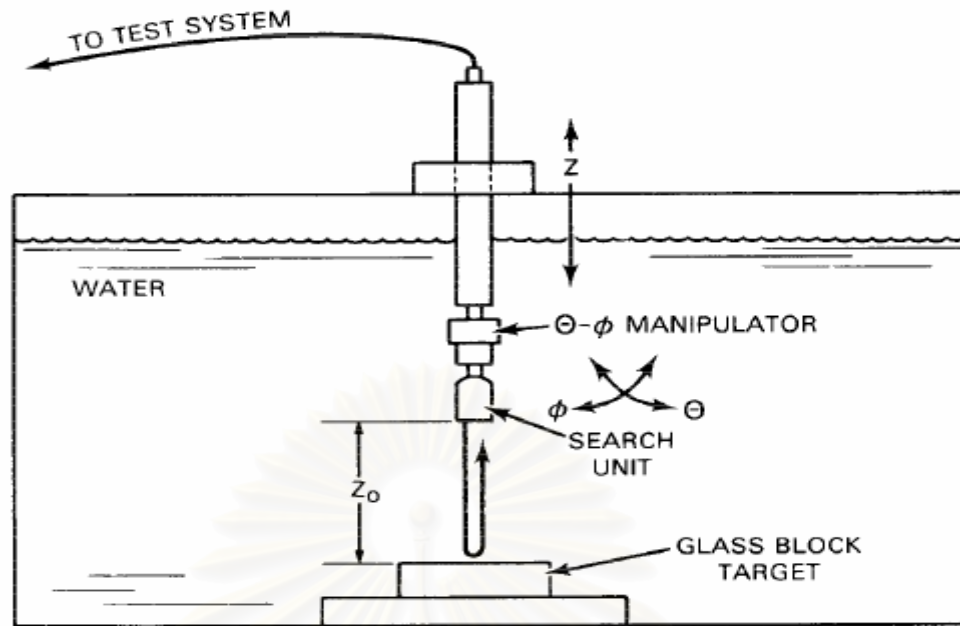
รูปที่ 3.7 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างเทียบกันเหรียญ 10 บาทของไทย

ตารางที่ 3.6 ลักษณะต่างๆของแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่าง

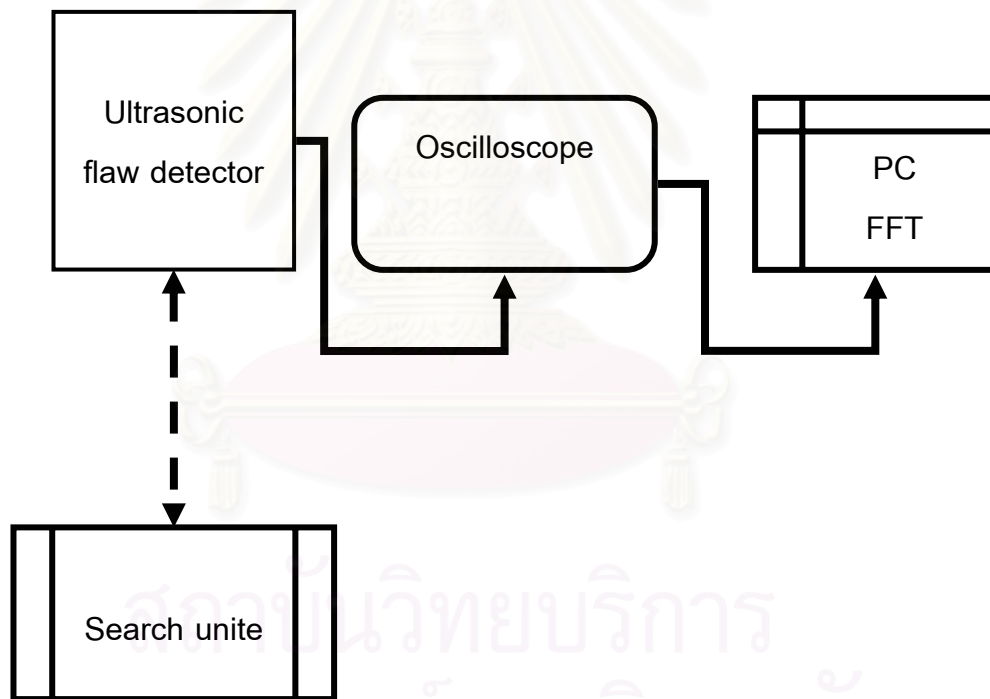
แทรนส์ดีวเซอร์	ชิ้นงาน PZT				Backing layer
	d_{33} (pC/N)	เส้นผ่านศูนย์กลางขั้ว (mm)		Thickness (mm)	
		ใน	นอก		
T1					
T11	340	23	30	1.0	5%Al-Resin
T12	341	23	30	1.0	5%Al-Resin
T13	341	23	30	1.0	5%Al-Resin
T2					
T21	342	23	30	1.0	5%Al-Resin
T22	341	23	30	1.0	5%Al-Resin
T23	341	23	30	1.0	5%Al-Resin

3.4.2 การตรวจวัดสมบัติของแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่าง

การตรวจวัดสมบัติของแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างจะดำเนินการโดยการวัดสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของชิ้นงานด้วยเครื่องอิมพีแดนซ์เฟสอานาไลเซอร์ (impedance phase analyzer) เพื่อวัดหาความจุไฟฟ้า (C_p) ที่ความถี่ 1 kHz และวัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และเฟสไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) แล้วทำการตรวจสอบสมบัติทางกล (mechanical properties) ดังแสดงแผนผังการเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ในรูปที่ 3.8b โดยนำเครื่อง ultrasonic flaw detector เป็นเครื่องกำเนิดความถี่ไปยังแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างที่อยู่ใต้น้ำในชุดทดสอบดังรูปที่ 3.8a แล้วจับความเข้มของสัญญาณความถี่ต่างๆ ที่ให้และได้รับจากแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่าง เพื่อนำผลไปเปลี่ยนเป็นการตอบสนองของสัญญาณกับเวลา (Time domain) และการตอบสนองของสัญญาณกับความถี่ (Frequency domain) ต่อไปด้วย MATLAB โดยใช้โปรแกรม FFT (Fast Fourier Transform)



(a)



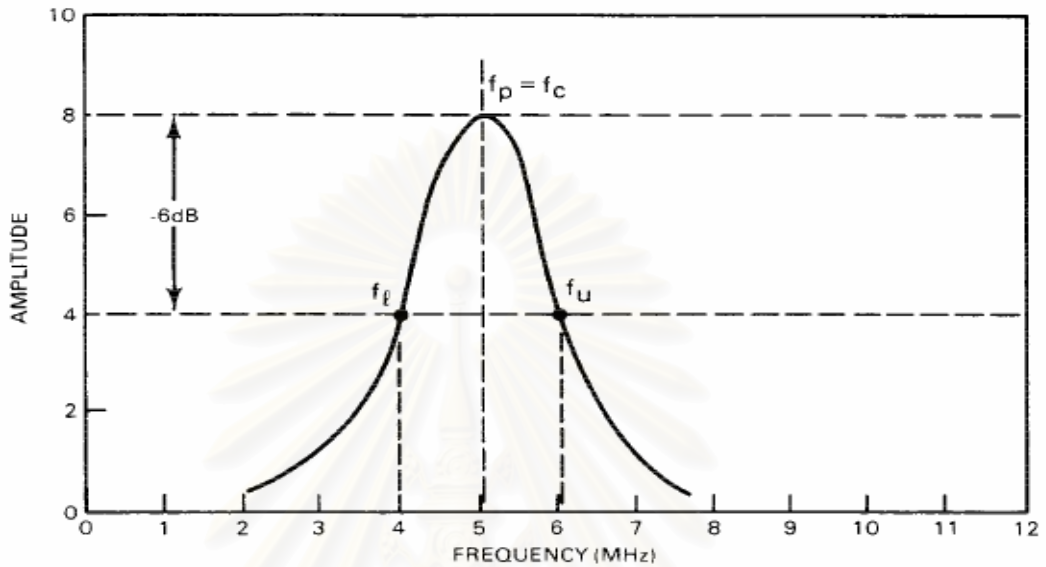
(b)

รูปที่ 3.8 การเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดแทรนส์ดิวเซอร์

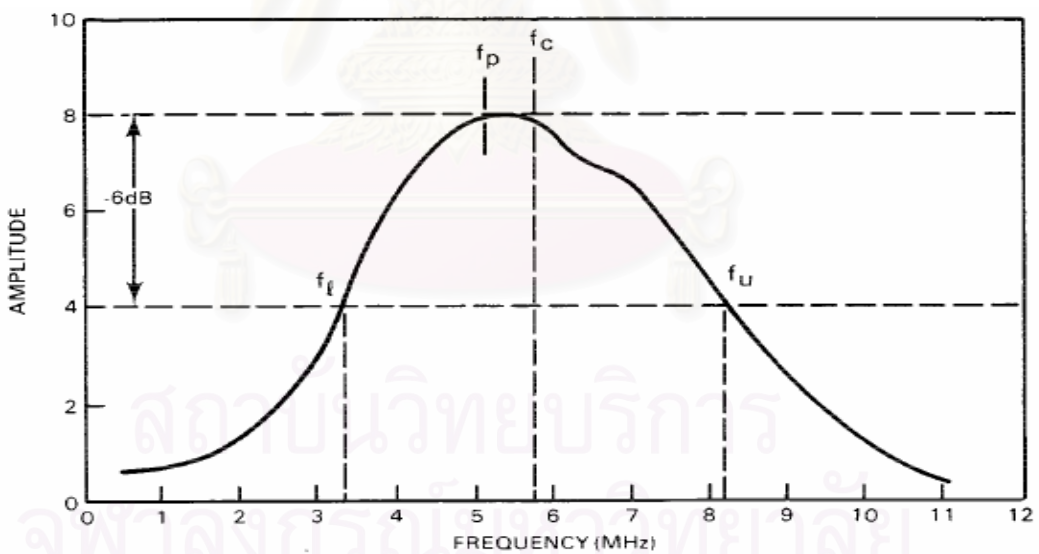
(a) ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมแทรนส์ดิวเซอร์ในน้ำ [17] (search unite)

(b) แสดงการจัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดแทรนส์ดิวเซอร์

1. การวิเคราะห์ความถี่สัญญาณความถี่ (measurement of frequency response)
 ลักษณะของสัญญาณที่ให้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณกับความถี่
 ต่างๆดังรูปที่ 3.9



(a)



(b)

รูปที่ 3.9 ความถี่สัญญาณความถี่ (Frequency response curves) [17]

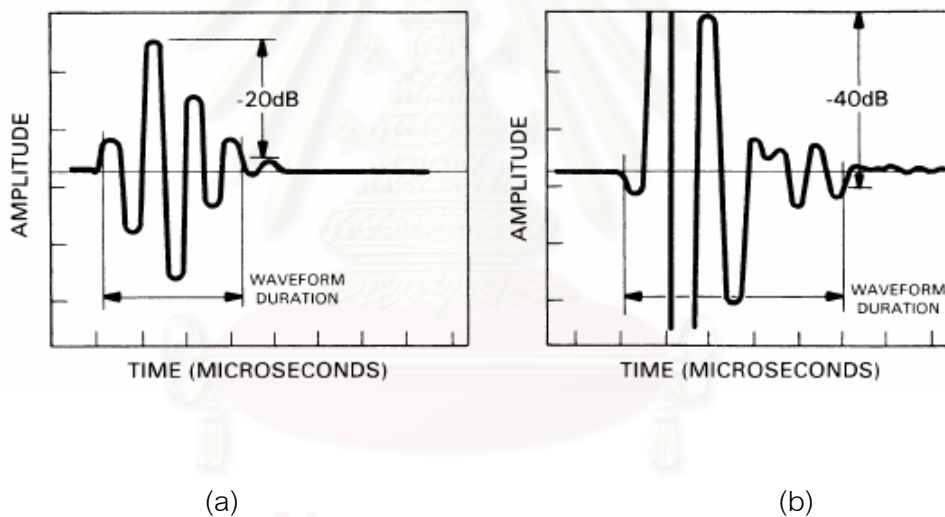
(a) ความถี่สัญญาณความถี่แบบสมมาตร (symmetrical response curve)

(b) ความถี่สัญญาณความถี่แบบไม่สมมาตร (asymmetrical response curve)

จากความเข้มสัญญาณความถี่ที่ได้สามารถใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของ แทรนส์ดีวีเซอร์ตัวอย่างได้โดยดูจากสูตรที่ใช้ในการคำนวณ

1. ความกว้างช่วงสัญญาณความถี่ (bandwidth) ที่ได้ดังตัวอย่างในภาคผนวก จ
2. ความสามารถรับส่งสัญญาณ (relative pulse-echo sensitivity) ได้ดังตัวอย่างในภาคผนวก ฉ

2. การวิเคราะห์ความเข้มสัญญาณความถี่ที่เวลาต่างๆ (measurement of time response) ลักษณะของสัญญาณที่ให้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณความถี่ต่างๆ ที่สะท้อนกลับมาของสัญญาณกับเวลา ดัง รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ความเข้มสัญญาณที่เวลาต่างๆ (Time responses)

จากสัญญาณที่ได้นี้สามารถใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของทรานส์ดีวีเซอร์ตัวอย่างได้ โดยดูจากสูตรที่ใช้ในการคำนวณหา waveform duration คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการที่คลื่นเดินทางใน แต่ละลูกคลื่นที่ความเข้มหนึ่งดังแสดงตัวอย่างไว้ในภาคผนวก ช

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

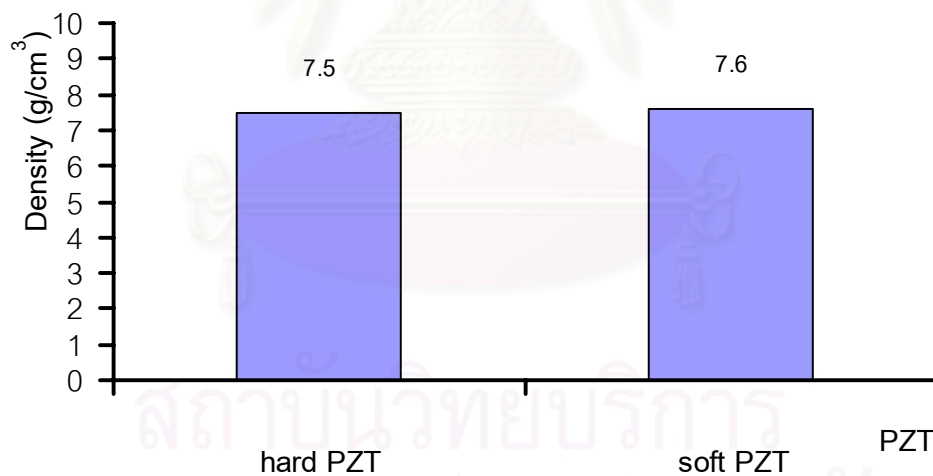
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงาน

4.1.1 การวิเคราะห์เพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

4.1.1.1 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่าง hard PZT และ soft PZT

1) การวิเคราะห์ความหนาแน่น (Density)

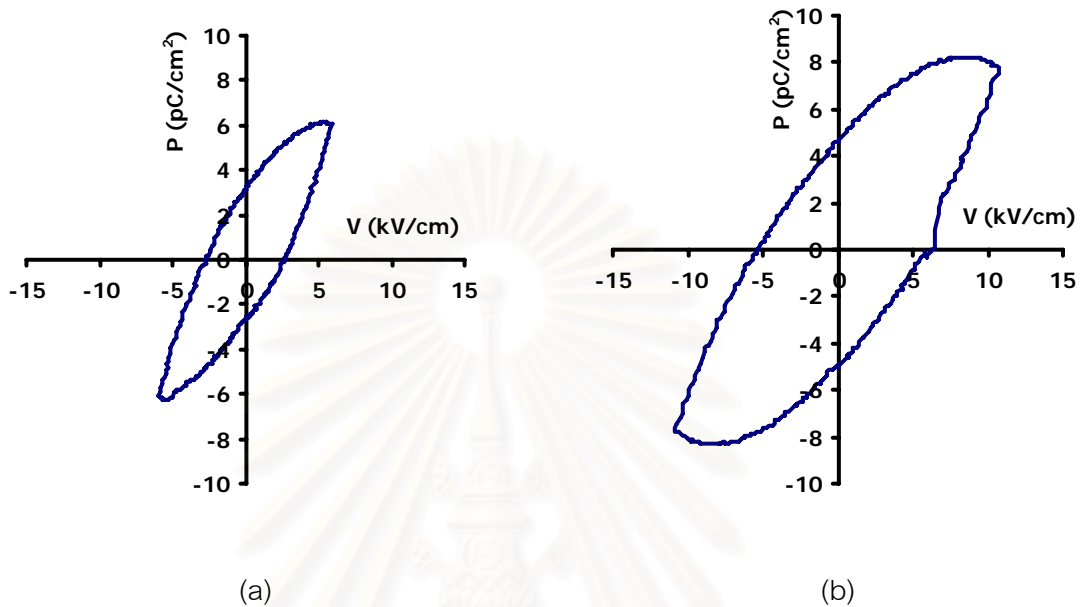
เมื่อนำผง PZT ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอัดสองทางด้วยแรงดันไฮดรอลิก 400 kg/cm² ดังแสดงรายละเอียดไว้แล้วในตารางที่ 3.2 ก่อนผ่านการซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1,250 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วหาความหนาแน่นของ PZT ทั้งสองชนิดด้วยวิธีของ อะคิมิดีส (Archimedes's Method) ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความหนาแน่นเฉลี่ยของ PZT ตัวอย่าง

จากผลการวิจัยพบว่าความหนาแน่นของ soft PZT มีค่าเท่ากับ 7.6 g/cm³ ส่วน hard PZT มีความหนาแน่นเป็น 7.5 g/cm³ ทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นแตกต่างกันค่อนข้างน้อยสังเกตได้จากกราฟแท่งที่เปรียบเทียบความหนาแน่นในรูปที่ 4.1 เนื่องจากความหนาแน่นจะมีผลต่อค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ ($Z = \rho v$) ดังนั้นสมบัติต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจากการวิจัย

PZT ทั้งสองชนิดจึงไม่สามารถแยกความแตกต่างได้จากความหนาแน่นได้ แต่ทั้ง hard PZT และ soft PZT มีความหนาแน่นที่สูงทั้งคู่ซึ่งมีผลทำให้มีอะคูสติคิมพีแดนซ์สูงตามได้



รูปที่ 4.2 วงจรฮิสเทอรีซิสของ PZT

(a) Soft PZT (SP1.0R1)

(b) Hard PZT (HP1.0R1)

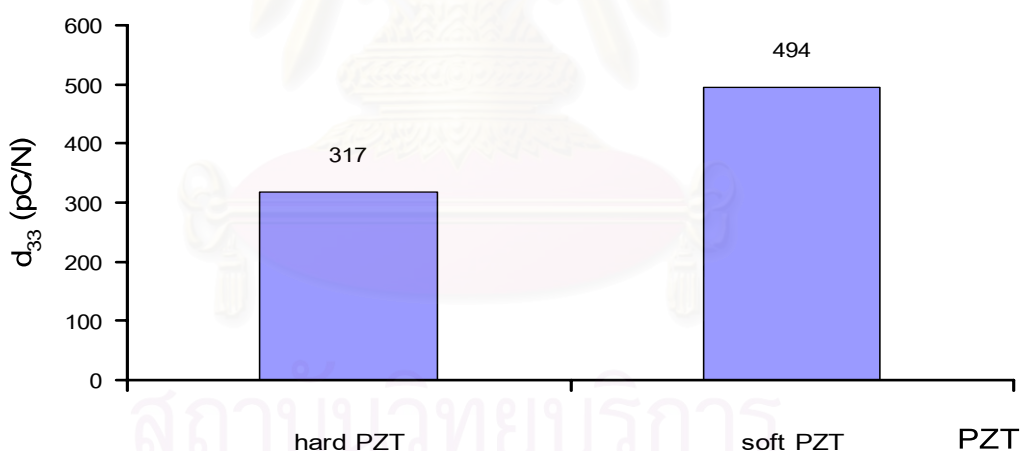
2) การวิเคราะห์วงจรมหิตเทอรีซิส (Hysteresis loop)

เมื่อทำการวิเคราะห์วงจรมหิตเทอรีซิสของชิ้นงาน PZT ทั้งสองชนิดแล้วสามารถบอกความแตกต่างในการให้พลังงานไฟฟ้ากับโพลาริเซชันที่ PZT ทั้งสองชนิดให้ออกมาได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยพบว่า ที่ coercive electricity (E_c) ของ soft PZT (2.1 kV/cm) จะมีค่าต่ำกว่า hard PZT (5.2 kV/cm) โพลาริเซชันสูงสุดที่สามารถให้ได้ (saturation polarization, P_s) ของ hard PZT (7.8 pC/cm²) มีค่าสูงกว่า soft PZT (5.9 pC/cm²) และเมื่อพิจารณาในส่วนของโพลาริเซชันที่เหลือเมื่อหยุดให้ศักย์ไฟฟ้า (remanent polarization, P_r) พบว่า soft PZT (3.1 pC/cm²) น้อยกว่า hard PZT (4.8 pC/cm²) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า soft PZT จะเกิดโพลาริเซชันได้ง่ายกว่า hard PZT จากค่า E_c ที่ soft PZT เริ่มเกิดโพลาริเซชันได้น้อยกว่า ในขณะที่เดียวกันการที่ soft PZT มี $-E_c$ ที่น้อยกว่า และมี P_r ที่ต่ำกว่าทำให้เกิดการเสื่อมของโพลาริเซชันได้ง่ายกว่าได้เช่นเดียวกัน ซึ่งจะเป็นสามเหตุให้อายุการใช้งานและประสิทธิภาพการใช้งานสั้นลงด้วย ที่สำคัญการที่มีค่าโพลาริเซชันต่ำจะทำให้มีการเปลี่ยนพลังงานกลกับพลังงานไฟฟ้าของชิ้นงานได้น้อยลง

ด้วย สำหรับงานด้านอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์แล้วความถี่และศักย์ไฟฟ้าที่ใช้งานจะค่อนข้างสูง ทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นมากด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการพิจารณาเลือกวัสดุทั้งสองชนิดในการเตรียมอัลตราโซนิกแทรนสดิวเซอร์ จึงน่าจะเป็น hard PZT ดีกว่า soft PZT เนื่องจากมีโพลาริเซชันที่สูงกว่า ทนต่อศักย์ไฟฟ้าได้สูงกว่า การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน่าจะมีค่าน้อยกว่ามากและยังมีการเสื่อมของโพลาริเซชันที่น้อยกว่าจากการมีค่า $-E_c$ และ P_r ที่มากกว่าทำให้มีอายุการใช้งานได้มากกว่า soft PZT

3) การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33})

การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกเป็นการวิเคราะห์จากค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นจากการให้แรงกดกับชิ้นงานที่ผ่านการโพลแล้วโดยใช้เครื่อง Piezo-Meter ซึ่งพบว่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ soft PZT มีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของ hard PZT โดยมีค่าเป็น 494 pC/N และ 317 pC/N ตามลำดับดังแสดงการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้เนื่องมาจาก soft PZT จะเกิดโพลาริเซชันได้ง่ายกว่า ทำให้มีความไวต่อแรงกดด้วยเช่นกันดังได้กล่าวมาแล้วจากการวิเคราะห์ห้วงจรฮิสเทอรีซิสทำให้ตอบสนองต่อแรงกดได้ดีกว่า

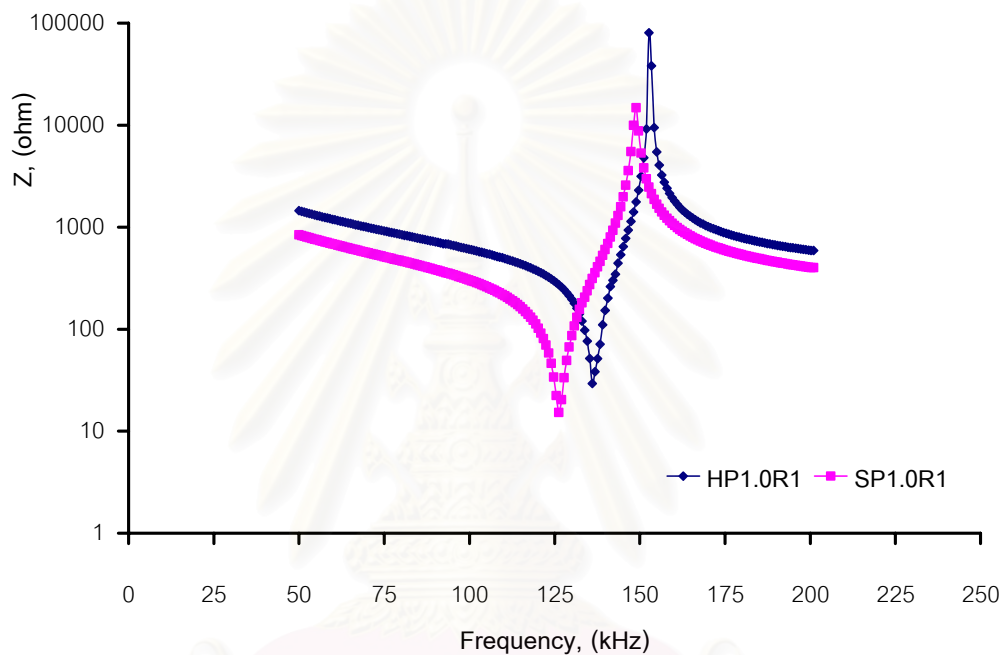


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกระหว่าง soft PZT กับ hard PZT

4) การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency, f_r) และ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (antiresonance frequency, f_a)

ความถี่เรโซแนนซ์เป็นความถี่ที่สามารถทำให้ชิ้นงานมีอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด จากการวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ระหว่างชิ้นงานขนาดเดียวกันที่ได้จาก soft PZT และ hard PZT หนา 1.0 mm และขึ้นรูปจากแม่พิมพ์เส้นผ่านศูนย์กลาง 20.0 mm พบว่า hard PZT จะมี

ความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่า soft PZT โดยมีความถี่เรโซแนนซ์เป็น 137 kHz และ 128 kHz ตามลำดับ ในขณะที่แอนติเรโซแนนซ์ให้ผลในลักษณะเดียวกันดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ดังนั้นในการพิจารณาเพื่อใช้เตรียมเป็นอัลตราโซนิกจึงน่าจะเลือก hard PZT เนื่องจากสามารถให้ความถี่ที่สูงกว่าตามความต้องการเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.4 การเกิดความถี่เรโซแนนซ์ และ แอนติเรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ของ hard PZT และ soft PZT

5) สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (electromechanical coupling factors, k_p) และ สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factors, Q_m)

สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (k_p) เป็นค่าที่วิเคราะห์หามาจากข้อมูลงานวิจัยที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข พบว่าสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้าของ hard PZT ต่ำกว่า soft PZT โดยมีค่าเป็น 0.50 และ 0.58 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า soft PZT มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่า hard PZT ซึ่งสอดคล้องกับค่า d_{33} และ การศึกษาในส่วนของวงจรรีซิสทีฟที่แสดงไว้แล้ว ในขณะเดียวกัน k_p ยังแสดงให้เห็นว่า soft PZT สามารถเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้

ดีกว่า hard PZT อีกด้วย แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (Q_m) ของ soft PZT กลับมีค่าน้อยกว่าของ hard PZT คือ 78 และ 360 ตามลำดับ ดังนั้นถ้าพิจารณาจากค่าทั้งสองแล้วจะพบว่าถึงแม้ว่า soft PZT จะเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้าได้ดีกว่าก็ตาม แต่มีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่า hard PZT มาก เห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่ soft PZT มีน้อยกว่า hard PZT ค่อนข้างมาก ทำให้ hard PZT เหมาะสำหรับงานด้านเพียโซอิเล็กทริก แทรนสดิวเซอร์มากกว่า soft PZT ซึ่งทั้ง k_p และ Q_m จากการวิจัยแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไฟฟ้า (electromechanical coupling factors, k_p) และ สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factors, Q_m)

PZT	สมบัติ	
	k_p	Q_m
soft PZT	0.58	78
hard PZT	0.50	360

6) ผลของอะคูสติคิมพีแดนซ์ (acoustic impedance, Z) ของชิ้นงาน PZT

ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกผ่านวัสดุ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $Z = \rho v$ โดยที่ Z คือ อะคูสติคิมพีแดนซ์ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ v คือความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก จากผลการวิจัยพบว่าทั้ง hard PZT และ soft PZT มีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเป็น 31.94 และ 31.85 Mrayl ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอะคูสติคิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งทั้ง hard PZT และ soft PZT มีค่าทั้งสองไม่แตกต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 4.2 จึงทำให้ PZT ทั้งสองชนิดมีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่ไม่แตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 อะคูสติกอิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT

สมบัติ	hard PZT	soft PZT
ความเร็วคลื่น		
(m/s)	4258	4190
อะคูสติกอิมพีแดนซ์		
(Mrayl), ($\times 10^5 \text{g/cm}^2\text{-sec}$)	31.94	31.85

*หมายเหตุ ความหนาแน่นของ hard PZT = 7.5 g/cm^3

ความหนาแน่นของ soft PZT = 7.6 g/cm^3

7) การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของ soft PZT และ hard PZT

สมบัติต่างๆของเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกตัวอย่างที่ทำวิจัยทั้งของ hard PZT และ soft PZT สามารถสรุปเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจะพบว่าทั้ง soft PZT และ hard PZT มีความหนาแน่น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และอะคูสติกอิมพีแดนซ์ที่ไม่แตกต่างกัน โดยที่ soft PZT มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้ามากกว่า hard PZT ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานด้านทรานสดิวเซอร์ทั่วไปได้ทั้งสองชนิด แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติในการใช้งานของทรานสดิวเซอร์ที่เตรียมได้แล้ว soft PZT จะดีกว่า hard PZT โดยการดูที่ค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล และข้อมูลเพิ่มเติมจากตารางที่ 4.3 จะพบว่า soft PZT ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานเนื่องจาก soft PZT มีการสูญเสียพลังงานที่สูงกว่า ซึ่งแสดงได้จากการมีค่าไดอิเล็กทริกคอสส์ที่สูง ความต้านทานไฟฟ้าสูง และสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกลที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ hard PZT นอกจากนี้ประสิทธิภาพการใช้งานยังไม่คงที่ในระยะการใช้งานที่ยาว จะเห็นได้จากการที่ soft PZT ที่ค่าลิเนียร์ริตี (Linearity) ต่ำและการเสื่อมของโพลาริเซชันเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

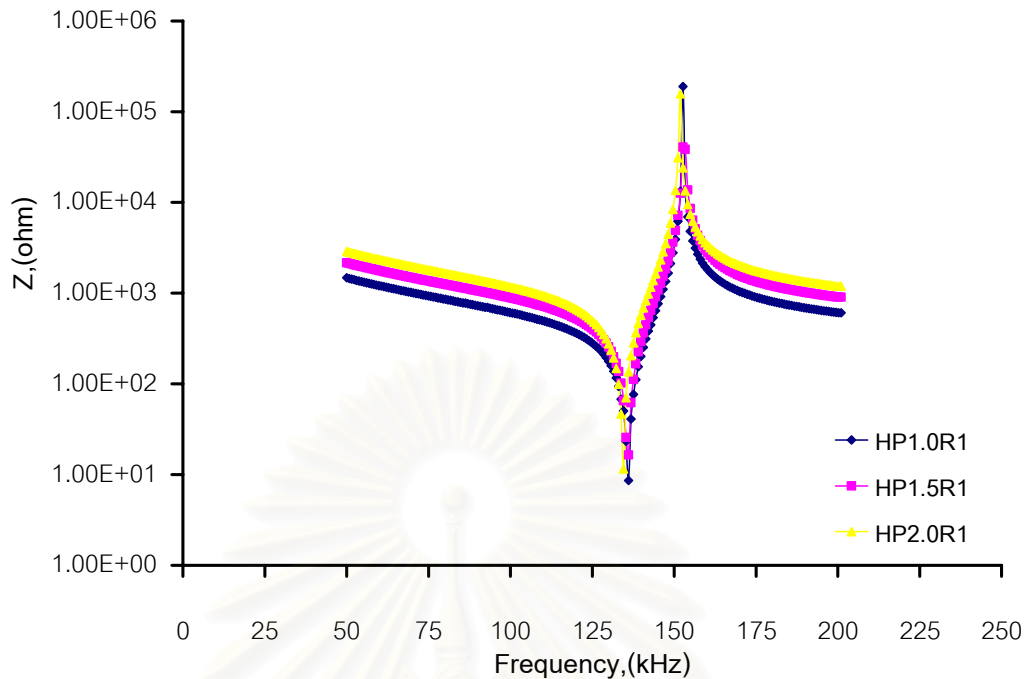
ตารางที่ 4.3 สมบัติต่างๆของชิ้นงาน PZT ตัวอย่าง[8]

Characteristic	Soft PZT	Hard PZT
Piezoelectric Charge Constants	larger	smaller
Permittivity	higher	lower
Dielectric Constants	larger	smaller
Dielectric losses	higher	lower
Electromechanical Coupling Factors	larger	smaller
Electrical Resistance	very high	lower
Mechanical Quality Factors	low	high
Coercive Field	low	higher
Linearity	poor	better
Polarization/Depolarization	easier	more difficult

4.1.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบความหนา และ ความยาวรัศมีของแผ่นชิ้นงานเซรามิกต่อความถี่เรโซแนนซ์

1) ผลของความหนาของแผ่นชิ้นงานที่มีต่อความถี่เรโซแนนซ์

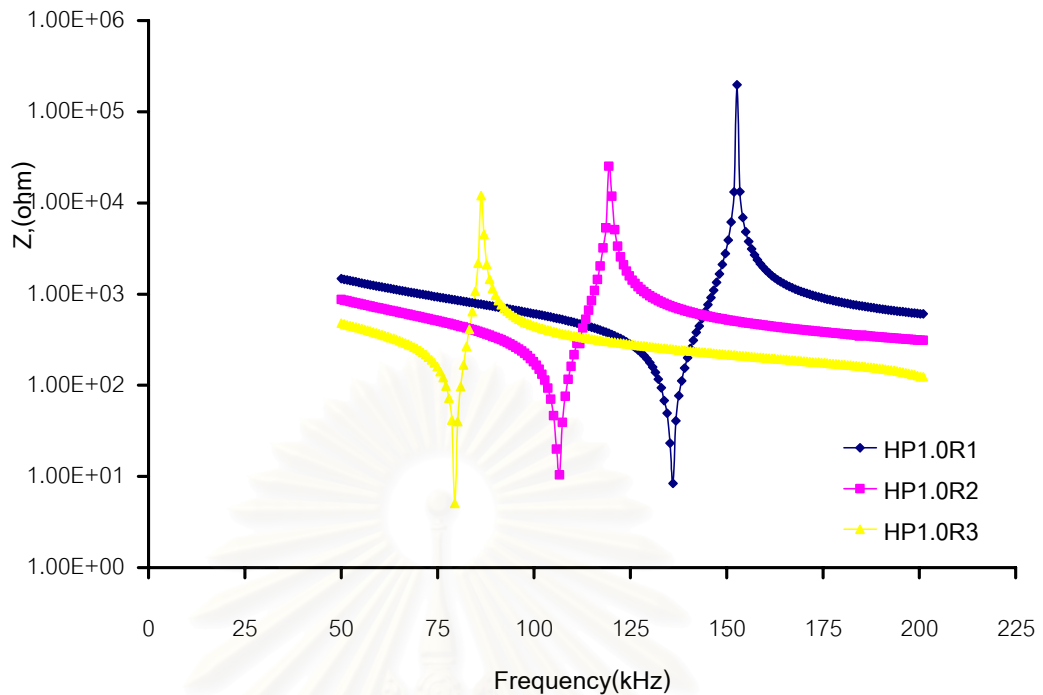
จากการศึกษาสมบัติต่างๆของชิ้นงานเซรามิกข้างต้นทำให้สามารถเลือก hard PZT ในการที่จะนำมาเป็นตัวกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกในงานวิจัยในครั้งนี้ เมื่อนำชิ้นงาน hard PZT มาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชิ้นงานกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ให้ โดยนำชิ้นงานที่มาจากกรชิ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ขนาดเล็ก (R1) มาทำให้มีความหนาเป็น 1.0 mm (HP1.0R1) 1.5 mm (HP1.5R1) และ 2.0 mm (HP2.0R1) หาความถี่เรโซแนนซ์ พบว่าเมื่อทำให้ชิ้นงานมีความหนามากขึ้นความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นดิสก์ชิ้นงานได้จากการเพิ่มหรือลดความหนาของแผ่นดิสก์ชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องมาจากความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการศึกษาเป็นความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 และลักษณะของชิ้นงานเป็นแผ่นดิสก์ค่อนข้างบาง จึงเกิดความถี่ในแนวรัศมีมากกว่าในแบบความหนา ทำให้การเปลี่ยนแปลงความหนาเพียงเล็กน้อยไม่ค่อยมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์มากนัก จากผลการวิจัยพบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของ hard PZT ตัวอย่าง (R1) อยู่ที่ประมาณ 137 kHz ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ไฟฟ้าที่ให้ของชิ้นงานตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถบอกความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงานได้ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว



รูปที่ 4.5 ความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ของชิ้นงาน hard PZT ที่ความหนา 1.0 1.5 และ 2.0 mm

2) ผลของความยาวรัศมีของแผ่นชิ้นงานที่มีต่อความถี่เรโซแนนซ์

เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ hard PZT ชิ้นงานเป็นขนาดเล็ก (HP1.0R1) ขนาดกลาง (HP1.0R2) และ ขนาดใหญ่ (HP1.0R3) โดยที่ทุกขนาดมีความหนาคงที่อยู่ที่ 1.0 mm (HP1.0) มาหาความถี่เรโซแนนซ์พบว่าความถี่เรโซแนนซ์จะเพิ่มขึ้นตามขนาดของรัศมีของชิ้นงานที่ลดลง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.6 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้เป็นความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ซึ่งยังเป็นความถี่คลื่นอัลตราโซนิกในย่านที่ต่ำอยู่ และเกิดจากแผ่นดิสก์ชิ้นงานที่บางมาก จึงเกิดเป็นความถี่ในแนวรัศมีมากกว่าเกิดในแนวความหนา ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความยาวของรัศมีจึงมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ได้มากกว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงาน ซึ่งจากการวิจัยพบว่าชิ้นงานทั้ง 3 ขนาดมีความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ประมาณ 80-140 kHz โดยที่ขนาดเล็กกว่าจะมีความถี่เรโซแนนซ์สูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความถี่เรโซแนนซ์ครั้งที่ 1 ของชิ้นงาน hard PZT ที่มีความหนา 1.0 mm และ ความยาววรัศมี R1 R2 และ R3

4.1.2 ผลการวิจัยวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์ (backing material) จากอะลูมิเนียมออกไซด์คอมพอสิต และ ทองแดงออกไซด์คอมพอสิต

วัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์จัดได้ว่า เป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากตัวหนึ่งที่ต้องศึกษาเพราะจะเป็นตัวที่จะดูดซับเอาคลื่นที่ผ่านมาจากตัวชิ้นงาน PZT หลังจากรับคลื่นสะท้อนที่ปล่อยออกไปกระทบวัตถุกลับมา หรือ คลื่นจากแหล่งอื่นแล้วไม่ให้สะท้อนกลับไปยังชิ้นงาน PZT อีกซึ่งเป็นเหตุให้รบกวนสัญญาณที่ PZT ในการรับคลื่นลูกใหม่ ดังนั้นวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์ ต้องมีค่าแอทเทนนิวเอชันสูง นอกจากนี้แล้ววัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์ยังต้องมีความสามารถในการรับคลื่นมาจาก PZT ให้ได้มากที่สุดเพื่อให้สัญญาณทั้งหมดที่ผ่านชิ้นงาน PZT แล้วถูกส่งผ่านออกมาทางวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์ให้มากที่สุดจะได้ไม่รบกวนการทำงานของ PZT ในครั้งต่อไป ดังนั้นวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์ต้องมีค่า อะคูสติกอิมพีแดนซ์ ที่เท่ากับกับ PZT หรือมีค่าใกล้เคียง เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่น (T_{coef}) ระหว่าง PZT กับ วัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดิวเซอร์มีค่าสูง (อะคูสติกอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกัน) แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น (R_{coef}) ต่ำ (มีค่าแอทเทนนิวเอชันสูง) หรือการดูดซับคลื่นได้มาก ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการให้สัญญาณของแทรนส์ดิวเซอร์ได้ดี

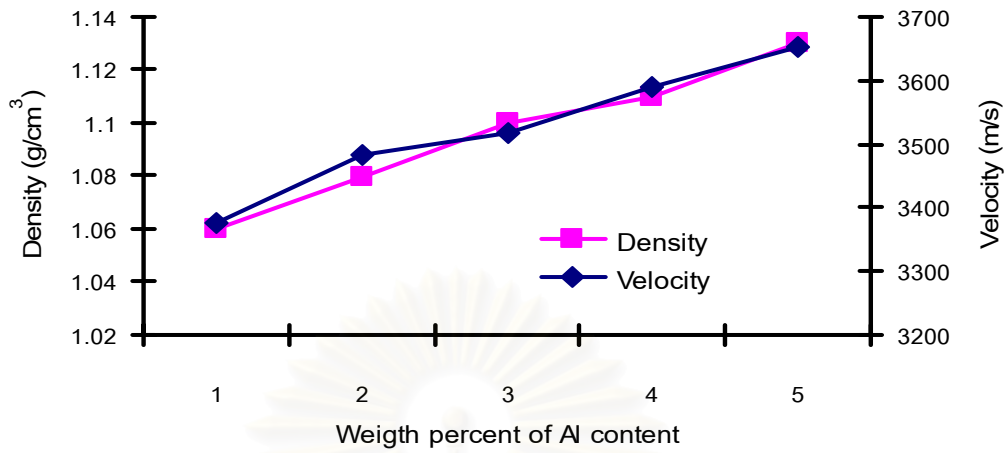
จากการศึกษาทำคอมพอสิตระหว่างเรซินซึ่งมีค่า อะคูสติคิมพีแดนซ์ต่ำผสมกับโลหะ ซึ่งมีสมบัติที่ให้ค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์สูง เพื่อให้เข้าใกล้กับ PZT มากที่สุด ในขณะที่จะต้องมีค่า แอเทเนชันที่เพิ่มขึ้นจากการที่เกิดการกระจายของคลื่นเมื่อกระทบกับอนุภาคของโลหะที่อยู่ในคอมพอสิต เบื้องต้นพบว่าเมื่อนำเอาชิ้นงานที่ได้จากการทำอะลูมิเนียมฟอกซีคอมพอสิต และ ทองแดงอิพอกซีคอมพอสิตตามสัดส่วนในตารางที่ 3.5 พบว่าคอมพอสิตที่มีสัดส่วนของโลหะ มากกว่า 5 wt.% ขึ้นไปมีการจับตัวกันของเรซินกับโลหะไม่ดี เนื่องจากมีโลหะมากเกินไปทำให้มี ความหนืดขณะผสมมากการกระจายตัวของอนุภาคโลหะจึงไม่ดี ดังนั้นจึงไม่นำมาแสดงผลใน งานวิจัยครั้งนี้ จะแสดงผลเฉพาะคอมพอสิตที่มีสัดส่วนโลหะตั้งแต่ 1-5 wt.% เท่านั้นมาวิเคราะห์หา ความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเพื่อคำนวณหาอะคูสติคิมพีแดนซ์ และ แอเทเนชัน ต่อไป

4.1.2.1 ผลของสัดส่วนของโลหะอะลูมิเนียม และ ทองแดงในคอมพอสิตที่มีต่อ ความหนาแน่นของคอมพอสิตและความเร็วเสียงในคอมพอสิต

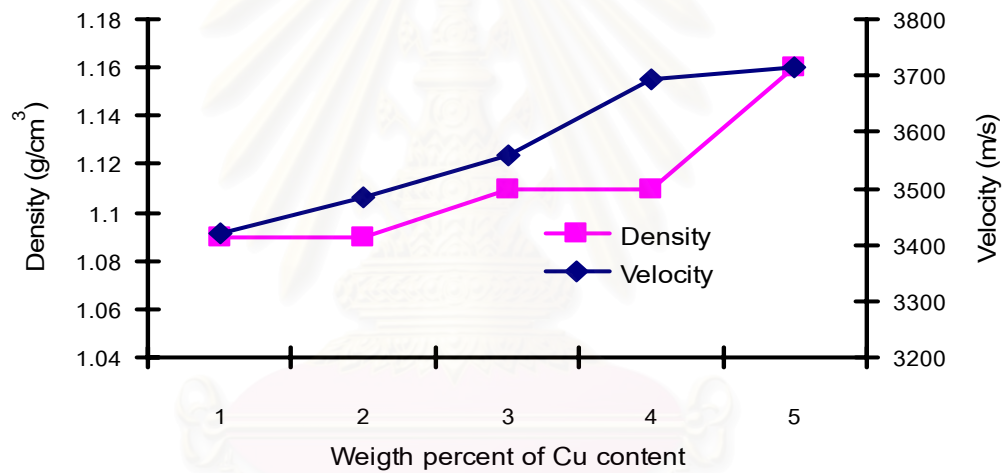
เมื่อสัดส่วนของโลหะในคอมพอสิตมากขึ้นจะทำให้มีความเร็วของคลื่นเสียง และ ความหนาแน่นในคอมพอสิตสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอิพอกซีคอมพอสิตโดยปกติมีความเร็วเสียง ต่ำกว่าโลหะอยู่แล้ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโลหะเข้าไปมากขึ้นจึงทำให้สามารถเพิ่มความเร็ว ของคลื่นเสียงได้ จากรูปที่ 4.7 จะพบว่าความเร็วคลื่นทั้งอะลูมิเนียมฟอกซีคอมพอสิต และ ทองแดงอิพอกซีคอมพอสิตมีแนวโน้มสูงขึ้นตามสัดส่วนของโลหะที่เพิ่มขึ้น โดยที่ทองแดงอิพอกซี คอมพอสิตจะมีความหนาแน่นและความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคมากกว่าอะลูมิเนียมฟอกซีคอมพอสิต ทั้งนี้เนื่องจากโดยปกติแล้วทองแดงบริสุทธิ์มีความหนาแน่นที่สูงกว่าอะลูมิเนียมมากอยู่แล้วเมื่อ เทียบกับความเร็วคลื่นเสียงที่ทองแดงมีน้อยกว่า ทำให้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของโลหะปริมาณที่เท่ากัน ในคอมพอสิตจึงทำให้ทองแดงอิพอกซีคอมพอสิตมีความหนาแน่น และความเร็วคลื่นมากกว่า อะลูมิเนียมฟอกซีคอมพอสิตด้วย

4.1.2.2 ผลของสัดส่วนของโลหะอะลูมิเนียม และ ทองแดงในคอมพอสิตที่มี ต่อการกระจายตัวของอนุภาคโลหะในคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.8 และจากรูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างจุลภาพของอะลูมิเนียมฟอกซี คอมพอสิต และทองแดงอิพอกซีคอมพอสิตตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวที่ดีของอนุภาค โลหะที่อยู่ในคอมพอสิต แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของโลหะสูงขึ้นแล้ว พบว่าอนุภาคของโลหะมีการจับตัว กันเป็นก้อนทำให้มีขนาดของอนุภาคโลหะโตขึ้นเป็นสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการจับตัวของ อิพอกซีกับโลหะต่ำลง ดังนั้นเมื่อสัดส่วนของโลหะมากกว่า 5 wt.% คอมพอสิตที่ได้จะไม่แข็งแรง ดังได้กล่าวไว้แล้ว และเมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้นานๆพบว่า ทองแดงอิพอกซีคอมพอสิตจะเกิดสีแดงเข้ม ขึ้นมา ซึ่งน่าจะเกิดจากการเกิดออกไซด์ของโลหะทองแดงกับอากาศชื้นด้วย



(a)

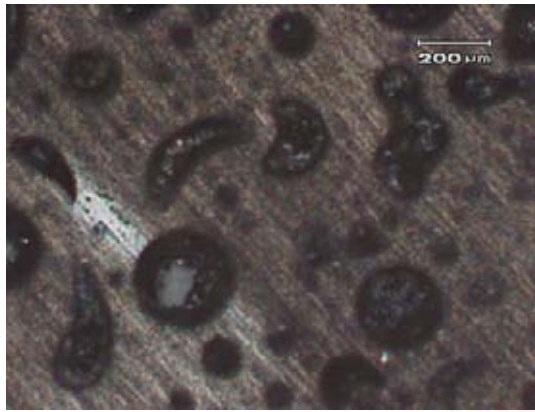


(b)

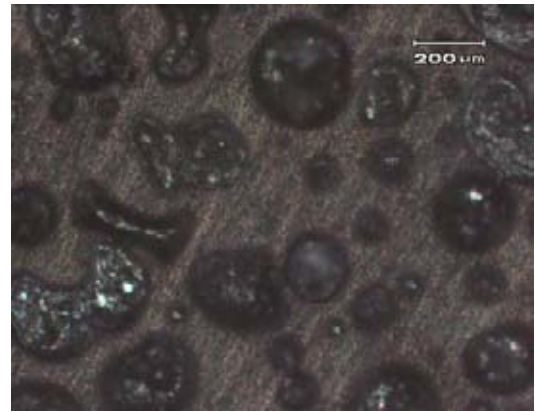
รูปที่ 4.7 ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นเสียงในชิ้นงานคอมพอสิต

(a) ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นเสียงในชิ้นงานอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิต

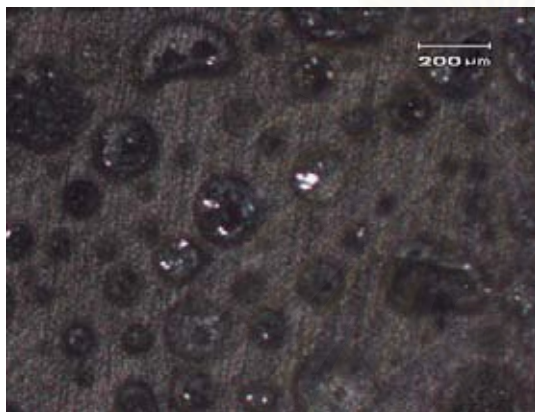
(b) ความหนาแน่น และความเร็วคลื่นเสียงในชิ้นงานทองแดงอีพอกซีคอมพอสิต



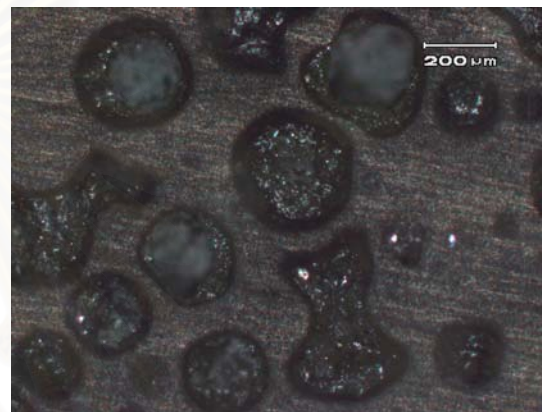
1 wt.%Al



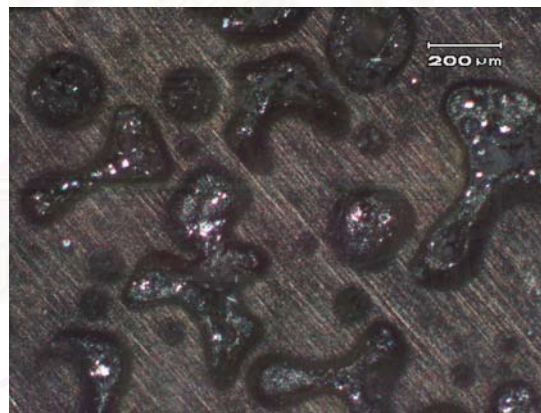
3 wt.%Al



2 wt.%Al

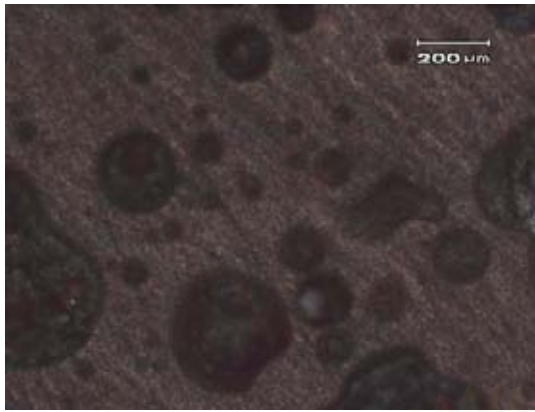


4 wt.%Al

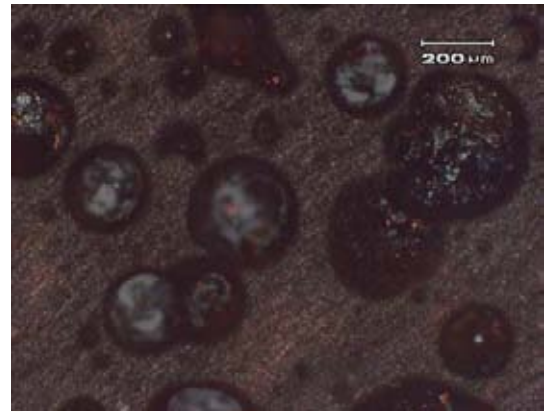


5 wt.%Al

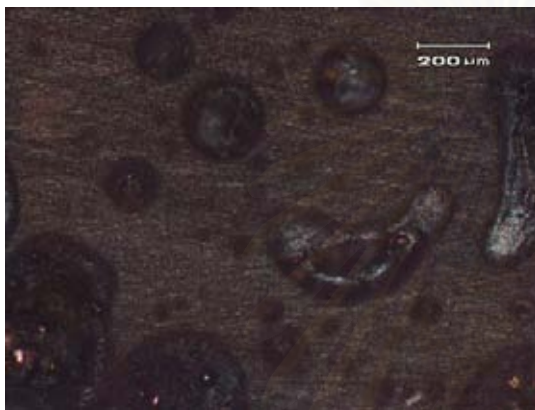
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคของ อะลูมิเนียมออกไซด์คอมพอสิต



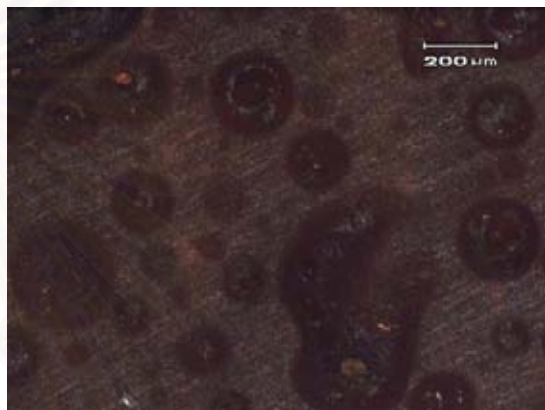
1 wt.%Cu



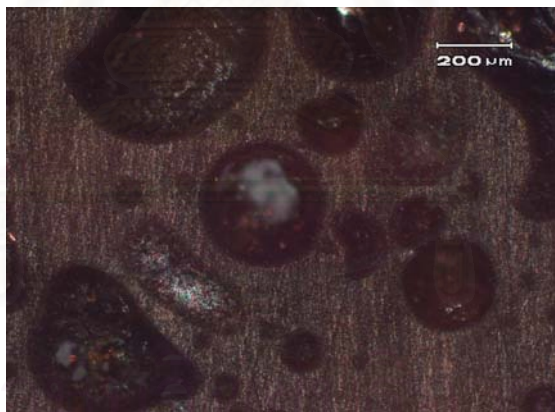
3 wt.%Cu



2 wt.%Cu

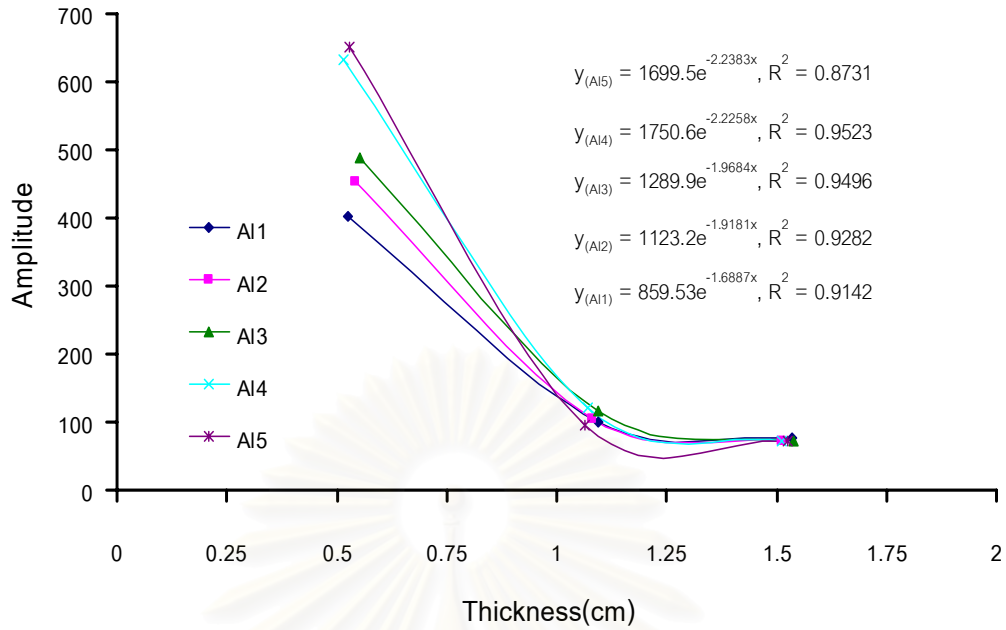


4 wt.%Cu

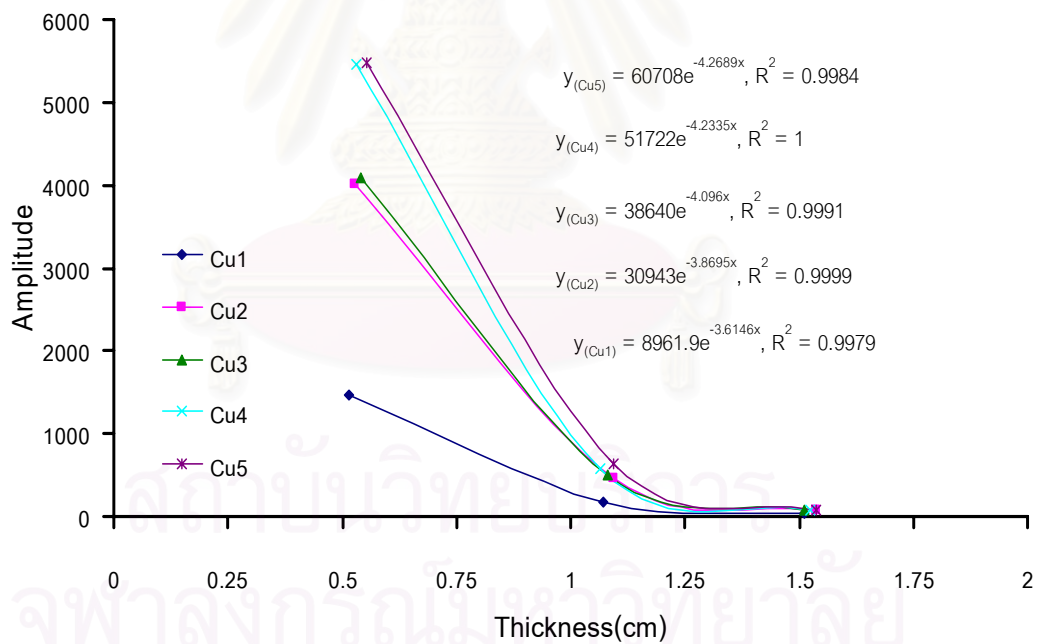


5 wt.% Cu

รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของทองแดงอีพอกซีคอมพอสิต



(a)

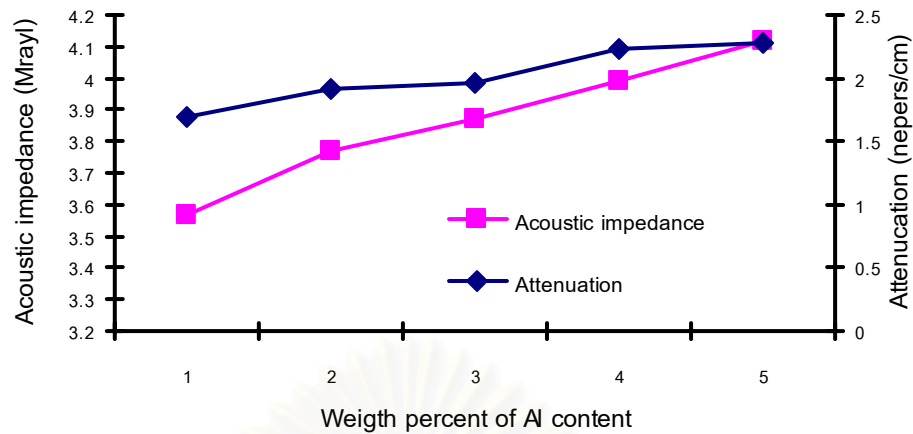


(b)

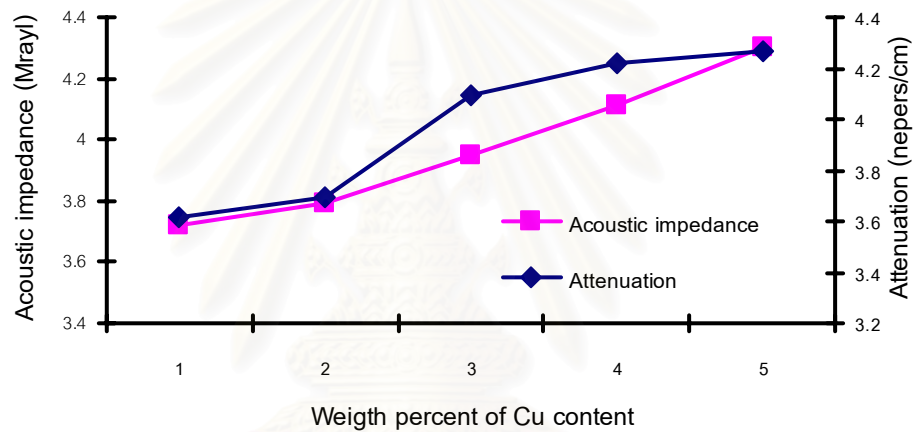
รูปที่ 4.10 ความเข้มของสัญญาณที่ความหนาต่างๆของคอมพอสิต

(a) อะลูมิเนียมฟอกซีคอมพอสิต

(b) ทองแดงฟอกซีคอมพอสิต



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ของสัดส่วนโลหะกับค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์และค่าแอทเทนนิวเอชันในคอมพอสิต

(a) อะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิต

(b) ทองแดงอีพอกซีคอมพอสิต

4.1.2.3 ผลของสัดส่วนของโลหะอะลูมิเนียม และ ทองแดงที่มีต่อ ค่าแอทเทนนิวเอชันของคอมพอสิต

จากการนำชิ้นงานทั้งอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิต และทองแดงอีพอกซีคอมพอสิต มาทำการวิเคราะห์หาค่าแอทเทนนิวเอชันโดยการวัดความเข้มสัญญาณที่ความถี่ 1 MHz ที่ความหนาของชิ้นงานเป็น 0.5 1.0 และ 1.5 mm เพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของสัญญาณกับระยะทางที่คลื่นผ่าน (ความหนา) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 เมื่อนำแนวโน้ม

ของกราฟที่ได้เทียบกับสมการ $A = A_0 e^{-\alpha x}$ สามารถหาค่าแอทเทนนิวเอชันได้ ดังแสดงผลในรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.11a และ รูปที่ 4.11b จะเห็นได้ว่าค่าแอทเทนนิวเอชันและอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของคอมพอสิตทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของโลหะที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อสัดส่วนของโลหะเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจาย และการหักเหของคลื่นที่มากกระทบอนุภาคของโลหะมากขึ้นด้วยทำให้เกิดการดูดซับคลื่นไว้ได้มากขึ้น ดังนั้นค่าแอทเทนนิวเอชันของคอมพอสิตมากขึ้นตาม ในขณะที่เดียวกันจะพบว่าที่สัดส่วนของโลหะสูงขึ้นอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าแอทเทนนิวเอชันจะลดลง เนื่องจากการที่โลหะจับตัวกันเป็นก้อนทำให้การจับตัวกันระหว่างโลหะกับเรซินไม่ค่อยดีดังได้กล่าวไว้แล้วในกรณีที่มีสัดส่วนของโลหะมากกว่า 5 wt.% ทำให้ความสามารถในการกระจายของคลื่นลดต่าลงนั่นเอง เมื่อเพิ่มสัดส่วนของโลหะให้มากขึ้นก็จะทำให้ความหนาแน่นของคอมพอสิตสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้เพิ่มค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ได้ด้วยเนื่องจากอะคูสติกอิมพีแดนซ์มีค่าเท่ากับความหนาแน่นคูณด้วยความเร็วคลื่น ($Z = \rho v$) อีกทั้งโลหะมีความเร็วคลื่นเสียงมากกว่าเรซิน ดังนั้นเมื่อสัดส่วนของโลหะเพิ่มจึงทำให้มีความเร็วเสียงเพิ่มด้วยเช่นกัน จึงเป็นการสนับสนุนให้อะคูสติกอิมพีแดนซ์สูงขึ้นนั่นเอง

4.1.3 วัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดิวเซอร์ (matching layer)

วัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดิวเซอร์ เป็นส่วนที่จะช่วยลดความแตกต่างของอะคูสติกอิมพีแดนซ์ระหว่าง PZT กับตัวกลางที่คลื่นส่งผ่าน ในการทดลองครั้งนี้ตัวกลางเป็นน้ำซึ่งมีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ประมาณ 1.5 Mrayl ซึ่ง PZT ตัวอย่างมีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ประมาณ 32 Mrayl ดังนั้นจะต้องหาวัสดุที่มีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ อยู่ระหว่างชั้นงานทั้ง 2 ชนิดนี้ โดยการเลือกหาจากวัสดุที่ทราบค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม แต่ในการทดลองครั้งนี้ศึกษาในส่วนของวัสดุส่วนท้ายของแทรนส์ดิวเซอร์ และการออกแบบลักษณะความหนา และความยาวรัศมีของชั้นงาน PZT เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ ดังนั้นจึงไม่ได้กำหนดให้วัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดิวเซอร์ อยู่ในขอบเขตงานวิจัยเพื่อเป็นการจำกัดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

4.1.4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างแต่ละชั้นของชั้นงานในแทรนส์ดิวเซอร์

เมื่อนำค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของวัสดุในแต่ละชั้นที่จะนำมาประกอบเป็นแทรนส์ดิวเซอร์ มาคำนวณ หา T_{coef} และ R_{coef} เพื่อดูประสิทธิภาพของการส่งผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิคในแทรนส์ดิวเซอร์ ที่จะเตรียม ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างชั้นของชิ้นงาน

Properties	1. Water	2. PZT	3. Metal epoxy resin (5 wt.%)					
			Al-epoxy resin	Cu-epoxy resin				
Density (g/cm ²)	1	7.5	1.13	1.16				
Velocity (m/s)	1495	4258	3652	3715				
Impedance (Mrayl)	1.495	31.935	4.12676	4.3094				
Coefficient	R_{coef12}	0.83	R_{coef23}	0.59	R_{coef32}	0.59	R_{coef32}	0.58
	T_{coef12}	0.17	T_{coef23}	0.41	T_{coef32}	0.41	T_{coef32}	0.42
			R_{coef21}	0.83				
			T_{coef21}	0.17				

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่า R_{coef} และ T_{coef} ในส่วนของวัสดุส่วนหลังของแทรนสดิวเซอร์ (โลหะอีพอกซีคอมพอสิต) กับ PZT นั้น PZT สามารถส่งคลื่นไปยังอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตได้ 41 % แต่มีค่าสะท้อนที่ผิวของ PZT เอง 59 % ทั้งนี้เนื่องจาก PZT ยังมีอะคูสติคิมพีแดนซ์ที่สูงกว่าอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตมาก ในขณะที่คลื่นจากอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตสามารถทะลุผ่านมายัง PZT ได้ 41 % เหมือนกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันคลื่นที่ผ่านมาจาก PZT เข้าสู่อะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตสะท้อนกลับมาเข้าสู่ PZT อีกครั้ง โดยการเพิ่มค่าแอทเทนนิวเอชันในอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตให้มีขนาดสูงขึ้น เพื่อให้คลื่นที่รับมาแล้วเกิดการกระจายตัวไปมาเป็นการดูดซับคลื่นจนไม่สามารถกลับไปมีผลต่อ PZT อีกดังได้กล่าวไว้ในส่วนของทฤษฎี และเมื่อพิจารณาในส่วนที่เป็นทองแดงอีพอกซีคอมพอสิตแล้ว พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันแต่เนื่องจากเสถียรภาพไม่ดีจึงพิจารณาใช้อะลูมิเนียมในการเตรียมเป็นวัสดุส่วนท้ายของแทรนสดิวเซอร์ต่อไป

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิคแทรนสดิวเซอร์

สมบัติที่ต้องการมากที่สุดของอัลตราโซนิคแทรนสดิวเซอร์ คือมีช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณสั้นโดยสามารถดูได้จากค่า waveform duration ต้องมีค่าสั้นนอกจากนี้แทรนสดิวเซอร์ต้องสามารถใช้งานในช่วงความถี่ที่กว้างมี bandwidth ที่กว้าง ค่าทั้งสองนี้จะทำให้แทรนสดิวเซอร์มีความไวและความละเอียดของการใช้งานที่สูงด้วยนั่นเอง แทรนสดิวเซอร์ตัวอย่างทั้ง 2 แบบที่เตรียมขึ้นมีลักษณะต่างกันที่ขั้นตอนในการประกอบ คือแบบแรก (T1) จะประกอบตัวโครงของแทรนสดิวเซอร์

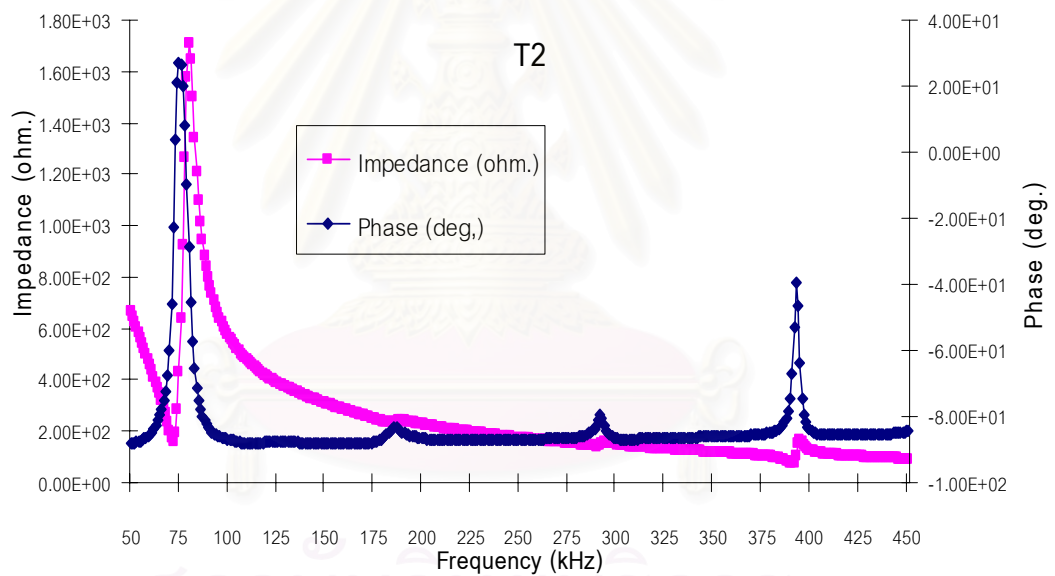
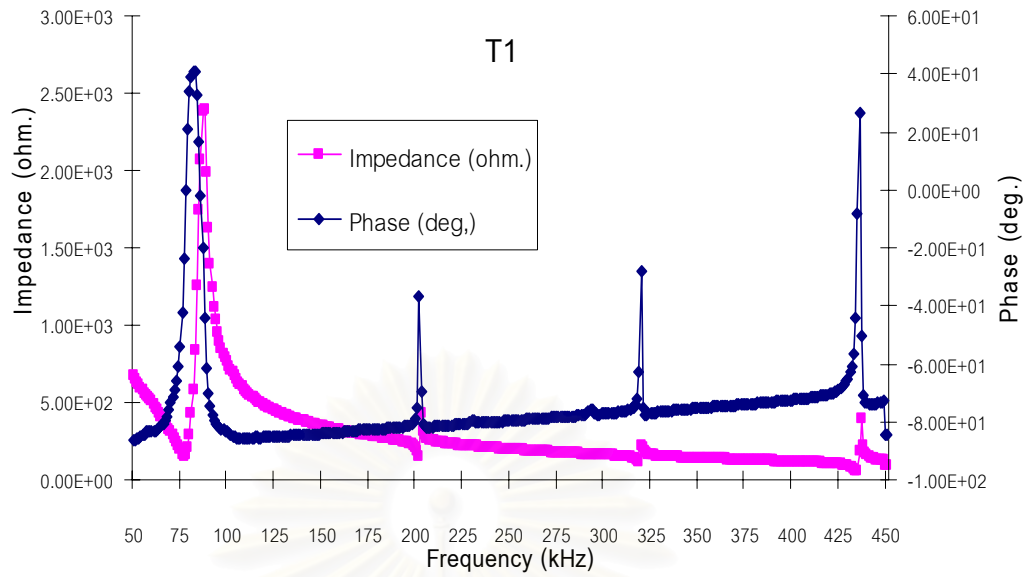
ที่หล่อด้วยวัสดุส่วนหลังของทรานส์ดิวเซอร์เรียบร้อยแล้วก่อนจะประกบกับ PZT ที่หลัง โดยใช้อิพอกซีคอมพอสิต ส่วนแบบที่สอง (T2) จะประกบ PZT กับตัวโครงพลาสติกเสร็จแล้วค่อยหล่อวัสดุส่วนหลังหล่อตามในขั้นตอนสุดท้าย โดยทั้งสองแบบมีขนาดของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm (R3) มีความหนา 1.0 mm มีส่วนหลังของทรานส์ดิวเซอร์ ทำมาจาก 5 wt.% อะลูมิเนียมอิพอกซีคอมพอสิต โดยไม่มีส่วนหน้าของทรานส์ดิวเซอร์ เพียงแต่มี ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) ต่างกันบ้างเล็กน้อยทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถควบคุมได้

4.2.1 อิมพีแดนซ์ไฟฟ้า (Electrical impedance)

รูปที่ 4.12 เป็นรูปที่แสดงอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของทรานส์ดิวเซอร์ตัวอย่างทั้งสองแบบ จากรูปที่ 4.13a และรูปที่ 4.13b สามารถบอกความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ของทรานส์ดิวเซอร์ตัวอย่างได้ โดยความถี่เรโซแนนซ์เฉลี่ยของทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองแบบ อยู่ที่ประมาณ 80 kHz และมีความถี่แอนติเรโซแนนซ์ที่ประมาณ 90 kHz ซึ่งแสดงว่าสามารถเตรียมให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการได้จากทั้งสองวิธีในการทำวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จะนำไปทดสอบกับการใช้งานในส่วนถัดไป



รูปที่ 4.12 ตัวอย่างเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์



รูปที่ 4.13 อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของแทรนส์ดีวเซอร์

(a) อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของแทรนส์ดีวเซอร์ T1

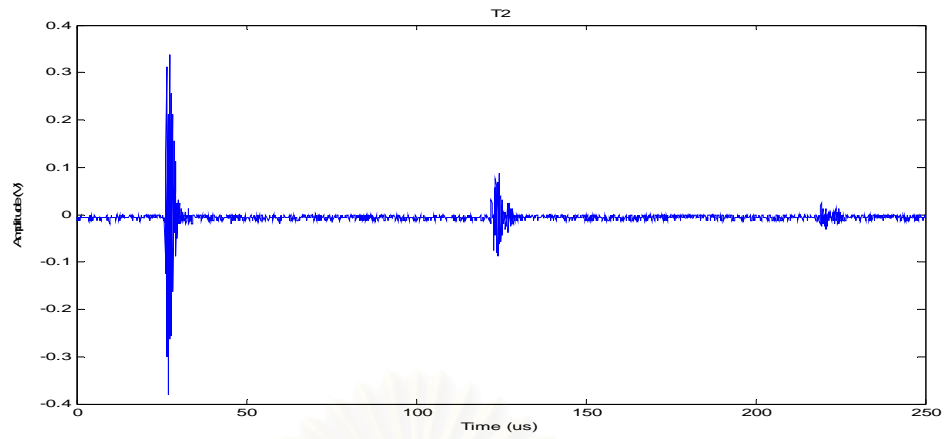
(b) อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของแทรนส์ดีวเซอร์ T2

4.2.2 การตอบสนองสัญญาณต่อเวลา (Time response)

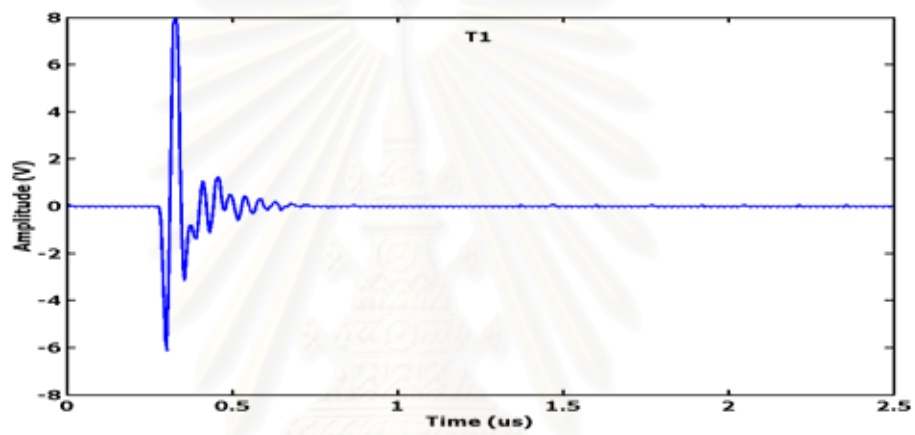
เมื่อนำทรานส์ดิวเซอร์ที่เตรียมได้มาทำการวิเคราะห์หา waveform duration ของคลื่นที่ส่งออกไปกระทบกับเป้าหมาย (แก้ว) แล้วสะท้อนกลับมาได้น้ำ โดยใช้เครื่องส่งคลื่นอัลตราโซนิก ultrasonic flaw detector แล้วเปรียบเทียบกับการใช้ทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสอง พบว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (wave form duration) สั้นมากทั้งสองแบบเห็นได้จากรูปที่ 4.14 เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งคลื่นไปของทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองแบบไปกระทบกับเป้าหมาย โดยรูปที่ 4.14b เป็นการส่งคลื่นจากการใช้ทรานส์ดิวเซอร์ T1 โดยมี waveform duration ของการส่งคลื่นทั้งหมดประมาณ $0.5 \mu s$ และรูปที่ 4.14c เป็นการส่งคลื่นจากการใช้ทรานส์ดิวเซอร์ T2 โดยมี waveform duration ของการส่งคลื่นทั้งหมดประมาณ $0.5 \mu s$ ส่วนการรับคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายมีลักษณะที่สอดคล้องเช่นกันกับการส่งดังแสดงในรูปที่ 4.15a และ 4.15b แต่พบว่าใช้เวลานานมากขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการส่งคลื่นออกไป ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่คลื่นได้ผ่านจากตัวกลางและชั้นต่างๆของทรานส์ดิวเซอร์แล้วทำให้ความเร็วคลื่นเปลี่ยนแปลงไป แต่ถือได้ว่าเป็นช่วงเวลาไม่แตกต่างกันทั้งสองแบบโดยมีค่า waveform duration ของการรับคลื่นทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ $7-8 \mu s$ เป็นการแสดงถึงประสิทธิภาพในการส่งและรับคลื่นที่ดีของทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองแบบได้ระดับหนึ่ง

4.2.3 การวิเคราะห์การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ (Frequency response)

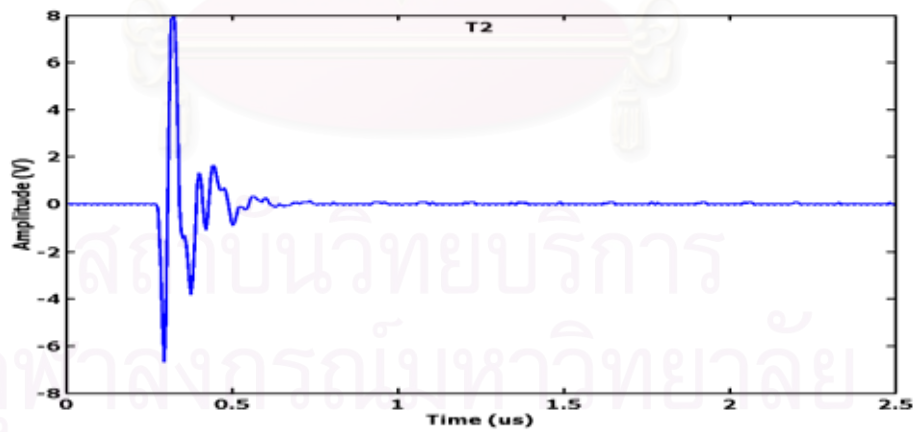
การวิเคราะห์การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์ที่รับได้นั้นจะเป็นตัวที่สามารถหา bandwidth และ sensitivity ของทรานส์ดิวเซอร์ได้ ทั้งนี้เนื่องจาก sensitivity เกิดจากการมีช่วงเวลาที่ใช้ในการส่งคลื่นในแต่ละลูกคลื่นสั้นแต่มี bandwidth ที่กว้าง ทั้งนี้ bandwidth สามารถพิจารณาได้จากตัวอย่างในภาคผนวก จ พบว่า bandwidth ได้จากช่วงพีคความถี่ของสัญญาณที่สามารถนำไปใช้งาน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองแบบมีการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์อยู่ในช่วงประมาณ 20-80 kHz ทั้งสองแบบซึ่งเมื่อเทียบกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มาแล้วในส่วนของการศึกษาอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าพบว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นแสดงว่าทรานส์ดิวเซอร์สามารถกำเนิดความถี่ได้ตามช่วงความถี่เรโซแนนซ์ที่หาได้และมีช่วงความถี่ที่กว้างใกล้เคียงกันทั้งสองแบบดังแสดงในรูปที่ 4.16



(a)



(b)



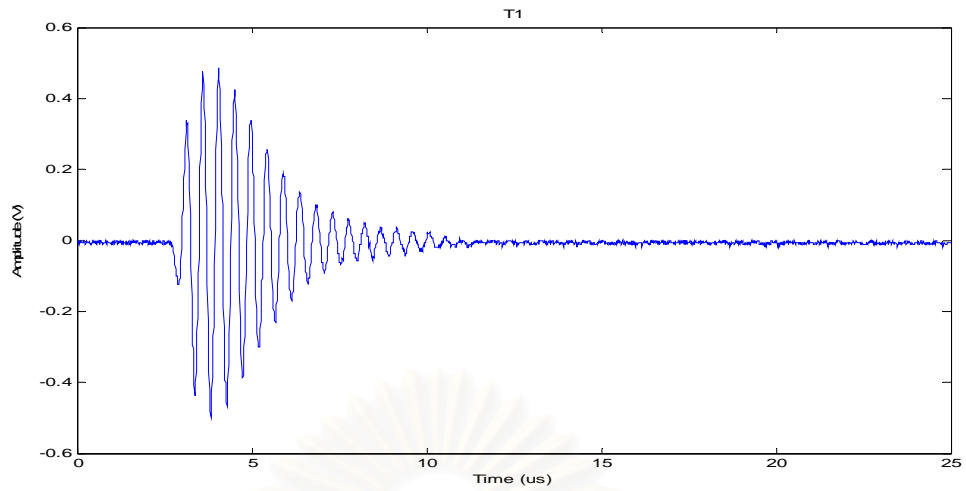
(c)

รูปที่ 4.14 การตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนส์ดีวเซอร์ขณะส่งสัญญาณ

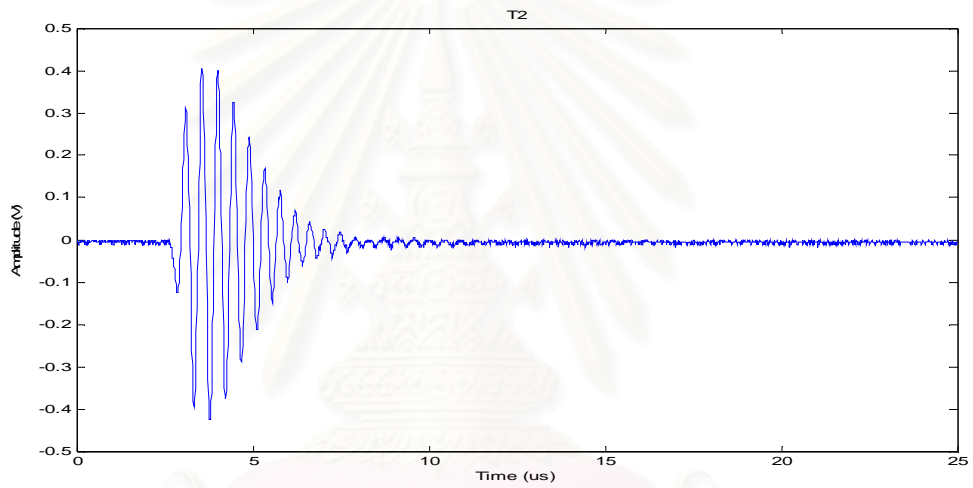
(a) แสดงลักษณะของการตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนส์ดีวเซอร์

(b) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนส์ดีวเซอร์ T1

(c) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนส์ดีวเซอร์ T2



(a)



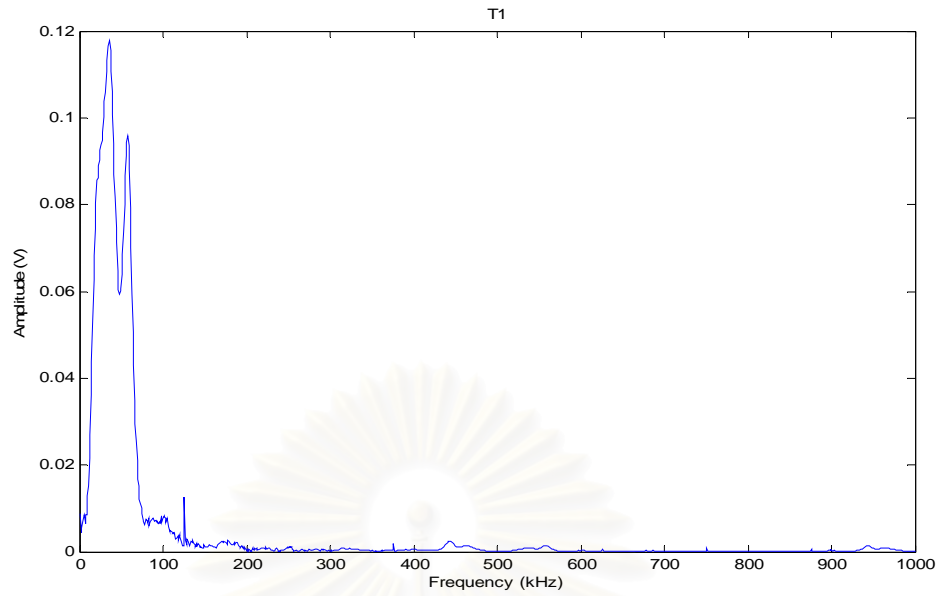
(b)

รูปที่ 4.15 การตอบสนองสัญญาณกับเวลาของทรานสดิวเซอร์ขณะรับคลื่นสะท้อนกลับ

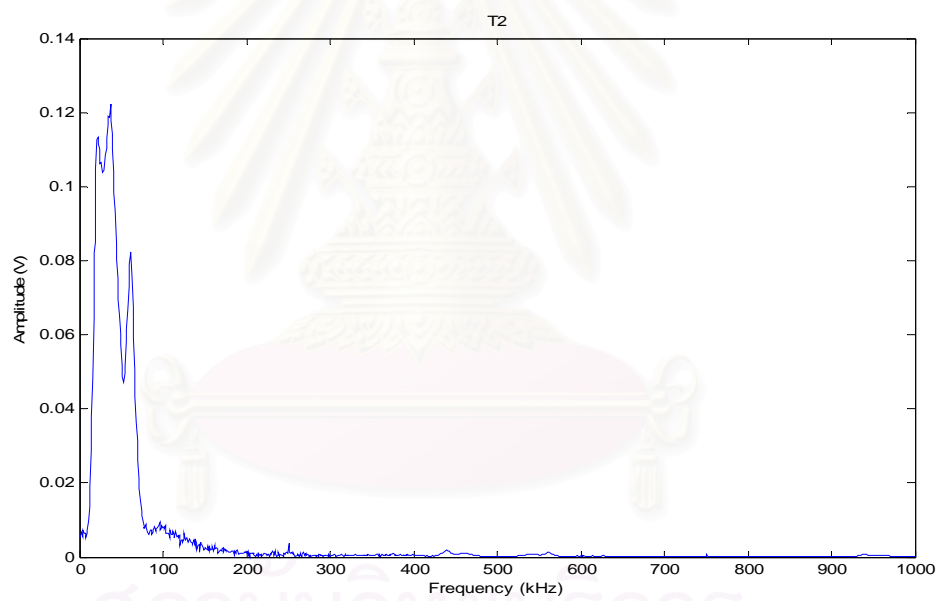
จากเป้าหมาย

(a) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับเวลาของทรานสดิวเซอร์ T1

(b) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับเวลาของทรานสดิวเซอร์ T2



(a)

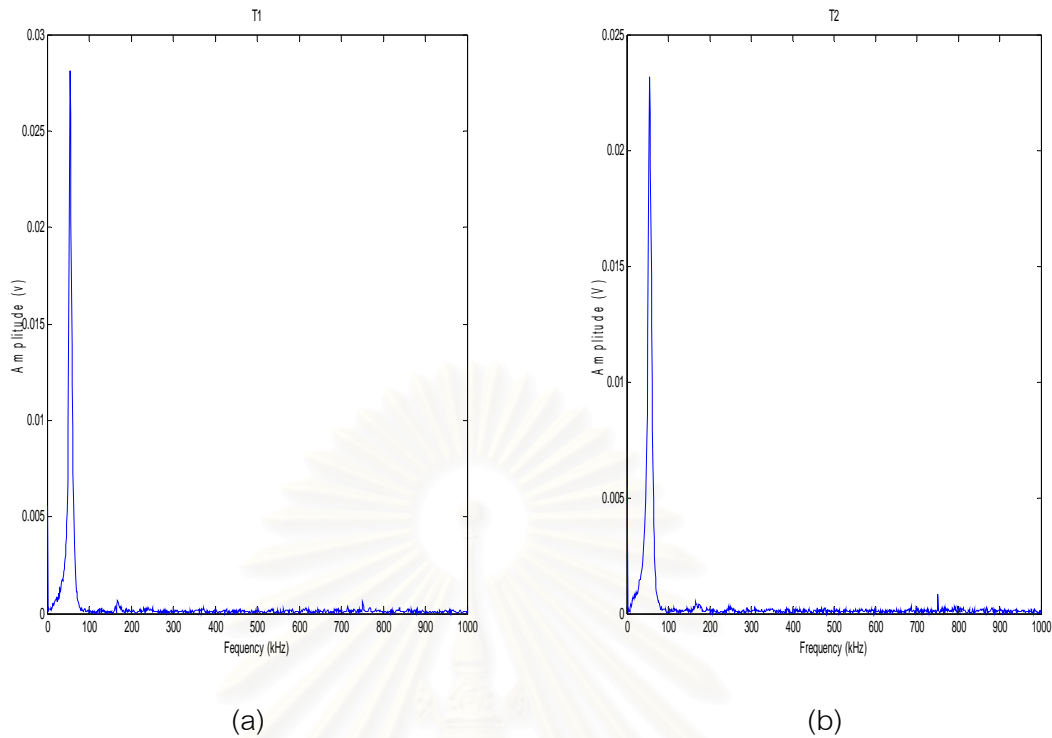


(b)

รูปที่ 4.16 การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ขณะส่งสัญญาณ

(a) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ T1

(b) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ T2



รูปที่ 4.17 การตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ขณะรับคลื่นสะท้อนกลับจากเป้าหมาย

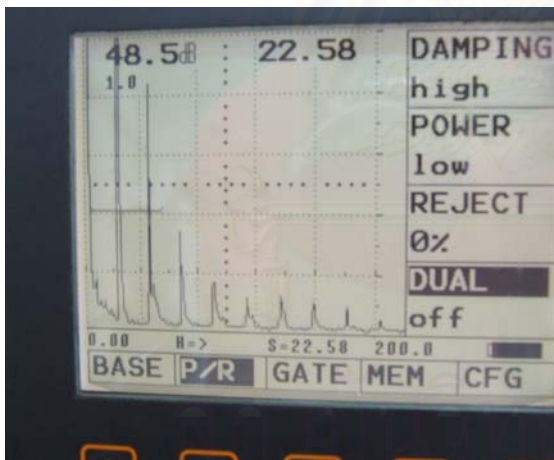
- (a) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ T1
 (b) แสดงการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ T2

จากรูปที่ 4.17 เป็นรูปที่แสดงการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ที่รับคลื่นสะท้อนกลับจากเป้าหมายจะพบว่า bandwidth ของความถี่ยังเหมือนกับ bandwidth ที่ส่งคลื่นออกไป แต่มีความเข้มอ่อนลงจากประมาณ 0.12 V ไปเป็น 0.025 V เนื่องจากการเดินทางตัวกลางขณะไปและกลับทำให้เกิดแอทเทนนิวเอชันของคลื่นเกิดขึ้นนั่นเอง

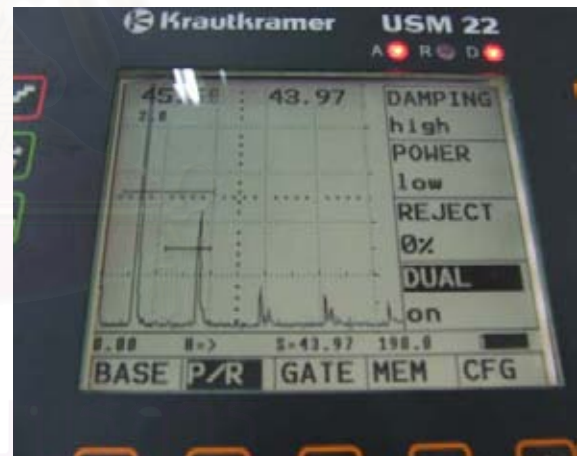
จากการวิเคราะห์ทั้งการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์ และการตอบสนองสัญญาณกับเวลาของแทรนส์ดีวเซอร์ พบว่าการตอบสนองสัญญาณกับความถี่ของแทรนส์ดีวเซอร์สามารถเกิดได้ในช่วงความถี่ประมาณ 20-80 kHz และมี waveform duration ที่น้อยซึ่งแสดงให้เห็นว่าแทรนส์ดีวเซอร์ทั้งสองแบบมี sensitivity ที่สูงสามารถนำไปใช้งานในด้านอัลตราโซนิกได้ ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างสัญญาณที่ใช้แทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างในการวัดระยะห่างในน้ำที่แสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าให้ความคมชัดของสัญญาณดีและให้ความแม่นยำในการวัดที่ค่อนข้างสูง



แสดงการจัดเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



หน้าจอของ ultrasonic flaw detector จากการ
ใช้แทรนส์ดิวเซอร์ตัวอย่างวัดระยะใต้น้ำ
โดยแบบหัวเดียว



หน้าจอของ ultrasonic flaw detector จากการ
ใช้แทรนส์ดิวเซอร์ตัวอย่างวัดระยะใต้น้ำ
โดยแบบสองหัว

รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ ในการใช้งานแทรนส์ดิวเซอร์ตัวอย่าง
และ หน้าจอของ ultrasonic flaw detector ขณะใช้งาน

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะในการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิด hard PZT เหมาะสำหรับการเตรียมเป็นชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก อัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์มากกว่า soft PZT

5.1.2 การออกแบบอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ให้มีความถี่มากขึ้นหรือน้อยลงสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดของความยาวครึ่งหนึ่งของแผ่นชิ้นงานรูปวงกลม ของ PZT ซึ่งจากการวิจัยพบว่าถ้าเปลี่ยนความยาวครึ่งหนึ่งของแผ่นชิ้นงานรูปวงกลม ของ PZT ที่มีความหนา 1.0 mm เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่พิมพ์ 20 25.5 และ 35 mm จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของชิ้นงานเปลี่ยนไปเป็น 140 105 และ 80 kHz ตามลำดับ

5.1.3 คอมพอสิตทั้งแบบอะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตและทองแดงอีพอกซีคอมพอสิตมีค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์และค่าแอทเทนนิวเอชันสูงขึ้นตามสัดส่วนของโลหะที่มีอยู่ในคอมพอสิตค่อนข้างเป็นแบบเส้นตรงตั้งแต่ 1-5 wt.% ของโลหะแต่ทองแดงอีพอกซีคอมพอสิตจะไม่มีเสถียรภาพเมื่อเก็บไว้นานเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสี ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเกิดออกไซด์กับอากาศ

5.1.4 5 wt.% อะลูมิเนียมอีพอกซีคอมพอสิตสามารถเลือกใช้เป็นตัวส่งคลื่นด้านหลังของแทรนส์ดีวเซอร์เนื่องจากมีค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ และค่าแอทเทนนิวเอชัน สูงที่สุดในช่วงที่ทำการวิจัย

5.1.5 เพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ที่เตรียมได้สามารถให้สัญญาณที่ดีทั้งการตอบสนองสัญญาณต่อความถี่ และการตอบสนองสัญญาณต่อเวลาได้ช่วงความถี่ประมาณ 20-90 kHz จากแผ่นชิ้นงานรูปวงกลม ของ PZT ที่มีความหนา 1.0 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm และ 5 wt.% อะลูมิเนียมอีพอกซีเรซินคอมพอสิตโดยการใช้ตัวโครงแทรนส์ดีวเซอร์เป็นพลาสติก

5.1.6 ชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างสามารถทดลองใช้กับ ultrasonic flaw detector ได้จริง มีสัญญาณที่ดี และมีความชัดเจนของสัญญาณสูง

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.2.1 ศึกษาส่วนผสมของคอมพอลิซของวัสดุส่วนหลังของแทรนส์ดีวเซอร์ โดยการเพิ่มหรือลดอัตราส่วนผสมต่างๆเพื่อให้สามารถเพิ่มปริมาณสัดส่วนของโลหะให้ได้มากขึ้นและเปลี่ยนชนิดของโลหะที่มีความหนาแน่น และความเร็วเสียงที่สูงกว่า ซึ่งเป็นการเพิ่มอะคูสติคิมพีแดนซ์ และค่าแอมเพนนิวเอชันให้สูงขึ้นได้ตามต้องการ

5.2.2 ศึกษาตัวโครงของแทรนส์ดีวเซอร์ เพื่อให้มีความแข็งแรงและทนต่อการใช้งานมากกว่าพลาสติก โดยการเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ

5.2.3 ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของวัสดุส่วนหน้าของแทรนส์ดีวเซอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงขึ้นของเพียโซอิเล็กทริกอัลตราโซนิกแทรนส์ดีวเซอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Wei Zou, Steve Holland, Kwang Yul Kim and wolfgang Sachse, Wideband high-frequency line-focus PVDF transducer for materials characterization, Ultrasonics 41 (2003) 157-161.
2. F.El-Tantawhy and Y.K. sung, A novel ultrasonic transducer backing from porous epoxy resin-titanium silane coupling agent and plasticizer composites, Materials letters 58 (2003) 154-158.
3. N.T.Nguyen, M. Lethiecq, B. Karlsson and F. Patat, Highly attenuative rubber modified epoxy for ultrasonic transducer Backing applications, Ultrasonics 34 (1996) 669-675.
4. S.K.Jain, Reeta Gupta and Subhash Chandra, Evaluation of acoustical characteristics of ultrasonic transducer backing materials at high hydrostatic pressures, Ultrasonics 36 (1998) 37-40.
5. Panametrics, Inc. Basic ultrasonic principles [Online].(n.d.). Available from: <http://www.panametrics-ndt.com/ndt/downloads/transducer/technotes.pdf> [2005,jan 10]
6. Dorothee Callens, Christian Bruneel and Jamal Assaad, Matching ultrasonic transducer using two matching layers where one of them is glue, NDT&E International 37 (2004) 591-596.
7. Yeon-bo Kim and Yongrae Roh, New design of matching layers for high power and wide band ultrasonic transducers, Sensors and actuators A 71 (1998)116-122.
8. APC International, Ltd. Piezo Theory [online]. (n.d.). Available from: http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html [2005, Jan 10]
9. Markys G Cain and Mark Stewart, Piezoelectric resonance, Measurement good practice guide, OTH-06-0318-2, 33 (2001).
10. E. Cianci, V. Foglietti, D. Memmi, G. Calliano, A. Caronti and M. Pappalardo, Fabrication of capacitive ultrasonic transducers by a low temperature and fully surface-micromachined process, Precision Engineering 26 (2002) 347-354.
11. R.Ramesh, H. Kara and C.R. Bowen, Finite element modeling of dense and –porous piezoceramic disc hydrophones, Ultrasonic 43 (2005) 173-181.

12. B. Dubus, g. Haw, C. Granger and O. Ledez, Characterization of multilayered piezoelectric ceramics for high power transducers, Ultrasonics 40 (2002) 903-906.
13. Firas, Akasheh, Todd Myers, John D. Fraser, Susmita Base and Amit Bandyopadhyay, Development of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers, Sensor and actuators A 111 (2004) 275-287.
14. Man-Jong Lee, Joo sum Kim, So Ho Kim, Seung Hyun Ji, Young Soo Yoon and Sang-Jin Lee, Fabrication and frequency response of a complex ultrasonic transducer for multilayer evaluation, Sensors and actuators A 125(2005)223-233.
15. NDT Resource Center. Introduction to ultrasonic testing [online]. (n.d.). Available from: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/ultrasonic/Equipment/Trans/Couplant.htm> [2005, Jan 07]
16. The university of new south wales, Sydney,Australia. AC circuits, AC electricity [online]. (n.d.). Available from <http://www.Phys.unsw.edu.au/jw/AC.html> [2005, Jan 12]
17. American Society for testing and Material (ASTM). Standard guide for evaluating characteristics of ultrasonic search unite¹. ASTM E1065-99. New York: ASTM, 2003.
18. Irinela Chilibon, Low frequency underwater piezoceramic transducer, Sensors and actuators 85 (2000) 292-295.
19. XiaoBing Hu, LongTu Li, XiangCheng Chu and ZhiLun Gui, The resonance vibration properties of a bimorph flexural piezoelectric ultrasonic transducer for distance measurement, Materials science and engineering B99 (2003) 316-320.
20. Young Soo Yoon, Soo Ho Kim, Sang-Jin Lee, Han Ki Kim and Man-Jong Lee, Fabrication and frequency response of dual-element ultrasonic transducer using PZT-5A thick film, Sensors and actuators A 125 (2006) 463-470.
21. Dave waller, Jie Chen, and T.R Gururaja, Requirements of piezoelectric materials for medical ultrasound transducers, IEEE (1996).
22. A. Badidi Bouda, S. Lebaili and A. Benchaala, Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation, NDT&International 36 (2003) 1-5.

23. A. Abrar and S. Cochran, Multilayer piezocomposite structures with piezoceramic volume fractions determined by mathematical optimization, Ultrasonics 42 (2004)259-265.
24. Mahesh C. Bhardwaj, High transduction piezoelectric transducers and introduction of non-contact and analysis, NDT.net-january 2000, Vol.5 No.01.
25. E. Cianci, V. Foglietti, G. Caliano and M. Pappalardo, Micromachined capacitive ultrasonic transducers fabricated using silicon on insulator wafers, Microelectronic engineering 61-62 (2002) 1025-1029.
26. Nuboru Ichinose, Naohiko Miyamoto and Sadayuki Takahashi. Ultrasonic transducer with functionally graded piezoelectric ceramics, Journal of the European Society 24 (2004) 1681-1685.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์หาความหนาแน่นโดยวิธีของอะคิมีดีส (Archimedes's method)

การวิเคราะห์หาความหนาแน่นโดยวิธีของอะคิมีดีส สามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการชินเทอร์ ไปอบให้แห้งแล้วไปชั่งน้ำหนัก (D) เสร็จแล้วนำชิ้นงานไปต้มโดยใช้น้ำกลั่นจนเดือดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นแช่ชิ้นงานทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักในน้ำ (I) แล้วซับเอาหยดน้ำที่เกาะอยู่ชิ้นงานออกเพื่อชั่งน้ำหนักเปียก (W) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นจากสมการ

$$\rho = \frac{D}{W - I}$$

เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)
	D	คือ น้ำหนักแห้ง (g)
	W	คือ น้ำหนักเปียก (g)
	I	คือ น้ำหนักที่ชั่งในน้ำ หรือ น้ำหนักแขวนลอย (g)

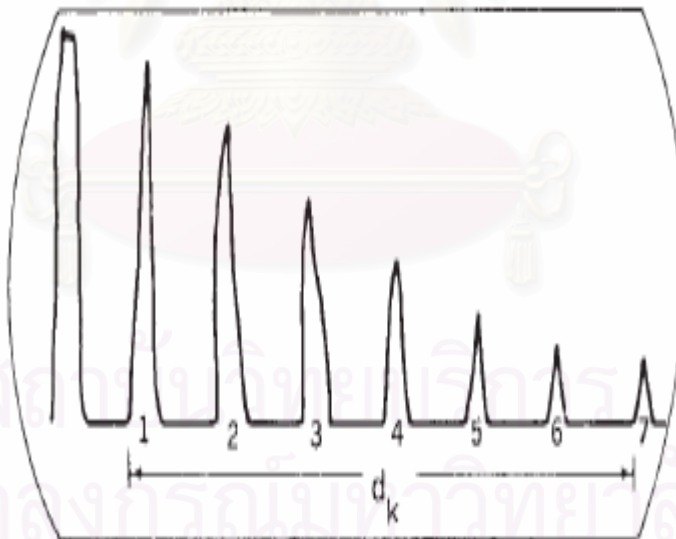
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การหาความเร็ว (velocity) อะคูสติกอิมพีแดนซ์ (acoustic impedance)
และ แอทเทนูเอชัน (attenuation) ของคลื่นเสียงในวัสดุ

ข-1 การวัดความเร็วคลื่นเสียงในวัสดุ (ultrasonic velocity in materials)

นำชิ้นงานที่ต้องการวัดความเร็วคลื่นเสียงมาตัดและขัดให้มีระนาบของผิวหน้าชิ้นงานเป็นระนาบกันทั้งสองหน้าโดยที่ให้ได้ความหนาไม่น้อยกว่า 0.5 mm และมีความคลาดเคลื่อน ± 0.02 mm หรือ 0.1% ของความยาวในกรณีที่มีความหนาของชิ้นงานมากกว่า หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยใช้เครื่อง ultrasonic flaw detector ของ Krautkramer USM22 โดยจัดตำแหน่งให้หัวเทรนส์ดีวเซอร์แนบบนชิ้นงานจนได้ความเข้มของสัญญาณมากที่สุดลักษณะดังรูปที่ ข-1 เครื่องจะสามารถคำนวณความเร็วคลื่นได้จากการสมการที่ ข-1 เมื่อให้ความหนาของชิ้นงานกับเครื่อง



รูปที่ ข-1 แสดงความเข้มของสัญญาณสะท้อนกลับที่ได้จาก ultrasonic flaw detector

จากสัญญาณที่ได้ดังรูปที่ ข-1 เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (t) ผ่านชิ้นงานที่มีความหนา (T) ดังนั้นเวลาจากสัญญาณ ที่ 1 ถึงสัญญาณที่ 2 มีค่าเท่ากับ ($2t$) จึงสามารถคำนวณหาความเร็วคลื่น (v) ได้ดังสมการที่ ข-1

$$v = \frac{T}{2t} \dots\dots\dots\text{ข-1)}$$

- เมื่อ v คือ ความเร็วคลื่น (m/s)
 T คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)
 t คือ เวลาที่คลื่นเดินทางผ่านชิ้นงานที่มีความหนา T (s)

ข-2 การคำนวณหาอะคูสติกอิมพีแดนซ์ (acoustic impedance)

นำชิ้นงานมาคำนวณหาความหนาแน่น (density) โดยการหาปริมาตรของชิ้นงานจากการวัดขนาดของชิ้นงาน และชั่งน้ำหนักของชิ้นงานโดยตรงแล้วนำไปคำนวณหาความหนาแน่น จาก สมการ ข-2

$$d = \frac{M}{V} \dots\dots\dots\text{ข-2)}$$

- เมื่อ d คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (g/cm^3)
 M คือ น้ำหนักของชิ้นงาน (g)
 V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน (cm^3)

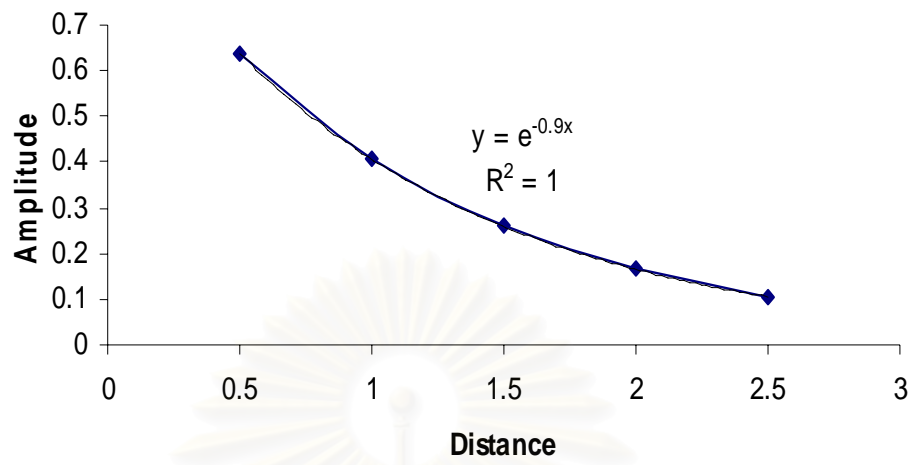
ข-3 การหาค่า Attenuation

1. ตัดและขัดชิ้นงานให้มีความหนาเป็น 0.5 1.0 และ 1.5 mm โดยให้มีความละเอียด 0.03 mm หรือ 0.1 % ของความหนาในกรณีที่มีความหนาของชิ้นงานสูง
2. ใช้ coupling agent ทาที่ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองด้านก่อน ประกอบหัวแทรนส์ดีวเซอร์ สองตัวที่ผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองด้าน
3. ปรับตำแหน่งของแทรนส์ดีวเซอร์ทั้งสองให้มีสัญญาณที่เครื่องวัด ultrasonic flaw detector ของ Krautkramer USM22 มากที่สุด แล้ววัดค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้จาก ชิ้นงาน
4. นำความเข้มของสัญญาณที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงานจะ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ ข-2
5. จากกราฟที่ได้จะมีแนวโน้มของกราฟดังรูปที่ ข-2 ซึ่งสามารถหา attenuation (α) ของชิ้นงานได้เมื่อนำแนวโน้มของกราฟที่ได้มาเทียบกับ สมการที่ ข-2

$$A = A_0^{-\alpha Z} \dots\dots\dots \text{ข-2)}$$

- เมื่อ A_0 คือ ความเข้มของสัญญาณที่ความหนาเริ่มต้นของชิ้นงาน
 A คือ ความเข้มของสัญญาณที่ความหนาที่ Z
 α คือ Attenuation
 Z คือ ความหนาของชิ้นงาน

Attenuation curve



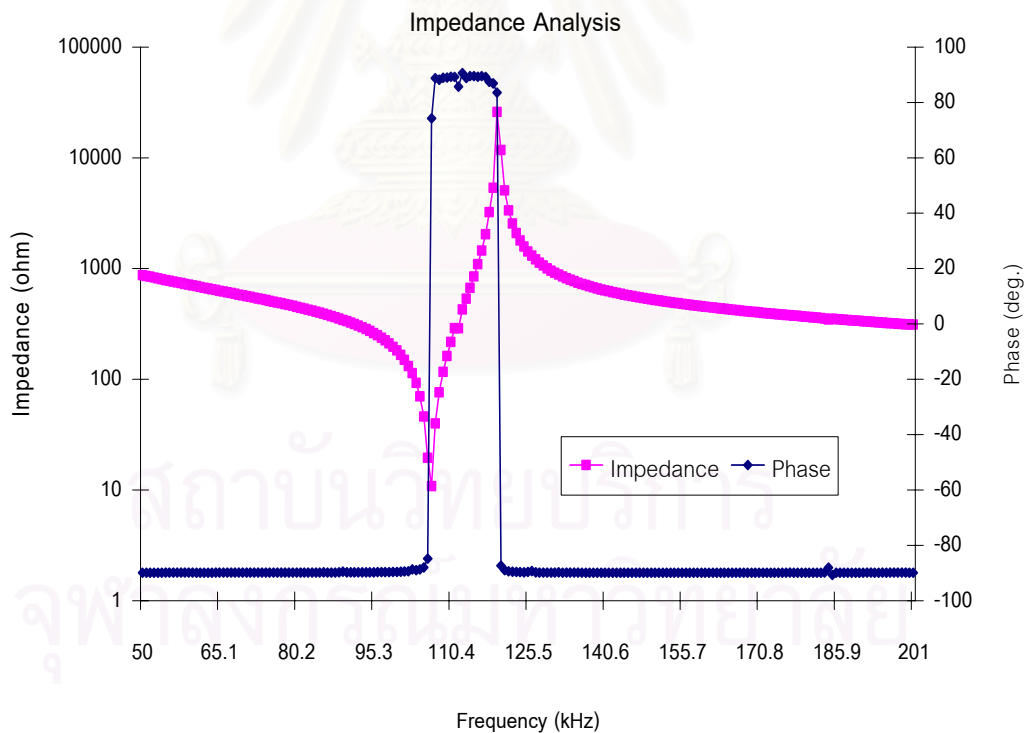
รูปที่ ข-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มคลื่นเสียงกับความหนาชั้นงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (electromechanical coupling factor, k_p)

นำชิ้นงานที่ผ่านการโพลแล้วทิ้งไว้ 1 วัน มาวิเคราะห์หาสมบัติสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของชิ้นงานด้วยเครื่องอิมพีแดนซ์ เฟสอานาไลเซอร์ (impedance phase analyzer) วัดค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และเฟสไฟฟ้า ที่ความถี่ต่างๆ เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) อิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) ลักษณะของกราฟระหว่างความสัมพันธ์แสดงได้ดังรูปที่ ค-1 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า (k_p) จากสมการที่ ค-1



รูปที่ ค-1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อิมพีแดนซ์ไฟฟ้า และเฟสไฟฟ้า ที่ความถี่ต่างๆ

$$K_p = \sqrt{[2.51\left(\frac{f_a - f_r}{f_a}\right) - \left(\frac{f_a - f_r}{f_a}\right)^2]} \dots\dots\dots \text{ค-1)}$$

เมื่อ k_p คือ สัมประสิทธิ์คู่ควมการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า
 f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)
 f_a คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (Hz)

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor, Q_m)

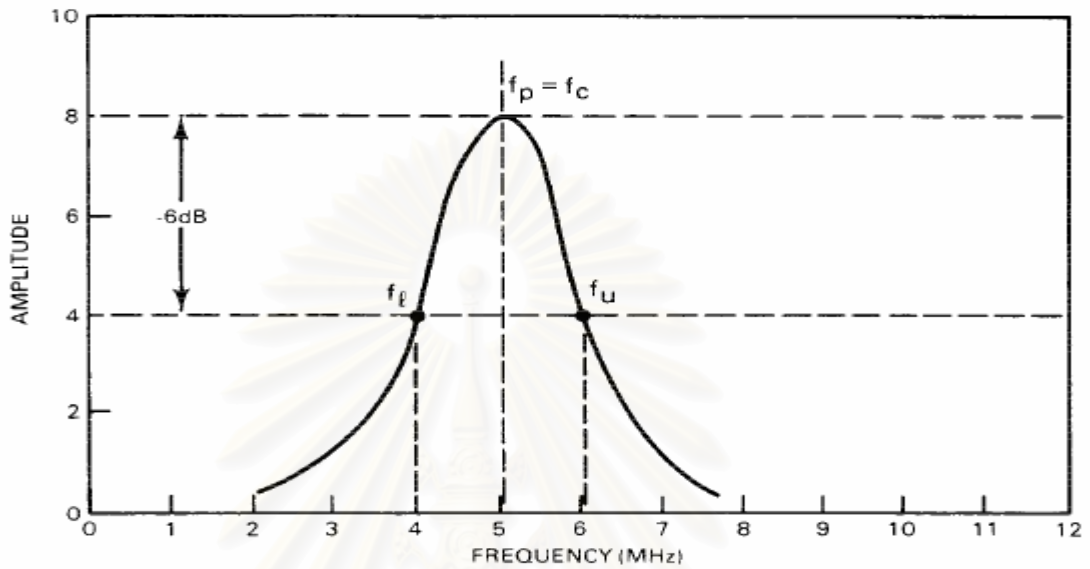
นำชิ้นงานที่ผ่านการโพลแล้วทิ้งไว้ 1 วัน มาวิเคราะห์หาสมบัติสมบัตินทางไฟฟ้า (electrical properties) ของชิ้นงานด้วยเครื่องอิมพีแดนซ์ เฟสอานาไลเซอร์ (impedance phase analyzer) เพื่อวัดหาความจุไฟฟ้า (C_p) ที่ความถี่ 1 kHz และวัดค่าอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าและเฟสไฟฟ้า ที่ความถี่ต่างๆเพื่อหาความถี่ เรโซแนนซ์ (f_r) อิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (Z_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) เหมือนกับ ภาคผนวก ค เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor) ดังสมการที่ ง-1

$$Q_m = \frac{f_a^2}{(2\pi f_r C_p Z_r)(f_a^2 - f_r^2)} \dots\dots\dots \text{ง-1)}$$

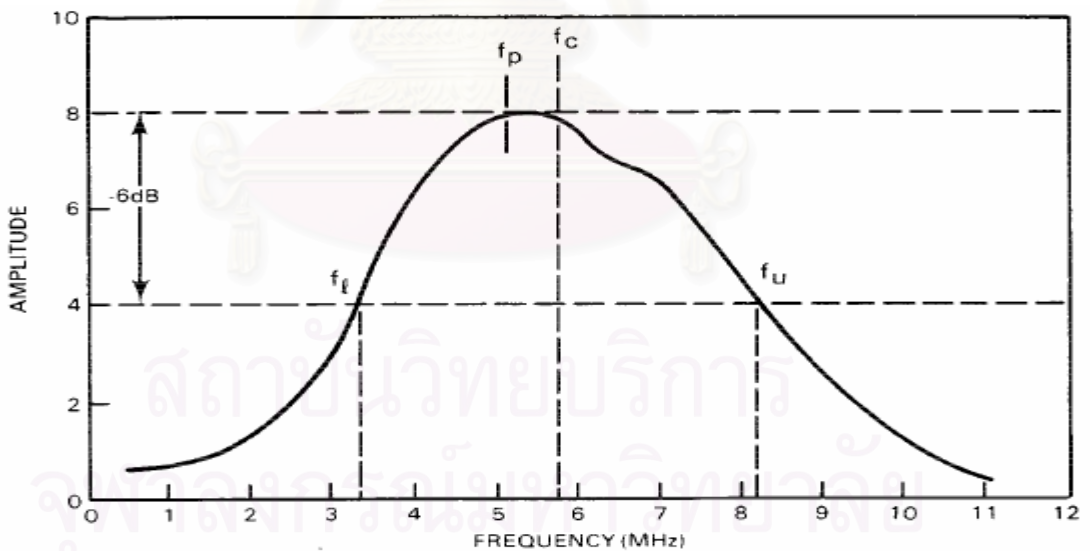
- เมื่อ Q_m คือ สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล (mechanical quality factor)
 f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์
 f_a คือ ความถี่แอนติเรโซแนนซ์
 Z_r คือ อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์
 C_p คือ ความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 1 kHz (F)

ภาคผนวก จ

วิธีการคำนวณหา bandwidth (BW)



(a)



(b)

รูปที่ จ-1 ความเข้มสัญญาณความถี่ (frequency response curves)

(a) ความเข้มสัญญาณความถี่แบบสมมาตร (symmetrical response curve)

(b) ความเข้มสัญญาณความถี่แบบไม่สมมาตร (asymmetrical response curve)

การวิเคราะห์ความถี่สัญญาณความถี่ (measurement of frequency response) ลักษณะของสัญญาณที่ให้จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสัญญาณกับความถี่ต่างๆดังรูปที่ ๑-1 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สัญญาณกับความถี่ดังรูปที่ ๑-1 สามารถบอกตำแหน่งต่างๆของความถี่ที่มีความถี่ลดลง -6 dB จากความถี่สูงสุด ความถี่ที่จุดความถี่สูงสุด (f_p) ความถี่ล่าง (f_l) ความถี่เหนือ (f_u) และความถี่กลาง (f_c) ซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่าง (f_l) กับ f_u

bandwidth (BW) จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ๑-1 โดยคำนวณ f_c ที่ใช้ในสมการ ๑-1 จากสมการที่ ๑-2

$$BW = \left(\frac{f_u - f_l}{f_c}\right) \times 100(\text{percentage}) \dots\dots\dots ๑-1$$

เมื่อ

$$f_c = \frac{f_l + f_u}{2} \dots\dots\dots ๑-2$$

ตัวอย่างเช่น

จากรูปที่ ๑-1a เป็นกราฟแบบสมมาตร จึงมี $f_c = f_p$

จะได้ $f_c = \frac{4.0 + 6.1}{2} = 5.05 \text{MHz}$

ดังนั้น $BW = \left(\frac{6.1 - 4.0}{5.05}\right) \times 100 = 42\%$

จากรูปที่ ๑-1b เป็นกราฟแบบไม่สมมาตร จึงมี $f_c \neq f_p$

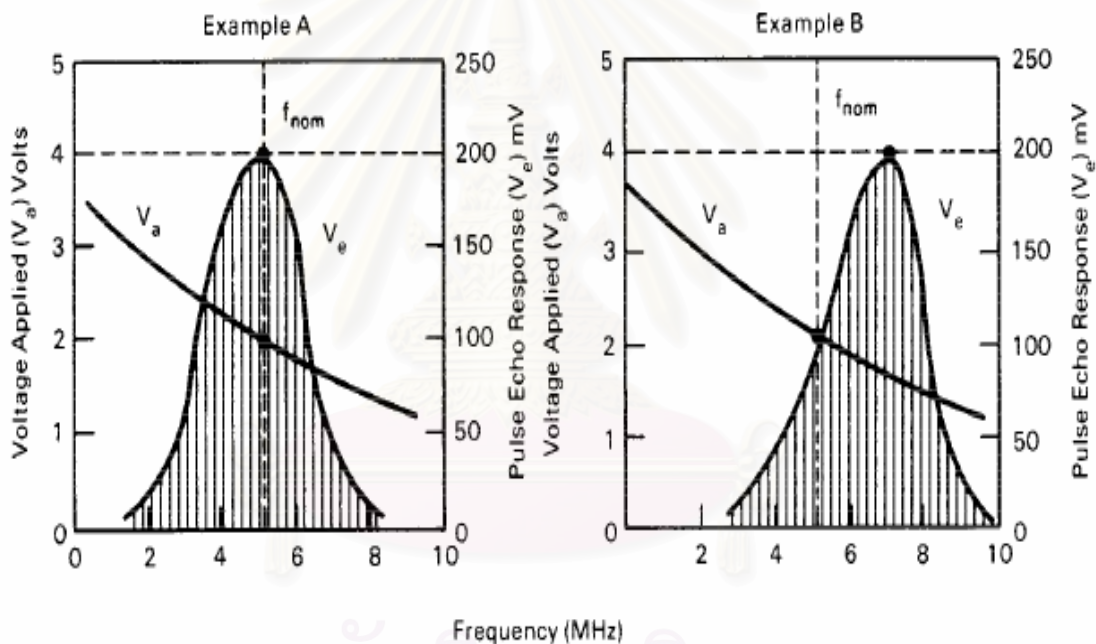
จะได้ $f_c = \frac{3.4 + 8.2}{2} = 5.8 \text{MHz}$

ดังนั้น $BW = \left(\frac{8.2 - 3.4}{5.8}\right) \times 100 = 83\%$

ภาคผนวก จ

วิธีการคำนวณ relative pulse-echo sensitivity (S_{rel})

การวิเคราะห์หา relative pulse-echo sensitivity (S_{rel}) สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์จาก Frequency response ที่ได้ดังตัวอย่าง รูปที่ จ-1 จากรูปที่ จ-1 จะได้ศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับทรานส์ดิวเซอร์ (V_a) และศักย์ไฟฟ้าที่ทรานส์ดิวเซอร์ให้ออกมา (V_e) ณ จุดที่ลากเส้นขนานจากจุดสูงสุดของศักย์ไฟฟ้าที่ทรานส์ดิวเซอร์ให้ออกมา (f_p หรือ f_{nom} ในกรณีที่เป็นแบบสมมาตร) แล้วนำข้อมูลไปหา relative pulse-echo sensitivity จากสมการ จ-1



(a)

(b)

รูปที่ จ-1 แสดงการวัดค่า sensitivity จาก Frequency response curve

(a) Frequency response curve แบบสมมาตร

(b) Frequency response curve แบบไม่สมมาตร

$$S_{rel} = 20 \log \frac{V_e}{V_a} \text{ (expressed in dB) } \dots\dots\dots \text{จ-1}$$

เมื่อ S_{rel} คือ relative pulse-echo sensitivity

V_a คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับทรานสดิวเซอร์ (V)

V_e คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ทรานสดิวเซอร์ให้ออกมา (V)

จากรูปที่ จ-1 สามารถนำข้อมูลมาหา S_{rel} ตามสมการที่ จ-1 ได้เป็น 2 กรณีเพื่อเป็นตัวอย่งดังนี้

จากรูปที่ จ-1a:

$$f_{nom} = f_p \quad V_a = 2.0 \text{ V}$$

$$V_e = 200 \text{ mV}$$

$$S_{rel} = 20 \log \left(\frac{0.2}{2.0} \right) = -20 \text{ dB}$$

จากรูปที่ จ-1b:

$$f_{nom} \neq f_p \quad V_a = 2.0 \text{ V}$$

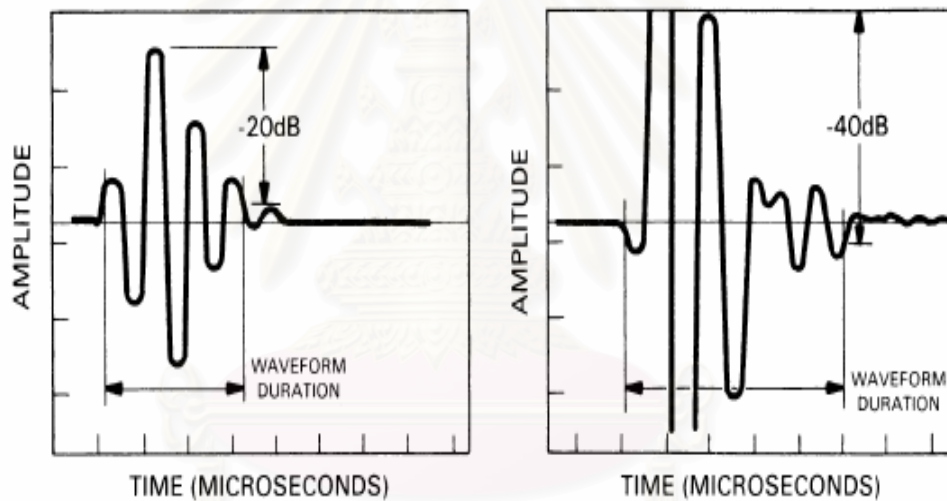
$$V_e = 0.1 \text{ V}$$

$$S_{rel} = 20 \log \left(\frac{0.1}{2.0} \right) = -26 \text{ dB}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หา waveform duration

การวิเคราะห์หา waveform duration สามารถหาได้จากสัญญาณระหว่างความเข้มของสัญญาณที่เวลาต่างๆดังรูปที่ ข-1 โดยปกติวัดที่ความเข้ม -20 dB และ -40 dB จากความสูงที่ความเข้มสูงสุดแล้ว ลากเส้นขนานแกนเวลาทั้งสองด้าน เวลาที่ได้ระหว่างจุดตัดของเส้นที่ลากกับเส้นกราฟ คือ wave form duration



(a)

(b)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข-1 แสดงช่วงเวลาที่ใช้ในการหา waveform duration ที่ -20 dB และ -40 dB

ภาคผนวก ซ

ตารางแสดงการคำนวณหาสัมประสิทธิ์คู่ควบการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล-ไฟฟ้า
(electromechanically coupling factor, K_p)

และ

สัมประสิทธิ์คุณภาพเชิงกล
(mechanical quality factor, Q_m)

ตาราง ซ-1 Electromechanically coupling factor (K_p) and mechanical quality factor (Q_m)

PZT	properties						
	f_r (Hz)	Z_r (ohm)	f_a (Hz)	Z_a (ohm)	C_p (1kHz)	K_p	Q_m
SP101R1	126130.7	15.2826	148743.7	14823.3	3.75E-09	0.60	78
SP102R1	132914.6	18.8444	152512.6	14026.5	3.30E-09	0.55	80
SP103R1	125376.9	15.8943	147990	17321.3	3.74E-09	0.60	76
Average	128140.7	16.67377	149748.7	15390.37	3.60E-09	0.58	78
HP101R1	135929.6	8.96825	152512.6	176777	2.11E-09	0.51	301
HP102R1	138191	10.8274	153266.3	101279	2.15E-09	0.49	264
HP103R1	135929.6	5.09195	152512.6	43326.2	2.17E-09	0.51	515
Average	136683.4	8.295867	152763.8	107127.4	2.14E-09	0.50	360

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฅ

ตารางแสดงข้อมูลในการหาค่าอะคูสติคิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน PZT

ตัวอย่าง ที่	Hard PZT		Soft PZT	
	ความเร็วคลื่น	อะคูสติคิมพีแดนซ์ (Mrayl)	ความเร็วคลื่น	อะคูสติคิมพีแดนซ์ (Mrayl)
	(m/s)	(x10 ⁵ g/cm ² -sec)	(m/s)	(x10 ⁵ g/cm ² -sec)
1	4285	32.14	4185	31.81
2	4274	32.06	4186	31.81
3	4191	31.43	4197	31.90
4	4282	32.12	4194	31.87
average	4258	31.94	4190	31.85

*note density Hard PZT = 7.5 (g/cm³)

 density Soft PZT = 7.6 (g/cm³)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ญ

ตารางแสดงข้อมูลของชิ้นงานวัสดุส่วนท้ายของแตรอนส์ดิฟเซอรั

คอมพอสิต	Al1	Al2	Al3	Al4	Al5	Cu1	Cu2	Cu3	Cu4	Cu5
ρ (g/cm ²)	1.03	1.05	1.08	1.10	1.13	1.09	1.09	1.11	1.11	1.16
v (m/s)	3376	3484	3519	3559	3652	3421	3484	3560	3649	3715
Z (Mrayl)	3.57	3.77	3.87	3.99	4.12	3.72	3.79	3.95	4.11	4.30
α (nepers/cm)	1.689	1.981	1.968	2.221	2.228	3.615	3.869	4.090	4.233	4.769

*หมายเหตุ

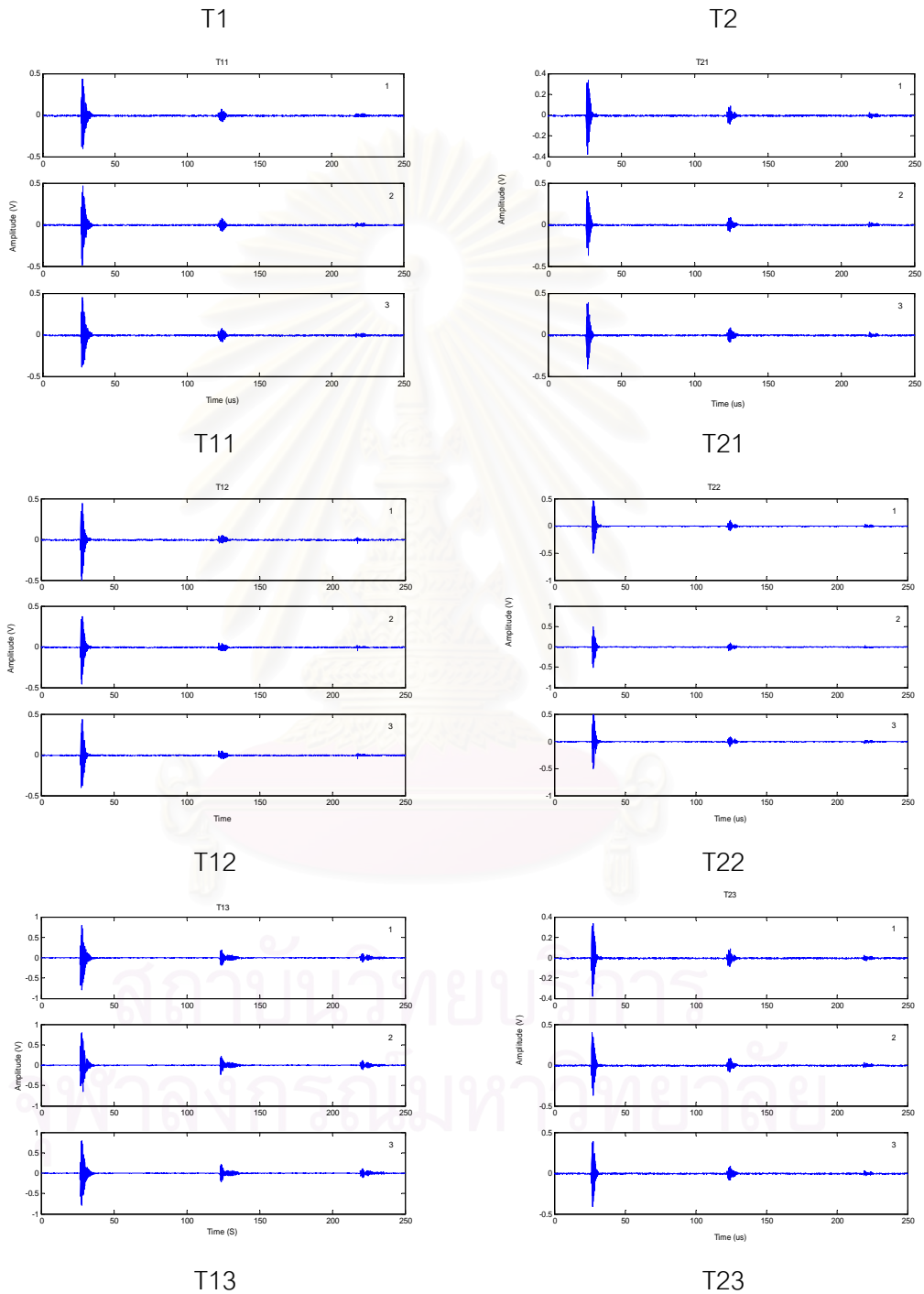
frequency= 1 MHz

diameter= 2.85 cm

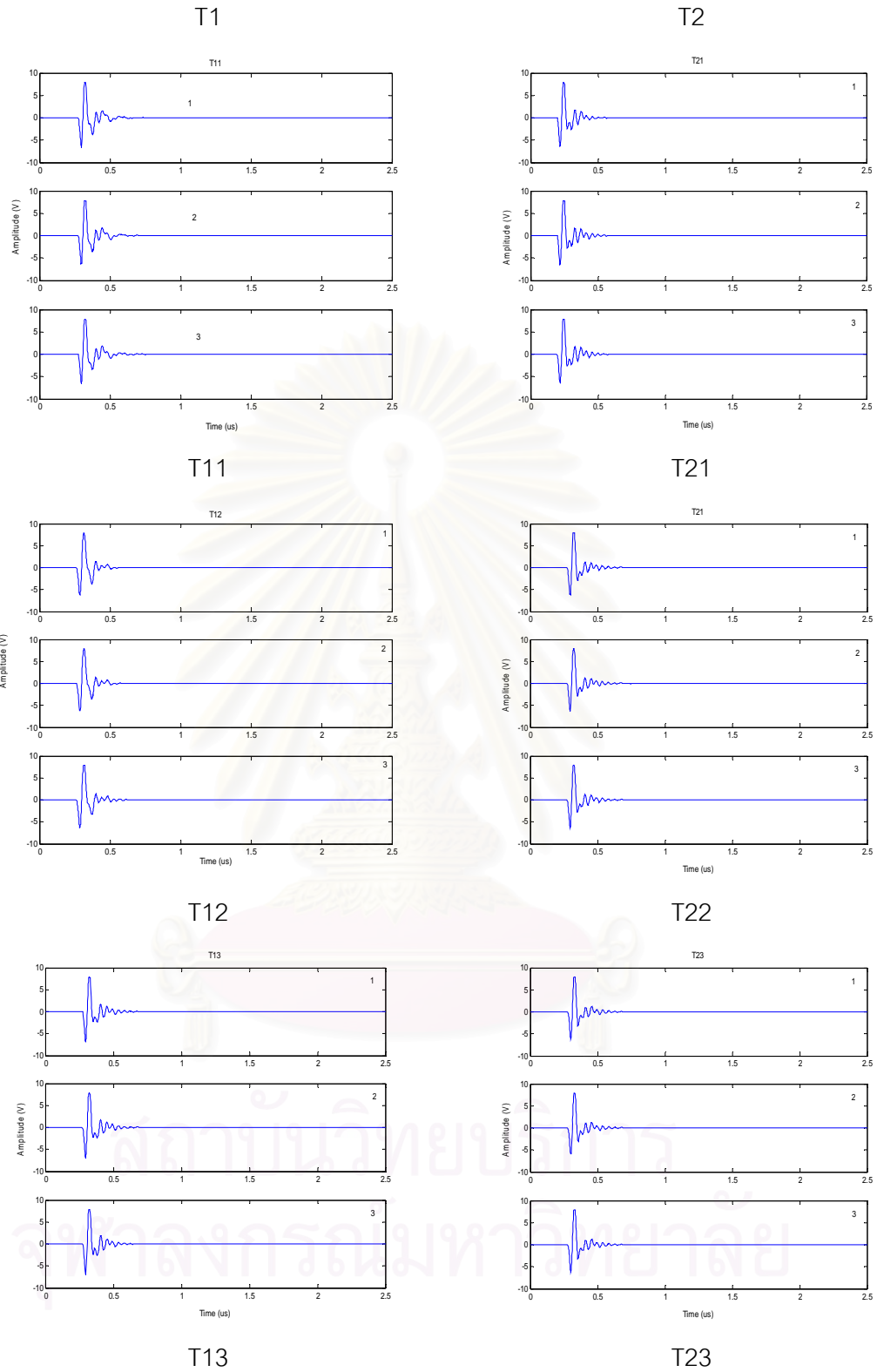
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฎ

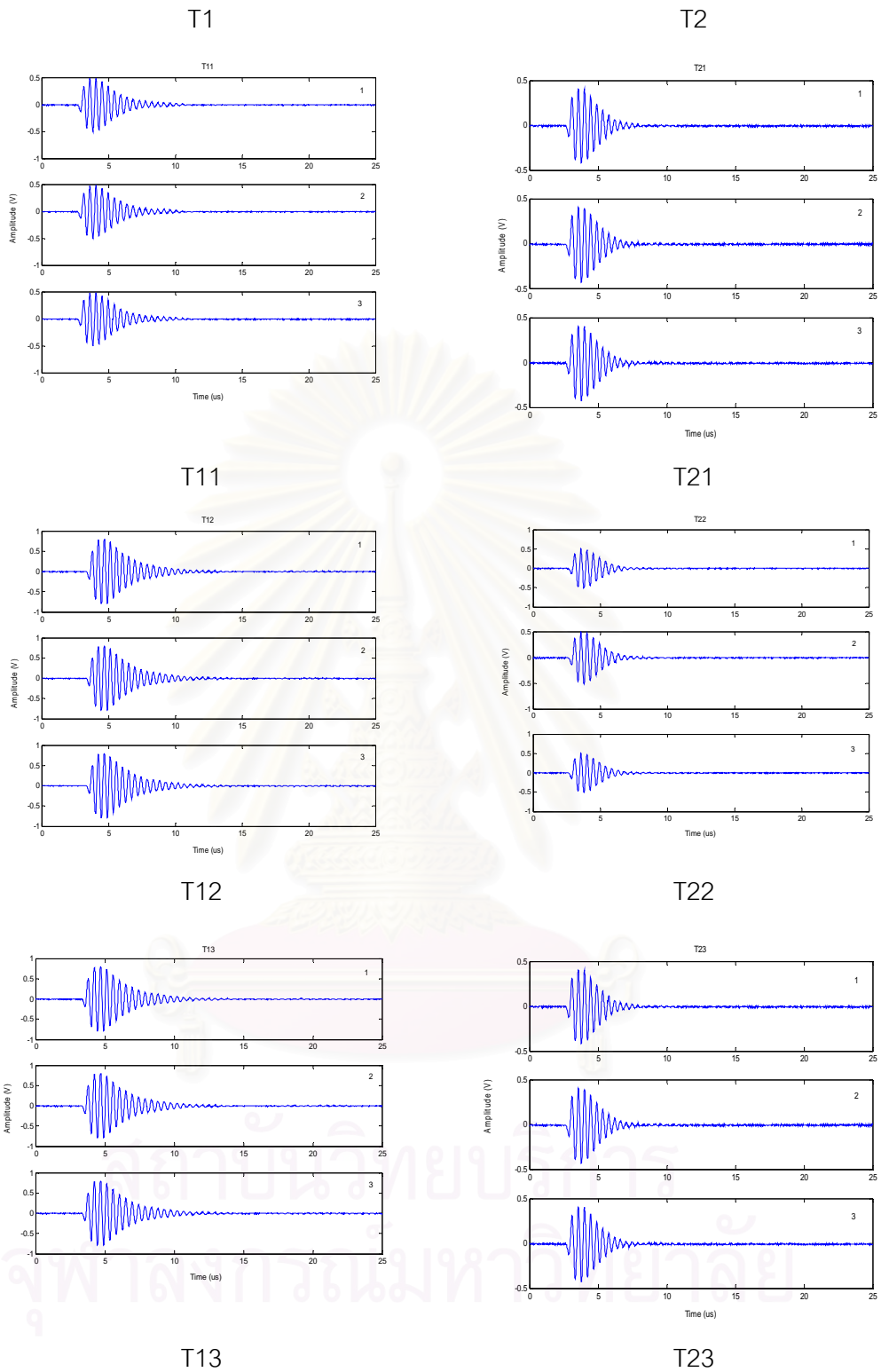
ข้อมูลแสดงการตอบสนองกับเวลาและความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์ตัวอย่าง



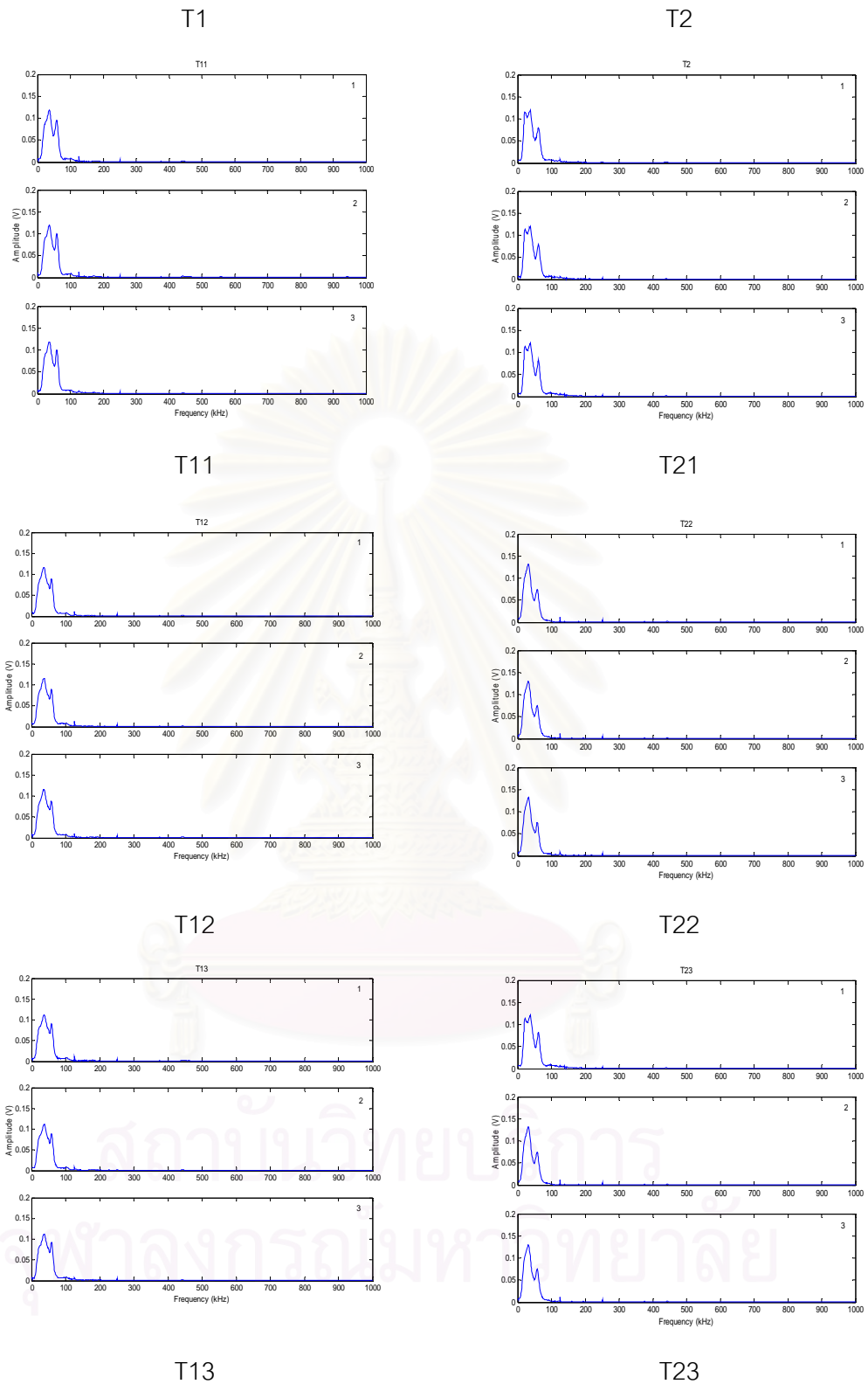
รูปที่ ฎ-1 แสดงการตอบสนองกับเวลาจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวอย่าง



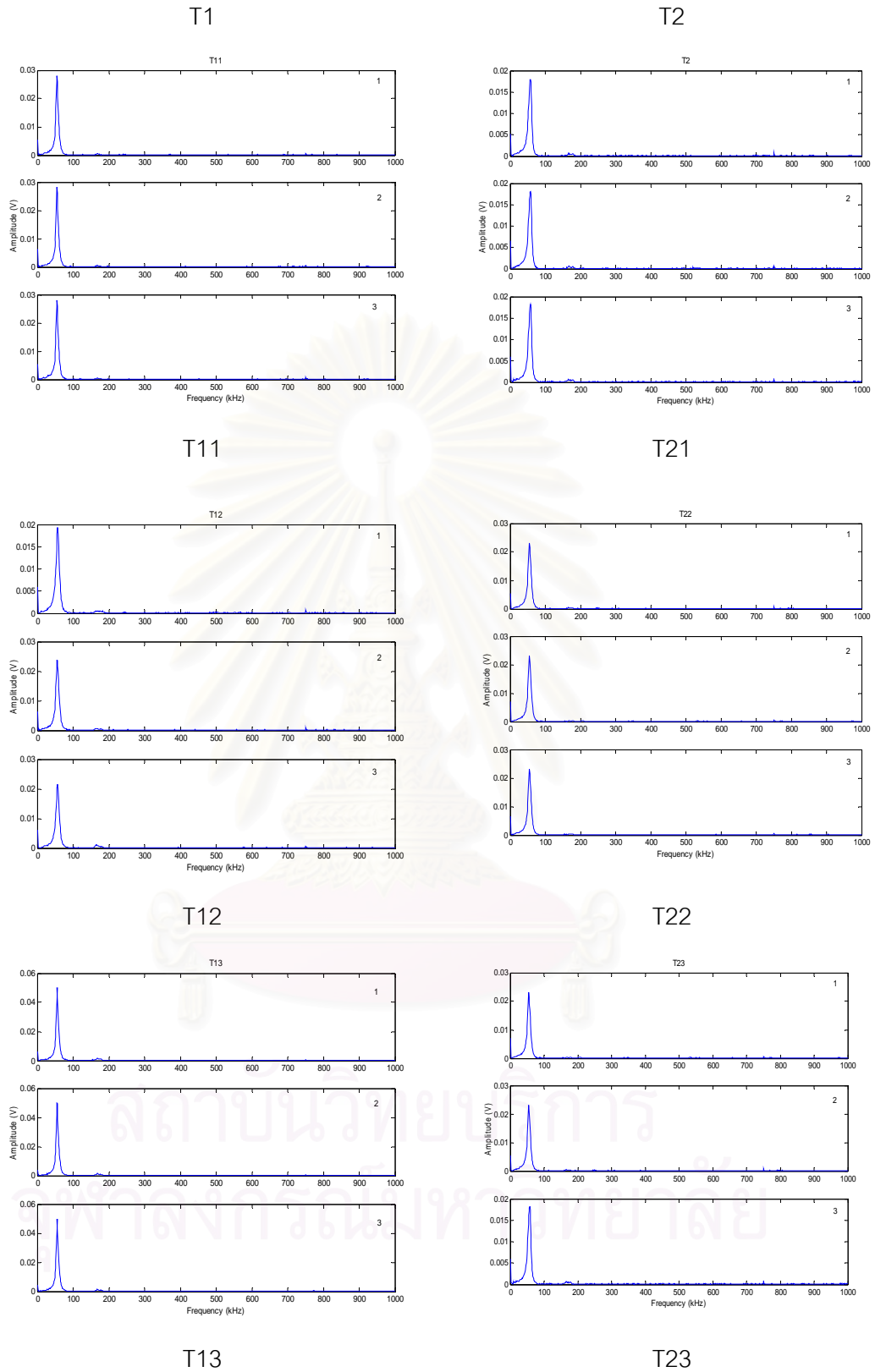
รูปที่ ๒-๒ แสดงการตอบสนองกับเวลาที่ส่งจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวอย่างออกไปกระทบเป้าหมาย



รูปที่ ๓-3 แสดงการตอบสนองกับเวลาที่เทรนส์ดิวเซอร์ตัวอย่างรับคลื่นสะท้อนกลับจากเป้าหมาย



รูปที่ ๔ แสดงการตอบสนองกับความถี่ที่ส่งออกจากทรานส์ดีวเซอร์ตัวอย่าง



รูปที่ ๕-5 แสดงการตอบสนองกับความถี่ที่แทรนส์ดีวเซอร์ตัวอย่างรับคลื่นสะท้อนกลับจากเป้าหมาย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เรือโทอนุชา เรืองสวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2518 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนพรหมานุฎาจารย์ จังหวัดสกลนคร เมื่อปีการศึกษา 2536 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) เมื่อปีการศึกษา 2542 เข้ารับราชการที่กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ เมื่อปี พ.ศ. 2543 หลังจากนั้นได้ลาศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2548 ปัจจุบันกลับเข้ารับราชการต่อที่กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ กองทัพเรือ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย