

การวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

MEASURING THE ELASTIC PROPERTIES OF ACRYLIC PLASTIC  
BY ULTRASONIC WAVE

เนอรันท์ ปิยะวิทยารธรรม  
NEERANUN PIYAVITYATHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษานามทางหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-810-2

การวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

MEASURING THE ELASTIC PROPERTIES OF ACRYLIC PLASTIC  
BY ULTRASONIC WAVE



นิรันนธ์ ปิยะวิทยากร

NEERANUN PIYAVITYATHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2546

ISBN 974-324-810-2

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน... 48925  
วัน, เดือน, ปี 13 ส.ค. 2547

.b.....
.i.....

MEASURING THE ELASTIC PROPERTIES OF ACRYLIC PLASTIC  
BY ULTRASONIC WAVE

NEERANUN PIYAVITYATHAM

A THESIS SUBMITTED PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2003  
ISBN 974-324-810-2

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

-----

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก  
MEASURING THE ELASTIC PROPERTIES OF ACRYLIC BY  
ULTRASONIC WAVE


ชื่อนักศึกษา              นางสาวนිරนนท์ ปิยะวิทย์ธรรม

รหัสประจำตัว              43065005

ปริญญา                      วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                  ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์    รศ. วิชิต                      ศิริโชคติ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วราวุฒิ	เถาถัดดา	
รศ. วิชิต	ศิริโชคติ	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
ผศ.ดร.ชนากร	โอสถจันทร์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 2 ตุลาคม 2546 เวลา 13.00-15.00 น. เป็นต้นไป  
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3 ห้อง 313



วันที่.....16.....เดือน.....ตุลาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
นักศึกษา	นางสาวนันทน์ ปิยะวิทยารวม
รหัสประจำตัว	43065005
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชติ

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เสนอวิธีการวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก หลักการวัดอาศัยค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกภายในวัสดุตัวกลาง มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยในงานวิจัยได้ใช้วิธีวัดความเร็วคลื่นเสียงให้มีแม่นยำด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ มาใช้ในการวัดค่าความเร็วของคลื่น 2 ชนิดที่เคลื่อนที่ในวัสดุคือ ความเร็วของคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวาง จะสามารถหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้หาค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นพลาสติกที่ระยะตัดต่าง ๆ ได้ จากนั้นจึงได้วัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกที่แตกต่างกัน นำค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกที่วัดได้จากคลื่นอัลตราโซนิก เปรียบเทียบกับการทดสอบพลาสติกแบบทำลายโดยวิธีการตัดโค้ง ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 4.860-5.355 GPa ส่วนการทดสอบทางกลมีค่าอยู่ในช่วง 4.800-5.301 GPa

Thesis Title	Measuring the Elastic Properties of Acrylic Plastic by Ultrasonic Wave
Student	Ms. Neeranun Piyavitham
Student ID.	43065005
Degree	Master of science
Program	Applied Physics
Year	2003
Thesis Advisor	Associate Professor Wichit Sirichote

### ABSTRACT

This research presents the method for measuring elastic properties of acrylic plastics by ultrasonic wave. Principle of operation is based on the relationship between sound velocity in matter and its elastic properties. The method of measuring precise sound velocity is employed by pulse-echo-overlap technique. Longitudinal and transverse wave velocities can be determined by measuring transit time of the ultrasonic wave. Since the elastic properties of materials depend on both types of sound wave propagation, thus we can determine Young's modulus of the specimen. The method has shown the application for measuring bending strength of the specimen at various bending lengths. The ultrasonic and mechanical testing for bending strength measurement were investigated using different color acrylic plastic. Results have shown the value of Young's modulus measured by ultrasonic method was 4.860-5.355 GPa and mechanical testing was 4.800-5.301 GPa.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์วิจิต ศรีโชติ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัย ตลอดจนเป็นตัวอย่างที่ดีในการทำงานตลอดมา รวมถึงอนุเคราะห์จัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ ในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เกลาัดดา รองศาสตราจารย์ ดร. จิตินัย แก้วแดง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร ไอสถจันทร์ ที่กรุณาให้คำชี้แนะและแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนค่าเล่าเรียน ค่าหนังสือ และค่าวัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้ดำเนินการในวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมืออุปกรณ์ทดสอบ และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่สนับสนุนด้านการศึกษาและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

นිරนนท์ ปิยะวิทยาธรรม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 พิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก.....	4
2.1 การเคลื่อนที่ของการสั่นแบบฮาร์โมนิก.....	5
2.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกใน 1 มิติ.....	8
2.3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกและความสัมพันธ์กับค่าสมบัติยืดหยุ่นใน วัสดุของแข็ง.....	10
2.3.1 ความเค้น.....	11
2.3.2 ความเครียด.....	12
2.3.3 ค่าคงที่ยืดหยุ่นและสมการการเคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็งยืดหยุ่น.....	14
2.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญของคลื่นเสียง.....	20
2.4.1 ความเร็วเสียง.....	20
2.4.2 อิมพีแดนซ์ของเสียง.....	22
2.4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน.....	24
2.4.4 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก.....	31

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	34
3.1 การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง.....	35
3.1.1 การวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคซิงอะรอนด์ (Sing around).....	36
3.1.2 การวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ .....	37
3.2 อุปกรณ์และระบบการวัด.....	42
3.2.1 อัลตราโซนิกโพรบ.....	43
3.2.2 คุณสมบัติสำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ.....	53
3.2.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับ.....	57
3.2.4 เครื่องกำเนิดพัลส์ .....	63
3.2.5 ดิจิตอลออสซิลโลสโคป.....	64
บทที่ 4 พลาสติกอะคริลิกและวิธีการทดสอบแบบทำลาย.....	66
4.1 พลาสติกอะคริลิกและคุณสมบัติ.....	67
4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการทดสอบ พลาสติกชนิดแผ่นด้วยวิธีการดัดโค้ง.....	72
4.3 การทดสอบพลาสติกชนิดแผ่นด้วยวิธีการดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D 790.....	80
บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล.....	83
5.1 การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ ซ้อนทับในตัวกลางของเหลวและของแข็ง.....	83
5.2 การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหาสมบัติยืดหยุ่นของ พลาสติกอะคริลิก.....	89
5.21 ตัวคลีปปลิงที่เหมาะสมต่อการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกใน ตัวกลางพลาสติกอะคริลิก.....	90
5.22 อัตราขยายของเครื่องพัลเซอร์และตัวรับที่เหมาะสมในการวัดความเร็ว คลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิก.....	94

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.23 การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ระดับ ความหนาและขนาดแตกต่างกัน.....	99
5.24 ค่าความต้านทานแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติก อะคริลิกจากระบบการวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	102
5.3 การทดลองวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยวิธีการดัดโค้ง.....	126
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	138
6.1 สรุปผลการวิจัยการวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	138
6.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข.....	141
6.3 แนวทางวิจัยและการประยุกต์ใช้ในอนาคต.....	142
เอกสารอ้างอิง.....	143
ภาคผนวก .....	145
ประวัติผู้เขียน.....	146

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติและค่าคงที่ทางเสียงของตัวกลาง.....	23
3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด.....	61
4.1 ลักษณะทางกายภาพของอะคริลิก.....	70
5.1 แสดงผลการทดลองการวัดความเร็วเสียงในน้ำที่อุณหภูมิ 15-25 °C .....	85
5.2 แสดงความหนาและความหนาแน่นของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส ที่ใช้ในการทดลอง.....	87
5.3 แสดงความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและตามขวางจากการทดลองของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส.....	87
5.4 แสดงความเร็วของคลื่นตามยาวและตามขวางที่ทราบค่าของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส.....	88
5.5 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางคลื่นตามขวางใน ตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ใช้ตัวคลัมป์ลิง น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ.....	93
5.6 แสดงค่าความหนาแน่น ความเร็วคลื่นตามยาวในตัวกลาง น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ.....	93
5.7 ผลการทดลองวัดคาบเวลาเดดไทม์กับผลของอัตราขยาย และแคมป์แพกเตอร์ ของพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR.....	97
5.8 แสดงขนาดของพลาสติกอะคริลิกใส.....	100
5.9 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใส.....	101
5.10 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกใสที่ไม่ได้ให้ความร้อนและ ให้ความร้อน 60 °C .....	103
5.11 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกใสที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	104
5.12 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกใสที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	104
5.13 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใส ที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C .....	105

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.14 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใส ที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	105
5.15 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใส ที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	106
5.16 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ไม่ได้ให้ความร้อน และให้ความร้อน 60 °C .....	106
5.17 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	107
5.18 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	107
5.19 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C .....	108
5.20 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	108
5.21 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	109
5.22 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C .....	109
5.23 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	110
5.24 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	110
5.25 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C .....	111

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.26 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีส้ม ที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	111
5.27 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีส้ม ที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	112
5.28 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวที่ไม่ได้ให้ความร้อน และให้ความร้อน 60 °C .....	112
5.29 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	113
5.30 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	113
5.31 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีเขียว ที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C .....	114
5.32 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีเขียว ที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	114
5.33 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีเขียว ที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	115
5.34 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงที่ไม่ได้ให้ความร้อนและ ให้ความร้อน 60 °C .....	115
5.35 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	116
5.36 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	116
5.37 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีแดง ที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C .....	117

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.38 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีแดง ที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C .....	117
5.39 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีแดง ที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C .....	118
5.40 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิกใส ด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก.....	123
5.41 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีน้ำเงินด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก.....	123
5.42 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีส้มด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก.....	124
5.43 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีเขียวด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก.....	124
5.44 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีแดงด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก.....	125
5.45 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิกใส ทดสอบด้วยวิธีทางกล.....	126
5.46 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีน้ำเงินทดสอบด้วยวิธีทางกล.....	127
5.47 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีส้มทดสอบด้วยวิธีทางกล.....	127
5.48 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.05-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีเขียวทดสอบด้วยวิธีทางกล.....	128
5.49 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีแดงทดสอบด้วยวิธีทางกล.....	128

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่การสั่นแบบฮาร์มอนิก.....	5
2.2 แสดงแบบจำลองการยึดติดกันของอนุภาคในตัวกลาง.....	7
2.3 แสดงความดันและความเร็วในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร.....	8
2.4 ส่วนประกอบของความเค้นที่กระทำบนตัวกลางของแข็งที่มีรูปทรง เป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์.....	11
2.5 แสดงการเปลี่ยนรูปร่างของตัวกลางที่มีสมบัติยืดหยุ่นจากหน่วยย่อย PQ เป็น P'Q' .....	12
2.6 แสดงลักษณะของคลื่นตามยาว.....	20
2.7 แสดงลักษณะของคลื่นตามขวาง.....	21
2.8 การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบบนพิกติ กับบริเวณรอยต่อ.....	24
2.9 สัญญาณและเฟสของความดันเสียงของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านที่รอยต่อ.....	27
2.10 แสดงการสะท้อนกลับและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบบนรอยต่อ ปกติบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงต่างกัน.....	30
2.11 แสดงการลดทอนของแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิก.....	33
3.1 แสดงการทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงที่รอยต่อของตัวกลาง.....	35
3.2 แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิคซิงอะเรเนด.....	37
3.3 แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ.....	38
3.4 แสดงสัญญาณของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง.....	39
3.5 แสดงวิธีวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ.....	39
3.6 แสดงการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง.....	40
3.7 แสดงสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้จากออสซิลอโคป.....	41
3.8 แสดงการปรับคาบเวลาของสัญญาณกระตุ้นให้ลูกคลื่นสัญญาณ $A_2$ ซ้อนทับกับ $B_1$ .....	41
3.9 แสดงระบบการวัดสมบัติยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	42
3.10 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์.....	43
3.11 แสดงคลื่นยืนตัวในแผ่นผลึกเมื่อความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเป็นจำนวนคี่ของ ครึ่งหนึ่งความยาวคลื่น.....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 แสดงอัลตราโซนิกรานสตีวเซอร์ชนิดกำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง.....	45
3.13 โครงสร้างทั่วไปของหัวอัลตราโซนิกโพรบ.....	46
3.14 ส่วนป้องกันผิวหน้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	47
3.15 หัวอัลตราโซนิกโพรบ (ก) แบบสัมผัส (ข) แบบจุ่ม.....	47
3.16 แสดงลំคลื่นของอัลตราโซนิกที่ระยะสนามใกล้.....	48
3.17 ลักษณะลំคลื่นโฟกัสอัลตราโซนิก.....	50
3.18 กราฟความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเนื่องจาก $S_F$ .....	51
3.19 แสดงโมเดล ACCUSCAN "S".....	54
3.20 แสดงโมเดล ACCUSCAN "R".....	55
3.21 แสดงโมเดล VIDEOSCAN.....	55
3.22 แสดงหัวอัลตราโซนิกโพรบของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย).....	56
3.23 แสดงขนาดหัวอัลตราโซนิกโพรบ.....	56
3.24 วงจรพัลส์เซอร์.....	58
3.25 แสดงลักษณะสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าพัลส์ลบปลายแหลม.....	58
3.26 วงจรในภาครับสัญญาณ.....	60
3.27 พัลส์เซอร์และตัวรับของ PANAMETRICS รุ่น 5073PR.....	61
3.28 สัญญาณพัลส์กระตุ้นของพัลส์เซอร์.....	62
3.29 การประยุกต์ใช้งานของพัลเซอร์แบบพัลส์สะท้อนกลับ.....	63
3.30 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์จากเครื่องกำเนิดพัลส์.....	64
3.31 เครื่องกำเนิดพัลส์ของ Stanford Research Systems (SRS) รุ่น DS345.....	64
3.33 แสดงภาพจากสัญญาณออกซีลโลสโคป โดย Ch1 เป็นสัญญาณ RF.....	65
3.34 ออกซีลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS340A.....	65
4.1 แผ่นพลาสติกอะคริลิค.....	68
4.2 แสดงแผ่นป้ายสัญญาณที่ทำจากพลาสติกอะคริลิค.....	68
4.3 แสดงแผ่นป้ายโฆษณาร้านค้าที่ทำจากพลาสติกอะคริลิค.....	69
4.4 แสดงเรือนเพาะชำที่ทำจากพลาสติกอะคริลิค.....	69
4.5 แสดงหลักการของกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปของเทอร์โมพลาสติก.....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงคานที่รับโมเมนต์ดัด.....	73
4.7 คานเกิดการโค้งเนื่องจากโมเมนต์ดัด.....	73
4.8 การเปลี่ยนแปลงรูปของคาน.....	74
4.9 การเปลี่ยนแปลงรูปของคาน.....	74
4.10 แสดงส่วนเล็ก ๆ ของสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา $dy$ .....	77
4.11 แสดงการทดสอบแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการดัดโค้ง.....	80
4.12 แสดงขนาดของแผ่นพลาสติกที่ทดสอบ.....	80
4.13 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	81
5.1 แสดงระบบการวัดความเร็วเสียงด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับในน้ำ.....	84
5.2 กราฟแสดงค่าความเร็วเสียงในน้ำที่ได้จากการทดลองและจากทฤษฎี.....	86
5.3 กราฟแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส.....	88
5.4 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อใช้ตัวคลัปปลิงเป็นน้ำผึ้ง.....	90
5.5 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อใช้ตัวคลัปปลิงเป็นน้ำมันซิลิโคน.....	91
5.6 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อใช้ตัวคลัปปลิงเป็นน้ำ.....	91
5.7 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อใช้ตัวคลัปปลิงเป็นอากาศ.....	91
5.8 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ $A_0$ ถึง $A_1$ ในตัวกลางพลาสติกอะคริลิค.....	92
5.9 แสดงการเลือกสัญญาณให้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ $B_1$ ซ้อนทับกับสัญญาณ พัลส์สะท้อนกลับ $A_2$ .....	92
5.10 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 10 dB.....	95
5.11 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 20 dB.....	95

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 30 dB.....	96
5.13 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 39 dB.....	96
5.14 สัญญาณเคดไซน์ที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราขยายของพัลส์เซอร์แตกต่างกัน.....	98
5.15 แสดงตำแหน่งการวางหัวโพรบอัลตราโซนิกสำหรับวัดความเร็วคลื่นในพลาสติกอะคริลิก.....	99
5.16 กราฟแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกหมายเลขชิ้นงานที่ 1-9.....	101
5.17 แสดงตัวอย่างแผ่นพลาสติกอะคริลิกสีเขียว สีน้ำเงิน สีส้ม สีแดง และสีใส.....	103
5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวอย่างพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สี เมื่อยังไม่ให้ความร้อน.....	119
5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกใสเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C .....	119
5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	119
5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีส้มเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	120
5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	120
5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีแดงเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	120
5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใสเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	121
5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	121

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยเคลื่อนตามขวางของพลาสดิกอะคริลิก สีส้มเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	121
5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยเคลื่อนตามขวางของพลาสดิกอะคริลิก สีเขียวเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	122
5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยเคลื่อนตามขวางของพลาสดิกอะคริลิก สีแดงเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C.....	122
5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิกอะคริลิก ใสที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	126
5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิกอะคริลิก สีน้ำเงินที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	130
5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิกอะคริลิก สีส้มที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	130
5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิกอะคริลิก สีเขียวที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	131
5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิกอะคริลิก สีแดงที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	131
5.34 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิก อะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและ ทางอัลตราโซนิก.....	132
5.35 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิก อะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 70 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและ ทางอัลตราโซนิก.....	132
5.36 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสดิก อะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 80 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและ ทางอัลตราโซนิก.....	133

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.37 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 90 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	133
5.38 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	134
5.39 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อยังไม่ให้ความร้อน ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	134
5.40 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	135
5.41 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	135
5.42 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	136
5.43 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	136
5.44 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก.....	137

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

การผลิตสินค้าในเชิงอุตสาหกรรม ผู้ผลิตจะต้องสามารถรับประกันคุณภาพของสินค้านั้นได้ โดยการใช้ระบบตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานตามอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การทดสอบแบบทำลายที่ต้องทำลายชิ้นงานในการทดสอบ และการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยชิ้นงานจะไม่ถูกทำลายไปหลังการทดสอบ เป็นระบบการวัดที่สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจนำมาใช้ในการตรวจสอบควบคุมหรือประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีด้านอัลตราโซนิกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ ใช้ในงานตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เนื่องด้วยคลื่นอัลตราโซนิก มีความยาวของคลื่นสั้น มีขนาดความถี่สูง ทำให้ลำของคลื่นมีขนาดแคบ จึงสามารถส่งคลื่นเข้าไปยังวัสดุตัวกลางได้ง่าย ชิ้นงานที่ทดสอบไม่ถูกทำลายไปหลังการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปใช้ และข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีความเชื่อถือได้สูง

สำหรับงานวิจัยที่จะนำเสนอนี้ เป็นการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกชนิดแผ่น ในปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นำมาใช้แทนวัสดุจากธรรมชาติ เช่น เหล็ก ไม้ พลาสติกชนิดแผ่นสามารถประกอบขึ้นเป็นรูปต่าง ๆ ได้ง่ายตามความต้องการของผู้ใช้ ทั้งมีน้ำหนักเบา ใส และราคาถูก ทำให้พลาสติกชนิดแผ่นเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ให้ดีขึ้น และมีระบบการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การทดสอบแบบทำลาย ที่ไม่สามารถตรวจสอบชิ้นงานได้ทุกชิ้น ทำให้ต้องสุ่มตัวอย่างขึ้นมาทดสอบ แตกต่างกับการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ที่สามารถตรวจสอบและประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ทุกชิ้นงาน

การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถหาค่าสมบัติยืดหยุ่นคือค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ได้เหมือนการทดสอบทางกล ทำให้ทราบค่าแรงต่อพื้นที่ ที่สามารถรับน้ำหนักได้สัมพันธ์กับระยะโก่งโค้งของแผ่นพลาสติก ทำให้สามารถนำแผ่นพลาสติกไปใช้ประโยชน์กับงานชนิดต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม และความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างปลอดภัย เพื่อใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคนิคและเครื่องมือทางด้านอัลตราโซนิก สำหรับใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย และการวัดคุณสมบัติของวัสดุ
2. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจถึงวิธีการนำเอาความรู้ทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก มาประยุกต์ใช้ในจัดระบบการวัดเพื่อให้ใช้งานได้จริง
3. เพื่อสามารถหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จากระบบการวัดที่จัดขึ้นได้

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาหลักการทำงานและทฤษฎีทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก
2. ศึกษาเทคนิคทางด้านอัลตราโซนิก สำหรับใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลาย
3. ศึกษากระบวนการวัดที่ได้จัดขึ้น ในการประยุกต์ใช้งานวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุที่ทดสอบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจหลักการทำงานและทฤษฎีทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก
2. ได้ทักษะในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือทางด้านอัลตราโซนิก
3. สามารถนำเทคนิคและวิธีการที่ได้เรียนรู้มาประยุกต์ใช้ในระบบการวัด
4. สามารถนำคลื่นอัลตราโซนิก จากระบบการวัดที่ได้จัดขึ้นมาใช้ในการทดสอบแบบไม่ทำลายได้

## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบการวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ตั้งแต่ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น ระบบการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความละเอียดและแม่นยำ ตลอดจนนำระบบการวัดไปใช้ทดสอบวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก ในรายงานจะมีรายละเอียดแบ่งออกเป็นบทย่อยคือในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลาง ซึ่งอธิบายถึงสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นในวัสดุรวมถึงผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ โดยจะนำมาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน

รวมทั้งจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิก เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบวัสดุ เมื่อเข้าใจในเนื้อหาและหลักการประยุกต์ใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกในเบื้องต้นแล้ว ต่อไปในปีบทที่ 3 จะกล่าวถึงเทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยในรายละเอียดอธิบายถึงเทคนิคการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีความละเอียดและแม่นยำ คือเทคนิคซิงอะเรานด์ และเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่จะใช้ในการทดลอง รวมทั้งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่สำคัญ ในปีบทที่ 4 อธิบายถึงคุณสมบัติของพลาสติกอะคริลิก และวิธีการทดสอบพลาสติกชนิดแผ่นแบบทำลาย โดยวิธีการดัดโค้ง ในปีบทที่ 5 เป็นผลการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกแบบพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ และการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกชนิดแผ่น โดยเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบทำลาย สุดท้ายในปีบทที่ 6 เป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองทั้งหมด

## บทที่ 2

# ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz มากกว่าช่วงความถี่เสียงที่มนุษย์จะสามารถได้ยิน โดยคลื่นเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินอยู่ในช่วงความถี่ 20 Hz – 20 kHz คลื่นอัลตราโซนิกมีสมบัติในการเคลื่อนที่เหมือนกับคลื่นเสียงความถี่ต่ำ แต่มีสมบัติพิเศษที่ต่างออกไปคือเป็นคลื่นความถี่สูง มีความยาวคลื่นที่สั้น มีการหักเหเล็กน้อย จึงเป็นการง่ายที่จะโฟกัสและกำหนดทิศทางของคลื่น

ด้วยลักษณะพิเศษดังกล่าวจึงมีการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องภายในวัสดุ การวินิจฉัยโรคโดยการตรวจดูอวัยวะภายในร่างกาย โดยที่คลื่นอัลตราโซนิกไม่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อของร่างกาย และประโยชน์ที่สำคัญและนิยมกันมากคือ การทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย ซึ่งเป็นการทดสอบวัสดุหรือชิ้นงาน โดยคลื่นอัลตราโซนิกจะไม่ทำลายวัสดุให้เกิดความเสียหาย

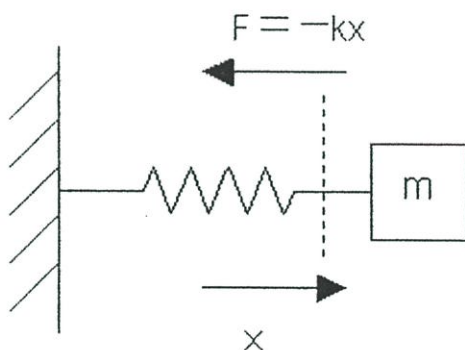
คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกลที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก จึงสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับคลื่นเสียง การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการเคลื่อนที่การสั่นแบบฮาร์มอนิก สามารถอธิบายได้โดยการใช้แบบจำลองการสั่นของมวลที่ยึดติดกับสปริง โดยที่คลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุตัวกลาง จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานให้แก่อนุภาคที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุ ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ออกจากสภาวะสมดุล เนื่องจากในวัสดุตัวกลางประกอบขึ้นจากอนุภาคย่อยยึดเหนี่ยวกันเป็นโครงข่าย จึงมีค่าแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาค เปรียบเสมือนอนุภาคแต่ละตัวถูกผูกติดกันไว้ด้วยสปริง ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาคเป็นเสมือนแรงดึงกลับของสปริง ที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่กลับสู่สภาวะสมดุล และการถ่ายทอดพลังงานของอนุภาคแต่ละตัวเป็นทอด ๆ ต่อเนื่องกันไป จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น

เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีค่าสมบัติยืดหยุ่นต่างกัน ขนาดของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค ระยะห่างระหว่างอนุภาคจะต่างกันด้วย ทำให้การถ่ายทอดพลังงานระหว่างอนุภาคต่างกัน ดังนั้นความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ในแต่ละตัวกลางจึงแตกต่างกันไป จากหลักการนี้ จึงนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย โดยการทราบค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลาง จะสามารถบ่งบอกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นในตัวกลางชนิดนั้นได้

โดยรายละเอียดในบทนี้ จะกล่าวถึงลักษณะการเคลื่อนที่และการถ่ายทอดพลังงานของอนุภาคในวัสดุตัวกลางเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่าน โดยจะแสดงถึงการได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ตัวแปรที่เป็นปัจจัยที่กำหนดขนาดของค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุในแต่ละชนิดก็คือค่าคงที่สปริงหรือค่าคงที่ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันของอนุภาค และนอกจากรายละเอียดที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านแล้ว ยังจะได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญของคลื่นอัลตราโซนิกด้วย

## 2.1 การเคลื่อนที่ของการสั่นแบบฮาร์มอนิก

การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการเคลื่อนที่การสั่นแบบฮาร์มอนิก สามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการสั่นของมวลที่ยึดติดกับสปริง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่การสั่นแบบฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 2.1 เป็นการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดสปริง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F = -kx \quad (2.1)$$

เมื่อ  $k$  คือค่าคงที่ของสปริง (stiffness)

$F$  คือค่าแรงดึงสปริง (N)

$x$  คือระยะขจัดที่ห่างจากตำแหน่งสมดุลหรือสภาวะหยุดนิ่ง (m)

$m$  มวลที่ติดกับสปริง (kg)

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน แรงจะสัมพันธ์โดยตรงกับมวลและความเร่ง ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 1 ใหม่ได้ดังนี้

$$F = -kx = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.2)$$

สามารถจัดรูปสมการที่ (2.2) ใหม่ เป็นสมการการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดกับสปริงได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{kx}{m} = 0 \quad (2.3)$$

จะเห็นว่าสมการที่ (2.3) คือสมการดิฟเฟอเรนเชียล โดยมีผลเฉลยรูปแบบทั่วไปของสมการคือ

$$x = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t \quad (2.4)$$

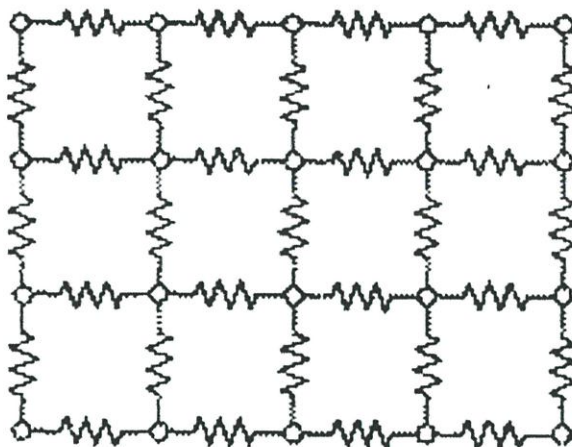
เมื่อ  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  คือค่าความถี่เชิงมุม (radian/sec)

A และ B คือค่าคงที่ใด ๆ (arbitrary constant)

ค่าความถี่เชิงมุมใน 1 รอบของการเคลื่อนที่ จะมีขนาด  $2\pi$  เรเดียน ดังนั้นจะได้ขนาดของความถี่ธรรมชาติ ( $f_0$ ) สัมพันธ์กับค่าความถี่เชิงมุม  $\omega_0$  ดังสมการที่ (2.5) คือ

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{\sqrt{k/m}}{2\pi} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) จะเห็นว่าถ้าขนาดของค่าคงที่สปริงลดลง หรือมวลมีขนาดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความถี่ในการสั่นมีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขที่ใช้ออกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลื่นกล หรือคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ต่าง ๆ กันภายในตัวกลางแต่ละชนิด ที่มีลักษณะโครงสร้างภายในแตกต่างกัน แบบจำลองอย่างง่ายของตัวกลางแต่ละชนิด อนุภาคแต่ละตัวจะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองการยึดติดกันของอนุภาคในตัวยาง

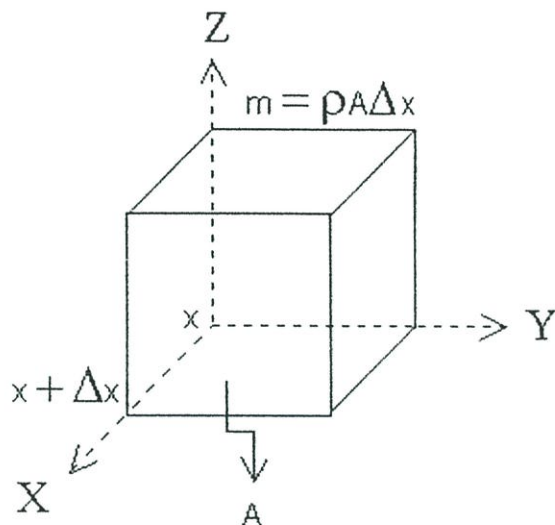
การเคลื่อนที่ของคลื่นอัตราไซคลิกเมื่อเข้าไปในตัวกลางใด ๆ เปรียบเสมือนเป็นการส่งพลังงานให้กับอนุภาคในตัวกลาง อนุภาคแต่ละตัวจะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค เมื่ออนุภาคได้รับพลังงานจากคลื่นอัตราไซคลิก ซึ่งมีการเคลื่อนที่การสั่นแบบฮาร์มอนิก จะทำให้อนุภาคเกิดการสั่นแบบฮาร์มอนิกด้วย

การที่อนุภาคได้รับพลังงานจากคลื่นอัตราไซคลิก ที่เคลื่อนที่เข้ามา ทำให้มีแรงมาผลักอนุภาค จากที่เคยอยู่ในสภาวะสมดุลเกิดการเคลื่อนที่ แรงที่มากกระทำกับอนุภาคมีทิศทางทั้งแรงผลักและแรงดึงส่งมา ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถอยหลังกลับ โดยการเคลื่อนที่ไปและกลับของอนุภาคเมื่อได้รับแรงมากกระทำ จะมีการส่งพลังงานให้กับอนุภาคข้างเคียง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลังงาน หรือเกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นอัตราไซคลิกในตัวกลางนั่นเอง

ความถี่ของคลื่นอัตราไซคลิกจะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 kHz ขึ้นไป ซึ่งพบว่าไม่ใช่ทุกค่าความถี่ของคลื่นอัตราไซคลิกที่จะสามารถเคลื่อนเข้าไปในตัวกลางแต่ละชนิดได้ โดยข้อจำกัดในการเคลื่อนที่แต่ละค่าความถี่ของคลื่นจะเห็นได้จากเงื่อนไขในสมการที่ 2.5 คือถ้าค่าคงที่สปริงลดลงหรือมวลของอนุภาคเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ในการสั่นของอนุภาคลดลง ซึ่งตัวกลางในแต่ละชนิด เช่นตัวกลางที่เป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางที่เป็นของแข็งจะเห็นว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาคหรือค่าคงที่สปริงในของตัวกลางแข็งจะสูงกว่าในตัวกลางที่เป็นของเหลว ดังนั้นค่าความถี่ของคลื่นอัตราไซคลิกที่เคลื่อนที่ได้ในตัวกลางของแข็งจึงสูงกว่าในตัวกลางที่เป็นของเหลว

## 2.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกใน 1 มิติ

ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก จะพิจารณาได้จากลักษณะการสั่นของอนุภาคหรือโมเลกุลที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่าน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ให้วัสดุตัวกลางเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทุกด้าน และมีความเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 2.3 แสดงความดันและความเร็วในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

จากรูปที่ 2.3 เมื่อคลื่นเสียงที่มีค่าความดัน  $p(x)$  เคลื่อนที่ผ่านโดยมีทิศทางการแพร่ของคลื่นอยู่ในแกน  $x$  ส่งผลให้เกิดการสั่นภายในปริมาตรของตัวกลาง ทำให้การขจัดกาการสั่นของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไป  $\Delta x$  โดยค่าความดัน ก็คือขนาดของแรงที่กระทำต่อ 1 หน่วยพื้นที่ เพราะฉะนั้นขนาดของแรงสุทธิบนวัสดุตัวกลางคือ

$$F = [p(x) - p(x + \Delta x)]A \quad (2.6)$$

เมื่อ  $F$  คือแรงจากคลื่นเสียงที่มากกระทำกับวัสดุ (N)

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดที่ถูกแรงมากระทำ ( $m^2$ )

$p$  คือความดัน ( $N/m^2$ )

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงใน 1 มิติ จากกฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตันจะได้

$$F = ma = m \frac{\partial u}{\partial t} = \rho A \Delta x \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $m = \rho A \Delta x$  คือมวลของวัสดุตัวกลาง (Kg)

$\rho$  คือความหนาแน่นของวัสดุ (Kg/m<sup>3</sup>)

$u$  คือความเร็ว (m/s)

จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{p(x) - p(x + \Delta x)}{\Delta x} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.8)$$

จากสมการที่ (2.8) เมื่อ  $d$  คือระยะกระจัด สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

พิจารณาความดัน  $p$  ใน 1 มิติ เมื่อ  $E$  คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ของวัสดุ สามารถเขียนความดันในรูปกฎของฮุค (Hooke ' s law) ได้ว่า

$$p = -E \times \frac{\partial d}{\partial x} \quad (2.10)$$

แทนค่าสมการที่ (2.10) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นดังนี้

$$\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

จากความเร็วเสียง  $V$  มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดังสมการ

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.12)$$

แทนค่าสมการที่ (2.12) ลงใน (2.11) จะได้

$$\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

สมการที่ 2.13 ก็คือสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงใน 1 มิติ ที่ทำให้ทราบถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นว่า ระยะขจัดของคลื่นเสียงจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อเวลาต่อระยะทางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ไป โดยคุณสมบัติที่ทำให้คลื่นเสียงเดินทางได้ง่ายหรือยาก ขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นเสียง ความยืดหยุ่น และความหนาแน่นของวัสดุตัวกลางนั้น

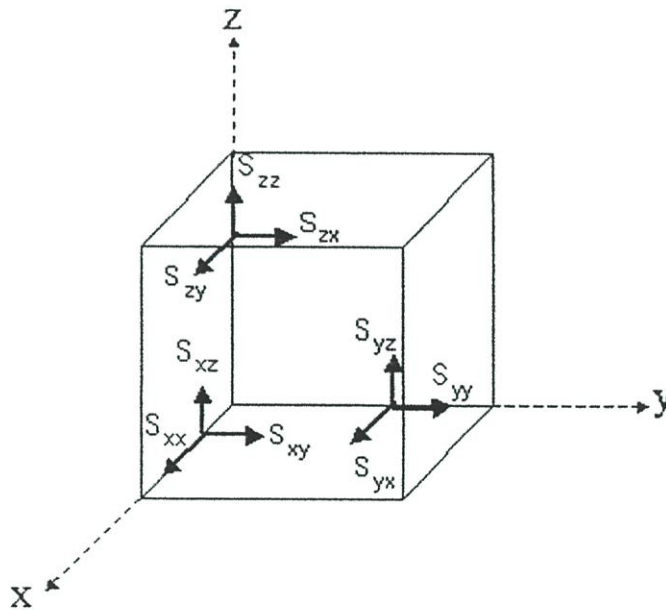
### 2.3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกและความสัมพันธ์กับค่าสมบัติยืดหยุ่นในวัสดุของแข็ง

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้พิจารณาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางรวมไปถึงสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางที่พิจารณา ซึ่งได้สร้างแบบจำลองของตัวกลางขึ้น โดยให้อนุภาคในตัวกลางยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคค่าหนึ่งเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับอนุภาคภายในตัวกลาง ซึ่งแรงภายนอกที่ได้มาจากแรงดันของคลื่นเสียงที่ส่งเข้ามายังตัวกลาง ก็เกิดผลของแรงกระทำกันระหว่างแรงจากภายนอกและแรงยึดเหนี่ยวภายในตัวกลาง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคภายในตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรหรือรูปร่างของตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากขนาดหรือรูปร่างเดิม โดยอยู่ในขอบเขตของแรงภายนอกค่าหนึ่งที่ไม่ทำให้ตัวกลางเกิดการเปลี่ยนปริมาตรอย่างถาวรตัวกลาง ที่สามารถกลับมามีขนาดปริมาตรและรูปร่างเหมือนเดิมเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับตัวกลางถูกนำออกไปแสดงว่าตัวกลางชนิดนี้มีสมบัติยืดหยุ่น

สำหรับในตัวกลางที่มีสถานะเป็นของแข็งตัวแทนที่ใช้ออกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุเรียกว่า ค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic constant) หรือค่าคงที่สติฟเนส (stiffness constant) ค่าคงที่นี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) โดยรายละเอียดของหัวข้อนี้จะพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็ง

### 2.3.1 ความเค้น

แรงภายนอกที่มากระทำกับตัวกลางของแข็งที่มีรูปทรงแน่นอน โดยทั่วไปพอจะแบ่งได้เป็นสองชนิดด้วยกัน คือ 1 แรงที่กระทำกับอนุภาคของตัวกลางทั้งหมด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับกับขนาดปริมาตรของตัวกลางที่แรงมากระทำ เช่น แรงดึงดูดของโลก ซึ่งแรงชนิดนี้จะกระทำกับอนุภาคทุก ๆ ตัวที่ประกอบกันขึ้นเป็นตัวกลาง เป็นต้น และ 2 คือแรงที่กระทำที่ผิวของตัวกลาง ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของตัวกลางที่แรงมากระทำ ความเค้นถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของแรงชนิดที่ 2 ซึ่งสามารถจำกัดความได้ว่าเป็นแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของตัวกลางของแข็ง ประกอบด้วย  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$ ,  $S_{yx}$ ,  $S_{yz}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{zx}$ ,  $S_{zy}$  และ  $S_{zz}$  ซึ่งอักษรล่างตัวแรกแสดงทิศทางของแรงที่กระทำและอักษรล่างตัวที่สองแสดงถึงทิศทางตั้งกับระนาบที่แรงมากระทำ แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยพิจารณาให้ตัวกลางของแข็งมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของความเค้นที่กระทำบนตัวกลางของแข็งที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

$S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  และ  $S_{zz}$  เรียกว่าความเค้นตั้งฉาก (normal stress) และ  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$ ,  $S_{yx}$ ,  $S_{yz}$ ,  $S_{zx}$ ,  $S_{zy}$  เรียกว่าความเค้นเฉือน (shear stress) โดยความเค้นทั้ง 9 เขียนในรูปแบบสั้น ๆ ได้เป็น  $S_{ij}$  หรือเขียนอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ก็ได้

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

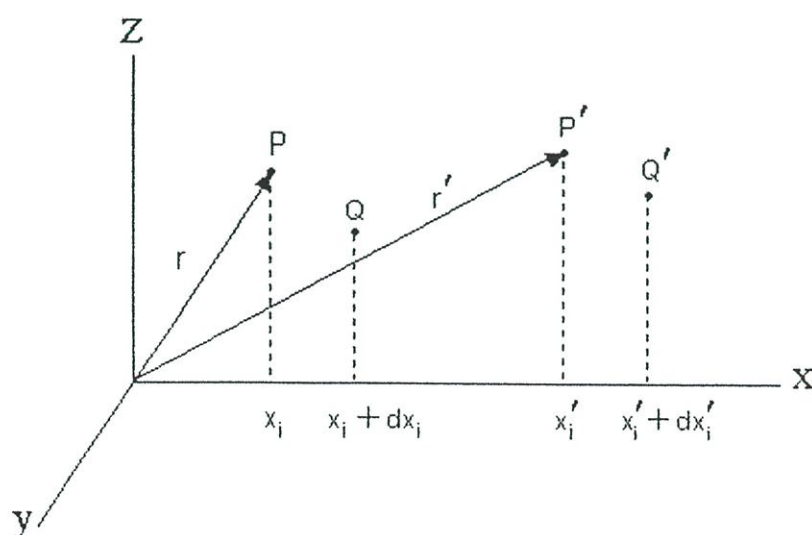
ในสมการที่ (2.14) กรณีที่มีความสมมาตรในเมตริกซ์ของความเค้นจะได้

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (2.15)$$

โดยความเค้นเป็นปริมาณที่มีหน่วยเป็นขนาดของแรงต่อหน่วยพื้นที่หรือพลังงานต่อหน่วยปริมาตร

### 2.3.2 ความเครียด

กรณีที่ตัวกลางที่มีค่าสมบัติยืดหยุ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขนาดและปริมาตรเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ โดยทั่วไปแล้วพอจะแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้เป็น 3 แบบ คือ 1 การเปลี่ยนรูปร่างในแนวตามยาวของตัวกลาง 2 การเปลี่ยนรูปร่างในแนวตามขวางของตัวกลางและ 3 การเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งมักจะเกิดกับตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ โดยการเปลี่ยนแปลงในสองแบบแรกส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ซึ่งการพิจารณาหาขนาดความเครียดที่เกิดขึ้นในตัวกลางของแข็งสามารถจะทำได้โดยพิจารณาจุด P ใด ๆ บนตัวกลางที่มีตำแหน่งโคออร์ดิเนตอยู่ที่  $x_i$  แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนรูปร่างของตัวกลางที่มีสมบัติยืดหยุ่นจากหน่วยย่อย PQ เป็น P'Q'

ถ้าตำแหน่ง P เกิดการย้ายตำแหน่งมายังตำแหน่ง P' ซึ่งมีตำแหน่งโคออร์ดิเนตอยู่ที่  $x'_i$  ผลต่างระหว่าง  $x'_i$  และ  $x_i$  กำหนดให้เป็นเวกเตอร์การเคลื่อนย้าย  $u_i$  (displacement vector) โดยที่

$$u_i = x'_i - x_i \quad (2.16)$$

ใกล้ ๆ ตำแหน่ง P คือตำแหน่ง Q ซึ่งมีตำแหน่งโคออร์ดิเนตอยู่ที่  $x_i + dx_i$  เมื่อตัวกลางเกิดการเปลี่ยนรูปร่างทำให้หน่วยย่อย PQ เคลื่อนมาอยู่ที่ P'Q' โดยในขณะที่ P เคลื่อนมาอยู่ที่ P' และ Q เคลื่อนมาอยู่ที่ Q' จะได้เวกเตอร์การเคลื่อนย้ายของ Q คือ

$$u'_i = (x'_i + dx'_i) - (x_i + dx_i) = u_i + du_i \quad (2.17)$$

เมื่อ  $du_i$  ก็คือขนาดของการเปลี่ยนรูปร่างของหน่วยย่อยในกรณีนี้  $du_i = 0$  แสดงว่าหน่วยย่อย PQ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั่นเอง โดยใช้ทฤษฎีของเทเลอร์ (Taylor's Theorem) ซึ่งในที่นี้จะไม่นำอนุกรมที่มีกำลังสูงมาพิจารณาจากสมการที่ (2.17) จะได้ความเครียด (e) เท่ากับ

$$\begin{aligned} u'_i &= u_i + du_i \\ &= u_i + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} dx_k + \dots \\ &= u_i + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) dx_k - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) dx_k \\ &= u_i + \varepsilon_{ik} dx_k - \omega_{ik} dx_k \end{aligned} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) จะได้

$$e = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (2.19)$$

สมการที่ (2.19) เรียกว่าเมตริกซ์ของความเครียด ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้คือ

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

กรณีที่มีความสมมาตรในเมตริกซ์ของความเครียดจะได้

$$e_{ij} = e_{ji} \quad (2.21)$$

ความเครียดเป็นอัตราส่วนของความยาว จึงเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

### 2.3.3 ค่าคงที่ยืดหยุ่นและสมการการเคลื่อนที่ในศูนย์กลางของแข็งยืดหยุ่น

เพื่อจะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในศูนย์กลางของแข็งกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของศูนย์กลางของแข็ง โดยจากที่กล่าวมาจะเห็นว่านอกจากคลื่นตามยาวที่ทำให้อนุภาคในศูนย์กลางของแข็งเกิดการสั่นในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่ของคลื่นซึ่งจะเกิดความเค้นปกติ และความเครียดในแนวตามยาวขึ้นแล้ว ยังมีคลื่นตามขวางที่สามารถเคลื่อนที่ในศูนย์กลางของแข็งได้โดยจะทำให้อนุภาคในศูนย์กลางเกิดการสั่นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น ซึ่งจะเกิดความเค้นเฉือนและความเครียดในแนวตามขวางขึ้น ด้วยเหตุนี้การพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในศูนย์กลางของแข็งจะต่างจากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงสำหรับตัวกลางที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งจะมีเฉพาะคลื่นตามยาวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งจะพิจารณาใน 1 มิติเท่านั้นแต่สำหรับในศูนย์กลางที่เป็นของแข็งแล้วสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะถูกพิจารณาในระบบ 3 มิติ โดยในศูนย์กลางของแข็งที่มีคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้ามาเปรียบเสมือนมีความเค้นมากจะทำให้ศูนย์กลางของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำให้เกิดความเครียดขึ้นซึ่งจากกฎของฮุกจะให้ความสัมพันธ์ของหน่วยย่อยความเค้นจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับหน่วยย่อยความเครียด

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติยืดหยุ่นกับสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในศูนย์กลางของแข็ง ให้พิจารณาดวงกลวงที่ถูกความเค้นจากภายนอกมากกระทำ กำหนดให้  $F_i$  เป็นผลรวมของแรงภายใน เนื่องจากความเค้นภายนอกมากกระทำต่อวัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร จะได้ผลรวมของแรงภายในของปริมาตรตัวกลางทั้งหมดคือ  $\int_V f_{int} dV$  โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F_{\text{int}} = \int_V f_{\text{int}} dV \quad (2.22)$$

จากที่ทราบว่าความเค้น (S) ของวัสดุ เท่ากับแรงที่กระทำ (F) ต่อพื้นที่หน้าตัด (a) ของวัสดุนั้น ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$d\vec{F} = \vec{S} \cdot d\vec{a} \quad (2.23)$$

ซึ่งความเค้นของวัสดุสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกส์ได้ดังนี้

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

พิจารณาเฉพาะแกน x สามารถเขียนสมการที่ (2.24) ใหม่ได้เป็น

$$dF_x = (S_{xx}n_x + S_{xy}n_y + S_{xz}n_z)da \quad (2.25)$$

โดยที่ n เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (normal vector) ที่แสดงทิศทางของความเค้น เมื่ออินทิเกรตสมการที่ (2.25) จะได้

$$\int_V dF_x = \int_A (S_{xx}n_x + S_{xy}n_y + S_{xz}n_z)da \quad (2.26)$$

จากทฤษฎีของเกาส์ (Gauss 's theorem) ดังสมการที่ (2.27)

$$\int_S \vec{A} \cdot \vec{n} da = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{A} dV \quad (2.27)$$

จากทฤษฎีของเกาส์ จึงสามารถเปลี่ยนรูปสมการที่ (2.27) ใหม่ได้เป็น

$$\int_V \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xz}}{\partial z} \right) da = \int_V f_x dV \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) สามารถเขียนรูปสมการอนุพันธ์ ในรูปของ  $f$  ทั่วไปได้ว่า

$$f_i = \sum_j \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.29)$$

ค่าความเค้น ( $S$ ) มีความสัมพันธ์กับค่าความเครียด ( $e$ ) ดังสมการ

$$S_{ij} = C_{ijkl} e_{kl} \quad (2.30)$$

เมื่อ  $C$  คือค่าความยืดหยุ่น (elasticity) จากสมการที่ (2.30) เนื่องจากความเค้นและความเครียดเป็นเมตริกซ์ในแนว  $x y z$  หรือเป็นเมตริกซ์แบบ  $3 \times 3$  ค่า  $C$  จึงมีสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 81 ค่า ดังนั้นจึงขอพิจารณาผลลัพธ์สุดท้ายของวัสดุที่มีความเค้นและความเครียดเหมือนกันในทุกทิศทาง โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ ) และค่าอัตราส่วนของปัวซองค์ ( $\nu$ ) ได้ดังสมการที่ (2.31) , (2.32) , (2.33) และ (2.34)

$$S_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \left( \sum_k e_{kk} \right) \delta_{ij} \quad (2.31)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_i}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $\mu$  คือค่าโมดูลัสในแนวเฉือน (shear modulus)

$\lambda$  คือค่าคงที่ยืดหยุ่นของเลม (Lame elastic constant)

$\delta$  คือเทนเซอร์หนึ่งหน่วย (unit tensor)

$d$  คือเวกเตอร์ของการขจัด

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ( $E$ ) ในวัสดุคืออัตราส่วนระหว่างความเค้นตามยาวและความเครียดตามยาวจะได้

$$E = \frac{\mu(2\mu + 3\lambda)}{\lambda + \mu} \quad (2.33)$$

และค่าอัตราส่วนของปัวซองค์ ( $\nu$ ) คืออัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวข้างกับความเครียดในแนวยาว ซึ่งจะได้

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.31) – (2.34) จึงสามารถเขียนสมการของแรงต่อปริมาตรใหม่ได้เป็น

$$f = (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot d) + \mu\nabla^2 d = \rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.35)$$

สนามเวกเตอร์เป็นผลรวมของเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ โดยเวกเตอร์หนึ่งมีไดเวอร์เจนซ์ (divergence) เท่ากับศูนย์ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ (เป็นการเคลื่อนที่ตามขวาง) และอีกเวกเตอร์หนึ่งมีเคอร์ล (curl) เป็นศูนย์ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งฉาก (เป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว) จึงสามารถเขียนเป็นสมการของเวกเตอร์การขจัดได้ดังนี้

$$\bar{d} = \bar{d}_1 + \bar{d}_2 \quad (2.36)$$

$$\nabla \cdot \bar{d}_1 = 0 \quad (2.37)$$

$$\nabla \times \bar{d}_2 = 0 \quad (2.38)$$

แทนสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.35) จะได้

$$\rho \frac{\partial^2 (d_1 + d_2)}{\partial t^2} = (\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot d_2) + \mu\nabla^2 (d_1 + d_2) \quad (2.39)$$

เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของการกระจัดหรือสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ (การเคลื่อนที่แบบตามยาว) จึงต้องกำจัดเทอม  $d_1$  ออกไป โดยการใส่ไดเวอร์เจนซ์ให้กับสมการที่ (2.39) จะได้เป็น

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla d_2)}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla^2 \cdot (\nabla \cdot d_2) + \mu \nabla (\nabla^2 d_2) \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.40) เมื่อดึงไดเวอร์เจนซ์ออกมาจะได้

$$\nabla \cdot \left\{ \rho \frac{\partial^2 d_2}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) (\nabla^2 d_2) \right\} = 0 \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) เทอมที่อยู่ในวงเล็บปีกกาจะเป็นศูนย์ เนื่องจาก  $\nabla \times d_2 = 0$  จึงมีค่าเป็นศูนย์ทั้งกรณีไดเวอร์เจนซ์ และเคอร์ล จึงได้สมการที่ (2.41) เป็น

$$\rho \frac{\partial^2 d_2}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 d_2 \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) จะได้ความเร็วของคลื่นตามยาว (longitudinal wave ,  $V_L$ ) ในวัสดุของแข็งเท่ากับ

$$V_L = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad (2.43)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.43) เพื่อหาการเคลื่อนที่แบบตามขวาง จึงต้องกำจัดเทอม  $d_2$  ออกไป โดยการเคอร์ลสมการที่ (2.39) จะได้

$$\rho \frac{\partial^2 d_1}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 d_1 \quad (2.44)$$

และสุดท้ายจะได้ความเร็วของคลื่นตามขวาง (transverse wave หรือ shear wave ,  $V_S$ ) ในวัสดุของแข็งเท่ากับ

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.45)$$

นำสมการที่ (2.43) และ (2.45) แทนค่าลงในสมการที่ (2.33) และ (2.34) จะทำให้สามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็งกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุได้เป็นความสัมพันธ์หลักอยู่สามความสัมพันธ์คือ

$$\text{ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น} \quad E = \frac{v_L^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2.46)$$

$$\text{ค่าโมดูลัสในแนวเฉือน} \quad \mu = \rho v_S^2 \quad (2.47)$$

$$\text{ค่าอัตราส่วนของปัวซอง} \quad \nu = \frac{1 - 2 \left( \frac{v_S}{v_L} \right)^2}{2 - 2 \left( \frac{v_S}{v_L} \right)^2} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.46) , (2.47) และ (2.48) เป็นสมการความสัมพันธ์ที่นำมาใช้หาค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็ง โดยใช้วิธีวัดค่าความเร็วของคลื่นตามยาว และค่าความเร็วของคลื่นตามขวาง นอกจากค่าสมบัติยืดหยุ่นที่ได้กล่าวมา ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางแล้ว ในการทดสอบแบบทำลายทางกลของแผ่นพลาสติกที่สามารถทดสอบความแข็งแรงของแผ่นพลาสติก ที่ทนต่อแรงภายนอกที่มากระทำสูงสุดแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรก็คือค่าความต้านทานแรงดัด วิธีทดสอบจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 โดยการใช้แรงดัดโค้งแผ่นพลาสติก ในรายละเอียดของการทดสอบจะกล่าวในบทที่ 4

## 2.4 พารามิเตอร์ที่สำคัญของคลื่นเสียง

จากที่ได้ศึกษาและเรียนรู้ถึงการเคลื่อนที่ของการสั่นแบบฮาร์มอนิก การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกใน 1 มิติ และสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกและความสัมพันธ์กับค่าสมบัติยืดหยุ่นในวัสดุของแข็งแล้วนั้น ในหัวข้อต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิก เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบวัสดุ ซึ่งได้แก่ ความเร็วเสียง อิมพีแดนซ์ของเสียง สัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน และการลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก โดยในรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.4.1 ความเร็วเสียง

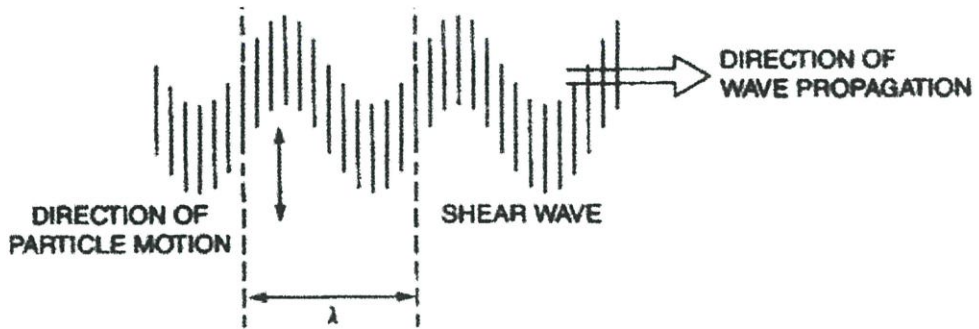
จากลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง โดยพิจารณาแบบจำลองการยืดหยุ่นร่วมกันของอนุภาคในตัวกลาง จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นตัวกลางที่มีสถานะเป็นก๊าซ , ของเหลวหรือของแข็ง พบว่าทิศทางในการสั่นของอนุภาคจะอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่ของคลื่น เรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นตามยาว (longitudinal wave) แสดงได้ดังรูปที่ 2.6

ซึ่งจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่ไปกลับผ่านจุดสมดุลของอนุภาคต่อวินาที ก็คือขนาดของความถี่ของคลื่นเสียง ( $f$ ) และขนาดของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ก็คือระยะห่างระหว่างระนาบของการส่งพลังงาน โดยค่าความเร็วของคลื่นเสียง ( $V$ ) ที่เคลื่อนที่ในตัวกลางจะเป็นผลคูณระหว่างค่าความถี่และความยาวคลื่น ( $V = f\lambda$ )



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของคลื่นตามยาว

ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง นอกจากคลื่นตามยาวแล้ว ยังมีคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้คือ คลื่นตามขวาง (transverse wave) คลื่นชนิดนี้จะมีแนวการสั่นของอนุภาคอยู่ในแนวตามขวาง ตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น มีลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของคลื่นตามขวาง

ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง พลังงานที่ใช้ถ่ายทอดไปยังอนุภาคข้างเคียงจะมีค่าต่ำกว่าคลื่นตามยาว ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางจึงต่ำกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว สำหรับในตัวกลางชนิดเดียวกันความเร็วคลื่นตามขวาง จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของคลื่นตามยาว

ความเร็วเสียงของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางคนละชนิดกันย่อมมีความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ในแต่ละตัวกลางแตกต่างกันด้วย ซึ่งความเร็วของคลื่นเสียงในแต่ละตัวกลางไม่ว่าจะเป็นของแข็ง , ของเหลว และก๊าซ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติค่าความยืดหยุ่น (Elastic modulus) และค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของตัวกลางนั้น ดังสมการที่ (2.49)

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.49)$$

### 2.4.2 อิมพีแดนซ์ของเสียง

ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงเป็นเวกเตอร์ของแรงต่อเวกเตอร์ของความเร็วอนุภาค ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปแบบของอนุภาคกลุ่มใหญ่ ๆ หรือมีจำนวนอนุภาคมากๆ แรงที่กระทำต่อกลุ่มอนุภาคในปริมาตรนั้น นิยามว่าเป็นแรงต่อพื้นที่หน้าตัดซึ่งก็คือความดัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนได้ว่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงหรือคลื่นอัลตราโซนิกเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดัน ( $p$ ) กับความเร็วของอนุภาค ( $u$ ) ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.50

$$Z = \frac{p}{u} \quad (2.50)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อระยะทาง  $x$  ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และอัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อเวลา (ความเร็วของอนุภาค) เมื่อพิจารณาการขจัดเฉพาะส่วนของจำนวนจริง รูปผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นสามารถเขียนแทนด้วยฟังก์ชันของโคไซน์ (cosine) และสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อระยะทางและอัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อเวลา ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$d = A \cos(\omega t - kx) \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial d}{\partial x} = -kA \sin(\omega t - kx) \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial d}{\partial t} = -\omega A \sin(\omega t - kx) \quad (2.53)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.51) , (2.52) และ (2.53) ลงในสมการที่ (2.50) จะได้ว่า

$$Z = \rho v^2 k \omega \quad (2.54)$$

เมื่อ  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  ,  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  และ  $v = f\lambda$  ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงจะสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$z = \rho v \quad (2.55)$$

สมการที่ (2.55) แสดงถึงคุณสมบัติการต้านทานทางเสียง (acoustic impedance) แปรผันตรงกับค่าความเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุและความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง โดยค่าอิมพีแดนซ์ของเสียงในแต่ละตัวกลางมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงผ่านวัสดุตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง ตัวอย่างของค่าอิมพีแดนซ์ของเสียงในวัสดุตัวกลาง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติและค่าคงที่ทางเสียงของตัวกลาง

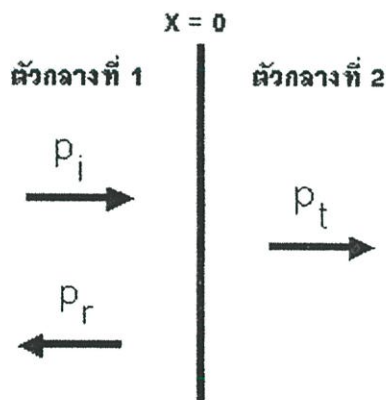
วัสดุตัวกลาง	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ความเร็วเสียง ( $\text{m/s}$ )	อิมพีแดนซ์ ( $\times 10^6 \text{ kg/m}^3\text{s}$ )
อากาศ ที่อุณหภูมิ 20 °C	1.21	344	0.0004
น้ำ ที่อุณหภูมิ 20 °C	1000	1483	1.483
พีซีที (PZT - lead zirconate titanate)	4445	7750	34.45
ควออร์ทซ์แบบเอ็กซ์คัท (quartz x-cut)	2650	5750	15.30
แก้วควออร์ทซ์ (quartz)	2200	5500	12.00
เหล็ก	7700	5900	45.43
ทองเหลือง	8640	4700	40.60
โพลีโพรพิลีน (polypropylene, PP)	890	2660	2.37
โพลีเอทิลีน (polyethylene, PE)	900	1950	1.76

### 2.4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน

ในหัวข้อนี้จะศึกษาในรายละเอียดของคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านวัสดุตัวกลางสองชนิด หรือมีการเปลี่ยนวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงหรือคลื่นกลชนิดหนึ่งจึงมีพฤติกรรมต่าง ๆ เช่นเดียวกับฟิสิกส์ของคลื่น ดังนั้นเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปกระทบกับผนังกันขอบเขต (boundary) ของอีกตัวกลางหนึ่ง จะเกิดคลื่นอัลตราโซนิกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับและอีกส่วนหนึ่งเกิดเป็นคลื่นที่เดินทางทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ จากปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงได้นำเอาคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบวัสดุได้ โดยการเกิดคลื่นแยกออกเป็นสองส่วนคือ (1) สะท้อนกลับ และ (2) ทะลุผ่าน

#### ในกรณีคลื่นอัลตราโซนิกตกกระทบในมุมปกติ (normal incidence)

พิจารณารูปที่ 2.8 ที่บริเวณรอยต่อ (boundary) ระหว่างวัสดุตัวกลางหนึ่งและวัสดุตัวกลางที่สอง มีระนาบ  $x = 0$  โดยวัสดุตัวกลางที่หนึ่งมีอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_1$  และตัวกลางที่สองมีอิมพีแดนซ์เป็น  $Z_2$



รูปที่ 2.8 การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบทำมุมปกติกับบริเวณรอยต่อ

จากรูปที่ 2.8 ให้คลื่นตกกระทบเคลื่อนที่ไปทางขวาหรือไปทางทิศทางบวก  $x$  และมีความดันเท่ากับ  $p_i$  ส่วนคลื่นที่เคลื่อนที่ชนกับบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างสองตัวกลาง เกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับมีความดันเท่ากับ  $p_r$  และคลื่นที่ทะลุผ่านมีความดันเท่ากับ  $p_t$

ในการพิจารณาที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองจะมีเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ตามหลักทางฟิสิกส์อยู่ 2 เงื่อนไขด้วยกัน ได้แก่ (1) ความดันเสียงที่ด้านทั้งสองของ

รอยต่อจะต้องเท่ากัน เรียกว่ากฎความต่อเนื่องของความดัน (continuity of pressure) หมายความว่าแรงลัพธ์สุทธิ (net force) ที่กระทำมีผลรวมเท่ากับศูนย์ ตามกฎของนิวตัน และ (2) ความเร็วของอนุภาคที่ตั้งฉากกับรอยต่อทั้งสองข้างจะต้องเท่ากัน ตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัม เรียกว่า “กฎความต่อเนื่องของความเร็วในแนวปกติ” (continuity of normal velocity) โดยเงื่อนไขขอบเขตทั้งสองสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$p_i + p_r = p_t \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (2.56)$$

$$u_i + u_r = u_t \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (2.57)$$

ผลลัพธ์จากการหาร (2.56) ด้วย (2.57) ที่  $x = 0$  จะได้เป็น

$$\frac{p_i + p_r}{u_i + u_r} = \frac{p_t}{u_t} \quad (2.58)$$

และทราบอีกว่า อัตราส่วนของความดันเสียงต่อความเร็วของอนุภาค คือ อิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุ ดังนั้นสมการที่ (2.58) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = Z_1 \left( \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} \right) = Z_2 \quad (2.59)$$

เมื่อกำหนดให้ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient, R) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความดันเสียงของคลื่นตกกระทบต่อความดันเสียงของคลื่นที่สะท้อนกลับ ดังนั้นจากสมการข้างต้นเราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.60)$$

และกำหนดให้ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (transmission coefficient, T) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความดันเสียงของคลื่นตกกระทบต่อความดันเสียงของคลื่นที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง จากสมการ (2.56) หาด้วยความดันเสียงตกกระทบ  $p_i$  ตลอด จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$1 + R = T \quad (2.61)$$

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.62)$$

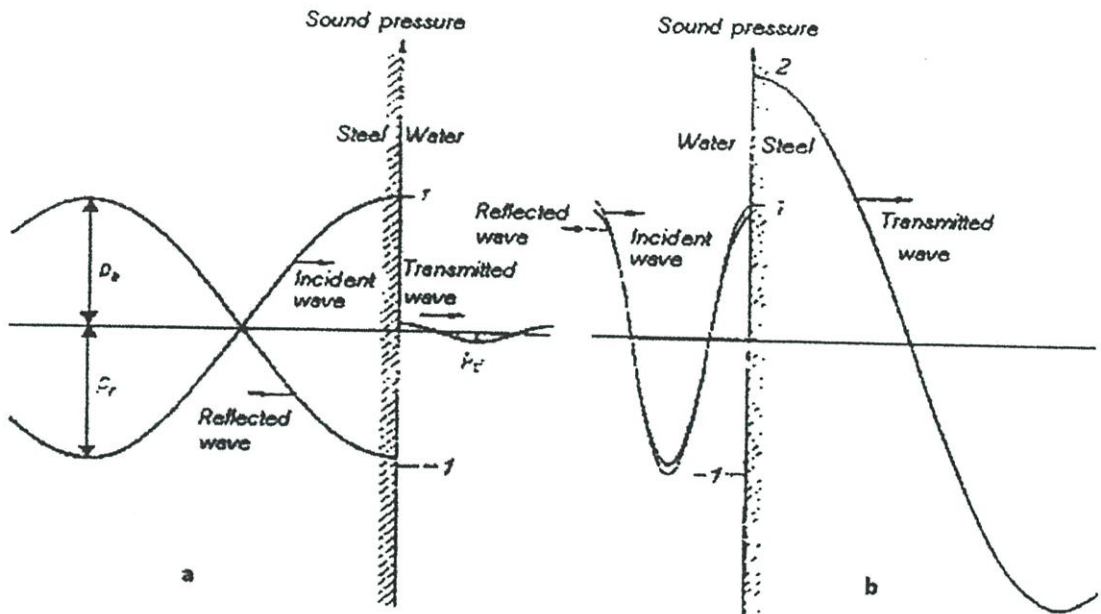
จาก (2.60) ถึง (2.62) แสดงให้เห็นว่า การเกิดการสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นที่บริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ได้แก่ อิมพีแดนซ์ ความหนาแน่น ความเร็วเสียง และความยืดหยุ่นของวัสดุ เนื่องจากเราเห็นแล้วว่า ความสัมพันธ์ของการสะท้อนของคลื่น และการทะลุผ่านของคลื่นขึ้นอยู่กับ ความแตกต่างกันระหว่างอิมพีแดนซ์ทางเสียงของทั้งสองวัสดุตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่านใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.63)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.64)$$

จากสมการ (2.60) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R จะเป็นจำนวนจริงเสมอ โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นบวกเมื่อ  $Z_1 < Z_2$  ซึ่งมีความหมายว่า เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางจากตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าไปยังวัสดุตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีเฟสของคลื่นเช่นเดียวกับเฟสของคลื่นตกกระทบ และเมื่อ  $Z_1 > Z_2$  ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจึงมีค่าเป็นลบ หมายความว่าเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางจากตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่าไปยังวัสดุตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีเฟสของคลื่นต่างกับเฟสของคลื่นตกกระทบ 180 องศา และกรณีเมื่ออิมพีแดนซ์ของทั้งสองวัสดุเท่ากัน  $Z_1 = Z_2$  แล้ว  $R = 0$

หมายถึงไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับที่บริเวณรอยต่อ หรือกล่าวได้ว่ามีการส่งถ่ายพลังงานที่สมบูรณ์ และจาก สมการที่ (2.62) พบว่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเป็นจำนวนจริงและมีค่าเป็นบวกเสมอ นั้นหมายความว่าคลื่นที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างสองวัสดุตัวกลางจะเป็นคลื่นที่มีเฟสของคลื่นเหมือนกับเฟสของคลื่นตกกระทบเสมอ จากหลักการสะท้อนกลับและทะลุผ่านของคลื่นที่บริเวณรอยต่อของวัสดุที่ต่างชนิดกันนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกได้ ในรูปที่ 2.9 แสดงความดันเสียงของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านที่บริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิด



รูปที่ 2.9 สัญญาณและเฟสของความดันเสียงของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านที่รอยต่อ

เนื่องจากการสะท้อนกลับและทะลุผ่านของคลื่นในโหมดของความดันเสียง ที่กล่าวไว้ว่า  $1 + R = T$  อาจทำให้ดูสับสนว่าไม่เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน (conservative of energy) พลังงานขาเข้าจะต้องเท่ากับพลังงานขาออก หรือ เขียนเป็นสมการได้เป็น  $1 = R + T$  สาเหตุมาจากว่า ความดันเสียงเปรียบเสมือนรูปหนึ่งของแรงดัน ไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว การจะพิจารณาการสะท้อนกลับและการทะลุผ่านของคลื่นในรูปพลังงาน จะใช้พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งคือ ความเข้มเสียง (intensity) ซึ่งเท่ากับ อัตราเฉลี่ยของพลังงานที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ หรือก็คือ เป็นงานที่ทำต่อพื้นที่ (work done by unit area,  $W/m^2$ )

ในกรอบแนวคิดเรื่องคลื่นกลและคลื่นอัลตราโซนิกนั้น จะพิจารณาพารามิเตอร์หลัก ๆ อยู่ 2 ตัว คือ ความดันเสียง ( $p$ ) และ ความเร็วของอนุภาค ( $u$ ) โดยผลคูณของ  $p$  และ  $u$  จะมีหน่วยแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$pu = \frac{F s}{A t} \Rightarrow \frac{N m}{m^2 s} = \frac{J/s}{m^2} = \frac{W}{m^2}$$

ดังนั้นความเข้มเสียง ( $I$ ) จึงเท่ากับ อัตราเฉลี่ยของผลคูณระหว่างความดันเสียงกับความเร็วของอนุภาค

$$I = \langle pu \rangle_t = \frac{1}{t} \int_0^t pu dt \quad (2.65)$$

และจาก  $Z = \frac{p}{u}$  ตามสมการที่ (2.65) สามารถเขียนสมการของความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{1}{t} \int_0^t \frac{p^2}{Z} dt \quad (2.66)$$

เนื่องจากความดันเสียง  $p$  เป็นสมการคลื่น (คิดเฉพาะส่วนของจำนวนจริง) จะได้

$$p = p_0 \cos \omega t \quad (2.67)$$

โดยคิดตั้งแต่คลื่นเริ่มเคลื่อนที่ที่  $t = 0$  จนคลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ  $t = T$  หรือเดินทางมาครบ 1 คาบ สามารถเขียนสมการที่ (2.66) ใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{1}{t} \frac{p_0^2}{Z} \int_0^t \cos^2 \omega t dt \quad (2.68)$$

จากคณิตศาสตร์ทางตรีโกณมิติ

$$\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} \quad (2.69)$$

เมื่อเราทำการอินทิเกรตแล้วจะได้ผลลัพธ์ของความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกเป็น

$$I = \frac{1}{t} \frac{p_0^2}{Z} \left( t \Big|_0^T + \frac{1}{2} \sin 2\omega t \Big|_0^T \right) \quad (2.70)$$

จากฟังก์ชันของไซน์ ทราบว่าที่  $t = 0$  และ  $T$  ค่าของฟังก์ชันไซน์เป็น 0 ดังนั้น

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{Z} \quad (2.71)$$

จากผลลัพธ์ของสมการพบว่าค่าความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกหรือก็คือพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก จะแปรผันตรงอยู่กับกำลังสองของความดัน และแปรผกผันกับอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุ เมื่อพิจารณาคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันในรูปแบบของความเข้มเสียงจากกฎอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation) ความเข้มหรือพลังงานของคลื่นตกกระทบต้องเท่ากับผลรวมของพลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับและพลังงานของคลื่นที่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านรอยต่อ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_i = I_r + I_t \quad (2.72)$$

และสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่านเป็นดังสมการ

$$1 = R + T \quad (2.73)$$

ใช้หลักคิดเดียวกันกับกรณีพิจารณาการสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นในโหมดความดันเสียง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านจะเท่ากับ

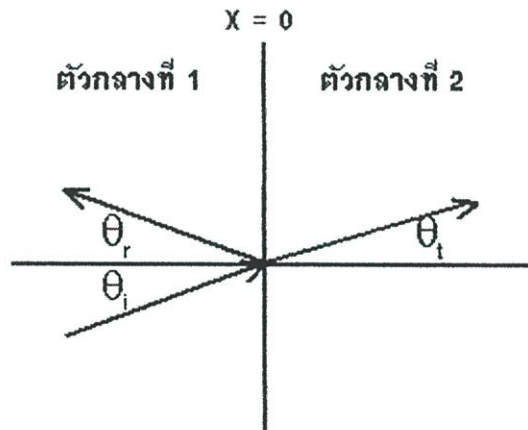
$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.74)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.75)$$

พบว่าค่าของทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านจะเป็นจำนวนจริงและมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งไม่สามารถพิจารณาความแตกต่างของเฟสของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านได้

**กรณีคลื่นอัลตราโซนิคตกกระทบทำมุมใดๆกับวัสดุ**

ในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ตกกระทบบริเวณรอยต่อตามทิศทางไม่ทำมุมปกติกับพื้นที่ตกกระทบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



**รูปที่ 2.10** แสดงการสะท้อนกลับและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบไม่อยู่ในแนวเส้นปกติบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงต่างกัน

จากรูปที่ 2.10 กำหนดให้

$\theta_i$  = มุมที่คลื่นอัลตราโซนิคตกกระทบ

$\theta_r$  = มุมที่คลื่นอัลตราโซนิคสะท้อนกลับ

$\theta_t$  = มุมที่คลื่นอัลตราโซนิคทะลุผ่าน

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน จะมีลักษณะคล้ายกับการพิจารณาในกรณีที่คลื่นตกกระทบในแนวเส้นปกติ แต่คิดผลของมุมตกกระทบ มุมสะท้อน และมุมหักเหด้วย โดยผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของคลื่นเสียงที่ตกกระทบไม่อยู่ในแนวเส้นปกติที่รอยต่อของวัสดุตัวกลางสองชนิด แสดงได้ดังสมการที่ (2.76) และ (2.77) ตามลำดับ

$$R = \frac{(Z_2/Z_1) - (\cos\theta_t / \cos\theta_i)}{(Z_2/Z_1) + (\cos\theta_t / \cos\theta_i)} \quad (2.76)$$

$$T = 1 + R \quad (2.77)$$

#### 2.4.4 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิก

ในขณะที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางใดๆ จะเกิดการลดทอนพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น โดยที่ค่าพลังงานที่ลดทอนไป มีสาเหตุมาจากปัจจัยหลักสองประการ คือ การที่พลังงานส่วนหนึ่งถูกดูดกลืน กลายเป็นพลังงานความร้อน และอีกส่วนหนึ่งสูญเสียไปเนื่องจากการกระเจิงของคลื่นเสียง ซึ่งสาเหตุดังกล่าว จะทำให้เกิดการลดทอนของแอมพลิจูดคลื่นหรือพลังงานคลื่นขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

- พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากพลังงานของคลื่นเสียงถูกดูดกลืน โดยจะเปลี่ยนรูปของพลังงานจากพลังงานของคลื่นเสียงกลายเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปมีผลมาจากแรงเสียดทานของอนุภาคภายในตัวกลาง โดยเมื่อคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกลาง จะทำให้อนุภาคในตัวกลางเกิดการสั่น แรงเสียดทานภายในจะต่อต้านการสั่นของอนุภาค จึงมีพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน
- พลังงานที่สูญเสียไปอาจเกิดจากการกระเจิงของคลื่น เป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) ของตัวกลาง ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงในแต่ละบริเวณแตกต่างกันไป จากสาเหตุทั้งสองที่ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางก็คือ การดูดกลืนและการกระเจิงของคลื่นเป็นผลให้ขนาดแอมพลิจูดหรือขนาดความเข้มของคลื่นมีขนาดลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ถ้ากำหนดให้  $A_0$  เป็นแอมพลิจูดของคลื่นเริ่มต้น และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางโดยมีระยะทางเท่ากับ  $d$  ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลงจนมีขนาดเท่ากับ  $A$  จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.78) คือ

$$A = A_0 e^{-\alpha d} \quad (2.78)$$

เมื่อ

$A$  = แอมพลิจูดของคลื่นที่ตำแหน่ง  $d$

$A_0$  = แอมพลิจูดของคลื่นต้น

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่น

$d$  = ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

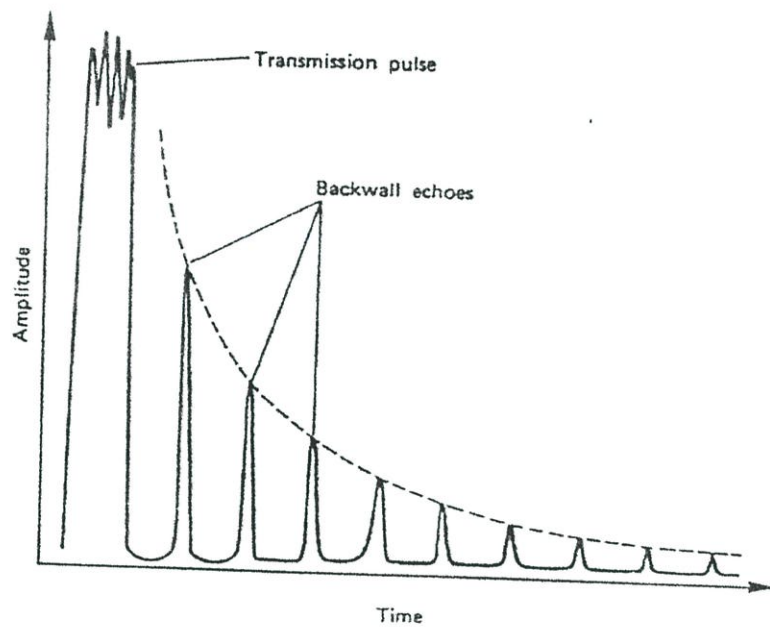
จากสมการที่ (2.78) จะสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\alpha_d = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (2.79)$$

จากสมการที่ (2.77) ค่า  $\alpha_d$  จะมีหน่วยเป็นเนเปอร์ ( $N_p$ ) หรือ  $\alpha$  มีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อเซนติเมตร ( $N_p/cm$ ) โดยทั่วไปหน่วยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมักแสดงในหน่วยเดซิเบล (dB) ดังนั้นสมการที่ (2.79) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha_d = 20 \log \frac{A_0}{A_1} \quad (2.80)$$

จากสมการที่ (2.80) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง สามารถจะพิจารณาได้จากอัตราการลดลงของแอมพลิจูดคลื่นเสียง โดยตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นสูง แสดงว่าตัวกลางที่พิจารณา มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่มาก จึงทำให้เกิดการลดทอนของพลังงานความร้อน และเกิดการกระเจิงขึ้นได้ง่าย แสดงการลดทอนของแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกได้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการลดทอนของแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิก

### บทที่ 3

## เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ในบทที่ 2 ได้อธิบายถึงฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่นำมาใช้ตรวจสอบวัสดุ ซึ่งก็คือการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาตรวจวัดสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยในการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาตรวจวัดสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุนั้น ปริมาณทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่สามารถนำมาใช้วัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุคือค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุดังแสดงในสมการที่ 2.45 , 2.46 และ 2.47

ดังนั้นในการวัดหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุนอกจากการตรวจสอบโดยอาศัยวิธีทางกลซึ่งจะนำวัสดุที่ต้องการวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นมากระทำด้วยแรงขนาดต่าง ๆ แล้วทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนขนาดรูปร่าง โดยความสัมพันธ์ของขนาดสัดส่วนรูปร่างที่เปลี่ยนไปของวัสดุเนื่องจากค่าของแรงที่มากกระทำขนาดต่าง ๆ จะเป็นค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุนั้น หลังจากการตรวจสอบด้วยวิธีทางกลชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบจะถูกทำลายไป ดังนั้นการตรวจสอบด้วยวิธีทางกลจึงเรียกได้ว่าเป็นการตรวจสอบแบบทำลายชิ้นงาน

อีกแนวทางหนึ่งในการตรวจวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุก็คือการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการตรวจสอบ อาศัยการวัดค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุตรวจสอบเพื่อนำมาหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ โดยวิธีนี้วัสดุจะไม่ถูกทำลายไปหลังจากการตรวจสอบ จึงเรียกว่าเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเทคนิคในการวัดค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุที่มีความละเอียดและความแม่นยำเพื่อนำมาคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ รวมถึงรายละเอียดหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในระบบการวัด

### 3.1 การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลาง

โดยทั่วไปในการวัดค่าความเร็วของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลาง จะมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ (Pulse echo) ซึ่งอาศัยสมบัติของการสะท้อนกลับของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปชนรอยต่อของตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์เสียง (Acoustic impedance) แตกต่างกัน โดยพิจารณาในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงที่รอยต่อของตัวกลาง

จากรูปที่ 3.1 เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ไปชนรอยต่อระหว่างตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง ซึ่งเป็นตัวกลางคนละชนิดกัน จะทำให้คลื่นเสียงส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับ และอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่สอง โดยสามารถแสดงปริมาณความเข้มของเสียงที่มีการสะท้อนกลับและทะลุผ่านให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $R$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน ( $T$ ) ได้ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.1)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$R$  = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

$T$  = ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน

$Z$  = ค่าอิมพีแดนซ์เสียงของตัวกลาง ( $Z = \rho \cdot v$ ) ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างความหนาแน่นของตัวกลาง ( $\rho$ ) กับความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง ( $v$ )

ในการวัดความเร็วของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลาง บนพื้นฐานเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ คาบเวลาที่ใช้หาค่าความเร็ว จะเป็นคาบเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิคใช้เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลาง สามารถวัดได้จากส่วนแสดงผล ซึ่งจะวัดคาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้นและพัลส์สะท้อนกลับ โดยความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่เคลื่อนที่ในตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$v = \frac{2d}{t} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$v$  = ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง (m/s)

$d$  = ความหนาของตัวกลาง (m)

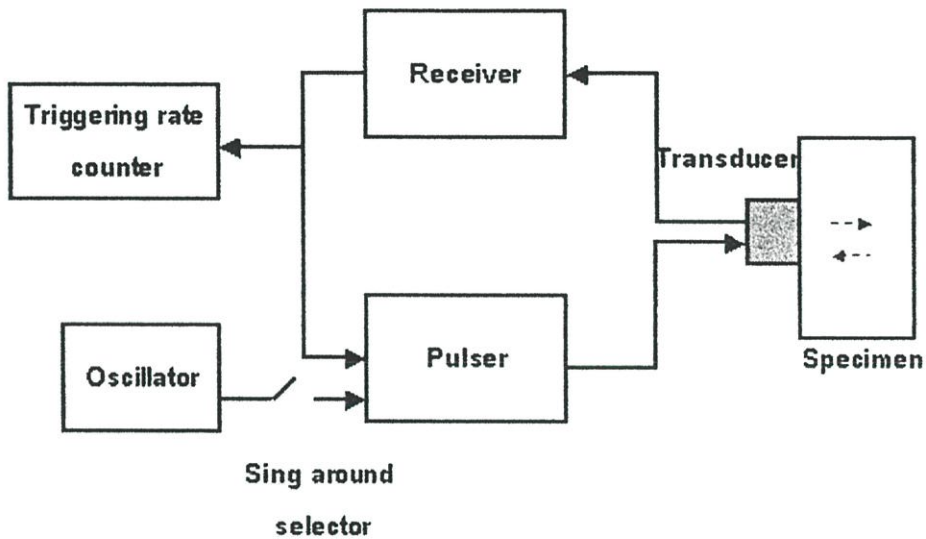
$t$  = คาบเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิคใช้เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลาง (s)

ในการหาค่าความเร็วคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง จะมีเทคนิคการวัดคาบเวลาที่มีความแม่นยำอยู่สองเทคนิคหลักๆ คือ เทคนิคซิงอะเรานด์ (Sing around) และเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ (Pulse echo overlap) โดยเทคนิคทั้งสองจะมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซึ่งอาศัยการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงที่รอยต่อของตัวกลางนั้น

### 3.1.1 การวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคซิงอะเรานด์ (Sing around)

การวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคซิงอะเรานด์ เป็นเทคนิคที่มีการวัดแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะใช้วิธีนับและเฉลี่ยคาบเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง ภายในระบบมีวงจรถอนิกส์กำเนิดฐานเวลา ใช้วัดคาบเวลาระหว่างพัลส์ โดยหลักการทำงานเริ่มขึ้นเมื่อภาคส่งสัญญาณ (pulser) ได้รับสัญญาณทริกเกอร์จากออสซิลเลเตอร์ (oscillator) จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงส่งไปที่ทรานสดิวเซอร์ ทำให้เกิดคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง

เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาที่ภาครับสัญญาณ (receiver) ภาครับสัญญาณจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับ และสัญญาณจากภาครับสัญญาณจะทริกเกอร์ให้ออสซิลเลเตอร์หยุดการทำงาน และทริกเกอร์ให้ภาคส่งสัญญาณกำเนิดพัลส์ลูกต่อไป ซึ่งคาบเวลาระหว่างพัลส์หรือคาบเวลาที่คลื่นเสียงใช้เคลื่อนที่ในตัวกลาง จะสามารถวัดได้จากเครื่องนับอัตราการทริกเกอร์ (Triggering rate counter) โครงสร้างการทำงานของเทคนิคชิงอะเรานด์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2

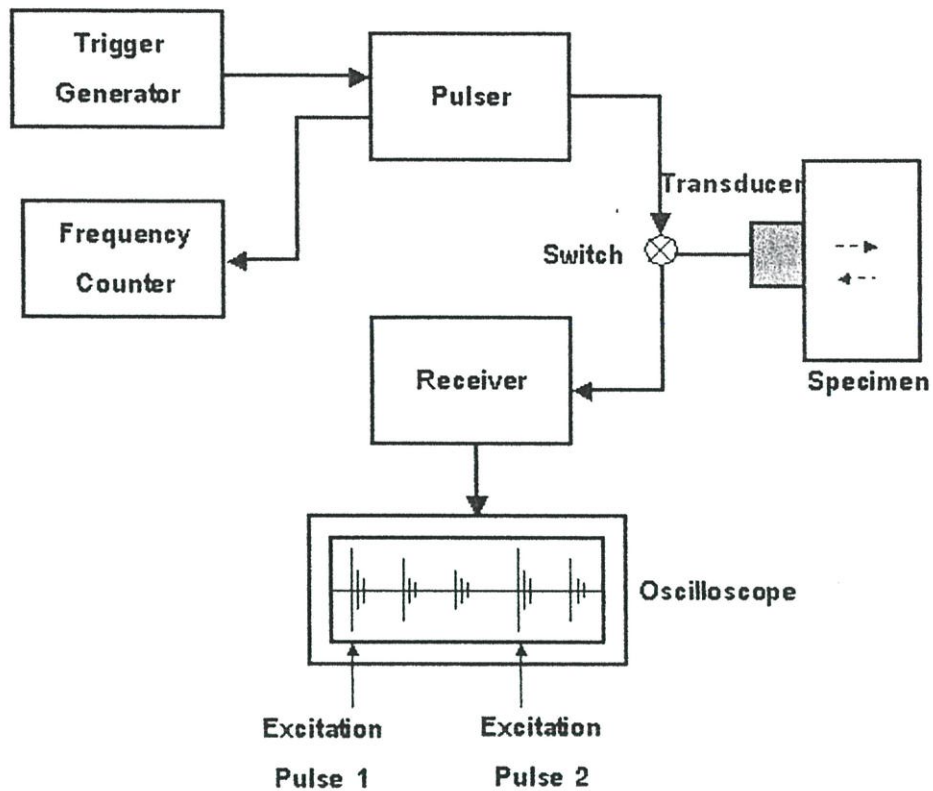


รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิคชิงอะเรานด์

ส่วนการวัดความเร็วคลื่นเสียงด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ จะอยู่บนพื้นฐานพัลส์สะท้อนกลับเช่นเดียวกับเทคนิคชิงอะเรานด์ แต่มีหลักการที่ไม่ยุ่งยาก รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติม สามารถจัดระบบการวัดได้โดยง่าย ในรายละเอียดของการวัดความเร็วโดยเทคนิคนี้จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3.1.2 การวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

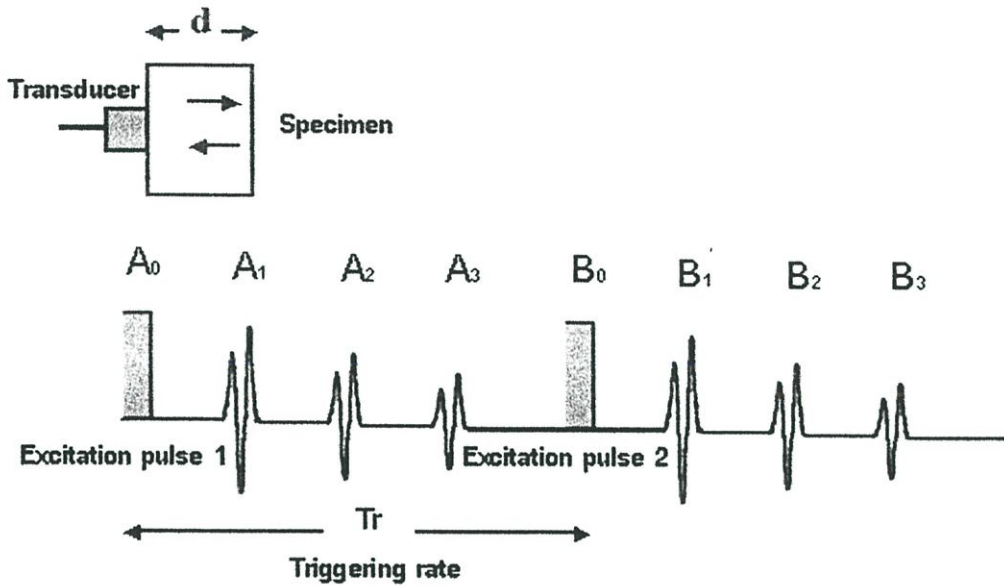
การวัดความเร็วคลื่นเสียงด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ จะอยู่บนพื้นฐานพัลส์สะท้อนกลับ อาศัยการส่งพลังงานจากภาคส่งสัญญาณส่งไปที่ทรานสดิวเซอร์ เพื่อให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง โดยสัญญาณที่สะท้อนกลับสามารถแสดงผลได้ที่จ้อออสซิลโลสโคป ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

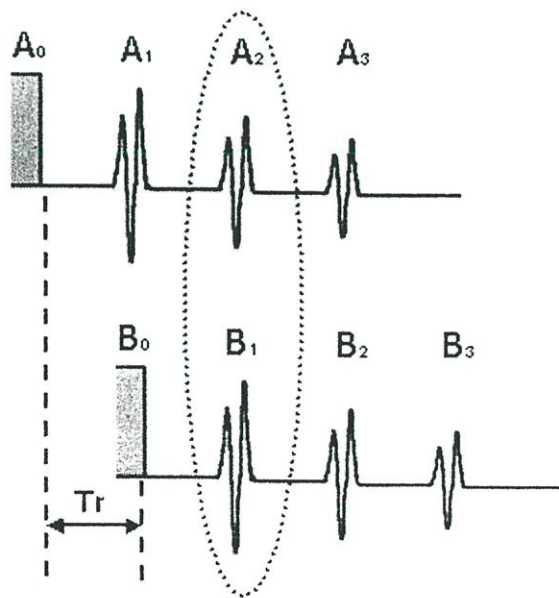
จากรูปที่ 3.3 โดยปกติภาคส่งสัญญาณจะมีอัตราการกำเนิดแรงดันไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับฐานเวลาที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ เรียกฐานเวลานี้ว่าอัตราการกระตุ้น ( $T_r$ ) เมื่อภาคส่งสัญญาณได้รับสัญญาณพัลส์กระตุ้นส่งไปที่ทรานสดิวเซอร์ ทรานสดิวเซอร์จะให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง และเกิดการสะท้อนกลับเมื่อชนรอยต่อของตัวกลาง ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับลำดับที่หนึ่งขึ้น

สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับลำดับที่หนึ่ง เมื่อเคลื่อนที่มาถึงปลายด้านที่สัมผัสกับทรานสดิวเซอร์ จะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางอีกครั้ง และจะเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาของคลื่นภายในตัวกลาง ทำให้เกิดสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับหลายครั้งคือ  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  จากสัญญาณกระตุ้น  $A_0$  และ  $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$  จากสัญญาณกระตุ้น  $B_0$  (เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$ ) ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณพัลส์กระตุ้นและสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับได้ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง

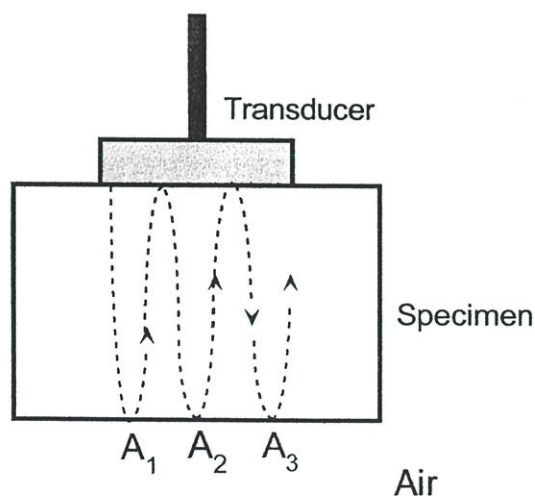
ในการวัดคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปกลับในตัวกลาง ก็คือคาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้น  $A_0$  และสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_1$  เพื่อให้ได้คาบเวลาที่ต้องการจึงต้องปรับระยะเวลาการกระตุ้นให้ลดลง เพื่อให้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $B_1$  ซ้อนทับกับสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_2$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าระยะเวลาของอัตราการกระตุ้นในขณะนี้ก็คือคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปกลับในตัวกลาง ซึ่งสามารถวัดได้จากเครื่องนับความถี่ ดังนั้นค่าความเร็วของคลื่นเสียงจะสามารถคำนวณหาค่าได้



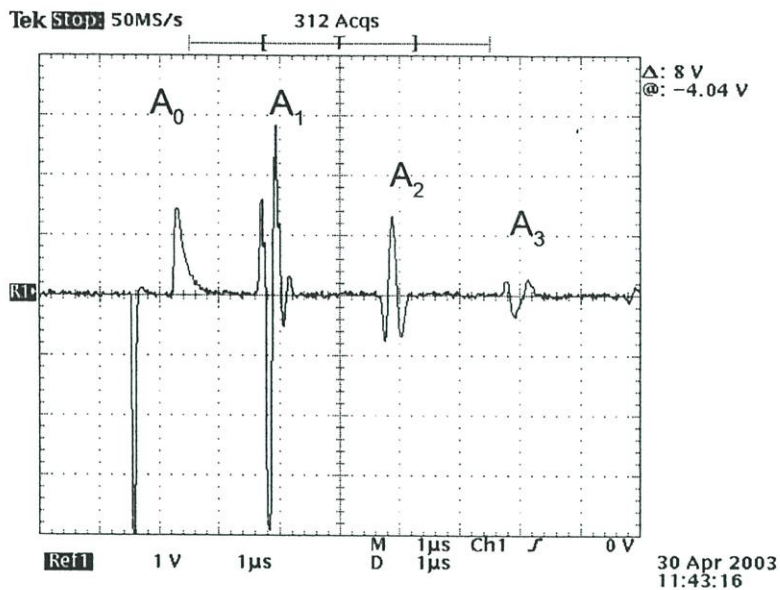
รูปที่ 3.5 แสดงวิธีวัดความเร็วคลื่นเสียงโดยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

ในการทดลองวัดความเร็วคลื่นเสียงด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลางพลาสติกอะคริลิก เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ไปถึงรอยต่อระหว่างพลาสติกอะคริลิกกับอากาศ จะวัดสัญญาณได้เป็นพัลส์สะท้อนกลับลำดับที่หนึ่ง ( $A_1$ ) และเมื่อคลื่นที่สะท้อนกลับมากกระทบหัวโพรบจะมีคลื่นส่วนหนึ่งสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกอีกครั้งหนึ่ง เมื่อถึงรอยต่อระหว่างพลาสติกอะคริลิกกับอากาศ จะสามารถวัดสัญญาณได้เป็นพัลส์สะท้อนกลับลำดับที่สอง ( $A_2$ ) เมื่อคลื่นที่สะท้อนกลับมากกระทบหัวโพรบอีก จะมีคลื่นส่วนหนึ่งสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกอีกครั้ง แล้วชนรอยต่อระหว่างพลาสติกอะคริลิกกับอากาศ ได้เป็นพัลส์สะท้อนกลับลำดับที่สาม ( $A_3$ ) สังเกตว่าสัญญาณที่ได้จะกลับเฟสเนื่องจากเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่า (พลาสติกอะคริลิก) ไปยังตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า (อากาศ) คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีเฟสของคลื่นตรงข้ามกับเฟสของคลื่นตกกระทบ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เพราะฉะนั้นจึงมีตกกระทบและสะท้อนกลับเป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ เป็น  $A_4, A_5, A_6, \dots$  จนกว่าพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกจะลดลง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

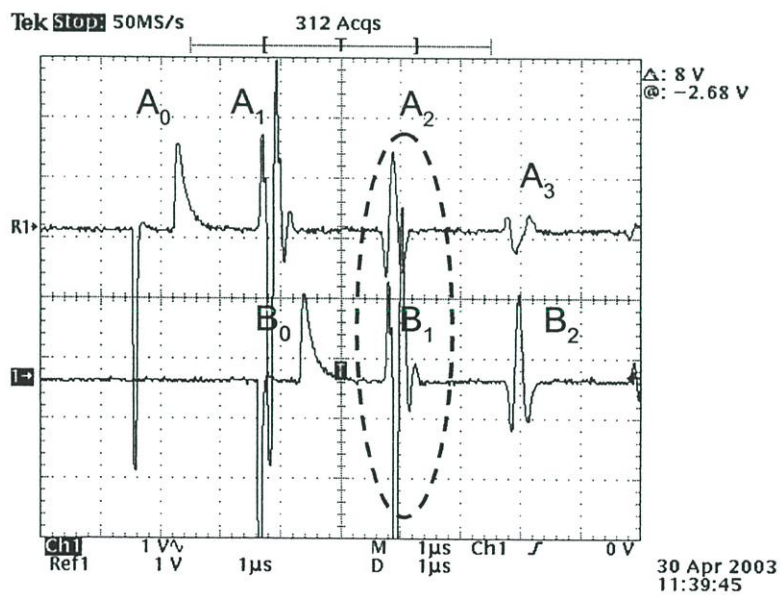
เมื่อสัญญาณอัลตราโซนิกที่วัดได้จากออสซิลอสโคปมีการกลับเฟส เนื่องจากที่รอยต่อระหว่างตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์แตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกลูกคลื่นสัญญาณ เพื่อปรับคาบเวลาของสัญญาณกระตุ้นให้ลูกคลื่นสัญญาณ  $A_2$  จากสัญญาณกระตุ้น  $A_0$  ซ้อนทับกับลูกคลื่นสัญญาณ  $B_1$  จากสัญญาณกระตุ้น  $B_0$  จึงต้องดูเฟสของสัญญาณด้วยเสมอ สามารถแสดงการวัดได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 แสดงการสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง



รูปที่ 3.7 แสดงสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิคที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป



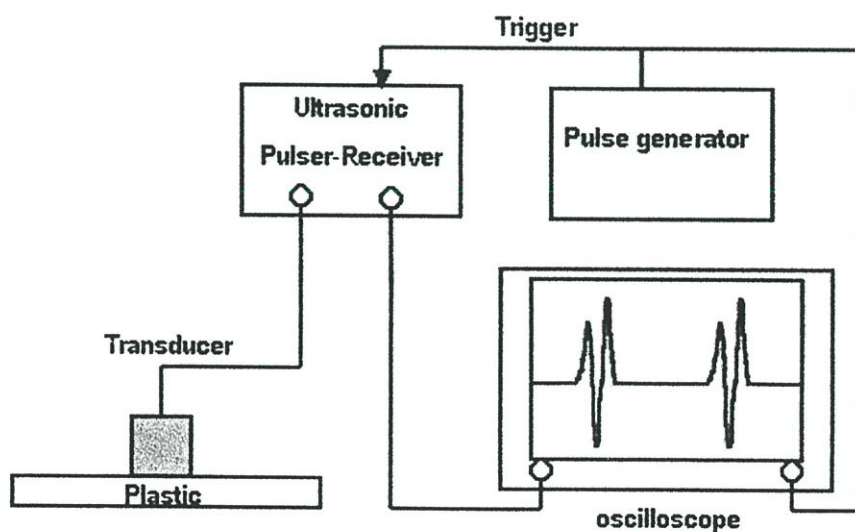
รูปที่ 3.8 แสดงการปรับคาบเวลาของสัญญาณกระตุ้นให้ลูกคลื่นสัญญาณ  $A_2$  ซ้อนทับกับ  $B_1$

### 3.2 อุปกรณ์และระบบการวัด

ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการวัดประกอบด้วย

- อัลตราโซนิกโพรบ (ทรานสดิวเซอร์) แบบตัวรับตัวส่งตัวเดียวกัน - เป็นตัวแปลงสัญญาณจากไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิก และแปลงจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก (Pulser-Receiver) - เป็นตัวส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่อัลตราโซนิกโพรบ และขยายสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นที่รับได้
- ตัวคลัปปลิงใช้น้ำผึ้ง - เป็นตัวช่วยส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในตัวกลางของแข็ง
- เครื่องกำเนิดพัลส์ - กำเนิดฐานเวลาที่สามารปรับค่าความถี่ได้ ส่งไปที่ภาครับภาคส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก
- ดิจิตอลออสซิลอสโคป - สำหรับเฝ้าดู (monitor) สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกในขณะทำการทดสอบ

ในวิจัยใช้คลื่นอัลตราโซนิกจากระบบการวัดที่จัดขึ้นมาใช้ในการตรวจวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกชนิดแผ่น การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกใช้เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ สามารถวัดความเร็วของคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวางในแผ่นพลาสติกมาใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้ โดยระบบการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

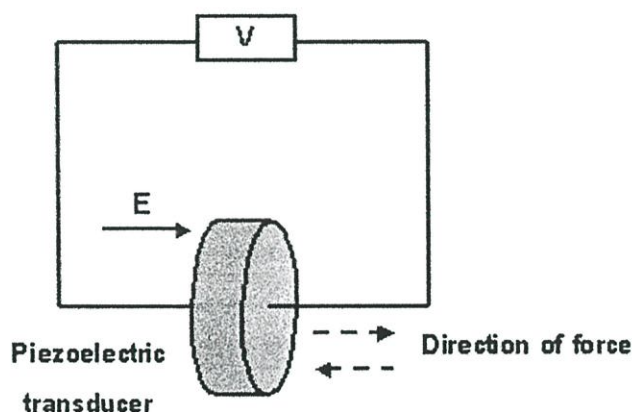


รูปที่ 3.9 แสดงระบบการวัดสมบัติยืดหยุ่นของแผ่นพลาสติกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

โดยในรายละเอียดและหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญในระบบการวัดซึ่งได้แก่ อัลตราโซนิกโพรบ แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับ เครื่องกำเนิดพัลส์ และดิจิทัลออสซิลอโคป สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

### 3.2.1 อัลตราโซนิกโพรบ

อัลตราโซนิกโพรบหรือเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณคลื่นเสียง และเปลี่ยนจากสัญญาณของคลื่นเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปสร้างจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เช่น พวกรเบเรียมไทตาเนต (barium titanate) และ พีซีที (PZT – lead zirconate titanate) เมื่อได้รับแรงดันหรือความดันเสียง วัสดุประเภทนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมา โดยจำนวนประจุที่จะแปรผันตรงกับความเค้นหรือแรงดันที่ป้อนให้ เรียกกระบวนการนี้ว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกตรง (direct piezoelectric effect) แสดงดังรูปที่ 3.10

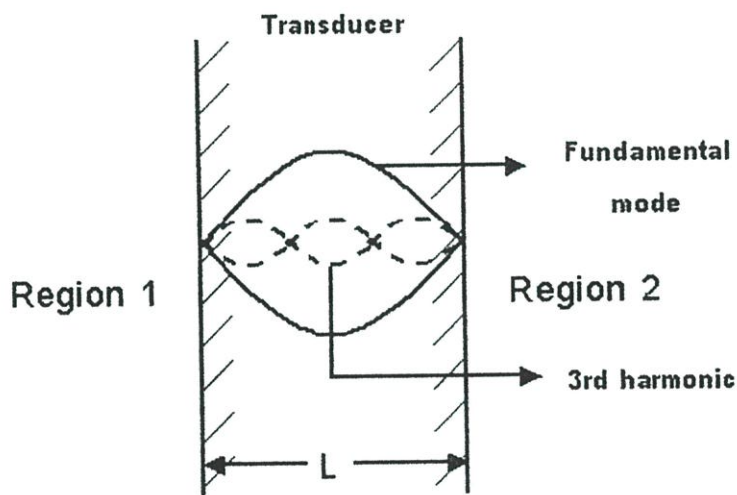


รูปที่ 3.10 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

โดยแรงภายนอกที่มากระทำแล้วทำให้อัลตราโซนิกโพรบเกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิว เช่น ความดันของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาตกกระทบกับโพรบ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวของโพรบ เกิดการเปลี่ยนไปมาสอดคล้องกับแรงที่มากระทำ ในกรณีนี้ อัลตราโซนิกโพรบจะประพฤติตัวเป็นตัวรับสัญญาณของคลื่น และในกรณีที่ใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไปที่ผิวของผลึกก็จะเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ (indirect piezoelectric effect) ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของผลึกมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป โดยมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับ

แรงดันไฟฟ้าที่ส่งเข้ามา โดยถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งเข้ามามีลักษณะแบบพัลส์สั้น ๆ จะทำให้แผ่นผลึกสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency)

ความถี่เรโซแนนซ์จะมีขนาดขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นผลึก ผลึกที่มีขนาดบางมากเท่าใดจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่หลักที่ต้องการได้ โดยการเลือกขนาดความหนาของแผ่นผลึก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการโดยให้ความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่นจากความถี่หลักที่ต้องการ พิจารณาดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงคลื่นยืนตัวในแผ่นผลึกเมื่อความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งหนึ่งความยาวคลื่น

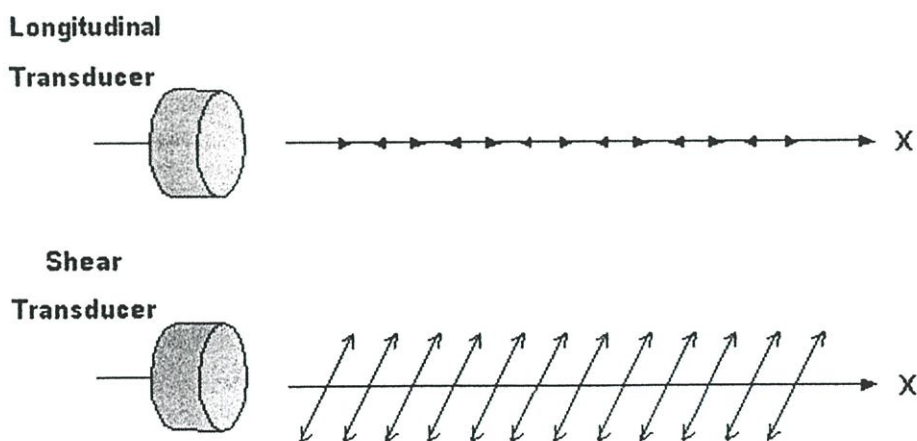
โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์เสียงของแผ่นผลึกจะมีค่าสูงกว่าอิมพีแดนซ์เสียงของตัวกลางที่สัมผัสอยู่กับแผ่นผลึกเช่น อากาศ, น้ำ หรือวัสดุที่เป็นโลหะเป็นต้น ดังนั้นเมื่อแผ่นผลึกถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์จากพัลส์เซอร์ทำให้แผ่นผลึกสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นผลึกจะเกิดคลื่นขึ้นในแผ่นผลึก และด้วยค่าอิมพีแดนซ์เสียงที่มีขนาดสูงของแผ่นผลึกจะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณภายในแผ่นผลึก เงื่อนไขที่จะทำให้เกิดคลื่นยืนตัว (standing wave) ขึ้นในแผ่นผลึกหรือเงื่อนไขที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ การสะท้อน (R) ของคลื่นภายในแผ่นผลึกมีค่าเท่ากับ -1 ก็คือ จะต้องทำให้ ค่าความดันที่บริเวณผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึกมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นความหนาของแผ่นผลึกจึงต้องถูกคำนวณให้มีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่นจากความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ที่ต้องการเพื่อให้เกิดคลื่นยืนตัวขึ้นในแผ่นผลึกเมื่อถูกกระตุ้นด้วย

สัญญาณพัลส์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นผลึกกับค่าความถี่เรโซแนนซ์แสดงดังสมการที่ 3.4 คือ

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f_0} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$v$	คือความเร็วของคลื่นเสียงในแผ่นผลึก (m/s)
	$f_0$	คือความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นผลึก (Hz)
	$L$	คือความหนาของแผ่นผลึก (m)
	$\lambda$	คือความยาวคลื่นเสียงในแผ่นผลึก (m)

ผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่พบตามธรรมชาติคือ ควอตซ์ (quartz) ซึ่งในระยะเริ่มแรกนิยมนำมาใช้ทำเป็นตัวรับและตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก โดยการตัดแผ่นผลึกให้ตั้งฉากกับระนาบแกน X (X-cut) คลื่นอัลตราโซนิกที่กำเนิดขึ้นจะเป็นคลื่นตามยาว และถ้าตัดแผ่นผลึกให้ตั้งฉากกับระนาบแกน Y (Y-cut) คลื่นอัลตราโซนิกที่กำเนิดขึ้นจะเป็นคลื่นตามขวาง โดยลักษณะอัลตราโซนิกโพรบที่กำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางแสดงดังรูปที่ 3.12



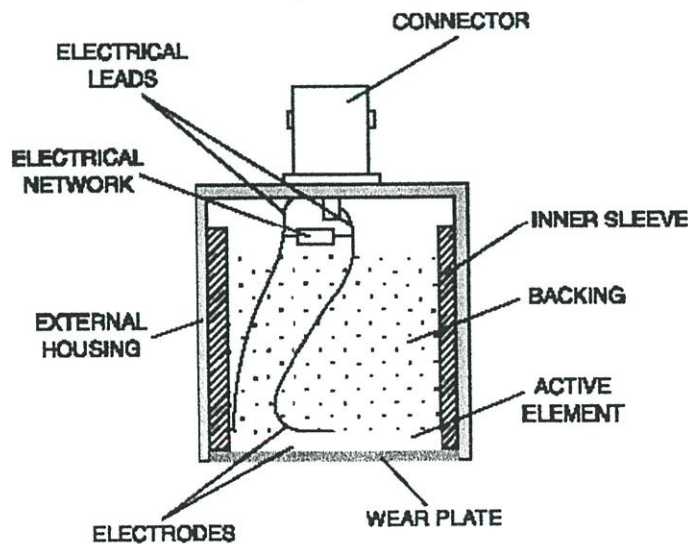
รูปที่ 3.12 แสดงอัลตราโซนิกโพรบชนิดกำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง

สำหรับในปัจจุบันอัลตราโซนิกโพรบไม่นิยมผลึกควอตซ์กันแล้ว แต่นิยมใช้ อัลตราโซนิกโพรบที่สร้างขึ้นจากการโพลาริไซซิงเตอร์เซรามิค เช่น พวกแบเรียมไทตาเนต และ พีซีที ซึ่งมีสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกที่ดี คือมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงาน

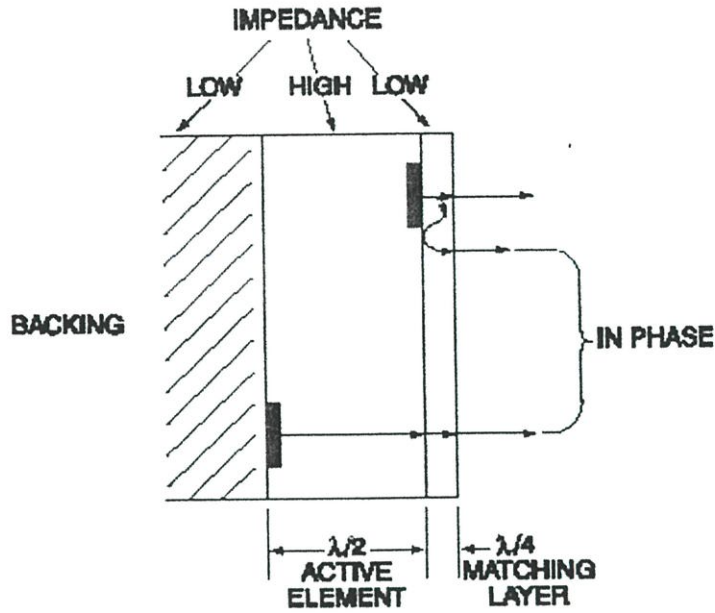
ทางกล และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานทางกลมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูง หมายความว่าผลึกเซรามิกนั้น สามารถนำไปใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นได้ดีเพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของความเครียดได้มาก

โครงสร้างพื้นฐานของหัวอัลตราโซนิกโพรบ แสดงดังรูปที่ 3.13 โดยประกอบไปด้วย

- วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (active element) ทำหน้าที่ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น
- ขั้วไฟฟ้า (electrode) ทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าไปยังคอนเนคเตอร์ (connector)
- ส่วนลดทอนสัญญาณแฉมป์ (backing) เป็นส่วนที่มีหน้าที่ลดแฟกเตอร์ที่คุณภาพ (quality factor, Q) ทำให้จำนวนไซเคิลในการสั่นลดลง
- ส่วนป้องกันผิวหน้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (wear plate) ส่วนนี้จำเป็นต้องทำจากวัสดุที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงที่เหมาะสมกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเพื่อให้คลื่นที่สร้างขึ้นมาเคลื่อนที่ออกไปได้มากที่สุด โดยความหนาของ wear plate มีความสำคัญมาก ต้องเลือกให้คลื่นที่วิ่งออกไปเป็นเฟสเดียวกัน (in phase) ไม่ให้เกิดการหักล้างกัน ดังนั้นในกรณีที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความหนาเท่ากับ  $\frac{\lambda}{2}$  แล้ว ความหนาของ wear plate ควรจะเท่ากับ  $\frac{\lambda}{4}$  จึงจะทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมาจากส่วน backing มีเฟสเดียวกันหรือตรงกันกับคลื่นที่สร้างออกมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แสดงได้ดังรูปที่ 3.14
- อิมพีแดนซ์แมทซิง (matching impedance หรือ electrical network) ทำหน้าที่เป็นโหลดที่ทำให้มีการส่งถ่ายพลังงานสูงที่สุด (maximum power transfer)



รูปที่ 3.13 โครงสร้างทั่วไปของหัวอัลตราโซนิกโพรบ



รูปที่ 3.14 ส่วนป้องกันผิวหน้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ลักษณะโครงสร้างที่กล่าวมาเป็นของหัวอัลตราโซนิกโพรบแบบสัมผัส ในกรณีที่ต้องการใช้งานในแบบจุ่ม หัวอัลตราโซนิกโพรบจะเพิ่มความยาวของส่วนปลอกหุ้ม (external housing) เพื่อให้มีส่วนที่จุ่มลงในน้ำได้มาก แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 หัวอัลตราโซนิกโพรบ (ก) แบบสัมผัส (ข) แบบจุ่ม

โดยทั่วไปลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ปล่อยออกจากหัวอัลตราโซนิกโพรบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่อยู่ห่างจากหัวโพรบไปจนถึงตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดจุดสุดท้ายและเป็น

ตำแหน่งที่ลำคลื่นเสียงเริ่มกระจายออกไม่เป็นลำขนาน เราเรียกช่วงนี้ว่า เฟรสเนลโซน (Fresnel zone หรือ near field) ช่วงนี้แอมพลิจูดของลำคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสูงไปต่ำและจากต่ำไปสูงสลับกันไป ถัดจากช่วงนี้ไป แอมพลิจูดของคลื่นจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางและลำคลื่นเสียงเริ่มบานออกเรียกช่วงนี้ว่า ฟรอนโฮเฟอร์โซน (Fraunhofer zone หรือ far field) ตำแหน่งของเฟรสเนลโซน (near field, N) มีค่าเป็นดังสมการ

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (3.5)$$

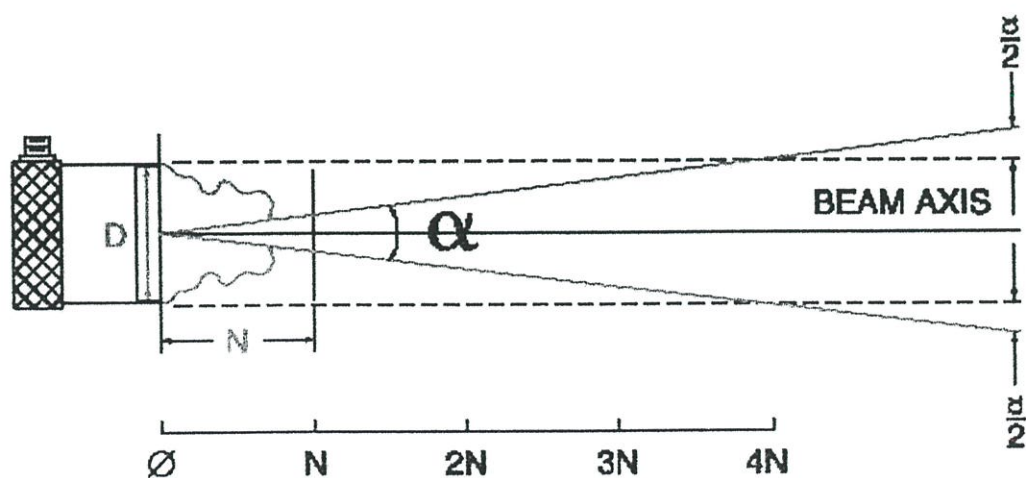
ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลาง D มากกว่าความยาวคลื่นมาก ๆ แล้วสามารถประมาณได้ว่า

$$N = \frac{D^2 f}{4V} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $f$  เป็นความถี่ หน่วยเป็น MHz

$V$  เป็นความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางใด ๆ หน่วยเป็น นิ้วต่อวินาที

$D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวโพรบ หน่วยเป็น นิ้ว



รูปที่ 3.16 แสดงลำคลื่นของอัลตราโซนิกที่ระยะสนามใกล้

รูปที่ 3.16 แสดงลำคลื่นของอัลตราโซนิก (beam spread) ตัวลำคลื่นจะแคบในช่วงระยะสนามใกล้ และกระจายออกไปในช่วงระยะสนามไกล มุมของลำคลื่น  $\alpha$  จากอัลตราโซนิกโพรบสามารถหาได้ดังสมการ

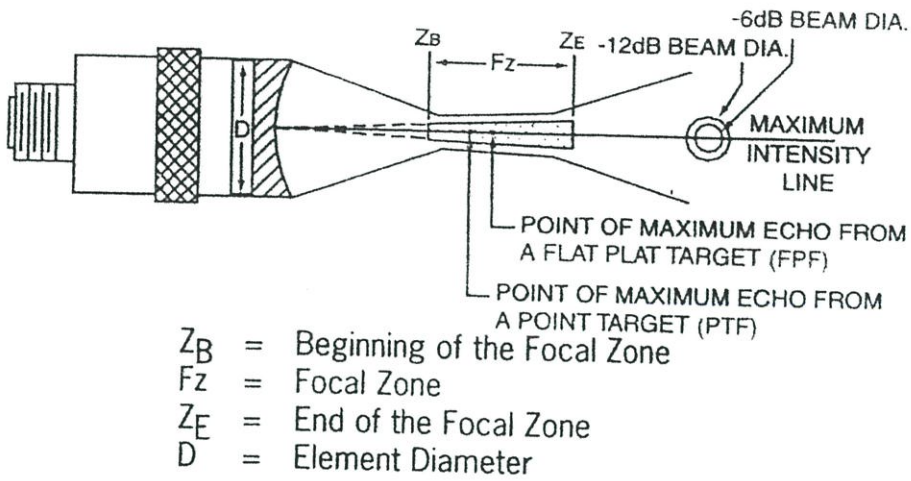
$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0.514V/fD \quad (3.7)$$

จากสมการที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าในการที่จะลดลักษณะการกระจายออกไปของลำคลื่นอัลตราโซนิก ต้องเลือกให้อัลตราโซนิกโพรบมีขนาดความถี่สูง หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มาก หรือทั้งสองอย่าง

นอกจากเฟรสนเอลโซนแล้ว คุณสมบัติสำคัญอื่น ๆ ของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ควรรู้ ได้แก่ ความกว้างของลำคลื่นอัลตราโซนิกและเฟคัลโซน โดยความกว้างของลำคลื่น (beam diameter, BD) เป็นคุณสมบัติที่มีผลต่อความไวและความละเอียดในการตรวจสอบ ยิ่งความกว้างของลำคลื่นแคบมากเท่าไร ความละเอียดในการตรวจจุดบกพร่องขนาดเล็กจะยิ่งสูง และเนื่องจากลำคลื่นทั้งหมดมารวมกันที่บริเวณนี้จึงมีพลังงานสูง จึงทำให้เกิดการสะท้อนกลับของจุดบกพร่องสูงอีกด้วย เรียกว่ามีความไวในการตรวจสอบสูงขึ้นด้วย โดยความกว้างของลำคลื่นเสียดที่ตำแหน่งที่แอมพลิจูดลดทอนลงเพียงครึ่งเดียว หรือ -6dB เป็นดังสมการ

$$BD_{(-6dB)} = \frac{1.02FV}{fD} \quad (3.8)$$

เมื่อ F เป็นความยาวโฟกัส หน่วยเป็น นิ้ว



รูปที่ 3.17 ลักษณะลำคลื่นโฟกัสอัลตราโซนิก

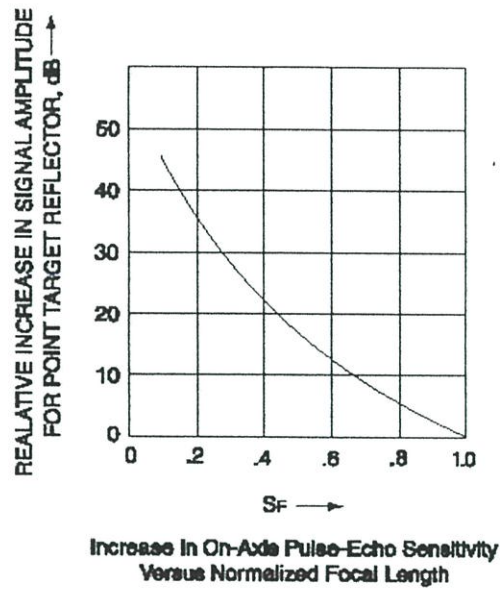
รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกโฟกัส โดยโฟกัสโซน ( $F_Z$ ) หรือช่วงที่แอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนกลับลดทอนลงไม่เกิน  $-6\text{dB}$  จากตำแหน่งโฟกัส สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_Z = NS_F^2 \left[ \frac{2}{1 + (0.5 \times S_F)} \right] \quad (3.9)$$

เมื่อ ( $S_F$ ) เป็นโฟกัสซิงเกน (Focusing gain) เป็นดังสมการ

$$S_F = \frac{F}{N} \quad (3.10)$$

โดยโฟกัสซิงเกนแสดงถึงอัตราการขยายของความไวในการตรวจสอบ เมื่อเทียบกับอัลตราโซนิกโพรบที่ไม่มีโฟกัส โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของโฟกัสซิงเกนกับการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดของสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเนื่องจาก  $S_F$

ในการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในเนื้อวัสดุ จำเป็นต้องมีตัวกลางมาช่วยในการส่งถ่ายพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกจากตัวส่งหรือหัวอัลตราโซนิกไปยังวัสดุตัวกลางที่ต้องการทดสอบ โดยตัวกลางนั้นจะต้องมีอิมพีแดนซ์ของเสียงเข้ากัน (matching) กับตัวส่งเพื่อลดอัตราการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิกบริเวณรอยต่อระหว่างหัวโพรบกับตัวกลาง โดยอัตราการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจะสูงมากเมื่อตัวกลางนั้นเป็นอากาศ เพื่อลดอัตราการสูญเสียพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกบริเวณรอยต่อ จึงจำเป็นต้องมีตัวกลางหรือตัวคัปปลิง (coupling) มาอยู่ระหว่างหัวโพรบกับวัสดุ โดยวิธีการคัปปลิงแบ่งได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่วิธีการคัปปลิงแบบสัมผัส และวิธีการคัปปลิงแบบจุ่ม

การคัปปลิงแบบสัมผัส (contact coupling) หัวโพรบอัลตราโซนิกจะแตะแนบกับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ โดยมีตัวคัปปลิงกั้นอยู่ตรงกลาง หัวโพรบจะถูกกดเพื่อลดความหนาของตัวคัปปลิงให้บางที่สุด โดยความหนาของตัวคัปปลิงจะต้องน้อยกว่า

$$d \ll \frac{2V}{f_{\max}} \quad (3.11)$$

เมื่อ	$d$	เป็นความหนาของตัวคลັปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตร
	$V$	เป็นความเร็วเสียงของตัวคลັปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที
	$f_{\max}$	เป็นความถี่สูงสุดของหัวโพรบอัลตราโซนิก หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (hertz)

การคลັปปลิงแบบจุ่ม (immersion coupling) ใช้ของเหลวเป็นตัวคลັปปลิง ระยะทางระหว่างหัวอัลตราโซนิกโพรบกับวัสดุที่ต้องการทดสอบต้องยาวเพียงพอที่จะแยกคลื่นสะท้อนของพื้นผิวหน้าวัสดุออกจากสัญญาณกระตุ้น (excitation signal) ของหัวโพรบ ความสัมพันธ์แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$d_c > \frac{V_c}{V_{tm}} N d_{tm} \quad (3.12)$$

เมื่อ	$d_c$	เป็นระยะทางของตัวคลັปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตร
	$d_c$	เป็นความหนาของวัสดุตัวกลาง หน่วยเป็น มิลลิเมตร
	$V_c$	เป็นความเร็วเสียงในตัวคลັปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที
	$V_{tm}$	เป็นความเร็วเสียงในวัสดุตัวกลาง หน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที
	$N$	เป็นจำนวนการสะท้อนที่เกิดซ้ำ ๆ (repetitive reflection) ในเนื้อวัสดุตัวกลาง

ในการทดลองการวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยคลื่นอัลตราโซนิกใช้การคลັปปลิงแบบสัมผัส ที่หัวโพรบอัลตราโซนิกจะแตะแนบกับพื้นผิวของพลาสติกอะคริลิคที่ต้องการตรวจสอบ หัวโพรบจะถูกกดเพื่อลดความหนาของตัวคลັปปลิงให้บางที่สุด โดยมีตัวคลັปปลิงกันอยู่ตรงกลาง ในการทดลองใช้น้ำผึ้งเป็นตัวคลັปปลิง เนื่องจากน้ำผึ้งสามารถใช้เป็นตัวคลັปปลิงได้ทั้งหัวโพรบคลื่นตามยาว และหัวโพรบคลื่นตามขวาง

### 3.2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงหลักการทำงานพื้นฐานของอัลตราโซนิกโพรบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติที่สำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้อัลตราโซนิกโพรบของบริษัท PANAMETRICS ดังนั้นสมบัติที่กล่าวถึงในที่นี้จึงอ้างอิงกับคุณสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบที่ผลิตโดยบริษัท PANAMETRICS เป็นหลัก

การเลือกอัลตราโซนิกโพรบที่เหมาะสมเป็นส่วนสำคัญมากในระบบการวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนอกจากจะเลือกตามการประยุกต์ใช้งานว่าต้องการใช้เป็นแบบสัมผัสหรือแบบจุ่มแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติอื่น ๆ ประกอบด้วย คุณสมบัติหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกอัลตราโซนิกโพรบ ได้แก่ รูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของความถี่ ซึ่งใช้การวัดตามมาตรฐานของ American society for Testing and Material (ASTM) ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.19 3.20 และ 3.21 โดยรูปคลื่นสัญญาณเป็นคุณสมบัติที่บอกถึงอัตราการลดทอนของอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ หรือค่าแดมปีง (damping) ของสัญญาณพัลส์อัลตราโซนิก ในกรณีของอัลตราโซนิกที่มีอัตราการลดทอนสูง พัลส์ที่สร้างออกมาจะหยุดในเวลาที่จะเร็วกว่าหัวอัลตราโซนิกโพรบที่มีอัตราการลดทอนต่ำ หรือก็คือมีคาบเวลาของรูปคลื่น (waveform duration) น้อยกว่าคาบเวลาของรูปคลื่นเป็นเวลาหัวอัลตราโซนิกโพรบสั้นหรือใช้ในการส่งคลื่นออกมา ในช่วงเวลาที่หัวอัลตราโซนิกโพรบจะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาได้ เรียกช่วงนี้ว่า dead zone

อัลตราโซนิกโพรบของบริษัท PANAMETRICS มีโหมดของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกอยู่ 3 โหมดด้วยกันคือ โหมด ACCUSCAN "S" โหมด ACCUSCAN "R" และ โหมด VIDEOSCAN เมื่อลองพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นของอัลตราโซนิกโพรบ โหมด VIDEOSCAN และโหมด ACCUSCAN กรณี VIDEOSCAN มีอัตราการลดทอนหรือสูญเสียพลังงานสูงกว่า ซึ่งส่งผลต่อความละเอียด (resolution) ในการตรวจสอบจะสูงกว่ากรณีของ ACCUSCAN แต่ความไว (sensitivity) ในการตรวจสอบต่ำกว่า คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่สำคัญได้แก่ สเปกตรัมของความถี่เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงการตอบสนองของความถี่ต่อการสั่นของอัลตราโซนิกโพรบ หรือก็คือกราฟที่แสดงให้เห็นถึงความเข้มเสียงที่ผลิตออกมาจากอัลตราโซนิกโพรบที่ความถี่ต่าง ๆ โดยมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจคือแฟกเตอร์ชี้คุณภาพ (quality factor, Q) ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นดังสมการ

$$Q = \frac{f_c}{\Delta f} \quad (3.13)$$

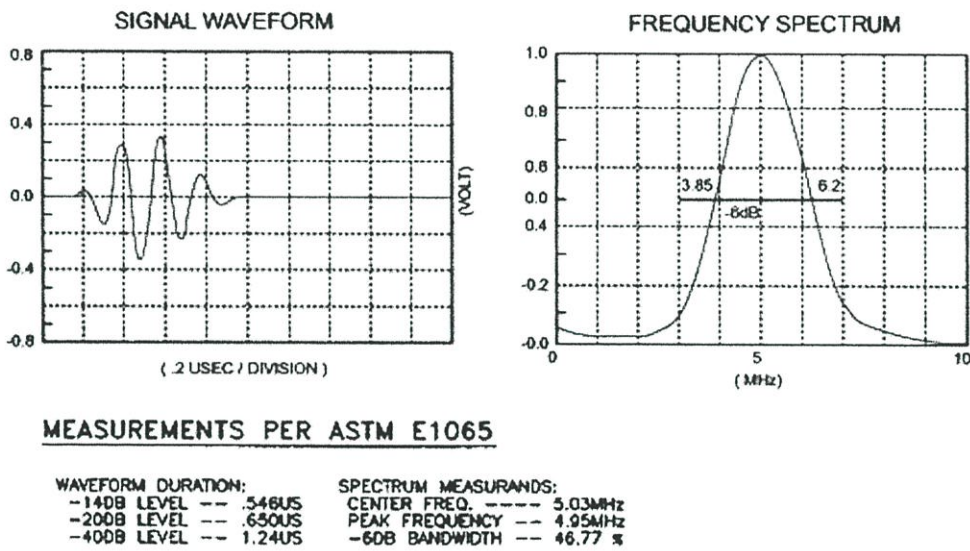
เมื่อ

Q คือแฟกเตอร์ชี้คุณภาพ

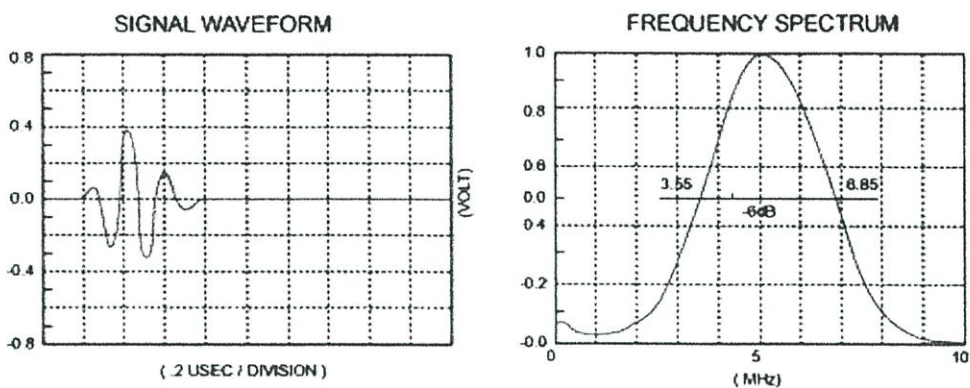
f คือความถี่กลางหรือความถี่เรโซแนนซ์ (center frequency หรือ resonant frequency)

$\Delta f$  คือช่องกว้างของความถี่ที่มีความเข้มเสียงลดลงเป็นสองเท่าหรือ -6 dB (bandwidth)

ในกรณีที่ค่า Q มีค่าน้อยแสดงว่าอัลตราโซนิกโพรบมีช่องกว้างความถี่ที่กว้าง (board-band) และถ้าค่า Q มีค่ามากแสดงว่าอัลตราโซนิกโพรบมีช่องกว้างความถี่แคบ (narrow-band)



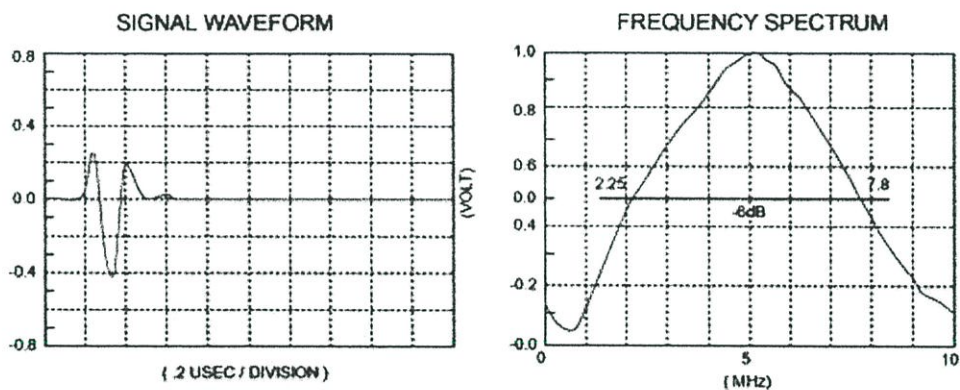
รูปที่ 3.19 แสดงโมเดล ACCUSCAN "S"



### MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION:	SPECTRUM MEASURANDS:
-14DB LEVEL -- .348US	CENTER FREQ. ---- 5.20MHz
-20DB LEVEL -- .494US	PEAK FREQUENCY -- 5.03MHz
-40DB LEVEL -- .782US	-6DB BANDWIDTH -- 63.46 %

รูปที่ 3.20 แสดงโมเดล ACCUSCAN "R"

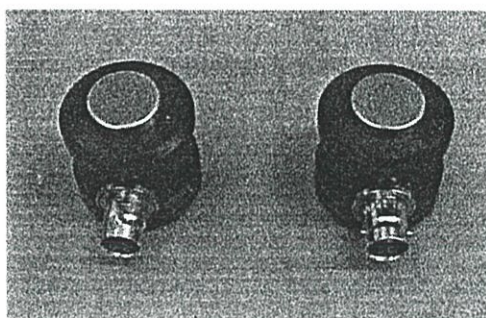


### MEASUREMENTS PER ASTM E1065

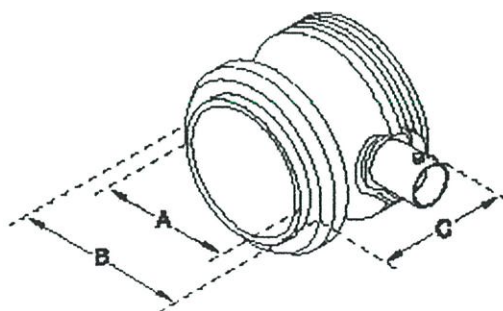
WAVEFORM DURATION:	SPECTRUM MEASURANDS:
-14DB LEVEL -- .238US	CENTER FREQ. ---- 5.03MHz
-20DB LEVEL -- .262US	PEAK FREQUENCY -- 5.28MHz
-40DB LEVEL -- .758US	-6DB BANDWIDTH -- 110.4 %

รูปที่ 3.21 แสดงโมเดล VIDEOSCAN

อัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในระบบการวัดของงานวิจัยนี้ ใช้ของบริษัท PANAMETRICS เป็นทรานสดิวเซอร์แบบสัมผัสตัวรับตัวส่งตัวเดียวกัน โมเดล VIDEOSCAN ใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบคลื่นตามยาว โมเดล V109 ความถี่กลางอยู่ที่ 5 MHz และหัวอัลตราโซนิกโพรบคลื่นตามขวาง โมเดล V155 ความถี่กลางอยู่ที่ 5 MHz แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 อัลตราโซนิกโพรบทั้งหัวโพรบคลื่นตามยาว และคลื่นตามขวาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 0.5 นิ้ว ความกว้างที่สัมผัสกับวัสดุทดสอบ (A) 0.63 นิ้ว ความกว้างทั้งหมดของหัวโพรบ (B) 1.16 นิ้ว และความยาวทั้งหมด (C) 1.25 นิ้ว แสดงได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 แสดงหัวอัลตราโซนิกโพรบของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย)



$$A = 0.63 \text{ นิ้ว}$$

$$B = 1.16 \text{ นิ้ว}$$

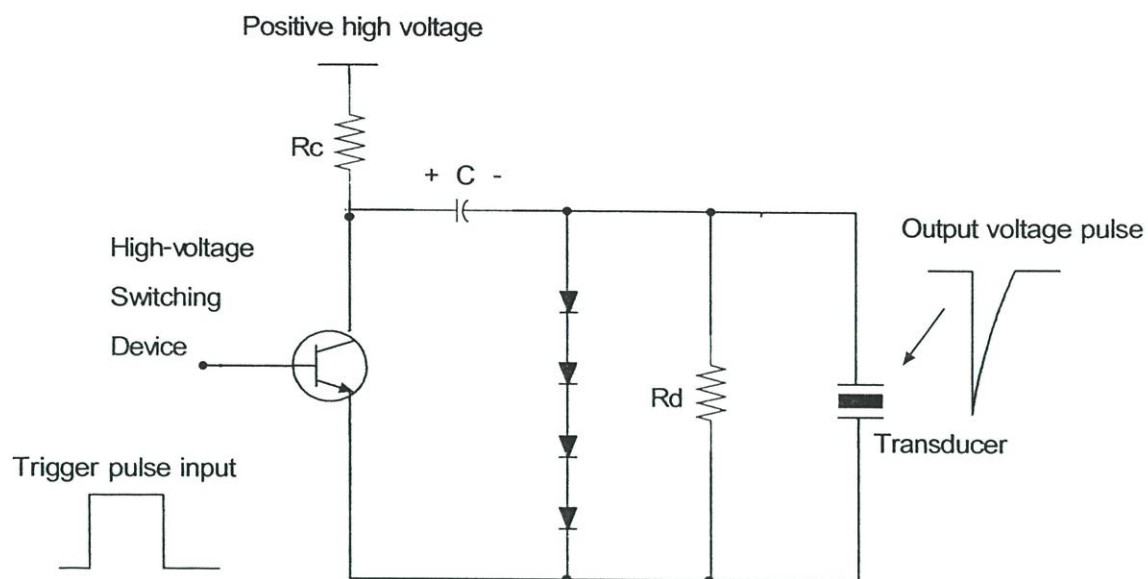
$$C = 1.25 \text{ นิ้ว}$$

รูปที่ 3.23 แสดงขนาดหัวอัลตราโซนิกโพรบ

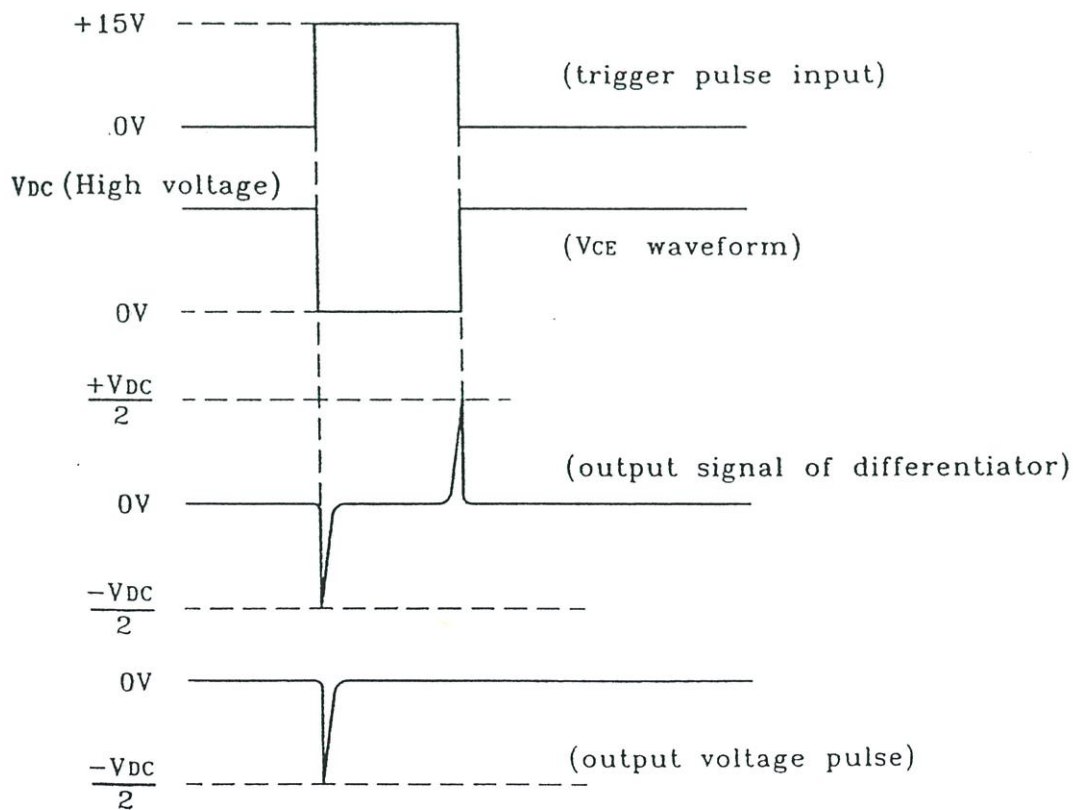
### 3.2.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับ

เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบให้สร้างคลื่นความดันคลื่นกล โดยทั่วไปนิยมเรียกว่า พัลส์เซอร์ (pulser) เปรียบเหมือนไม้ตีระฆัง โดยอัลตราโซนิกโพรบเปรียบเสมือนเป็นระฆัง ซึ่งจะสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ตามคุณสมบัติของระฆัง เมื่อพัลส์เซอร์ส่งแรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ จะเปรียบได้กับการออกแรงตีระฆัง ให้ระฆังสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของระฆังเอง ถ้าออกแรงตีมากระฆังจะมีเสียงดังมาก และเสียงก็จะค่อย ๆ ลดลงไปเรื่อย ๆ จนเงียบไป เนื่องจากเกิดการสูญเสียพลังงาน เมื่อต้องการให้ระฆังสั่นอีก ต้องออกแรงตีระฆังอีกครั้งหนึ่ง ในทำนองเดียวกันพัลส์เซอร์จะผลิตพัลส์ของแรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ โดยยิ่งพัลส์ของแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง ก็จะผลิตคลื่นกลที่มีแอมพลิจูดสูงด้วยจะทำให้มีความไวในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องขนาดเล็ก ๆ ได้ดี แต่การใส่พัลส์กระตุ้นที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง ทำให้อัลตราโซนิกโพรบเกิดความร้อนภายในสูงด้วย ดังนั้นพัลส์เซอร์จึงจำเป็นต้องออกแบบให้สร้างพัลส์ของแรงดันที่มีคาบเวลาล้านที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อลดผลของความร้อนและเพิ่มความไวในการตรวจสอบ

รูปที่ 3.24 แสดงตัวอย่างของวงจรไฟฟ้าที่ใช้สร้างพัลส์แรงดันสูงที่มีคาบเวลาล้าน (high voltage sharp pulse) ซีกลบ โดยลักษณะการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.24 เป็นวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ลบปลายแหลม มีอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage switching device) เช่น BJT MOSFET เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ตัดต่อซึ่งถูกควบคุมโดยสัญญาณพัลส์ทริกเกอร์อินพุท (trigger pulse input) เมื่ออุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอยู่ในสถานะไม่นำกระแสตัวเก็บประจุ (C) จะถูกชาร์จด้วยแรงดันไฟฟ้าบวกขนาดสูง (positive high voltage) และเมื่อมีสัญญาณพัลส์มาทริกเกอร์ จะทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอยู่ในสถานะนำกระแส โดยค่าความต้านทานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะมีขนาดต่ำ ทำให้ตัวเก็บประจุเกิดการคายประจุผ่านลงสู่กราวด์ของวงจร ซึ่งจะเกิดแรงดันพัลส์ปลายแหลมตกคร่อมที่ขั้วของโพรบ โดยที่แรงดันพัลส์บวกปลายแหลมจะไบแอสไดโอดผ่านลงสู่กราวด์ของวงจรเหลือเพียงแรงดันพัลส์ลบปลายแหลมเพื่อนำไปขับโพรบ ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรสำหรับกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ลบปลายแหลมในแต่ละส่วนแสดงดังรูปที่ 3.25



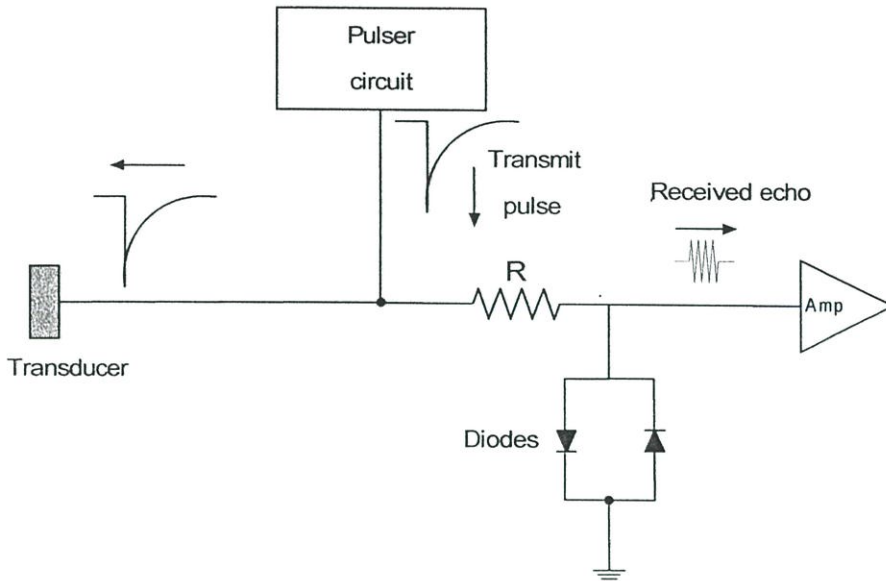
รูปที่ 3.24 วงจรพัลส์เซอร์



รูปที่ 3.25 แสดงลักษณะสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าพัลส์ลบปลายแหลม

จากลักษณะสัญญาณในรูปที่ 3.25 เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์ทรานซิสเตอร์อินพุททำให้เกิดการนำกระแส จะได้สัญญาณที่คอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ ( $V_{CE}$ ) ของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณพัลส์ทรานซิสเตอร์สัญญาณ  $V_{CE}$  จะถูกดีฟเฟอร์เรนเชียลด้วย วงจร RC ดีฟเฟอร์เรนเชียลจะปรากฏเป็นสัญญาณพัลส์บวกลบโดยมีแอมพลิจูดของพัลส์บวกและลบเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ขาคอลเลกเตอร์ของอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรจะมีเฉพาะสัญญาณพัลส์ลบ โดยสัญญาณพัลส์บวกจะไปไบแอสไดโอดที่ต่อขนานอยู่กับค่าความต้านทาน  $R_d$  ให้ปรากฏเฉพาะพัลส์ลบที่เอาต์พุตวงจรสำหรับค่าความต้านทาน  $R_d$  ในวงจรจะทำหน้าที่เป็นเดมปีเปอร์ของสัญญาณพัลส์โดยเป็นตัวกำหนดขนาดความกว้างและรูปร่างของสัญญาณพัลส์ปลายแหลม เมื่อโพรบถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์ปลายแหลมโพรบจะเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบ โดยช่วงเวลาในการสั่นสัมพันธ์กับอัตราการสูญเสียพลังงานเทียบกับเวลาในการสั่นของโพรบ ซึ่งลักษณะการสั่นของโพรบเมื่อมีสัญญาณพัลส์มากระตุ้นสามารถจะเปรียบเทียบได้จาก "การตีระฆัง" โดยระฆังในที่นี้ก็เปรียบเสมือนกับโพรบ และแรงที่มาระฆังก็เปรียบเสมือนสัญญาณพัลส์ที่มากระตุ้นโพรบ เมื่อระฆังถูกตีด้วยแรงขนาดหนึ่งระฆังจะเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของระฆังเอง โดยแอมพลิจูดในการสั่นของระฆังหรืออีกนัยหนึ่งก็คือความดังของเสียงระฆังจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไปแสดงว่าในการสั่นของระฆังเมื่อถูกตีจะเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้นทำให้ความดังของเสียงระฆังลดลงไปเรื่อย ๆ ซึ่งในการสั่นของอัลตราโซนิกโพรบก็มีลักษณะเช่นเดียวกับระฆังที่ถูกตี

สำหรับในวิทยานิพนธ์ใช้ทรานสดิวเซอร์ที่ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นจึงเลือกใช้เครื่องพัลส์เซอร์ที่มีภาครับอยู่ด้วย โดยภาครับในเครื่องพัลส์เซอร์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสองส่วนได้แก่ ส่วนป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินและส่วนแสดงสัญญาณดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 วงจรในภาครับสัญญาณ

เครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท PANAMETRICS รุ่น 5073PR แสดงดังในรูปที่ 3.27 พารามิเตอร์ของเครื่องพัลส์เซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ พารามิเตอร์ภาคส่งและพารามิเตอร์ภาครับ ในภาครับมีพารามิเตอร์ที่สำคัญมีอยู่เพียงพารามิเตอร์เดียว ซึ่งก็คืออัตราขยาย/อัตราการลดทอนสัญญาณ (gain) นิยมใช้หน่วยของเดซิเบล (dB) เมื่อค่าเป็นบวก (+) หมายถึงเพิ่มอัตราขยาย และเมื่อค่าเป็น (-) หมายถึงอัตราการลดทอน โดยในรุ่น 5073PR มีอัตราขยาย  $-49$  dB ถึง  $+39$  dB ความหมายของหน่วยเดซิเบล (dB) คืออัตราการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของสัญญาณที่ 1 (สัญญาณขาเข้า) กับสัญญาณที่ 2 (สัญญาณขาออก) เป็นไปตามสมการที่ 3.14 และในตารางที่ 3.1 จะแสดงความสัมพันธ์ที่สำคัญของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด

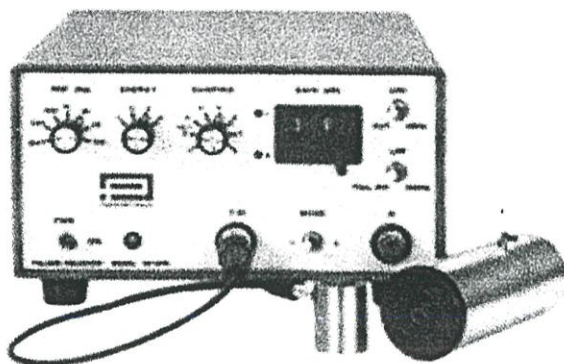
$$\text{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (3.14)$$

เมื่อ

dB คืออัตราการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของสัญญาณที่ 1 กับสัญญาณที่ 2

$A_1$  คือสัญญาณที่ 1 หรือ สัญญาณขาเข้า

$A_2$  คือสัญญาณที่ 2 หรือ สัญญาณขาออก



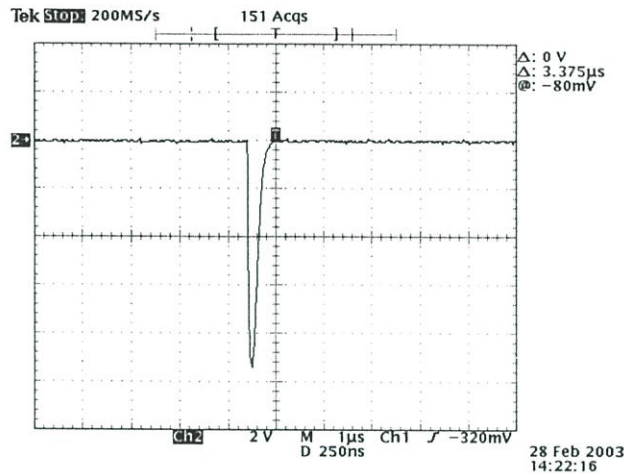
รูปที่ 3.27 พัลส์เซอร์และตัวรับของ PANAMETRICS รุ่น 5073PR

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด

$\frac{A_1}{A_2}$	อัตราส่วน	dB
$\frac{100\%}{70.71\%}$	1.4142	3
$\frac{100\%}{50\%}$	2	6
$\frac{100\%}{25\%}$	4	12
$\frac{100\%}{70.71\%}$	10	20
$\frac{100\%}{10\%}$	100	40
$\frac{100\%}{70.71\%}$	1000	60

พารามิเตอร์ของภาคส่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ พลังงาน (energy) การลดทอนสัญญาณกระเพื่อม (damping) และความถี่ในการกระตุ้น (pulse repetition frequency, PRF) พลังงานของพัลส์กระตุ้นเป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายไปสู่อัลตราโซนิกโพรบ โดยระดับพลังงานที่จ่ายให้กับอัลตราโซนิกโพรบอยู่ในระดับไมโครจูล ( $\mu\text{J}$ ) โดยการปรับเพิ่มพารามิเตอร์พลังงานเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ

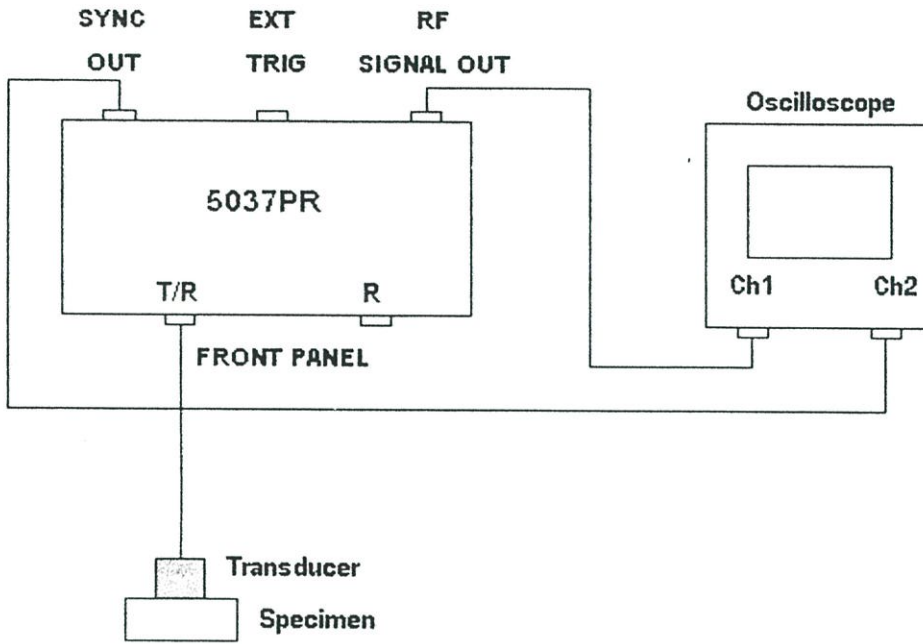
หัวอัลตราโซนิกโพรบนั้นเอง ยิ่งพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้นเพียงได้อัลตราโซนิกโพรบก็จะผลิตคลื่นกลที่มีขนาดของแอมพลิจูดสูงมากขึ้นตามไปด้วย ลักษณะของพัลส์ที่สร้างจากเครื่องพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR แสดงดังรูปที่ 3.28 ซึ่งเป็นการต่อเอาท์พุทของพัลส์เซอร์กับความต้านทานขนาด 50 โอห์ม



รูปที่ 3.28 สัญญาณพัลส์กระตุ้นของพัลส์เซอร์

พารามิเตอร์การลดทอนสัญญาณกระเพื่อม (damping) เป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ให้เกิดสัญญาณกระเพื่อม (ringing effect) โดยลดแรงดันไฟฟ้าและความกว้างของแรงดันไฟฟ้าพัลส์กระตุ้นลง ส่วนพารามิเตอร์สุดท้ายเป็นค่าความถี่ในการสร้างพัลส์กระตุ้น คือเมื่อปล่อยพัลส์แรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบจะสร้างคลื่นกลออกไปหนึ่งลูก และสะท้อนกลับมาแสดงผลบนจอภาพของออสซิลโลสโคป แต่เนื่องจากถ้าสร้างขึ้นมาเพียงลูกเดียวบนจอออสซิลโลสโคปจะแสดงรูปคลื่นของพัลส์เดียวแล้วหายไป เป็นเหตุให้วัดและประมวลผลข้อมูลหรือรูปคลื่นที่ได้ไม่ทัน ดังนั้นเพื่อที่จะสร้างรูปคลื่นให้คงอยู่ จึงต้องผลิตพัลส์กระตุ้นเป็นจังหวะ ๆ โดยปกติค่าความถี่ในการปล่อยพัลส์กระตุ้นจะอยู่ที่ประมาณ 100 Hz - 20 kHz

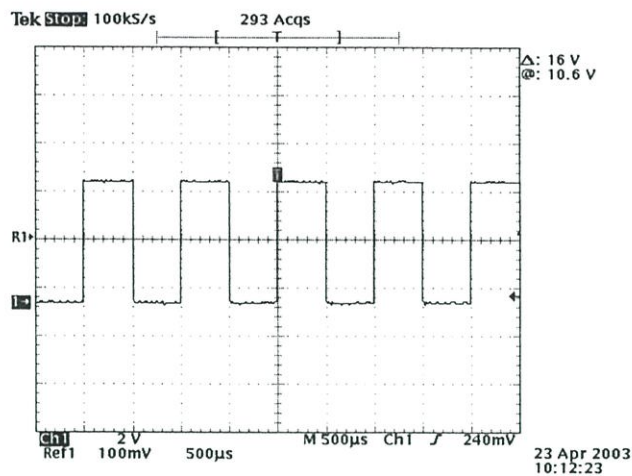
จากพื้นฐานของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพัลส์เซอร์และตัวรับแล้ว สิ่งที่จะพิจารณาต่อไปคือลักษณะการนำเอาพัลส์เซอร์และตัวรับ มาประยุกต์ต่อใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 3.29 เป็นการนำพัลส์เซอร์มาต่อในการวัดแบบพัลส์สะท้อนกลับ โดยสัญญาณขาออกหลังจากที่ผ่านการขยายสัญญาณจากภาครับแล้ว จะส่งไปแสดงผลที่จอภาพของออสซิลโลสโคป



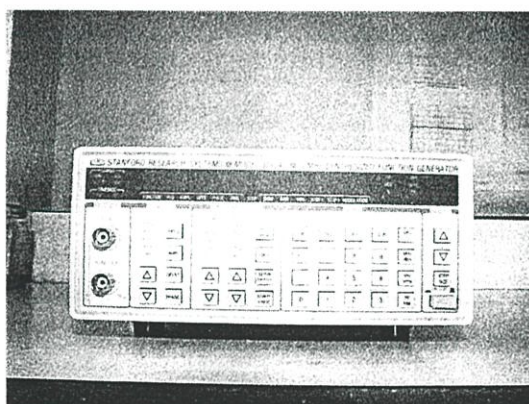
รูปที่ 3.29 การประยุกต์ใช้งานของพัลเซอร์แบบพัลส์สะท้อนกลับ

### 3.2.4 เครื่องกำเนิดพัลส์

เครื่องกำเนิดพัลส์ทำหน้าที่กำเนิดฐานเวลาที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ ส่งไปที่ภาครับภาคส่งสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ในการทดลองใช้เครื่องกำเนิดพัลส์ของบริษัท Stanford Research Systems (SRS) รุ่น DS345 ปรับความถี่ได้สูงสุด 30 MHz ความละเอียด (Resolution) ในการปรับค่าความถี่อยู่ที่  $1 \mu\text{Hz}$  เครื่องกำเนิดพัลส์จะให้กำเนิดพัลส์รูปสี่เหลี่ยมที่ปรับค่าความถี่ได้ส่งไปที่พัลเซอร์ (ตัวอย่างพัลส์แสดงได้ดังรูปที่ 3.30) เพื่อใช้ในการหาค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนในตัวกลางด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ โดยอาศัยการวัดอัตราการกระตุ่นของสัญญาณที่ใช้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก แล้วปรับคาบเวลาของสัญญาณกระตุ่นให้มีขนาดเท่ากับคาบเวลาระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิก ที่ตำแหน่งที่จะทำการปรับอัตราการกระตุ่นให้เกิดการซ้อนทับของคลื่นสะท้อนกลับ ดังนั้นระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ไปและกลับได้ในตัวกลาง ได้จากส่วนกลับของอัตราการกระตุ่นของสัญญาณที่ใช้ในการกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกนั่นเอง เครื่องกำเนิดพัลส์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.31



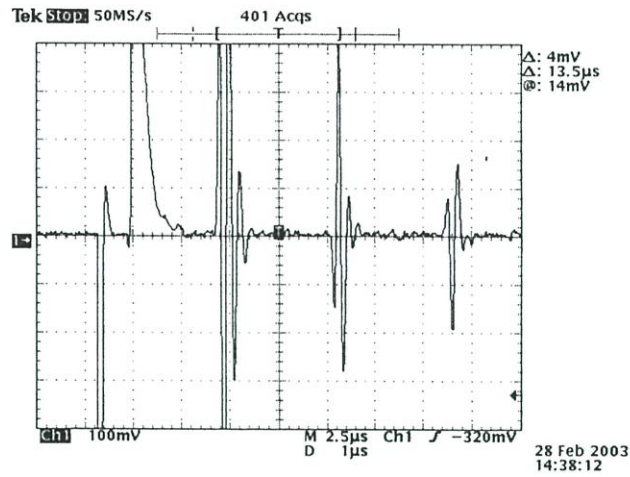
รูปที่ 3.30 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์จากเครื่องกำเนิดพัลส์



รูปที่ 3.31 เครื่องกำเนิดพัลส์ของ Stanford Research Systems (SRS) รุ่น DS345

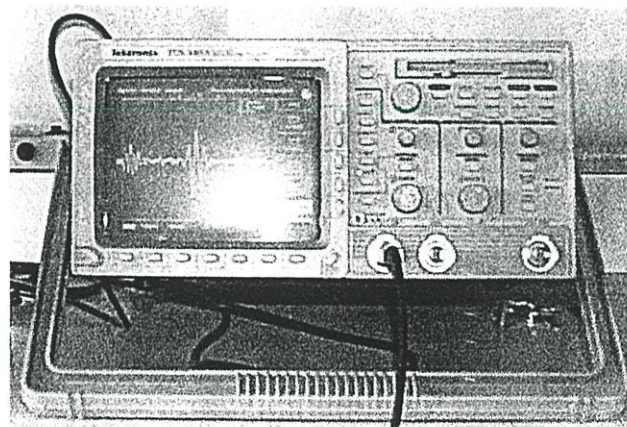
### 3.2.5 ดิจิตอลออสซิลอสโคป

ออสซิลอสโคปทำหน้าที่แสดงรูปคลื่นสัญญาณ RF (รูปคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกที่ได้จากพัลส์เซอร์และตัวรับ) ในการทดลองจึงจำเป็นต้องมีออสซิลอสโคปสำหรับเฝ้าตรวจ (monitor) สัญญาณในขณะที่ทำการทดลอง เพื่อเลื่อนปรับสัญญาณไปยังตำแหน่งหรือดูคลื่นที่ต้องการ ลักษณะของสัญญาณที่ได้จากออสซิลอสโคปแสดงได้ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.33 แสดงภาพจากสัญญาณออสซิลโลสโคป โดย Ch1 เป็นสัญญาณ RF

ออสซิลโลสโคปที่ใช้เป็นแบบดิจิตอลออสซิลโลสโคปแบบบันทึกสัญญาณได้ (Digital storage Oscilloscope, DSO) ของ Tektronix รุ่น TDS340A มีช่วงกว้างความถี่ (band width) เท่ากับ 100 MHz และมีอัตราการสุ่มวัดสัญญาณ (sampling rate) 10 จุด/วินาที ถึง 500 ล้านจุด/วินาที ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานกับอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยมีความละเอียดของฐานเวลา (time base) ในระดับ 5 ns/ช่อง รูปที่ 3.34 แสดงภาพถ่ายของออสซิลโลสโคปที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.34 ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS340A

## บทที่ 4

### พลาสติกอะคริลิกและวิธีการทดสอบแบบทำลาย

ในปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่นำมาใช้แทนวัสดุจากธรรมชาติ เช่น เหล็ก ไม้ พลาสติกชนิดแผ่นสามารถประกอบขึ้นเป็นรูปต่าง ๆ ได้ง่ายตามความต้องการของผู้ใช้ ทั้งมีน้ำหนักเบา ใส และราคาถูก ทำให้พลาสติกชนิดแผ่นเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย พลาสติกอะคริลิกเป็นพลาสติกแผ่นอีกชนิดที่นำมาใช้งานในชีวิตประจำวันกันมาก เนื่องจากใส มีน้ำหนักเบา และทนทาน สามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ดี เช่น ป้ายร้านค้า ป้ายโฆษณา โคมหลังคา กระจกนิรภัย กระจกแว่นตา เลนส์ จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ให้ดีขึ้น และมีระบบการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน การทดสอบคุณสมบัติของพลาสติกชนิดแผ่นมีหลายอย่าง มีการทดสอบทางเคมี เช่น ทดสอบความทนต่อกรดเบส การทดสอบทางไฟฟ้า เช่น ความเป็นฉนวนไฟฟ้า การทดสอบทางกล เช่น ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น

การทดสอบดังที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการทดสอบแบบทำลายที่ไม่สามารถตรวจสอบชิ้นงานได้ทุกชิ้น ทำให้ต้องสุ่มตัวอย่างชิ้นมาทดสอบ ต้องเสียชิ้นงานไปหลังการทดสอบ และไม่สามารถประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ทุกชิ้นงาน โดยปกติการทดสอบทางกลของพลาสติกชนิดแผ่นเพื่อวัดค่าสมบัติยืดหยุ่น จะใช้การทดสอบแบบทำลาย โดยการให้แรงกดลงบนแผ่นพลาสติก ให้เกิดความโค้งงอถึงแรงกดลงมากที่สุด จนแผ่นพลาสติกหัก เรียกการทดสอบแบบนี้ว่าการทดสอบโดยการดัดโค้ง แตกต่างกับการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถหาค่าสมบัติยืดหยุ่นคือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ได้เหมือนการทดสอบทางกล ทำให้ทราบค่าแรงต่อพื้นที่ ที่สามารถรับน้ำหนักได้สัมพันธ์กับระยะโค้งงอของแผ่นพลาสติก ทำให้สามารถนำแผ่นพลาสติกไปใช้ประโยชน์กับงานชนิดต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม และความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างปลอดภัย

จากในบทที่ 3 ได้อธิบายถึงเทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาตรวจวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก ซึ่งการทดสอบแบบนี้เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย พลาสติกอะคริลิกที่ตรวจสอบไม่ถูกทำลายไปหลังการตรวจสอบ และสำหรับในบทที่ 4 นี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติ ประโยชน์ การนำไปประยุกต์ใช้งานของพลาสติกอะคริลิก การได้มาของค่าความต้านทานแรงดัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และสุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการทดสอบแบบทำลายโดยวิธีการดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D 790

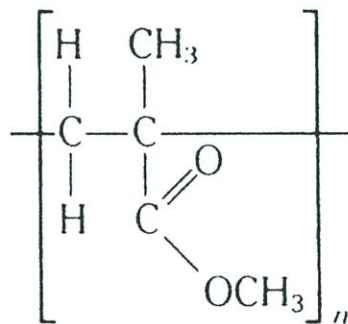
#### 4.1 พลาสติกอะคริลิกและคุณสมบัติ

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์กลุ่มใหญ่ และมีหมู่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน อาจทำให้รวมตัวกัน หรือเข้าแบบให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ โดยทั่วไปพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastic)

เทอร์โมพลาสติก เป็นพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น พลาสติกพวกนี้จึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ตลอด โดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง

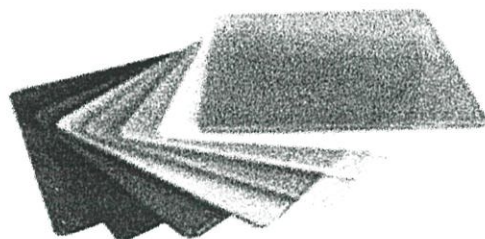
เทอร์โมเซตติงพลาสติก เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปร่างอย่างถาวรด้วยการบ่มด้วยปฏิกิริยาเคมี หรือด้วยความร้อน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ส่วนอะคริลิก หรือ พอลิเมทิลเมทาครีเลต (Polymethyl methacrylate = PMMA) จัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติก ที่สามารถทำให้หลอมเหลว หรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น โดยมีโครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อยคือ



อะคริลิกรู้จักกันดีในชื่อการค้าคำว่า เพกซิกลาส (Plexiglas) ลูซิท์ (Lucite) โพลีกลาส (Polyglas) ได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในปี ค.ศ.1336 อะคริลิกได้นำไปผสมกับพลาสติกชนิดอื่น เช่น สไตรีน (styrene) พีวีซี (P.V.C) เกิดเป็นพลาสติกชนิดใหม่ เช่น Methyl Methacrylate-styrene เป็นต้น อะคริลิกเป็นพลาสติกที่ใสที่สุดชนิดหนึ่ง แข็งแรงพอสมควรเป็นรอยขีดข่วนง่าย (ชนิดพิเศษแข็งแรงมาก) ทนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี เป็นฉนวนไฟฟ้าดีมาก ทนสารเคมีได้พอสมควร ไม่ควรให้ถูกน้ำมันเบนซิน อะซีโตน คลอโรฟอร์ม สเปร์ย์น้ำหอม และพวกกรดออกซิไดซิง (oxidizing Acids) ชนิดเข้มข้น อะคริลิกยังทำเป็นสีต่าง ๆ ได้มีทั้งชนิดใส ฝ้า และทึบแสง เมื่อจับจะรู้สึกอุ่นและสบายมือ ตัวอย่างแผ่นพลาสติกอะคริลิก แสดงได้ดังรูปที่ 4.1

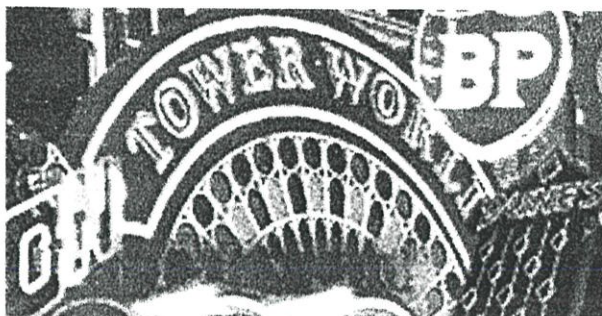
การใช้ประโยชน์ของอะคริลิกนิยมนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ป้ายร้านค้า ป้ายโฆษณา โคมหลังคา กระจกแว่นตา เลนส์ โคมไฟ เฟอร์นิเจอร์ ภาชนะ และถ้วยบรรจุของเหลวชนิดใส สีพ่นรถยนต์และในรูปเส้นใยใช้ทำพรม เป็นต้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากอะคริลิกแสดงได้ดังรูปที่ 4.2-4.4



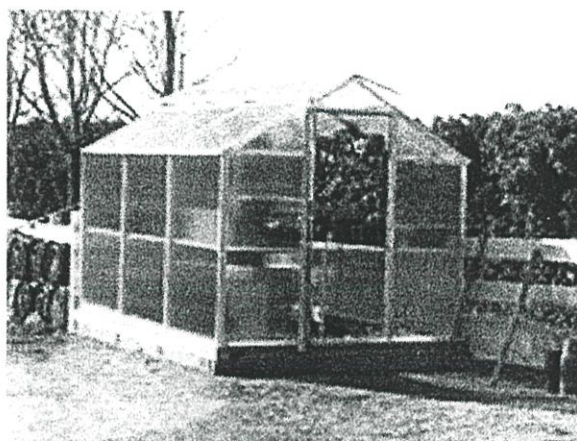
รูปที่ 4.1 แผ่นพลาสติกอะคริลิก



รูปที่ 4.2 แสดงแผ่นป้ายสัญลักษณ์ที่ทำจากพลาสติกอะคริลิก



รูปที่ 4.3 แสดงแผ่นป้ายโฆษณาร้านค้าที่ทำจากพลาสติกอะคริลิก



รูปที่ 4.4 แสดงเรือนเพาะชำที่ทำจากพลาสติกอะคริลิก

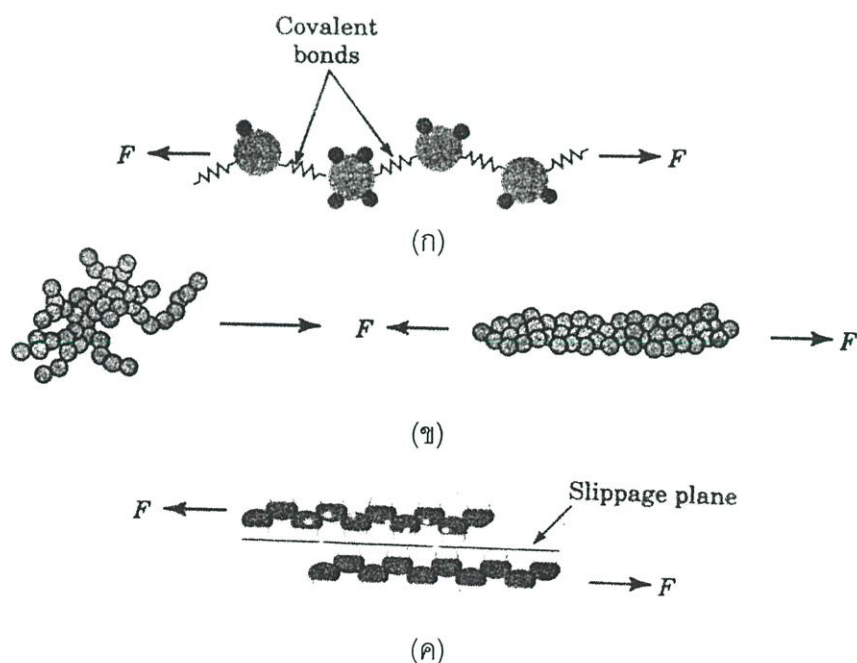
และอะคริลิกสามารถนำไปตัดเป็นรูปต่าง ๆ ได้เมื่อได้รับความร้อนเผาอีกครั้งหนึ่ง ประมาณ  $1400 - 1600^{\circ}\text{C}$  จะมีสภาพอ่อนเมื่อนำไปกดลงในแม่แบบสำเร็จรูปที่ต้องการจะได้ตามนั้น และเมื่อเย็นตัวแล้วจะรักษารูปแบบตามแม่แบบตลอดไป นอกจากนี้ยังสามารถนำไปเลื่อยกลึง ตัด ดัด เชื่อม ให้ได้รูปตามต้องการได้ คุณสมบัติทางเคมีสามารถทนต่อกรดต่างได้หลายชนิด คุณสมบัติทางฟิสิกส์สูงพอที่จะสามารถนำไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม สถาปัตยกรรม ศิลปกรรมตลอดจนของใช้ ในชีวิตประจำวันได้ โดยคุณสมบัติของอะคริลิกสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ลักษณะทางกายภาพของอะคริลิค

ลักษณะทางกายภาพของ Acrylic-methylmethacrylate	
กรรมวิธีการผลิต	Injection, Extrusion, Casting
คุณสมบัติที่ใช้ในการผลิต	Electrostatic
อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต	162 <sup>o</sup> - 246 <sup>o</sup> C
ความหดตัวหลังการผลิต	0.02-0.08 นิ้ว/นิ้ว
ความถ่วงจำเพาะ	1.17- 1.20
ปริมาตร ลบ.นิ้ว/ปอนด์	23.7-23.1
ทนแรงดึง	80 -140 MPa
ทนแรงอัด	100 -150 MPa
ทนแรงกระทบ	0.3 - 0.5
ความแข็ง	M 85 - M 105
ทนความร้อนโดยปกติ	60 <sup>o</sup> - 90 <sup>o</sup> C
ความดูดซึมน้ำ	0.3%
อัตราการเผาไหม้	ช้า
ทนกรด	ดี (ไม่ทนกรด Oxidizing Acids ชนิดเข้มข้น)
ทนด่าง	ดี (ไม่ทนด่างแก่)
ทนสารละลาย	ดี (แต่ไม่ทน Ketones, Esters, Aromatic และ Chlorinated Hydrocarbons)
ทนแสงแดด	ดีมาก
ความใส (Transparency)	ใสมาก

ผลของอุณหภูมิต่อความแข็งแรงของพลาสติก สำหรับลักษณะเฉพาะตัวของเทอร์โมพลาสติก คือจะค่อย ๆ อ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะเฉพาะของกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น second bonding (weak bond) ระหว่างโมเลกุลจะอ่อนลงทำให้ความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกลดลงด้วย เมื่อวัสดุเทอร์โมพลาสติกได้รับความร้อนผ่าน glass transition temperature ( $T_g$ ) ความแข็งแรงจะลดลง เนื่องจากการลดลงของแรง second bonding เทอร์โมเซทติงพลาสติกก็เช่นเดียวกัน เมื่อให้ความร้อนความแข็งแรงจะลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากพันธะโควาเลนต์ ในการเกิดโครงข่ายที่แข็งแรงนั้น ต้องสลายไปหรือเกิดการใหม่เกรียม

สำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปของเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญคือการเปลี่ยนแบบอีลาสติก (elastic) และการเปลี่ยนแบบพลาสติก (permanent) หรืออาจเปลี่ยนทั้งสองแบบ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า glass transition temperature เทอร์โมพลาสติกจะเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า glass transition temperature เทอร์โมพลาสติกจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกจะมีการเปลี่ยนแปลงความเปราะ-ความอ่อนตัวตามความร้อนที่ได้รับ สำหรับพอลิเมทิลเมทาครีเลต การเปลี่ยนแปลงจะอยู่ระหว่างช่วงอุณหภูมิ  $86 - 104$  °C



รูปที่ 4.5 แสดงหลักการของกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปของเทอร์โมพลาสติก

จากรูปที่ 4.5 แสดงหลักการของกลไกการเปลี่ยนแปลงรูปของเทอร์โมพลาสติกในรูปที่ 4.5 (ก) แสดงการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติก โดยที่พันธะโควาเลนต์ยึดออกภายในโมเลกุลรูปที่ 4.5 (ข) แสดงการยืดออกของโพลิเมอร์โซ่ตรง อาจเป็นการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกหรือแบบพลาสติกก็ได้ และในรูปที่ 4.5 (ค) แสดงการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (แบบพลาสติก) โดยที่โมเลกุลยาว ๆ เกิดการเลื่อนไถลด้วยการแตกออกของพันธะ

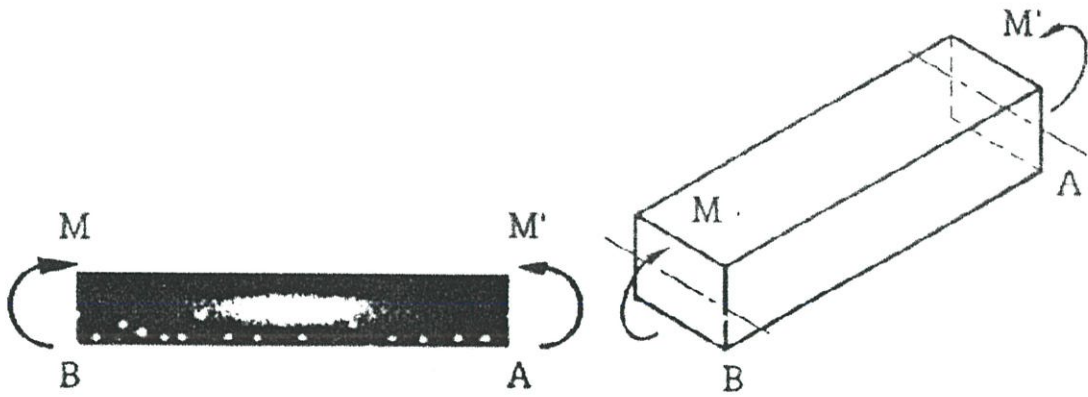
## 4.2 ค่าความต้านทานแรงดัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการทดสอบพลาสติกชนิดแผ่นด้วยวิธีการดัดโค้ง

การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติกโดยทั่วไปมีหลายแบบ เช่น การทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง การทดสอบสมบัติความแข็งแรงดัด การทดสอบอย่างแรกคือการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง ส่วนใหญ่ใช้ในการทดสอบกับพลาสติกที่ขึ้นรูปเป็นแท่งกลมตัน หรือขึ้นเป็นรูปกระดูก ในการทดสอบจะใช้แรงดึงที่ปลายทั้งสองข้างของพลาสติก จนพลาสติกเกิดการยืดออกด้วยแรงดึงมากที่สุดจนขาด ผลการทดลองที่ทดสอบสามารถหาค่าความต้านทานแรงดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้

ส่วนการทดสอบสมบัติความแข็งแรงดัดเป็นการทดสอบด้วยวิธีการดัดโค้ง ที่ใช้ในการทดสอบกับพลาสติกชนิดแผ่น ในการทดสอบใช้แรงกดลงตรงกลางแผ่นจนแผ่นพลาสติกหัก ผลการทดลองที่ทดสอบนั้น สามารถหาค่าความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้

สำหรับในหัวข้อนี้ จะอธิบายถึงความสำคัญและที่มาของการหาค่าความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของการทดสอบพลาสติกชนิดแผ่นด้วยวิธีการดัดโค้ง โดยสมมติให้แผ่นพลาสติกแทนคานใด ๆ ที่ถูกกระทำด้วยแรงดัดกดลงตรงกลางของคาน

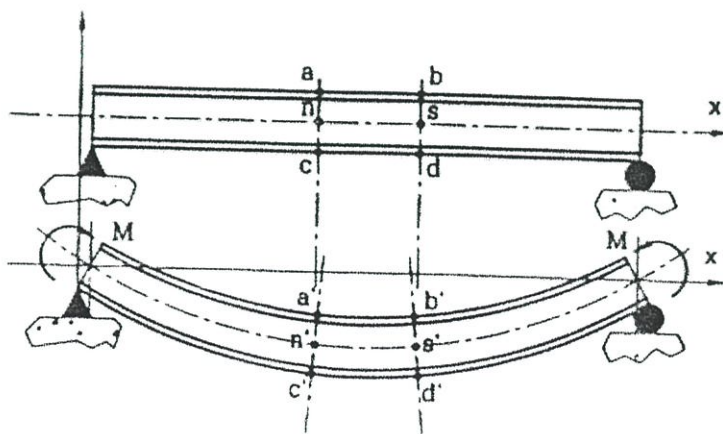
สำหรับการหาค่าความเค้นและความเครียดในแนวแกน อันเนื่องมาจากโมเมนต์ดัดภายใน (M) ที่กระทำกับหน้าตัดคาน สามารถแสดงดังในรูปที่ 4.6 จากรูปเป็นการวิเคราะห์เพื่อที่หาความสัมพันธ์ของค่าความเค้นกับความเครียดที่เกิดบนวัสดุเนื้อเดียว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะได้สมการเพื่อใช้หาค่าความเค้นในแนวตั้งฉาก (normal stress) และได้ค่ารัศมีการโค้งของคาน (radius of curvature) โดยการพิจารณาค่าของความเค้นนั้น



รูปที่ 4.6 แสดงคานที่รับโมเมนต์ดัด

การหาค่าความเครียดในคานเริ่มจากการพิจารณาโมเมนต์ดัดในคานที่ทำจากวัสดุเนื้อเดียวกันตลอด แรงรวมที่กระทำต่อคานจะไม่พิจารณาแรงบิด จะพิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำในแนวของแกนหลัก ซึ่งก็คือแกนที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางของคาน ตั้งฉากซึ่งกันและกันในแนวของหน้าตัด

เพื่อช่วยต่อการสังเกตคานหลังจากรับแรงดัด สมมติให้ลากเส้นบนคานคือ เส้น  $ab$  และเส้น  $cd$  ตามแนวแกน (แกน  $x$ ) ของคาน และ  $ns$  เป็นแกนหลัก เมื่อคานได้รับแรงดัด เส้น  $ab$  และ  $cd$  จะเปลี่ยนเป็น  $a'b'$  และ  $c'd'$  ส่วน  $ns$  จะคงเดิม แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 คานเกิดการโค้งเนื่องจากโมเมนต์ดัด

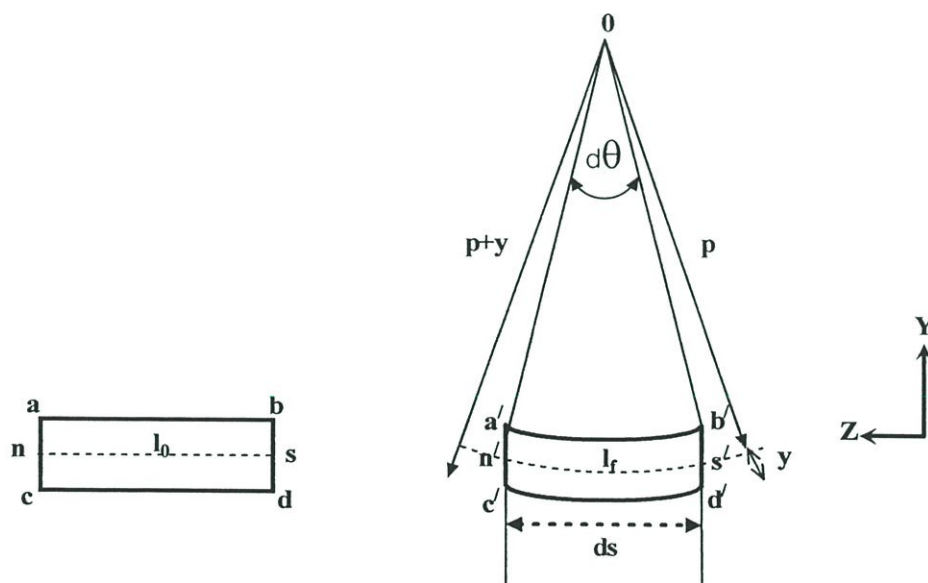
หากมีการเขียนเส้นตาราง (grid) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคานจะเห็นว่าช่องสี่เหลี่ยมเหนือแกนหลักจะหดตัว แสดงว่ารับแรงอัด ส่วนช่องสี่เหลี่ยมด้านล่างจะยืดตัว แสดงว่ารับแรงดึง ส่วนตรงแกนหลักจะมีความยาวคงที่เนื่องจากแรงเป็นศูนย์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



(ก) คานก่อนรับโมเมนต์

(ข) คานหลังรับโมเมนต์

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงรูปของคาน



(ก) คานก่อนรับโมเมนต์

(ข) คานหลังรับโมเมนต์

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงรูปของคาน

พิจารณารูปร่างการโค้งของคานหลังจากรับแรงดัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 เมื่อจุด 0 เป็นจุดศูนย์กลางของการโค้ง มีรัศมีการโค้ง  $p$  วัดจากจุด 0 มายังแกนหลัก แล้วจะได้มุมระหว่างเส้นรัศมีเป็น  $d\theta$  และกำหนดให้  $ds$  เท่ากับระยะบนแนวแกน  $x$  ใดๆ มีขนาดเท่ากับ  $ab, cd$  เมื่อ  $ds = (pd\theta)$  สามารถหาค่าความเครียดตามแนวแกน  $x$  จากความสัมพันธ์

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.9 จะได้ความสัมพันธ์ของส่วนโค้งที่ตำแหน่งใดๆ เมื่อวัดระยะ  $y$  ลงไป

$$l_f = (p + y)d\theta \quad (4.2)$$

และ

$$l_o = ns = n's' = ds = pd\theta \quad (4.3)$$

แทนสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.1) จะได้

$$\varepsilon = \frac{(p + y)d\theta - pd\theta}{pd\theta} = \frac{y}{p} \quad (4.4)$$

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ของความเค้นดัดและโมเมนต์ เริ่มจากเมื่อคานรับโมเมนต์ดัดก่อให้เกิดความเครียดในแนวแกน  $x$  ซึ่งสามารถหาความเค้นในแนวแกน  $x$  ได้จากความสัมพันธ์ตามกฎของฮุกคือ

$$\sigma = E\varepsilon = E\left(\frac{y}{p}\right) \quad (4.5)$$

เมื่อ

$\sigma$  = ความเค้น

$E$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น

$\varepsilon$  = ความเครียด

$y$  = ส่วนโค้งที่ตำแหน่งใดๆ เมื่อวัดระยะ  $y$  ลงไป

$p$  = รัศมีของการโค้ง

พิจารณาพื้นที่  $dA$  เล็กๆ บนหน้าตัดใดๆ ของคาน ซึ่งอยู่ห่างจากแกนหลักของหน้าตัดเป็นระยะ  $y$  ซึ่งผลบวกของแรงภายในเท่ากับศูนย์

$$\sum F_x = 0 \quad (4.6)$$

และแรง  $dF$  บนพื้นที่  $dA$  ก่อให้เกิดโมเมนต์ของแกนรอบแกนหลัก

$$dM = ydF = y\sigma dA \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.5) แทนค่า  $\sigma = E\left(\frac{y}{p}\right)$  ลงไปในสมการ (4.7) จะได้

$$dM = yE\left(\frac{y}{p}\right)dA \quad (4.8)$$

สุดท้ายจะได้ค่าโมเมนต์เท่ากับ

$$M = \int_A y\sigma dA = \frac{E}{p} \int_A y^2 dA \quad (4.9)$$

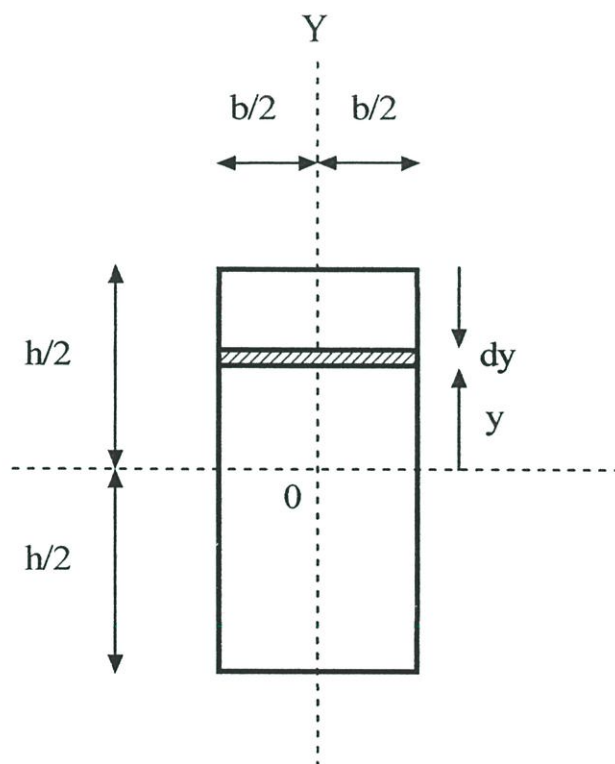
แทนค่า  $I = \int_A y^2 dA$  เมื่อ  $I$  คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหลักของหน้าตัดนั้น แทนลงในสมการที่ (4.9) จะได้

$$M = \frac{EI}{p} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.5) ได้ความสัมพันธ์  $\frac{\sigma}{y} = \frac{E}{\rho}$  แทนค่าลงในสมการที่ (4.10) จะได้สมการ  
ความเค้นดัดเท่ากับ

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (4.11)$$

ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของวัสดุทดสอบที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง  $b$  ยาว  $L$  หนา  $d$  แสดง  
ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงส่วนเล็ก ๆ ของสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา  $dy$

เมื่อ  $dA = bdy$  จะได้โมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ

$$I = \int y^2 dA = \int_{-d/2}^{d/2} by^2 dy = \frac{by^3}{3} \Big|_{-d/2}^{d/2} \quad (4.12)$$

$$I = \frac{bd^3}{12} \quad (4.13)$$

พิจารณาแรงดัดที่กระทำกับวัสดุทดสอบ เมื่อ  $P$  คือแรงกดที่กระทำกับคาน และ  $L$  คือระยะกว้างของฐานรองรับ

$$\Sigma M = 0 \quad (4.14)$$

$$M = \frac{PL}{4} \quad (4.15)$$

แทนค่าสมการที่ (4.13) และ (4.15) ลงในสมการที่ (4.11) จะได้ค่าความเค้นแรงดัดเท่ากับ

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^3} \quad (4.16)$$

ตามปกติค่าความโค้ง  $\frac{1}{p}$  ที่คำนวณได้จะเท่ากับ

$$\frac{1}{p} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (4.17)$$

แต่เนื่องจาก  $\frac{dy}{dx}$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้นยกกำลังสองของ  $\frac{dy}{dx}$  ยังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ 1 จึงได้

ค่า  $\frac{1}{p}$  โดยประมาณเป็น

$$\frac{1}{p} = \frac{d^2 y}{dx^2} = y'' \quad (4.18)$$

แทนค่าสมการ (4.18) ลงในสมการ  $\frac{1}{p} = \frac{M}{EI}$  จะได้

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M = Ely'' \quad (4.19)$$

แทนค่า  $M = \frac{PL}{4}$ ,  $l = \frac{bd^3}{12}$  และแทน  $x = L$  ลงในสมการที่ (4.19) จะได้

$$E = \frac{PL^3}{4ybd^3} \quad (4.20)$$

ให้  $m = \frac{P}{y}$  เป็นความชันของกราฟ สุดท้ายจะได้สมการค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ

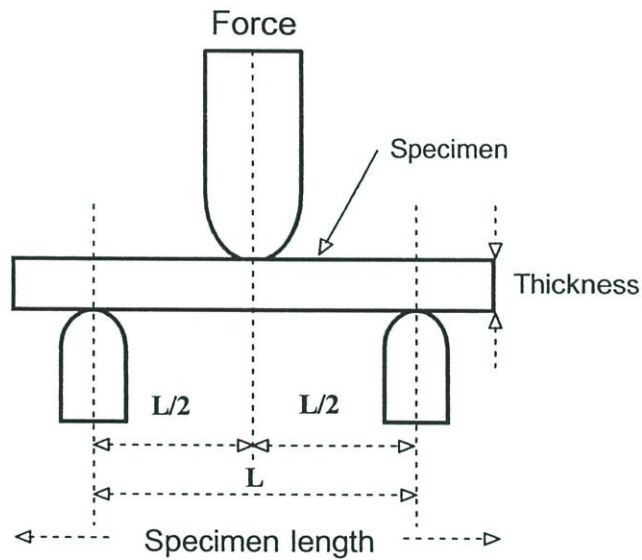
$$E = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (4.21)$$

จากทั้งหมดที่แสดงมาจะเห็นได้ว่าในการหาค่าความเค้นแรงดัดหรือค่าความต้านทานแรงดัดสามารถหาได้จากสมการที่ (4.16) ซึ่งค่าความต้านทานแรงดัดจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นพลาสติกกับแรงดัดที่กดลงจนแผ่นพลาสติกหัก ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถหาได้จากสมการที่ (4.21) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นพลาสติก และค่าความสัมพันธ์ความชันของกราฟระหว่างแรงที่กดลงต่อระยะของแผ่นพลาสติกที่โก่งโค้ง ดังนั้นในการทดสอบสมบัติ ความแข็งแรงดัด จึงสามารถหาค่าความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้

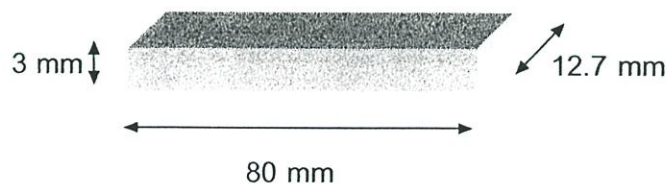
### 4.3 การทดสอบพลาสติกชนิดแผ่นด้วยวิธีการดัดโค้งตามมาตรฐาน

#### ASTM D 790

การทดสอบพลาสติกตามมาตรฐาน ASTM D 790 เป็นการทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติกชนิดแผ่นด้วยวิธีการดัดโค้ง ค่าที่ได้จากการทดสอบได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น , ค่าความเค้นหรือค่าความต้านทานแรงดัด วิธีการทดสอบใช้แรงกดดัดโค้งแผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกหัก จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำบนแผ่นพลาสติกต่อพื้นที่ และระยะดัดของแผ่นพลาสติกที่โค้งลง โดยการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11 ขนาดของแผ่นพลาสติกที่ทดสอบมีความกว้าง 12.7 mm ความยาว 80 mm ความหนา 3 mm แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบแผ่นพลาสติกด้วยวิธีการดัดโค้ง



รูปที่ 4.12 แสดงขนาดของแผ่นพลาสติกที่ทดสอบ

จากรูปที่ 4.12 แสดงขนาดของแผ่นพลาสติกที่ทดสอบ กำหนดให้แผ่นพลาสติกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 12.7 mm หนา 3 mm ยาว 80 mm ระยะกว้างของฐานรองรับ 40 mm ซึ่งมีขนาดเป็น 16 เท่าของความหนาแผ่นพลาสติก การทดสอบใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) แสดงได้ดังรูปที่ 4.13 วางแผ่นพลาสติกบนฐานรองรับ ใช้แรง 3000 N กดลงตรงกลางแผ่นพลาสติกด้วยอัตราเร็ว 5 mm/min จนแผ่นพลาสติกหัก สามารถอ่านผลลัพธ์แรงกดลงที่ระยะตัดต่าง ๆ ถึงแรงมากที่สุดจนแผ่นพลาสติกหักได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่กับเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล



รูปที่ 4.13 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

ผลการทดสอบด้วยวิธีการตัดโค้งจะได้ค่าที่ต้องการมาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดัดซึ่งเท่ากับสมการที่ (4.22) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหรือโมดูลัสยืดหยุ่นแรงดัดเท่ากับสมการที่ (4.23) ดังนี้

$$\sigma_F = \frac{3PL}{2bd^3} \quad (4.22)$$

$$E_F = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (4.23)$$

เมื่อ

$\sigma_F$  = ความเค้นหรือความต้านทานแรงดัด (Stress หรือ Flexural Stress,  $N/mm^2$ )

$P$  = แรงกดที่กระทำกับแผ่นพลาสติก (N)

$b$  = ความกว้างของแผ่นพลาสติก (mm)

$d$  = ความหนาของแผ่นพลาสติก (mm)

$L$  = ระยะกว้างของฐานรองรับ (mm)

$E_F$  = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหรือโมดูลัสยืดหยุ่นแรงดัด (Modulus of elasticity หรือ Flexural Modulus,  $N/mm^2$ )

$m = \frac{P}{y}$  เป็นความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดกับระยะดัดโค้งของแผ่นพลาสติก

$y$  = ระยะดัดโค้ง (mm)

## บทที่ 5

### การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

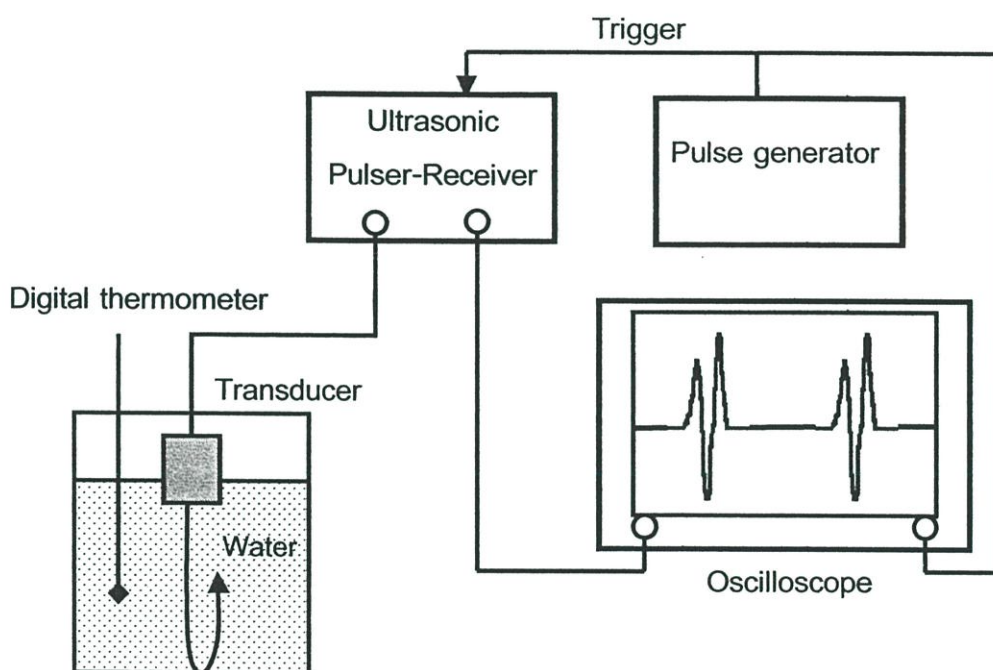
ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง ในการทดลองวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถพิจารณา การทดลองแบ่งออกเป็นสามส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทดลองวัดประสิทธิภาพของ การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ว่ามีความแม่นยำและ ความถูกต้องเท่าใด ในส่วนที่สองเป็นการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหา สมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิค โดยการทดลองใช้ตัวคลัมปลิงที่เหมาะสม การปรับ อัตราขยายของเครื่องพัลเซอร์และตัวรับ การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติก อะคริลิคที่ระดับความหนาและขนาดต่าง ๆ กัน การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง พลาสติกอะคริลิคที่ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 60-100 °C ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกตามยาว และตามขวางที่ได้จากการทดลอง สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด ต่าง ๆ กับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นได้ และสุดท้ายส่วนที่สามเป็นการทดสอบแบบทำลายวัดค่าสมบัติ ยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยวิธีการดัดโค้ง ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติยืดหยุ่นของ พลาสติกอะคริลิคด้วยคลื่นอัลตราโซนิก จะสามารถนำมาเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบทำลาย ด้วยวิธีการดัดโค้งได้

#### 5.1 การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ ซ้อนทับในตัวกลางของเหลวและของแข็ง

ในการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับในตัวกลางของเหลว และของแข็ง เป็นการทดลองเพื่อทดสอบระบบการวัดความเร็วคลื่นด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ ซ้อนทับว่ามีความแม่นยำ และค่าความเร็วที่วัดได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุตัวกลางทดสอบที่ ทราบค่าเท่าใด สามารถแบ่งการทดลองได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองวัดความเร็วคลื่น อัลตราโซนิกในน้ำ เนื่องจากน้ำมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ทำให้ความเร็วคลื่นเสียงเปลี่ยนไป ดังนั้นในการทดสอบจึงสามารถหาค่าความแม่นยำและความถูกต้องของระบบการวัดที่จัดขึ้นได้ ในส่วนที่สองเป็นการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในวัสดุของแข็งมี อะลูมิเนียม เหล็ก

กระจก และสเตนเลส นำค่าความเร็วที่ทราบค่าของวัสดุเหล่านี้เปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นที่วัดได้จากระบบการวัด โดยในรายละเอียดของการทดลองมีดังต่อไปนี้

การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคในตัวกลางด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ในตัวกลางน้ำ สามารถจัดระบบการวัดได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วย เครื่องพัลเซอร์และตัวรับ, ทรานสดิวเซอร์ แบบตัวรับตัวส่งตัวเดียวกันให้กำเนิดคลื่นตามยาวความถี่กลาง 5 MHz , ดิจิตอล ออสซิลโลสโคป ช่วงกว้างความถี่ 100 MHz , เครื่องกำเนิดพัลส์ 30 MHz และ ดิจิตอล เทอร์มิเตอร์ละเอียด 0.1 °C ในการทดลองน้ำมีความหนาแน่น 1,000 kg/m<sup>3</sup>



รูปที่ 5.1 แสดงระบบการวัดความเร็วเสียงด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับในน้ำ

เนื่องจากความเร็วคลื่นเสียงในน้ำจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังสมการที่ 5.1 โดยที่  $V$  เป็นความเร็วเสียงในน้ำ (m/s) และ  $T$  เป็นอุณหภูมิ (°C)

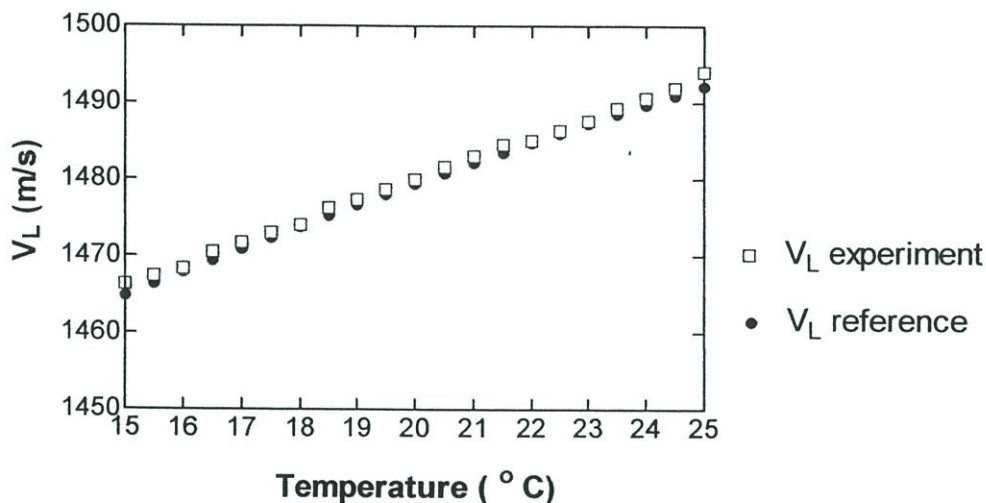
$$V = 1410 + 4.2T - 0.037T^2 \quad (5.1)$$

ในการทดลองเพื่อทดสอบศักยภาพของระบบการวัด จึงได้ทดลองวัดความเร็วของคลื่นเสียงในน้ำ ที่อุณหภูมิระหว่าง 15-25 °C ระดับน้ำ 30 mm ทำการทดลองวัดความเร็วของคลื่นเสียงในแต่ละอุณหภูมิจำนวน 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถแสดงได้จากตารางที่ 5.1 และกราฟรูปที่ 5.2 กำหนดให้  $T$  คืออุณหภูมิของน้ำ

$V_L$  (avg) คือความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวที่ได้จากการทดลอง  $V_{L \text{ reference}}$  คือความเร็วของคลื่นตามยาวที่คำนวณได้จากสมการที่ 5.1 ส่วน SD (Standard Deviative) คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ Percentage Error คือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทดลอง

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองการวัดความเร็วเสียงในน้ำที่อุณหภูมิ 15-25 °C

T (°C)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_{L \text{ reference}}$ (m/s)	SD	Percentage error (%)
15.0	1,466.33	1,464.83	0.035	0.10
15.5	1,467.38	1,466.37	0.051	0.07
16.0	1,468.35	1,467.89	0.052	0.03
16.5	1,470.53	1,469.39	0.038	0.08
17.0	1,471.74	1,470.88	0.042	0.06
17.5	1,473.01	1,472.34	0.047	0.05
18.0	1,474.01	1,473.79	0.041	0.02
18.5	1,476.26	1,475.22	0.078	0.07
19.0	1,477.36	1,476.63	0.047	0.05
19.5	1,478.70	1,478.03	0.036	0.05
20.0	1,479.98	1,479.40	0.045	0.04
20.5	1,481.62	1,480.76	0.035	0.06
21.0	1,483.02	1,482.09	0.036	0.06
21.5	1,484.52	1,483.41	0.034	0.07
22.0	1,485.08	1,484.71	0.040	0.02
22.5	1,486.37	1,485.99	0.030	0.03
23.0	1,487.64	1,487.26	0.043	0.03
23.5	1,489.30	1,488.50	0.040	0.05
24.0	1,490.62	1,489.73	0.038	0.06
24.5	1,491.93	1,490.94	0.040	0.07
25.0	1,494.08	1,492.13	0.044	0.13



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าความเร็วเสียงในน้ำที่ได้จากการทดลองและจากทฤษฎี

จากผลการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำในการวัดคิดเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าที่ได้น้อยกว่า 0.052 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นเสียงที่คำนวณจากทฤษฎีสมการที่ 5.1 ค่าความถูกต้องที่ได้คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 0.13 %

จากการทดลองข้างต้นเป็นการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางของเหลว สำหรับการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางของแข็ง สามารถจัดระบบการวัดคล้ายกับการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำ ซึ่งอุปกรณ์ประกอบด้วย เครื่องพัลเซอร์และตัวรับ , ทรานสดิวเซอร์ 2 ตัว เป็นแบบตัวรับตัวส่งตัวเดียวกันให้กำเนิดคลื่นตามยาวความถี่กลาง 5 MHz และคลื่นตามขวางความถี่กลาง 5 MHz , ดิจิตอลออสซิลอสโคปช่วงกว้างความถี่ 100 MHz , เครื่องกำเนิดพัลส์ 30 MHz ตัวคลัปปลิงใช้น้ำผึ้งเป็นตัวช่วยส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในตัวกลางของแข็ง

วัสดุของแข็งที่ทดสอบมี อะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส ได้ทำ การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในวัสดุของแข็งที่อุณหภูมิ 27 °C แต่ละชิ้นวัดเป็นจำนวน 10 ครั้ง แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นที่วัดได้ โดยความหนาและความหนาแน่นวัสดุของแข็งแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 ส่วนผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3-5.7 สำหรับค่าที่แสดงในตาราง  $V_L$  เป็นความเร็วของคลื่นตามยาวและ  $V_S$  เป็นความเร็วของคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็งตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 แสดงความหนาและความหนาแน่นของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุลำดับที่	ชนิดวัสดุของแข็ง	ความหนาเฉลี่ย (mm)	ความหนาแน่นเฉลี่ย ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )
1	อะลูมิเนียม	4.41	2.309
2	เหล็ก	24.98	7.606
3	กระจก	4.95	2.435
4	สแตนเลส	34.31	7.900

จากการทดลองสามารถที่จะสรุปความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและตามขวางที่เคลื่อนที่ในวัสดุของแข็งคือ อะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส ได้ดังตารางที่ 5.3 โดยค่าความเร็วคลื่นตามยาวและตามขวางของวัสดุอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส ที่ทราบค่าจากหนังสืออ้างอิง [2] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.4

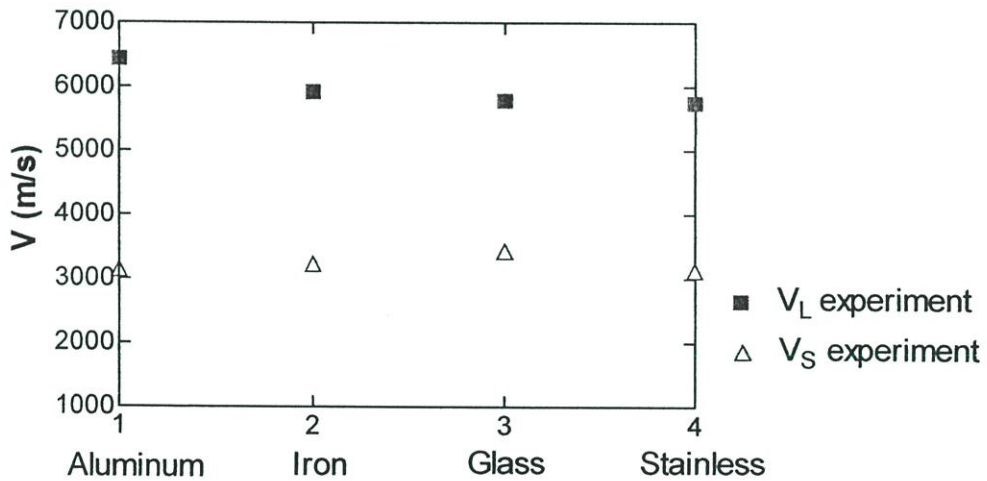
ตารางที่ 5.3 แสดงความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและตามขวางจากการทดลองของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส

วัสดุลำดับที่	ชนิดวัสดุของแข็ง	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$V_S / V_L$	SD $V_L$	SD $V_S$
1	อะลูมิเนียม	6,440.02	3,147.17	0.49	0.40	0.10
2	เหล็ก	5,925.28	3,238.35	0.55	0.10	0.02
3	กระจก	5,792.79	3,436.49	0.59	0.05	0.01
4	สแตนเลส	5,751.48	3,131.59	0.54	0.09	0.02

ตารางที่ 5.4 แสดงความเร็วของคลื่นตามยาวและตามขวางที่ทราบค่าของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส

วัสดุลำดับที่	ชนิดวัสดุของแข็ง	ความหนาแน่น ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )	$V_L$ (m/s)	$V_S$ (m/s)
1	อะลูมิเนียม	2.700	6,320	3,130
2	เหล็ก	7.700	5,900	3,230
3	กระจก	2.510	5,770	3,430
4	สแตนเลส	7.910	5,740	3,090

จากผลการทดลองสามารถเขียนกราฟแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส ดังกราฟรูปที่ 5.3 กำหนดให้  $V_{L \text{ experiment}}$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาว  $V_{S \text{ experiment}}$  เป็นความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามขวางจากการทดลอง



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของอะลูมิเนียม เหล็ก กระจก และสแตนเลส

จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของอะลูมิเนียมมีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นเหล็ก กระชก และ สเตนเลส โดยค่าความเร็วคลื่นตามยาวของวัสดุทั้ง 4 ชนิดจะมีค่ามากกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของคลื่นตามขวาง ผลการทดลองวัดความเร็วคลื่นที่ได้มีความแม่นยำในการวัดคิดเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 0.4 ค่าความเร็วเฉลี่ยทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางจากการทดลองมีแนวโน้มเดียวกับค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่ทราบค่า ทั้งนี้ค่าความเร็วคลื่นจะไม่เท่ากันโดยตรงเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองมีค่าความหนาแน่นไม่ตรงกัน

ค่าความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวกลางนั้น ดังนั้นวิธีการวัดความเร็วเสียงเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำและถูกต้องจึงมีความสำคัญต่อระบบการวัดที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิก ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลางด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถวัดความเร็วเสียงได้อย่างแม่นยำ โดยอาศัยสมบัติการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ไปชนรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์เสียงแตกต่างกัน คาบเวลาที่ใช้หาความเร็วเสียงเป็นคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปกลับในตัวกลาง สามารถวัดได้จากคาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้นและพัลส์สะท้อนกลับ โดยการปรับฐานเวลาอัตราการกระตุ้น เพื่อให้สัญญาณพัลส์ที่ได้เลือกไว้ซ้อนทับกันแล้วจะได้คาบเวลาที่ต้องการมาใช้ในการคำนวณหาความเร็วคลื่น

## 5.2 การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหาสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก

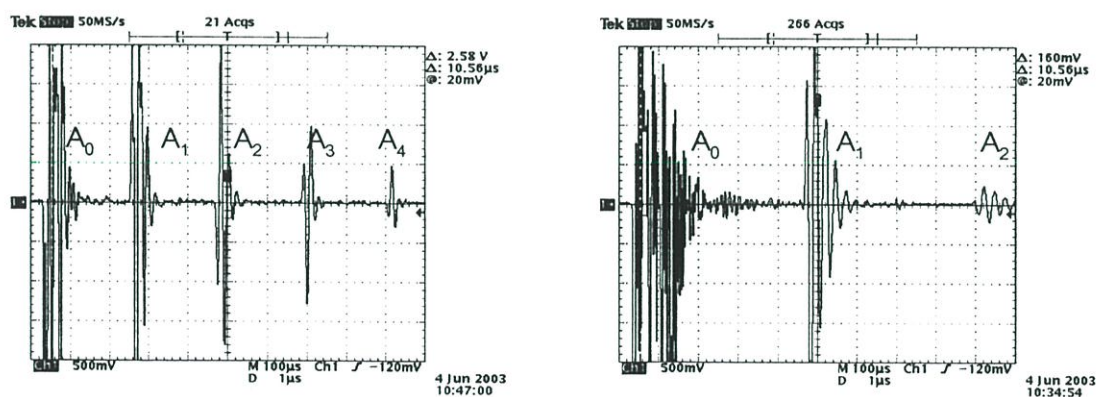
สำหรับในหัวข้อนี้เป็นการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหาสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก โดยรายละเอียดสามารถแบ่งเป็นส่วนได้แก่ ตัวคลิปปลิงที่เหมาะสมต่อการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก อัตราขยายของเครื่องพัลเซอร์และตัวรับที่เหมาะสมในการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ระดับความหนาและขนาดแตกต่างกัน ค่าความต้านทานแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกจากระบบการวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ผลการทดลองในแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

## 5.21 ตัวคลีปปลิงที่เหมาะสมต่อการวัดความเร็วคลื่นอัตราไซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิก

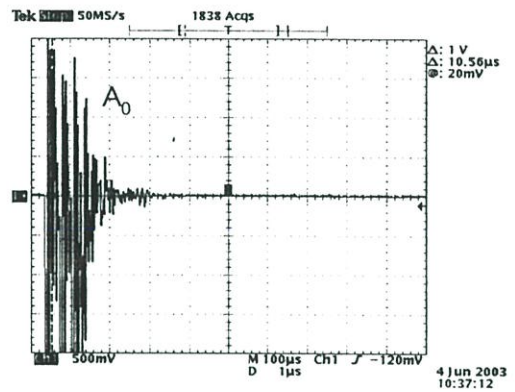
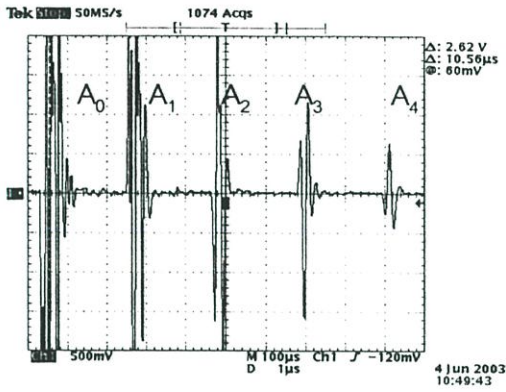
ตัวคลีปปลิงเป็นตัวช่วยส่งผ่านคลื่นอัตราไซนิกให้เคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่ต้องการทดสอบได้ง่าย สำหรับในการทดลองนี้ได้ทดลองใช้ตัวคลีปปลิง น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ เพื่อทดสอบว่าตัวคลีปปลิงชนิดใดสามารถส่งผ่านคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางเข้าไปในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกได้ดี

การทดลองเป็นการทดสอบคลีปปลิงแบบสัมผัส หัวโพรบอัตราไซนิกจะแตะแนบกับพื้นผิวพลาสติกอะคริลิกที่ต้องการตรวจสอบ โดยมีตัวคลีปปลิงกันอยู่ตรงกลาง หัวโพรบจะถูกกดลงเพื่อลดความหนาของตัวคลีปปลิงให้บางที่สุด โดยความหนาของตัวคลีปปลิงจะต้องน้อยกว่าอัตราส่วนสองเท่าความเร็วคลื่นในตัวกลางคลีปปลิงหารด้วยความถี่สูงสุดของหัวโพรบอัตราไซนิกตามสมการที่ 3.11 ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

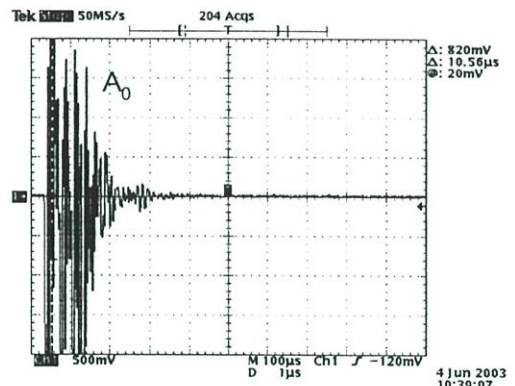
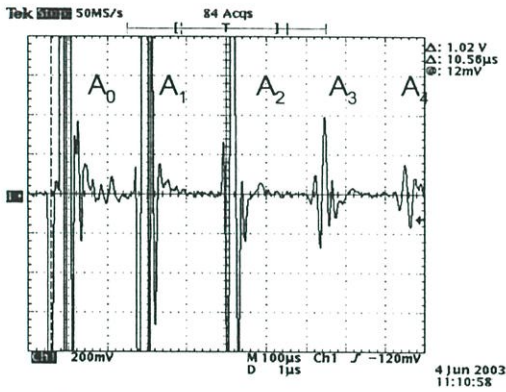
ผลการทดลองวัดสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ โดยใช้ตัวคลีปปลิงเป็น น้ำผึ้ง กลีเซอริน น้ำ และอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4-5.7 เมื่อตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ทดสอบมีความหนา 3.041 mm ความหนาแน่น 1180 kg/m<sup>3</sup> ทดลองที่อุณหภูมิ 27 °C เมื่อ A<sub>0</sub> คือสัญญาณพัลส์กระตุ้น A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> และ A<sub>4</sub> คือสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับลำดับที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ



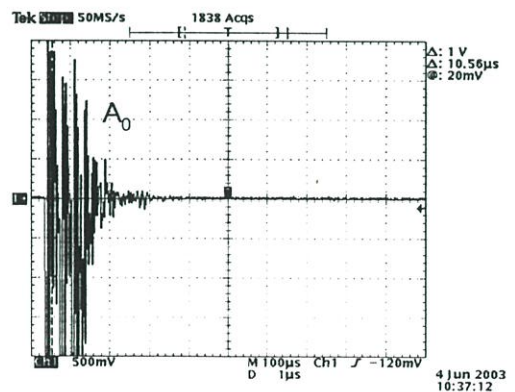
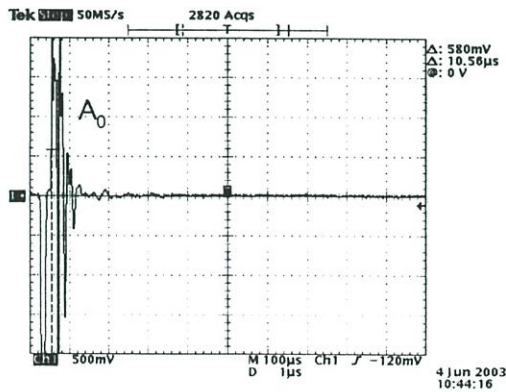
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อใช้ตัวคลีปปลิงเป็นน้ำผึ้ง



รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อให้ตัวคลื่นปลิงเป็นน้ำมันซิลิโคน

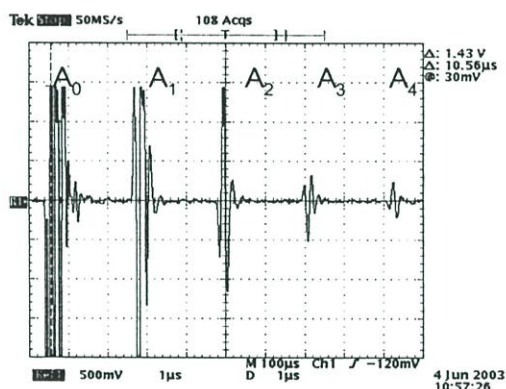


รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อให้ตัวคลื่นปลิงเป็นน้ำ

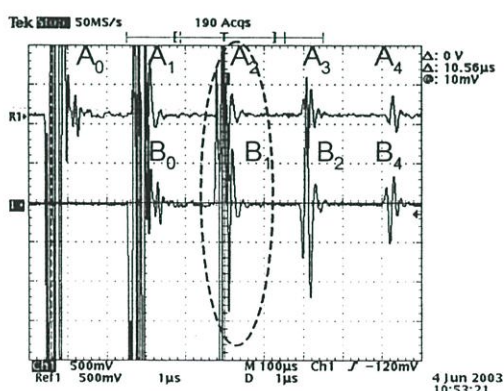


รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่อให้ตัวคลื่นปลิงเป็นอากาศ

การวัดความเร็วของคลื่นอัตราไซนิกในตัวกลางวัสดุทดสอบด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ ซ้อนทับ สามารถตัดปัญหาเรื่องความหนาของตัวคลีปลิงที่มีผลต่อการวัดความเร็วคลื่นได้โดย การใช้ช่วงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับตั้งแต่  $A_1$  เป็นต้นไป เพราะช่วงระหว่าง  $A_0$  ถึง  $A_1$  คือช่วง คลื่นอัตราไซนิกออกจากหัวโพรบผ่านตัวคลีปลิงแล้วผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางที่ทดสอบ ซึ่งอาจ มีผลกระทบจากชั้นความหนาของตัวคลีปลิงได้ การทดลองการวัดความเร็วของคลื่นจึงใช้ สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_1$  เป็นจุดเริ่มต้น แล้วปรับเครื่องกำเนิดพัลส์ให้สัญญาณอัตราการ กระตุ้นลดลง เพื่อให้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $B_1$  ซ้อนทับกับสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_2$  แล้วจะได้ระยะเวลาของอัตราการกระตุ้นระหว่าง  $A_1$  กับ  $A_2$  ก็คือคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไป กลับในตัวกลาง ดังนั้นค่าความเร็วของคลื่นเสียงจะสามารถคำนวณหาค่าได้ ตัวอย่างรูป การทดลองวัดความเร็วคลื่นตามยาวในแผ่นพลาสติกอะคริลิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ ซ้อน ทับแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 และ 5.9



รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_0$  ถึง  $A_1$  ในตัวกลางพลาสติกอะคริลิก



รูปที่ 5.9 แสดงการเลือกสัญญาณให้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $B_1$  ซ้อนทับกับสัญญาณพัลส์ สะท้อนกลับ  $A_2$

ผลการทดลองการวัดความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกมีความหนาเฉลี่ย 3.041 mm ใช้ตัวคลัปปลิงเป็น น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ ทำการทดลองวัดเป็นจำนวน 10 ครั้ง แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นที่วัดได้ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.5 โดยที่ค่าความหนาแน่น ความเร็วคลื่นตามยาวในตัวกลางของน้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ แสดงได้ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ใช้ตัวคลัปปลิง น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ

ตัวคลัปปลิง	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
น้ำผึ้ง	2,586.35	1,339.06
น้ำมันซิลิโคน	2,586.40	ไม่สามารถวัดได้
น้ำ	2,586.01	ไม่สามารถวัดได้
อากาศ	ไม่สามารถวัดได้	ไม่สามารถวัดได้

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความหนาแน่น ความเร็วคลื่นตามยาวในตัวกลาง น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ

ตัวคลัปปลิง	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	$V_L$ (m/s)
น้ำผึ้ง	1,420	2,030
น้ำมันซิลิโคน	818	960
น้ำ	1,000	1,497
อากาศ	1.21	340

จากการทดลองใช้ตัวคลัปปลิงเป็น น้ำผึ้ง น้ำมันซิลิโคน น้ำ และอากาศ เพื่อทดสอบว่าตัวคลัปปลิงชนิดไหนสามารถส่งผ่านคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางเข้าไปในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกได้ดี ผลการทดลองจะเห็นได้ว่ามีเฉพาะน้ำผึ้งเท่านั้นที่สามารถส่งผ่านทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางได้ ส่วนตัวคลัปปลิงที่เป็นน้ำมันซิลิโคน และน้ำส่งผ่านได้เฉพาะคลื่นตามยาว

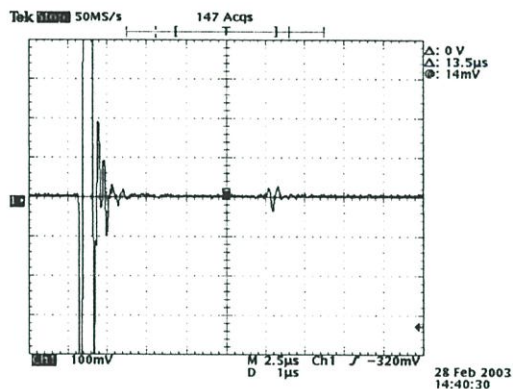
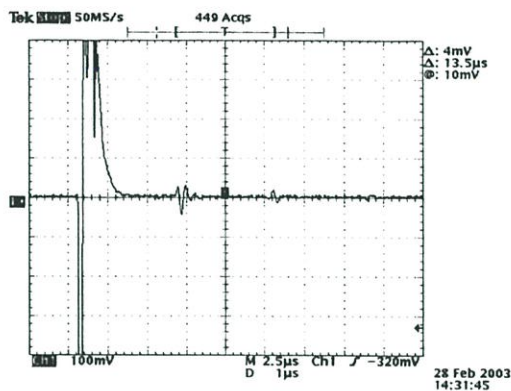
และคลื่นตามขวางได้ ส่วนตัวคลื่นปัลลิ่งที่เป็นน้ำมันซิลิโคน และน้ำส่งผ่านได้เฉพาะคลื่นตามยาว ตัวคลื่นปัลลิ่งเป็นอากาศไม่สามารถส่งผ่านได้ทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง การส่งผ่านคลื่นตามขวางจะทำได้ยากกว่าคลื่นตามยาว เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค คลื่นตามขวางสามารถส่งผ่านได้เฉพาะในวัสดุของแข็ง ฉะนั้นตัวคลื่นปัลลิ่งที่ส่งผ่านคลื่นตามขวาง จะต้องมีความสมบัติเป็นของแข็งหรือเป็นวัสดุที่หนืดไม่เหลว การทดลองจะเห็นได้ว่าตัวคลื่นปัลลิ่งเป็นน้ำผึ้งสามารถส่งผ่านทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง เข้าไปในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกได้ดี ดังนั้นจึงใช้น้ำผึ้งเป็นตัวคลื่นปัลลิ่งในการทดลองวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก การทดลองหัวโพรบอัลตราโซนิกจะถูกกดลงเพื่อลดความหนาของตัวคลื่นปัลลิ่งให้บางที่สุด ความหนาของตัวคลื่นปัลลิ่งจะต้องน้อยกว่าอัตราส่วนสองเท่าความเร็วคลื่นในตัวกลางคลื่นปัลลิ่งหารด้วยความถี่สูงสุดของหัวโพรบอัลตราโซนิก คือต้องทาน้ำผึ้งให้หนาน้อยกว่า 0.8 mm รอเวลาประมาณ 5 นาทีเพื่อให้น้ำผึ้งแห้ง แล้วทำการวัดความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

## 5.22 อัตราขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับที่เหมาะสมในการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิก

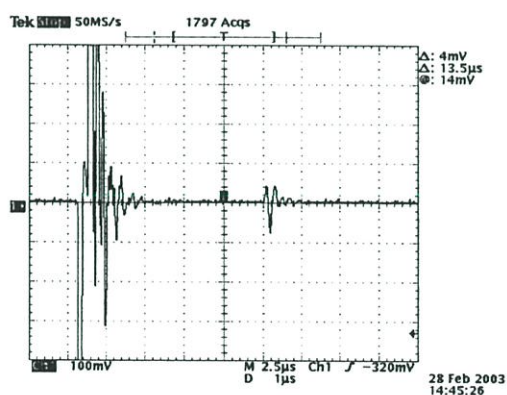
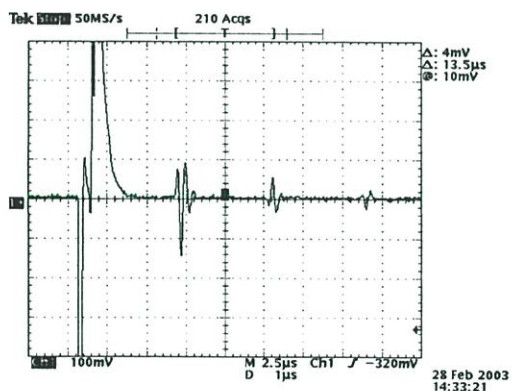
เครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เป็นของบริษัท PANAMETRICS รุ่น 5073PR พารามิเตอร์ภาครับ มีพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่เพียงพารามิเตอร์เดียว คืออัตราขยาย/อัตราการลดทอนสัญญาณ (gain) นิยมใช้หน่วยของเดซิเบล (dB) เมื่อค่าเป็นบวก (+) หมายถึงเพิ่มอัตราขยาย และเมื่อค่าเป็น (-) หมายถึงอัตราการลดทอน โดยในรุ่น 5073PR มีอัตราขยาย -49 dB ถึง +39 dB ความหมายของหน่วยเดซิเบล (dB) คืออัตราการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของสัญญาณที่ 1 (สัญญาณขาเข้า) กับสัญญาณที่ 2 (สัญญาณขาออก) เป็นไปตามดังสมการที่ 3.14

สำหรับการทดลองในวิทยานิพนธ์เป็นการวัดค่าความเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางมาใช้ในการคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก ซึ่งวิธีวัดค่าความเร็วคลื่นใช้เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ จำเป็นต้องปรับอัตราขยายให้เห็นสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับได้อย่างชัดเจน เพื่อให้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับที่เลือกไว้ซ้อนทับกัน ในการทดลองจึงเริ่มปรับอัตราขยายตั้งแต่ 10 dB - 39 dB เพื่อหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการทดลอง โดยการทดลองใช้หัวโพรบอัลตราโซนิกทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง วัสดุตัวกลางที่ใช้วัดเป็นพลาสติกอะคริลิกความหนาเฉลี่ย 3.041 mm ตัวคลื่นปัลลิ่งเป็นน้ำผึ้ง ผลการทดลองได้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับแสดงดังรูปที่ 5.10 - 5.13 ซึ่งจะเห็นว่าอัตราขยาย

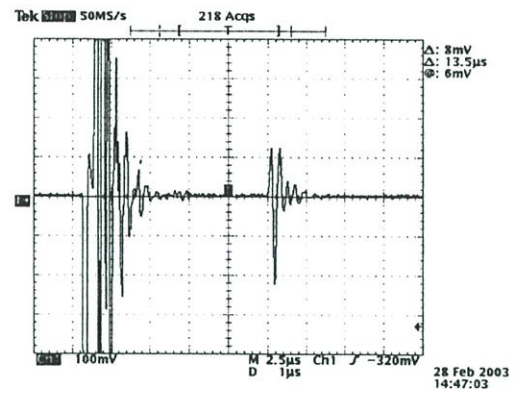
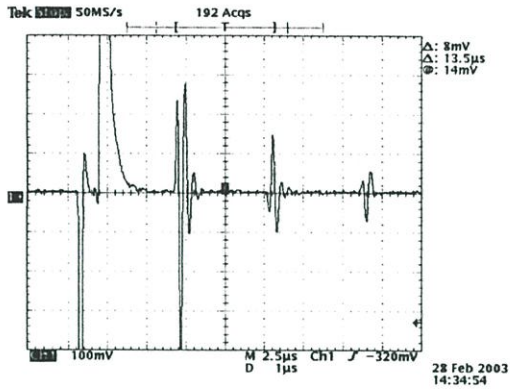
ปรับที่ 39 dB เป็นอัตราการขยายที่เหมาะสมที่สุด สามารถเห็นสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับได้ดี  
ในงานวิจัยจึงปรับอัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับให้อยู่ที่ระดับ 39 dB



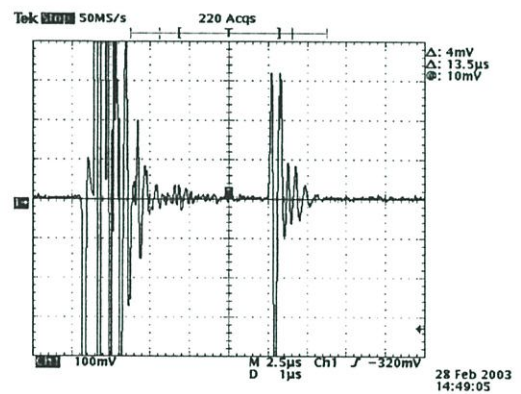
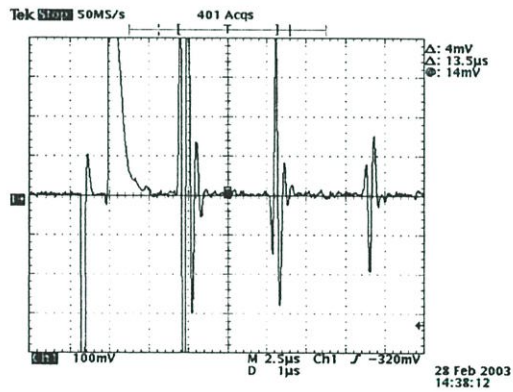
รูปที่ 5.10 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย)  
เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 10 dB



รูปที่ 5.11 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย)  
เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 20 dB



รูปที่ 5.12 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 30 dB



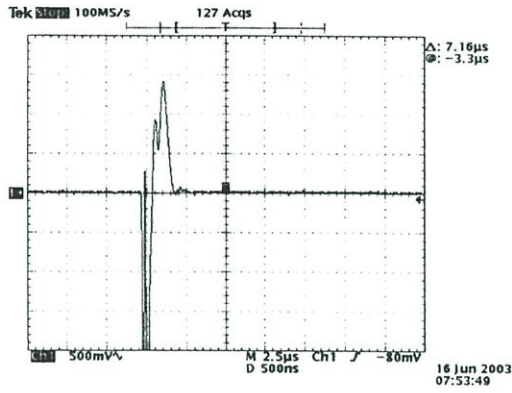
รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับของคลื่นตามยาว (ขวา) และคลื่นตามขวาง (ซ้าย) เมื่ออัตราการขยายของเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับอยู่ระดับ 39 dB

ในการหาขีดจำกัดความหนาวัสดุที่ทดสอบของการตรวจสอบวัสดุด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกแบบพัลส์สะท้อนกลับ อันเนื่องมาจากอุปกรณ์และเครื่องมือที่นำมาใช้ในระบบการวัด จากทฤษฎีในบทที่ 2 พัลส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกกระตุ้นให้สั้น จะค่อย ๆ ลดทอนกำลังลงตามเวลาและระยะทาง เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางของวัสดุที่ทดสอบจะเกิดสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ โดยแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับจะค่อย ๆ ลดทอนกำลังลงตามเวลา ช่วงเวลานี้จะสั้นหรือยาวขึ้นอยู่กับแดมปีงแฟกเตอร์ (damping factor) ของอัลตราโซนิกโพรบและเครื่องพัลส์เซอร์ที่นำมาใช้ โดยช่วงเวลานี้จะไม่สามารถตรวจสอบพัลส์ของคลื่นสะท้อนกลับลูกอื่น ๆ ได้ เรียกระยะทางช่วงนี้ว่า "เดดโซน" (dead zone) ดังนั้นเดดโซนจึงเป็นขีดจำกัดที่บอกถึงความหนาวัสดุที่จะนำมาตรวจสอบ ในงานวิจัยได้ทดลองวัดคาบเวลาเดดโซน ( $t_{dz}$ ) กับเครื่องพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR และอัลตราโซนิกโพรบคลื่นตามยาวความถี่กลาง 5 MHz ผลการทดลองวัดคาบเวลาเดดโซนกับผลของอัตราขยาย และแดมปีงแฟกเตอร์ของพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR แสดงได้ในตารางที่ 5.7 และสัญญาณเดดโซนที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราขยายพัลส์เซอร์แตกต่างกัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.14

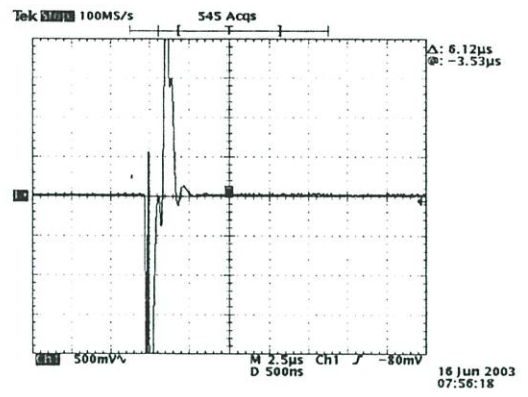
จากตัวเลขคาบเวลาเดดโซนในตารางที่ 5.7 สามารถนำไปคำนวณหาความหนาของชิ้นงานที่บางที่สุด ( $d$ ) ที่สามารถตรวจสอบด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกแบบพัลส์สะท้อนกลับ โดยแทนค่า  $t_{dz}$  และความเร็วเสียงของวัสดุแต่ละชนิด ( $V$ ) ลงในสมการ  $d = \frac{Vt_{dz}}{2}$  จะได้ความหนาของแผ่นพลาสติกอะคริลิกบางที่สุดที่สามารถตรวจสอบได้เท่ากับ 1.29 mm

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองวัดคาบเวลาเดดโซนกับผลของอัตราขยาย และแดมปีงแฟกเตอร์ของพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR

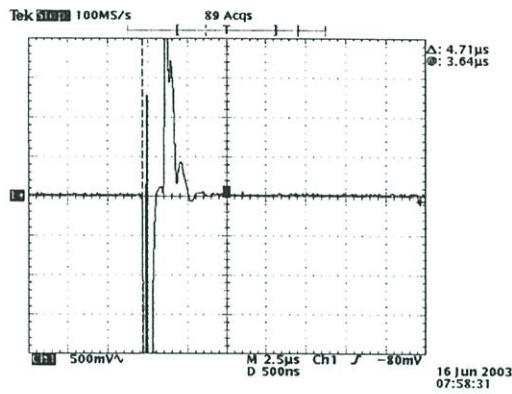
อัตราขยาย (dB)	แดมปีงแฟกเตอร์	$t_{dz}$ ( $\mu$ s)
0	2	0.43
10	2	0.58
20	2	0.58
30	2	0.88
39	2	1.00
39	3	0.93
39	4	0.93
39	5	0.92



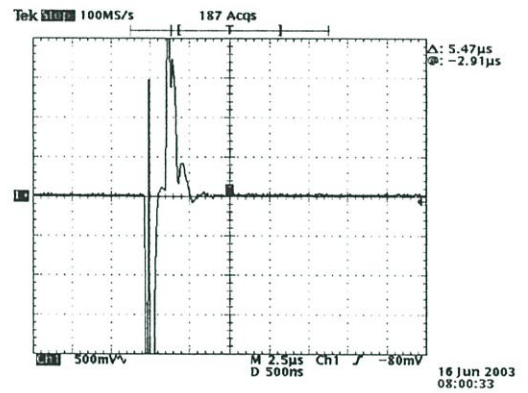
Gain = 0 dB Damping = 2



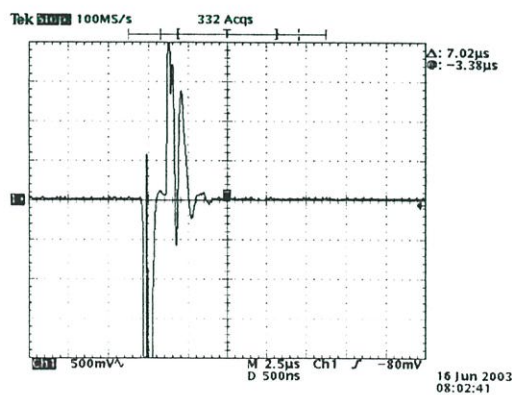
Gain = 10 dB Damping = 2



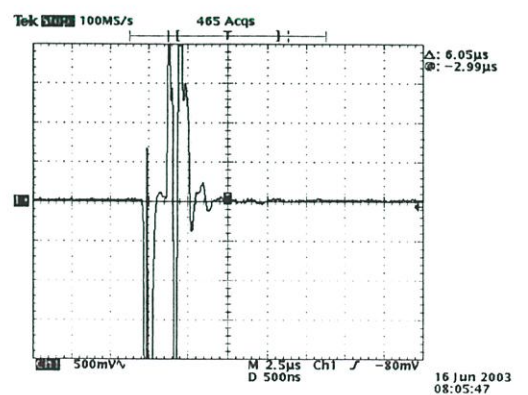
Gain = 20 dB Damping = 2



Gain = 30 dB Damping = 2



Gain = 39 dB Damping = 2

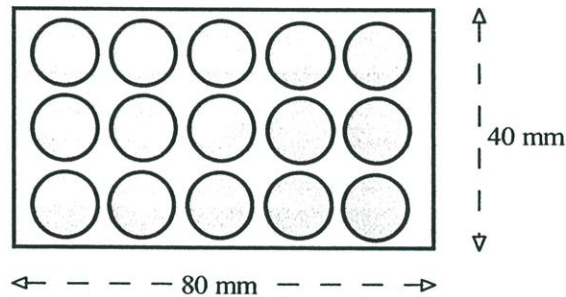


Gain = 39 dB Damping = 3

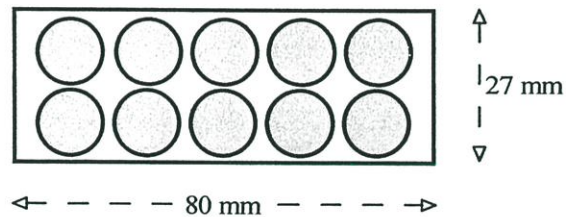
รูปที่ 5.14 สัญญาณเดคไซนที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราขยายของพัลส์เซอร์แตกต่างกัน

### 5.23 การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ระดับความหนาและขนาดแตกต่างกัน

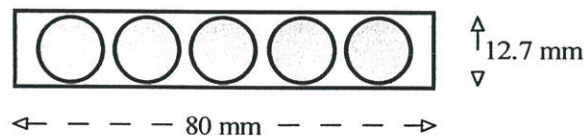
การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ระดับความหนาและขนาดแตกต่างกัน ในการทดลองใช้พลาสติกอะคริลิกใส ซึ่งจะมี 3 ความหนา คือ 3 mm 5 mm และ 10 mm แต่ละความหนาจะมี 3 ขนาดคือ กว้าง  $\times$  ยาว เท่ากับ  $40 \times 80$  mm ,  $27 \times 80$  mm  $12.7 \times 80$  mm หัวโพรบอัลตราโซนิกใช้ทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง ในการทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกที่ขนาด  $40 \times 80$  mm วางหัวโพรบวัดตามตำแหน่งดังรูป 5.15 (ก) ทั้งหมด 15 จุดทั่วทั้งแผ่น ส่วนที่ขนาด  $27 \times 80$  mm วางหัวโพรบวัดตามตำแหน่งดังรูป 5.15 (ข) ทั้งหมด 10 จุดทั่วทั้งแผ่น และสุดท้ายที่ขนาด  $12.7 \times 80$  mm ซึ่งเป็นขนาดที่จะใช้ทดลองในการทำวิจัยวางตำแหน่งดังรูป 5.15 (ค) ทั้งหมด 5 จุดทั่วทั้งแผ่น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.15 แสดงตำแหน่งการวางหัวโพรบอัลตราโซนิกสำหรับวัดความเร็วคลื่นในพลาสติกอะคริลิก

อุปกรณ์ระบบการวัดประกอบด้วยเครื่องพัลเซอร์และตัวรับ , ทรานสดิวเซอร์ 2 ตัว เป็นแบบตัวรับตัวส่งตัวเดียวกันให้กำเนิดคลื่นตามยาวความถี่กลาง 5 MHz และคลื่นตามขวาง ความถี่กลาง 5 MHz , ดิจิตอลออสซิลอสโคปช่วงกว้างความถี่ 100 MHz , เครื่องกำเนิดพัลส์ 30 MHz ตัวกลับปลิงใช้น้ำผึ้ง ทำการทดลองวัดที่อุณหภูมิ 27 °C จากผลการทดลองนำ ค่าความเร็วคลื่นแต่ละค่าที่วัดได้นำมาหาค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง ผลการทดลองค่าความเร็วคลื่นในแต่ละความหนา ในแต่ละขนาดจะมีค่าใกล้เคียงกัน

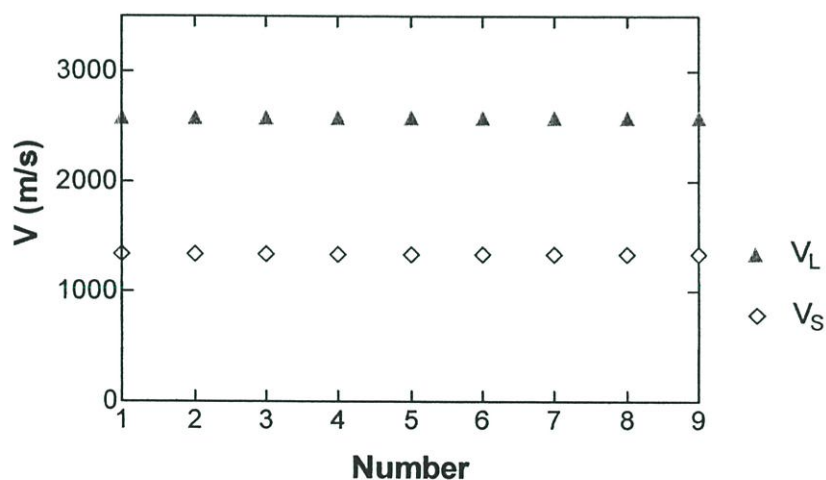
โดยผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.8 ซึ่งแสดงขนาดความหนาเฉลี่ย (d) ความกว้างเฉลี่ย (b) ความยาวเฉลี่ย (L) และความหนาแน่นเฉลี่ย ( $\rho$ ) ของพลาสติกอะคริลิกใส แต่ละแผ่นที่ทดสอบ ส่วนตารางที่ 5.9 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง ที่ระดับความหนาและขนาดแตกต่างกัน สุดท้ายจะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วคลื่นที่ระดับความหนาและขนาดต่าง ๆ ได้ดังกราฟรูปที่ 5.16

ตารางที่ 5.8 แสดงขนาดของพลาสติกอะคริลิกใส

ลำดับ ชิ้นงาน	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.041	40.01	80.10	1,180.25
2	3.041	26.90	80.06	1,180.23
3	3.041	12.83	80.07	1,180.17
4	5.052	40.03	80.05	1,180.42
5	5.052	27.01	80.07	1,180.57
6	5.052	12.84	80.10	1,180.44
7	10.039	40.05	80.09	1,181.10
8	10.039	26.80	80.04	1,180.95
9	10.039	12.70	80.01	1181.16

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใส

ลำดับ ชั้นงาน	ความหนา เฉลี่ย (mm)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	SD $V_L$	SD $V_S$
1	3.041	2.3518	4.5412	2,586.08	1,339.29	0.09	0.04
2	3.041	2.3516	4.5413	2,586.28	1,339.27	0.13	0.02
3	3.041	2.3518	4.5410	2,586.06	1,339.34	0.10	0.03
4	5.052	3.9067	7.5452	2,585.80	1,338.60	0.10	0.03
5	5.052	3.9066	7.5456	2,585.85	1,338.52	0.08	0.06
6	5.052	3.9065	7.5455	2,585.96	1,338.54	0.08	0.06
7	10.039	7.7662	15.0013	2,585.30	1,338.55	0.04	0.02
8	10.039	7.7662	15.0014	2,585.30	1,338.54	0.07	0.01
9	10.039	7.7666	15.0017	2,585.19	1,338.52	0.03	0.01



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิก  
หมายเลขชั้นงานที่ 1-9

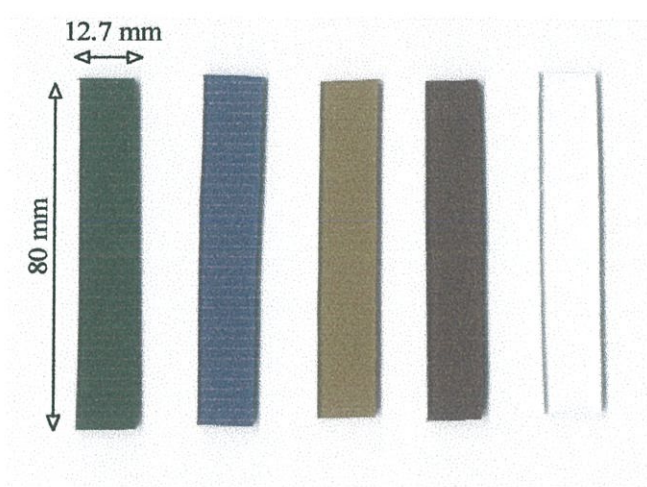
จากตารางที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าพลาสติกอะคริลิกที่มีระดับความหนาและขนาดแตกต่างกัน ค่าความเร็วคลื่นเฉลี่ยทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดน้อยกว่า 0.13 เนื่องด้วยเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ค่าความเร็วคลื่นเป็นอัตราส่วนระหว่างสองเท่าของชั้นความหนาในตัวกลางที่ทดสอบหารด้วยคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลาง โดยพลาสติกอะคริลิกที่มีความหนามากจะใช้เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลางมากกว่าพลาสติกอะคริลิกที่มีความหนาน้อย แต่เมื่อคำนวณหาความเร็วคลื่นออกมา ผลที่ได้จะมีค่าความเร็วคลื่นใกล้เคียงกัน

#### 5.24 ค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกจากระบบการวัดด้วยคลื่นอัตราไซนิค

การหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกจากระบบการวัดด้วยคลื่นอัตราไซนิคเป็นการนำค่าความเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ในพลาสติกอะคริลิกโดยวัดความเร็วคลื่นด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ นำค่าความเร็วคลื่นที่ได้มาคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นคือ ค่าความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ตามสมการที่ 2.46 และ 2.47 ตามลำดับ

ในการทดลองใช้พลาสติกอะคริลิก 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง พลาสติกแต่ละสี ได้นำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีการอบ กระทำโดยนำพลาสติกมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ คืออุณหภูมิ 60 °C , 70 °C , 80 °C , 90 °C และ 100 °C แต่ละอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที เสร็จแล้วนำออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเย็น กระบวนการให้ความร้อนแก่พลาสติกอะคริลิกทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากพันธะโควาเลนต์ ในการเกิดโครงข่ายที่แข็งแรงนั้น ต้องสลายไปหรือเกิดการไหม้เกรียม แต่ค่าของอุณหภูมิการให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงแตกต่างกันไป

ทำการทดลองวัดความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สี ที่ให้อุณหภูมิความร้อน ตั้งแต่ไม่ให้ความร้อนถึงให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C วัดความเร็วคลื่นแต่แผ่นละ 5 ตำแหน่งดังรูปที่ 5.15 (ค) แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นแต่ละแผ่น ทำการทดลองวัดที่อุณหภูมิ 27 °C ขนาดของพลาสติกที่ทดสอบมีความกว้าง 12.7 mm ความยาว 80 mm ความหนา 3 mm แสดงตัวอย่างพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงตัวอย่างแผ่นพลาสติกอะคริลิกสีเขียว สีน้ำเงิน สีส้ม สีแดง และสีขาว

โดยขนาดความหนาเฉลี่ย ( $d$ ) ความกว้างเฉลี่ย ( $b$ ) ความยาวเฉลี่ย ( $L$ ) และความหนาแน่นเฉลี่ย ( $\rho$ ) ของพลาสติกอะคริลิกแต่ละแผ่นที่ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.10–5.12 ส่วนผลการทดลองวัดค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกแต่ละแผ่น สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.13–5.39

ตารางที่ 5.10 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน  $60^{\circ}\text{C}$

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน $60^{\circ}\text{C}$			
	$d$ (mm)	$b$ (mm)	$L$ (mm)	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$d$ (mm)	$b$ (mm)	$L$ (mm)	$\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
1	3.041	12.722	80.05	1,180.11	3.041	12.731	80.09	1,180.28
2	3.041	12.721	80.06	1,180.23	3.041	12.722	80.10	1,180.22
3	3.041	12.723	80.06	1,180.09	3.041	12.730	80.08	1,180.20
4	3.041	12.730	80.07	1,180.15	3.041	12.740	80.07	1,180.19
5	3.041	12.719	80.05	1,180.03	3.041	12.732	80.10	1,179.18

ตารางที่ 5.11 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกใสที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.041	12.721	80.03	1,180.03	3.041	12.752	80.01	1,180.11
2	3.041	12.732	80.05	1,180.07	3.041	12.719	80.06	1,180.11
3	3.041	12.751	80.04	1,180.09	3.041	12.730	80.02	1,180.15
4	3.041	12.740	80.06	1,180.10	3.041	12.741	80.07	1,180.15
5	3.041	12.718	80.05	1,179.65	3.041	12.700	80.05	1,179.13

ตารางที่ 5.12 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกใสที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.040	12.751	80.09	1,180.09	3.040	12.712	80.04	1,179.56
2	3.040	12.722	80.08	1,180.05	3.040	12.730	80.06	1,179.61
3	3.040	12.752	80.10	1,180.09	3.040	12.719	80.07	1,179.63
4	3.040	12.760	80.07	1,179.75	3.040	12.721	80.07	1,179.73
5	3.040	12.717	80.09	1,179.65	3.040	12.718	80.05	1,179.77

ตารางที่ 5.13 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสมาอะคริลิกใสที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.3516	4.5419	2,586.32	1,339.09	2.4021	4.6276	2,531.95	1,314.29
2	2.3517	4.5420	2,586.21	1,339.06	2.4019	4.6275	2,532.16	1,314.32
3	2.3516	4.5419	2,586.32	1,339.09	2.4020	4.6275	2,532.06	1,314.32
4	2.3515	4.5419	2,586.43	1,339.09	2.4019	4.6276	2,532.16	1,314.29
5	2.3516	4.5420	2,586.32	1,339.06	2.4019	4.6277	2,532.16	1,314.26
เฉลี่ย	$V_L = 2,586.32$ m/s $V_S = 1,339.08$ m/s				$V_L = 2,532.10$ m/s $V_S = 1,314.29$ m/s			

ตารางที่ 5.14 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสมาอะคริลิกใสที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.4480	4.7090	2,484.48	1,291.57	2.4720	4.7500	2,460.36	1,280.42
2	2.4481	4.7092	2,484.38	1,291.51	2.4722	4.7501	2,460.16	1,280.39
3	2.4482	4.7092	2,484.27	1,291.51	2.4720	4.7503	2,460.36	1,280.34
4	2.4481	4.7091	2,484.38	1,291.54	2.4720	4.7503	2,460.36	1,280.34
5	2.4480	4.7090	2,484.48	1,291.57	2.4721	4.7501	2,460.26	1,280.39
เฉลี่ย	$V_L = 2,484.40$ m/s $V_S = 1,291.54$ m/s				$V_L = 2,460.30$ m/s $V_S = 1,280.38$ m/s			

ตารางที่ 5.15 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใสที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.5022	4.7865	2,429.86	1,270.24	2.5401	4.8506	2,393.61	1,253.45
2	2.5023	4.7865	2,429.76	1,270.24	2.5401	4.8506	2,393.61	1,253.45
3	2.5023	4.7866	2,429.76	1,270.21	2.5403	4.8507	2,393.42	1,253.43
4	2.5022	4.7867	2,429.86	1,270.19	2.5402	4.8506	2,393.51	1,253.45
5	2.5022	4.7867	2,429.86	1,270.19	2.5402	4.8507	2,393.51	1,253.43
เฉลี่ย	$V_L = 2,429.82$ m/s $V_S = 1,270.21$ m/s				$V_L = 2,393.53$ m/s $V_S = 1253.44$ m/s			

ตารางที่ 5.16 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.052	12.721	80.11	1,180.21	3.052	12.731	80.04	1,180.18
2	3.052	12.713	80.09	1,180.23	3.052	12.732	80.09	1,180.19
3	3.052	12.722	80.10	1,180.20	3.052	12.731	80.07	1,180.20
4	3.052	12.711	80.11	1,180.19	3.052	12.721	80.08	1,180.22
5	3.052	12.712	80.08	1,180.18	3.052	12.732	80.05	1,180.17

ตารางที่ 5.17 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.052	12.720	80.04	1,180.10	3.051	12.710	80.04	1,180.11
2	3.052	12.731	80.07	1,180.17	3.051	12.711	80.06	1,180.10
3	3.052	12.712	80.08	1,180.16	3.051	12.730	80.08	1,180.12
4	3.052	12.713	80.07	1,180.14	3.051	12.721	80.09	1,180.15
5	3.052	12.710	80.06	1,180.14	3.051	12.722	80.05	1,180.12

ตารางที่ 5.18 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.051	12.721	80.10	1,180.09	3.051	12.732	80.03	1,179.86
2	3.051	12.721	80.09	1,180.05	3.051	12.730	80.05	1,179.91
3	3.051	12.712	80.06	1,180.09	3.051	12.720	80.06	1,179.83
4	3.051	12.703	80.08	1,180.12	3.051	12.721	80.09	1,179.85
5	3.051	12.711	80.07	1,180.10	3.051	12.721	80.05	1,179.78

ตารางที่ 5.19 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสี  
น้ำเงินที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.3595	4.5593	2,586.99	1,338.80	2.4105	4.6449	2,532.25	1,314.13
2	2.3594	4.5594	2,587.10	1,338.77	2.4106	4.6448	2,532.15	1,314.16
3	2.3595	4.5594	2,586.99	1,338.77	2.4106	4.6448	2,532.15	1,314.16
4	2.3596	4.5595	2,586.88	1,338.74	2.4106	4.6448	2,532.15	1,314.16
5	2.3595	4.5595	2,586.99	1,338.74	2.4107	4.6450	2,532.04	1,314.10
เฉลี่ย	$V_L = 2,586.99$ m/s $V_S = 1,338.77$ m/s				$V_L = 2,532.15$ m/s $V_S = 1,314.14$ m/s			

ตารางที่ 5.20 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสี  
น้ำเงินที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.4564	4.7247	2,484.94	1,291.93	2.4801	4.7651	2,460.38	1,280.56
2	2.4565	4.7246	2,484.84	1,291.96	2.4802	4.7652	2,460.29	1,280.53
3	2.4563	4.7246	2,485.04	1,291.96	2.4802	4.7652	2,460.29	1,280.53
4	2.4563	4.7248	2,485.04	1,291.91	2.4800	4.7651	2,460.48	1,280.56
5	2.4563	4.7248	2,485.04	1,291.91	2.4800	4.7650	2,460.48	1,280.59
เฉลี่ย	$V_L = 2,484.98$ m/s $V_S = 1,291.93$ m/s				$V_L = 2,460.38$ m/s $V_S = 1,280.56$ m/s			

ตารางที่ 5.21 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสี  
น้ำเงินที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.5109	4.8029	2,430.20	1,270.48	2.5487	4.8678	2,394.16	1,253.54
2	2.5108	4.8028	2,430.30	1,270.51	2.5487	4.8679	2,394.16	1,253.52
3	2.5107	4.8027	2,430.40	1,270.54	2.5487	4.8677	2,394.16	1,253.57
4	2.5109	4.8027	2,430.20	1,270.54	2.5486	4.8678	2,394.26	1,253.54
5	2.5109	4.8027	2,430.20	1,270.54	2.5488	4.8678	2,394.07	1,253.54
เฉลี่ย	$V_L = 2,430.26$ m/s $V_S = 1,270.52$ m/s				$V_L = 2,394.16$ m/s $V_S = 1,253.54$ m/s			

ตารางที่ 5.22 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ไม่ได้ให้ความร้อนและ  
ให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.042	12.722	80.07	1,180.24	3.042	12.740	80.05	1,180.22
2	3.042	12.730	80.09	1,180.23	3.042	12.751	80.13	1,180.23
3	3.042	12.730	80.08	1,180.25	3.042	12.751	80.09	1,180.20
4	3.042	12.731	80.10	1,180.20	3.042	12.750	80.11	1,180.22
5	3.042	12.710	80.11	1,180.21	3.042	12.741	80.13	1,180.24

ตารางที่ 5.23 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ให้ความร้อน 70 °C  
และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.041	12.721	80.07	1,180.19	3.041	12.751	80.04	1,180.16
2	3.041	12.731	80.06	1,180.17	3.041	12.742	80.08	1,180.15
3	3.041	12.730	80.06	1,180.16	3.041	12.751	80.06	1,180.12
4	3.041	12.730	80.09	1,180.16	3.041	12.740	80.07	1,180.15
5	3.041	12.712	80.05	1,180.14	3.041	12.752	80.05	1,180.15

ตารางที่ 5.24 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มที่ให้ความร้อน 90 °C  
และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.041	12.722	80.01	1,180.09	3.040	12.711	80.05	1,179.96
2	3.041	12.721	80.02	1,180.08	3.040	12.711	80.07	1,179.91
3	3.041	12.731	80.05	1,180.09	3.040	12.710	80.04	1,179.86
4	3.041	12.730	80.04	1,180.11	3.040	12.722	80.07	1,179.94
5	3.041	12.710	80.05	1,180.10	3.040	12.710	80.08	1,179.78

ตารางที่ 5.25 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสมาอะคริลิกสีส้ม  
ที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.3518	4.5422	2,586.95	1,339.44	2.4023	4.6278	2,532.57	1,314.66
2	2.3520	4.5423	2,586.73	1,339.41	2.4024	4.6279	2,532.47	1,314.64
3	2.3519	4.5422	2,586.84	1,339.44	2.4024	4.6280	2,532.47	1,314.61
4	2.3519	4.5421	2,586.84	1,339.47	2.4024	4.6279	2,532.47	1,314.64
5	2.3519	4.5422	2,586.84	1,339.44	2.4025	4.6279	2,532.36	1,314.64
เฉลี่ย	$V_L = 2,586.84$ m/s $V_S = 1,339.44$ m/s				$V_L = 2,532.47$ m/s $V_S = 1,314.64$ m/s			

ตารางที่ 5.26 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสมาอะคริลิกสีส้ม  
ที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.4486	4.7094	2,483.87	1,291.46	2.4719	4.7509	2,460.46	1,280.18
2	2.4485	4.7093	2,483.97	1,291.49	2.4717	4.7510	2,460.65	1,280.15
3	2.4487	4.7092	2,483.77	1,291.51	2.4717	4.7508	2,460.65	1,280.21
4	2.4487	4.7094	2,483.77	1,291.46	2.4718	4.7508	2,460.56	1,280.21
5	2.4485	4.7094	2,483.97	1,291.46	2.4718	4.7510	2,460.56	1,280.15
เฉลี่ย	$V_L = 2,483.87$ m/s $V_S = 1,291.48$ m/s				$V_L = 2,460.57$ m/s $V_S = 1,280.18$ m/s			

ตารางที่ 5.27 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีส้ม  
ที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.5028	4.7864	2,430.08	1,270.68	2.5405	4.8503	2,393.23	1,253.53
2	2.5029	4.7863	2,429.98	1,270.71	2.5406	4.8505	2,393.14	1,253.48
3	2.5029	4.7864	2,429.98	1,270.68	2.5407	4.8504	2,393.04	1,253.50
4	2.5027	4.7865	2,430.18	1,270.66	2.5407	4.8504	2,393.04	1,253.50
5	2.5027	4.7863	2,430.18	1,270.71	2.5407	4.8504	2,393.04	1,253.50
เฉลี่ย	$V_L = 2,430.08$ m/s $V_S = 1,270.69$ m/s				$V_L = 2,393.10$ m/s $V_S = 1,253.50$ m/s			

ตารางที่ 5.28 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวที่ไม่ได้ให้ความร้อน  
และให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.060	12.730	80.01	1,180.22	3.060	12.731	80.09	1,180.28
2	3.060	12.731	80.02	1,180.22	3.060	12.720	80.07	1,180.22
3	3.060	12.732	80.07	1,180.29	3.060	12.732	80.06	1,180.20
4	3.060	12.741	80.05	1,180.21	3.060	12.739	80.04	1,180.19
5	3.060	12.742	80.04	1,180.20	3.060	12.730	80.07	1,179.18

ตารางที่ 5.29 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.059	12.721	80.08	1,180.19	3.059	12.701	80.07	1,180.15
2	3.059	12.710	80.07	1,180.21	3.059	12.709	80.03	1,180.14
3	3.059	12.711	80.07	1,180.18	3.059	12.720	80.04	1,180.16
4	3.059	12.709	80.09	1,180.19	3.059	12.701	80.07	1,180.15
5	3.059	12.711	80.06	1,179.22	3.059	12.701	80.06	1,179.13

ตารางที่ 5.30 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.059	12.720	80.11	1,180.03	3.059	12.729	80.10	1,179.81
2	3.059	12.721	80.12	1,180.07	3.059	12.730	80.05	1,179.85
3	3.059	12.709	80.09	1,180.09	3.059	12.721	80.07	1,179.93
4	3.059	12.710	80.08	1,179.92	3.059	12.709	80.09	1,179.83
5	3.059	12.709	80.05	1,179.65	3.059	12.720	80.09	1,179.97

ตารางที่ 5.31 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกดี  
 เทียบที่ไม้ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม้ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.3665	4.5705	2,586.10	1,339.02	2.4180	4.6610	2,531.02	1,313.02
2	2.3664	4.5704	2,586.21	1,339.05	2.4182	4.6613	2,530.81	1,312.94
3	2.3666	4.5705	2,585.99	1,339.02	2.4182	4.6610	2,530.81	1,313.02
4	2.3667	4.5706	2,585.88	1,338.99	2.4181	4.6611	2,530.91	1,312.99
5	2.3665	4.5705	2,586.10	1,339.02	2.4180	4.6612	2,531.02	1,312.97
เฉลี่ย	$V_L = 2,586.05$ m/s $V_S = 1,339.02$ m/s				$V_L = 2,530.91$ m/s $V_S = 1,312.99$ m/s			

ตารางที่ 5.32 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกดี  
 เทียบที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.4647	4.7405	2,482.25	1,290.58	2.4888	4.7813	2,458.21	1,279.57
2	2.4648	4.7406	2,482.15	1,290.55	2.4889	4.7812	2,458.11	1,279.60
3	2.4646	4.7405	2,482.35	1,290.58	2.4887	4.7814	2,458.31	1,279.54
4	2.4647	4.7405	2,482.25	1,290.58	2.4888	4.7812	2,458.21	1,279.60
5	2.4647	4.7407	2,482.25	1,290.53	2.4887	4.7812	2,458.31	1,279.60
เฉลี่ย	$V_L = 2,482.25$ m/s $V_S = 1,290.56$ m/s				$V_L = 2,458.23$ m/s $V_S = 1,279.58$ m/s			

ตารางที่ 5.33 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิก  
สี่เหลี่ยมที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.5195	4.8188	2,428.26	1,269.61	2.5561	4.8783	2,393.49	1,254.13
2	2.5193	4.8187	2,428.45	1,269.64	2.5562	4.8783	2,393.40	1,254.13
3	2.5194	4.8187	2,428.36	1,269.64	2.5563	4.8782	2,393.30	1,254.15
4	2.5194	4.8187	2,428.36	1,269.64	2.5562	4.8782	2,393.40	1,254.15
5	2.5194	4.8187	2,428.36	1,269.64	2.5561	4.8783	2,393.49	1,254.13
เฉลี่ย	$V_L = 2,428.36$ m/s $V_S = 1,269.63$ m/s				$V_L = 2,393.42$ m/s $V_S = 1,254.14$ m/s			

ตารางที่ 5.34 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ให้ความร้อนและ  
ให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.053	12.710	80.02	1,180.25	3.053	12.728	80.06	1,180.25
2	3.053	12.719	80.07	1,180.26	3.053	12.721	80.05	1,180.24
3	3.053	12.711	80.09	1,180.24	3.053	12.730	80.03	1,180.21
4	3.053	12.710	80.08	1,180.27	3.053	12.729	80.07	1,180.20
5	3.053	12.711	80.07	1,180.20	3.053	12.730	80.09	1,180.19

ตารางที่ 5.35 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงที่ให้ความร้อน 70 °C  
และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.053	12.721	80.07	1,180.20	3.053	12.711	80.04	1,180.10
2	3.053	12.720	80.08	1,180.21	3.053	12.709	80.09	1,180.04
3	3.053	12.731	80.07	1,180.19	3.053	12.730	80.06	1,180.06
4	3.053	12.729	80.04	1,180.20	3.053	12.731	80.05	1,180.05
5	3.053	12.731	80.03	1,180.17	3.053	12.720	80.04	1,179.97

ตารางที่ 5.36 แสดงขนาดและความหนาแน่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงที่ให้ความร้อน 90 °C  
และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	d (mm)	b (mm)	L (mm)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	3.052	12.738	80.05	1,180.02	3.052	12.721	80.10	1,179.91
2	3.052	12.740	80.08	1,180.07	3.052	12.728	80.08	1,179.85
3	3.052	12.741	80.09	1,180.01	3.052	12.702	80.06	1,179.90
4	3.052	12.749	80.10	1,179.98	3.052	12.710	80.09	1,179.84
5	3.052	12.749	80.06	1,179.95	3.052	12.711	80.05	1,179.95

ตารางที่ 5.37 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีแดง  
ที่ไม่ได้ให้ความร้อนและให้ความร้อน 60 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ไม่ได้ให้ความร้อน				ให้ความร้อน 60 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.3608	4.5590	2,586.41	1,339.33	2.4101	4.6450	2,533.50	1,314.53
2	2.3609	4.5591	2,586.30	1,339.30	2.4101	4.6452	2,533.50	1,314.48
3	2.3607	4.5591	2,586.52	1,339.30	2.4102	4.6450	2,533.40	1,314.53
4	2.3608	4.5591	2,586.41	1,339.30	2.4103	4.6450	2,533.29	1,314.53
5	2.3607	4.5590	2,586.52	1,339.33	2.4103	4.6451	2,533.29	1,314.50
เฉลี่ย	$V_L = 2,586.43$ m/s $V_S = 1,339.31$ m/s				$V_L = 2,533.40$ m/s $V_S = 1,314.51$ m/s			

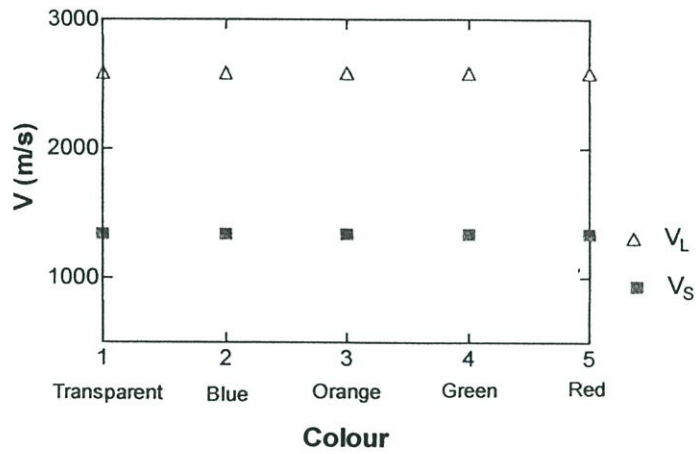
ตารางที่ 5.38 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีแดง  
ที่ให้ความร้อน 70 °C และ 80 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 70 °C				ให้ความร้อน 80 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.4567	4.7250	2,485.45	1,292.28	2.4806	4.7656	2,461.50	1,281.27
2	2.4567	4.7252	2,485.45	1,292.22	2.4807	4.7655	2,461.40	1,281.29
3	2.4567	4.7252	2,485.45	1,292.22	2.4805	4.7656	2,461.60	1,281.27
4	2.4566	4.7250	2,485.55	1,292.28	2.4806	4.7655	2,461.50	1,281.29
5	2.4566	4.7210	2,485.55	1,293.37	2.4806	4.7657	2,461.50	1,281.24
เฉลี่ย	$V_L = 2,485.49$ m/s $V_S = 1,292.47$ m/s				$V_L = 2,461.50$ m/s $V_S = 1,281.27$ m/s			

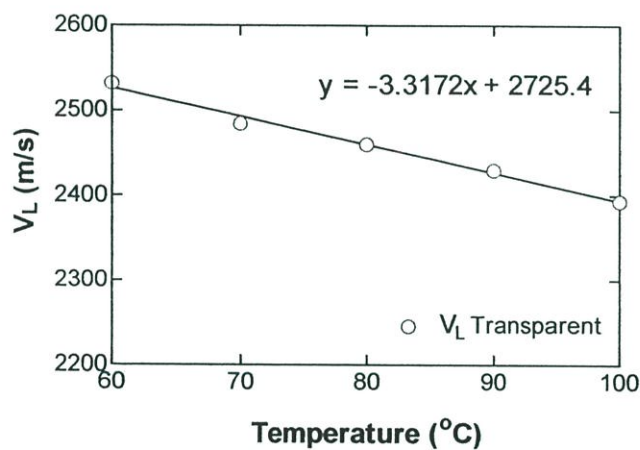
ตารางที่ 5.39 แสดงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีแดง ที่ให้ความร้อน 90 °C และ 100 °C

ลำดับ ชิ้น งาน	ให้ความร้อน 90 °C				ให้ความร้อน 100 °C			
	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)	$t_L$ (avg) ( $\mu$ s)	$t_S$ (avg) ( $\mu$ s)	$V_L$ (avg) (m/s)	$V_S$ (avg) (m/s)
1	2.5113	4.8031	2,430.61	1,270.85	2.5491	4.8680	2,394.57	1,253.90
2	2.5114	4.8033	2,430.52	1,270.79	2.5491	4.8683	2,394.57	1,253.83
3	2.5114	4.8033	2,430.52	1,270.79	2.5492	4.8680	2,394.48	1,253.90
4	2.5114	4.8032	2,430.52	1,270.82	2.5492	4.8682	2,394.48	1,253.85
5	2.5113	4.8031	2,430.61	1,270.85	2.5492	4.8682	2,394.48	1,253.85
เฉลี่ย	$V_L = 2,430.56$ m/s $V_S = 1,270.82$ m/s				$V_L = 2,394.51$ m/s $V_S = 1,253.87$ m/s			

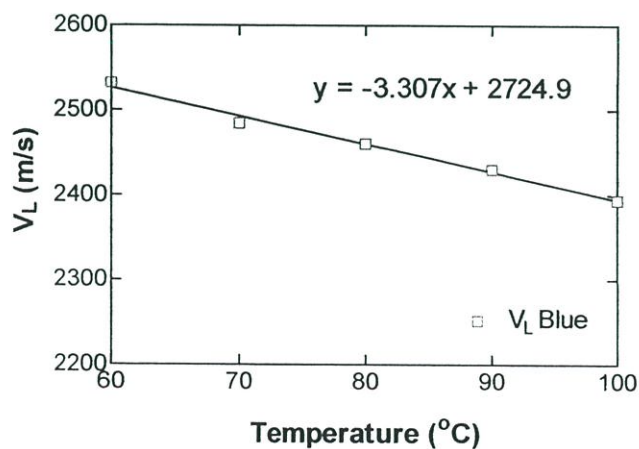
จากผลการทดลองวัดค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง ที่ให้อุณหภูมิความร้อน ตั้งแต่ไม่ให้ความร้อน ถึงให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สี เมื่อยังไม่ให้ความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สี มีค่าใกล้เคียงกันแตกต่างกันไม่มาก โดยมีค่าความเร็วคลื่นตามยาวมีค่า  $2586.52 \pm 0.47$  m/s และค่าความเร็วคลื่นตามขวางมีค่า  $1338.90 \pm 0.13$  m/s ซึ่งค่าความเร็วคลื่นตามยาวจะมีค่ามากกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของคลื่นตามขวาง ส่วนกราฟรูปที่ 5.19-5.23 เป็นกราฟแสดงค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาว และกราฟรูปที่ 5.23-5.28 เป็นของคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สีที่ให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C จะเห็นได้ว่าเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้นแก่พลาสติกอะคริลิกค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางจะมีค่าลดลง



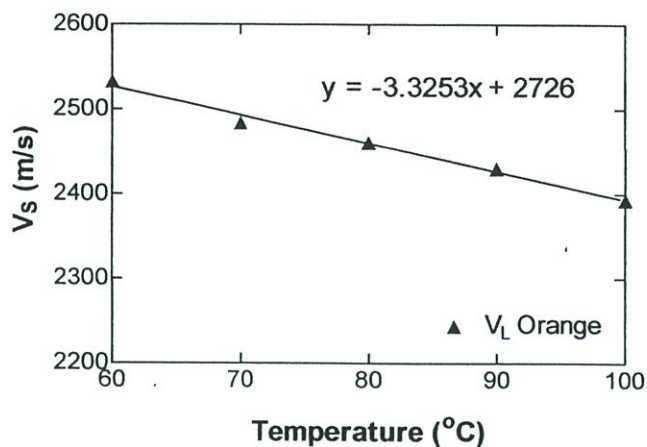
รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยเคลื่อนตามยาวและเคลื่อนตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สี เมื่อยังไม่ให้ความร้อน



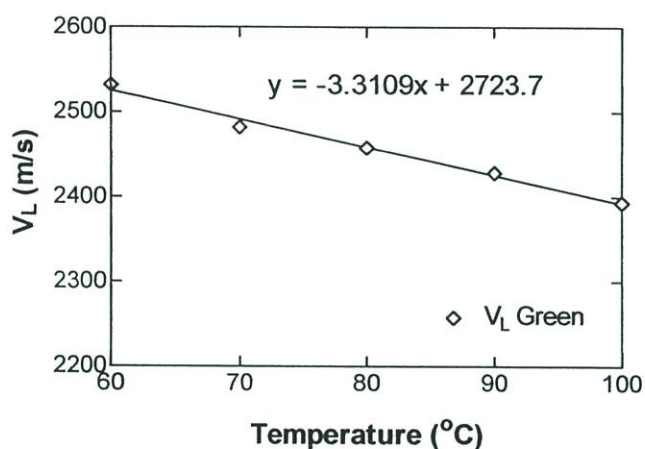
รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยเคลื่อนตามยาวของพลาสติกอะคริลิกใสเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C



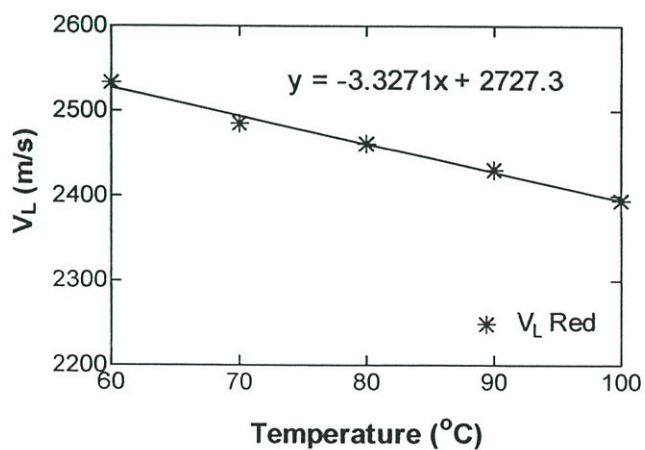
รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยเคลื่อนตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C



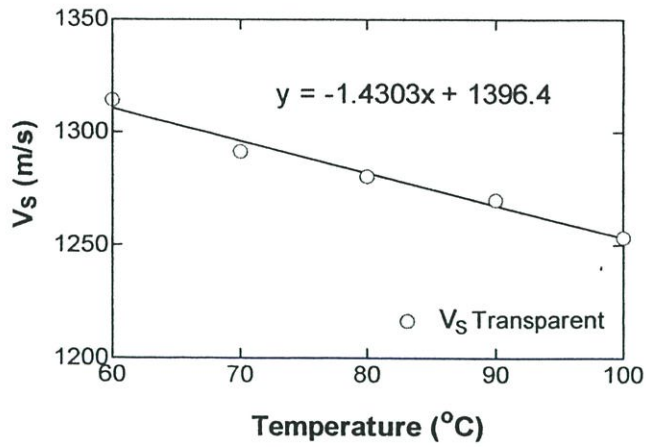
รูปที่ 5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีส้ม  
เมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$



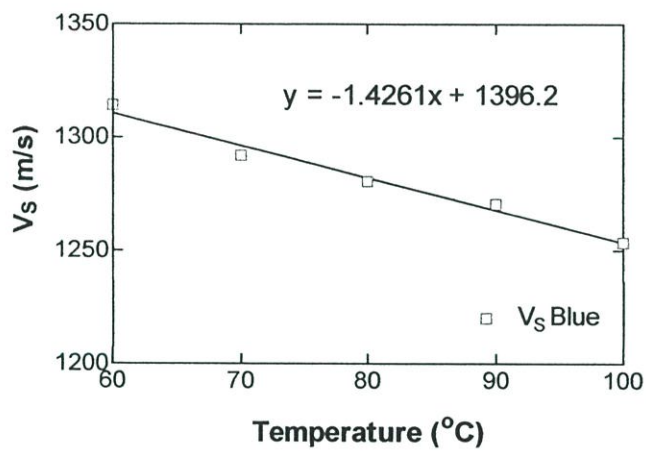
รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีเขียว  
เมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$



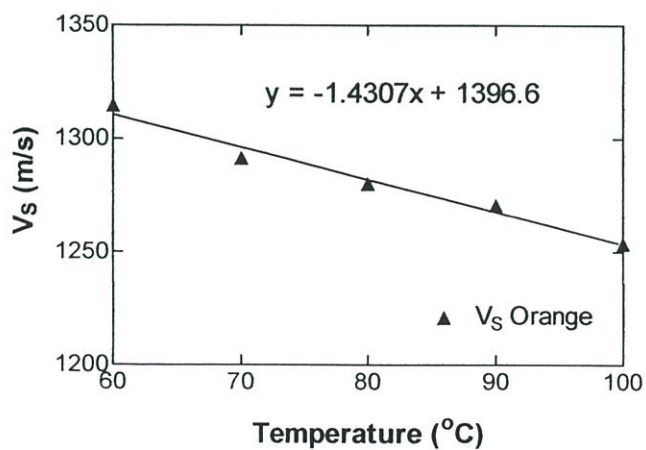
รูปที่ 5.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวของพลาสติกอะคริลิกสีแดง  
เมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$



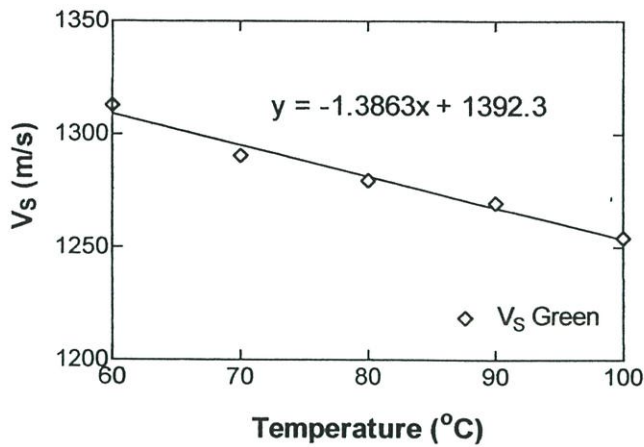
รูปที่ 5.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉื่อยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกใส เมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$



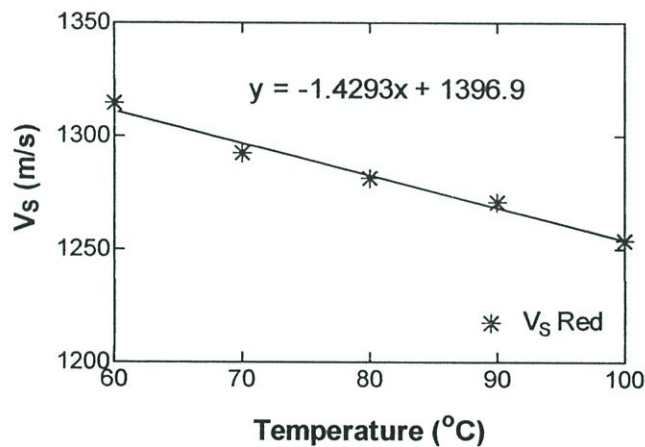
รูปที่ 5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉื่อยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉื่อยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกสีส้มเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิก สีเขียวเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C



รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิก สีแดงเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C

เมื่อนำค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางในตัวกลางพลาสติกอะคริลิก ทั้งหมด 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง ที่ให้อุณหภูมิความร้อน ตั้งแต่ไม่ให้ความร้อน ถึงให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C มาคำนวณหาค่าของสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก ได้แก่ค่าความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.46 4.22 และ 4.26 ผลการทดลองจะได้ค่าความต้านทานแรงดัด ที่ระยะดัดต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.50-1.25 mm และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ดังตารางที่ 5.40 - 5.44 กำหนดให้ T คืออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติก  $\sigma$  และ E คือความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ทดสอบด้วยระบบการวัดอัลตราโซนิกตามลำดับ

ตารางที่ 5.40 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิกใส  
ด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

T (°C)	V <sub>L</sub> (avg) (m/s)	V <sub>S</sub> (avg) (m/s)	σ 0.50 mm (MPa)	σ 0.75 mm (MPa)	σ 1.00 mm (MPa)	σ 1.25 mm (MPa)	E (GPa)
ไม่ได้ให้ ความร้อน	2,586.32	1,339.08	31.78	47.67	63.56	79.45	5.573
60	2,532.10	1,314.29	30.58	45.87	61.16	76.45	5.363
70	2,484.40	1,291.54	29.51	44.27	59.03	73.78	5.176
80	2,460.30	1,280.38	28.99	43.49	57.98	72.48	5.085
90	2,429.82	1,270.21	28.47	42.71	56.95	71.18	4.995
100	2,393.53	1,253.44	27.70	41.55	55.40	69.25	4.860

ตารางที่ 5.41 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก  
สีน้ำเงินด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

T (°C)	V <sub>L</sub> (avg) (m/s)	V <sub>S</sub> (avg) (m/s)	σ 0.50 mm (MPa)	σ 0.75 mm (MPa)	σ 1.00 mm (MPa)	σ 1.25 mm (MPa)	E (GPa)
ไม่ได้ให้ ความร้อน	2,586.99	1,338.77	31.9	47.8	63.8	79.7	5.572
60	2,532.15	1,314.14	30.7	46.0	61.4	76.7	5.363
70	2,484.98	1,291.93	29.6	44.5	59.3	74.1	5.180
80	2,460.38	1,280.56	29.1	43.6	58.2	72.7	5.087
90	2,430.26	1,270.52	28.6	42.9	57.2	71.5	4.998
100	2,394.16	1,253.54	27.8	41.7	55.6	69.5	4.862

ตารางที่ 5.42 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก  
 สีส้มด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

T (°C)	V <sub>L</sub> (avg) (m/s)	V <sub>S</sub> (avg) (m/s)	σ	σ	σ	σ	E (GPa)
			0.50 mm (MPa)	0.75 mm (MPa)	1.00 mm (MPa)	1.25 mm (MPa)	
ไม่ได้ให้ ความร้อน	2,586.84	1,339.44	31.8	47.7	63.6	79.5	5.577
60	2,532.47	1,314.64	30.6	45.9	61.2	76.5	5.367
70	2,483.87	1,291.48	29.5	44.3	59.0	73.8	5.176
80	2,460.57	1,280.18	29.0	43.5	58.0	72.5	5.084
90	2,430.08	1,270.69	28.5	42.8	57.0	71.3	4.999
100	2,393.10	1,253.50	27.7	41.6	55.4	69.3	4.861

ตารางที่ 5.43 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก  
 สีเขียวด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

T (°C)	V <sub>L</sub> (avg) (m/s)	V <sub>S</sub> (avg) (m/s)	σ	σ	σ	σ	E (GPa)
			0.50 mm (MPa)	0.75 mm (MPa)	1.00 mm (MPa)	1.25 mm (MPa)	
ไม่ได้ให้ ความร้อน	2,586.05	1,339.02	32.0	48.0	64.0	79.9	5.573
60	2,532.02	1,312.99	30.7	46.1	61.4	76.8	5.355
70	2,482.25	1,290.56	29.6	44.5	59.3	74.1	5.168
80	2,458.23	1,279.58	29.1	43.7	58.2	72.8	5.078
90	2,428.36	1,269.63	28.6	42.9	57.2	71.6	4.991
100	2,393.42	1,254.14	27.9	41.9	55.8	69.8	4.865

ตารางที่ 5.44 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีแดงด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

T (°C)	V <sub>L</sub> (avg) (m/s)	V <sub>S</sub> (avg) (m/s)	σ 0.50 mm (MPa)	σ 0.75 mm (MPa)	σ 1.00 mm (MPa)	σ 1.25 mm (MPa)	E (GPa)
ไม่ได้ให้ความร้อน	2,586.43	1,339.31	31.9	47.9	63.8	79.8	5.576
60	2,533.40	1,314.51	30.7	46.1	61.4	76.8	5.367
70	2,485.49	1,292.47	29.7	44.5	59.3	74.2	5.184
80	2,461.50	1,281.27	29.1	43.7	58.3	72.9	5.092
90	2,430.56	1,270.82	28.6	42.9	57.2	71.5	5.000
100	2,394.51	1,253.87	27.8	41.8	55.7	69.6	4.864

การทดลองทั้งหมดสามารถนำค่าความเร็วคลื่นทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีที่ได้จากระบบการวัด มาคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านทานแรงดัด ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สี เมื่อยังไม่ให้ความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติกอะคริลิกสูงขึ้น

ส่วนค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง เมื่อยังไม่ให้ความร้อนค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สี มีค่าใกล้เคียงกัน และที่ระยะดัดโก่งโค้งมากขึ้นความต้านทานแรงดัดจะมีค่ามากขึ้น พลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจะมีค่าความต้านทานแรงดัดลดลง เมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติกอะคริลิกสูงขึ้น

### 5.3 การทดลองวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยวิธีการตัดโค้ง

การทดลองวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยวิธีการตัดโค้ง จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 ค่าที่ได้จากการทดสอบได้แก่ ค่าความต้านทานแรงดัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น วิธีการทดสอบใช้แรงกดตัดโค้งแผ่นพลาสติก จนแผ่นพลาสติกหัก จะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำบนแผ่นพลาสติกต่อพื้นที่ และระยะดัดของแผ่นพลาสติกที่โค้งลง ขนาดของแผ่นพลาสติกที่ทดสอบมีความกว้าง 12.7 mm ความยาว 80 mm ความหนา 3 mm

ในการทดสอบใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) วางแผ่นพลาสติกบนฐานรองรับ ใช้แรง 3000 N กดลงตรงกลางแผ่นพลาสติกด้วยอัตราเร็ว 5 mm/min จนแผ่นพลาสติกหัก สามารถอ่านผลลัพธ์แรงกดลงที่ระยะดัดต่าง ๆ ถึงแรงมากที่สุดจนแผ่นพลาสติกหักได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่กับเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล ทำการทดสอบกับพลาสติกอะคริลิคทั้งหมด 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง ตั้งแต่ไม่ให้ความร้อนถึงให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ที่ทดสอบด้วยระบบการวัดอัลตราโซนิก นำมาทดสอบแบบทำลายด้วยวิธีการตัดโค้ง 5 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยผลการทดสอบสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยวิธีการตัดโค้ง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.45 - 5.49 โดยค่าความต้านทานแรงดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ กำหนดให้ T คืออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติก  $\sigma_F$  คือความต้านทานแรงดัดเฉลี่ยที่ระยะดัดต่าง ๆ และ  $E_F$  คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยที่ทดสอบด้วยวิธีการตัดโค้ง

ตารางที่ 5.45 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิคใส ทดสอบด้วยวิธีทางกล

T (°C)	$\sigma_F$ 0.50 mm (MPa)	$\sigma_F$ 0.75 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.00 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.25 mm (MPa)	$E_F$ (GPa)
ไม่ได้ให้ความร้อน	31.39	47.09	62.79	78.48	5.506
60	30.38	45.57	60.76	75.95	5.328
70	29.10	43.65	58.21	72.76	5.104
80	28.53	42.79	57.05	71.31	5.003
90	28.10	42.15	56.20	70.25	4.930
100	27.36	41.04	54.72	68.41	4.800

ตารางที่ 5.46 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก  
สีน้ำเงินทดสอบด้วยวิธีทางกล

T (°C)	$\sigma_F$ 0.50 mm (MPa)	$\sigma_F$ 0.75 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.00 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.25 mm (MPa)	$E_F$ (GPa)
ไม่ได้ให้ความร้อน	31.55	47.32	63.09	78.87	5.513
60	30.33	45.50	60.67	75.84	5.301
70	29.19	43.78	58.37	72.97	5.100
80	28.82	43.23	57.64	72.05	5.038
90	28.22	42.33	56.44	70.55	4.933
100	27.65	41.48	55.31	69.14	4.834

ตารางที่ 5.47 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก  
สีส้มทดสอบด้วยวิธีทางกล

T (°C)	$\sigma_F$ 0.50 mm (MPa)	$\sigma_F$ 0.75 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.00 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.25 mm (MPa)	$E_F$ (GPa)
ไม่ได้ให้ความร้อน	31.40	47.09	62.79	78.49	5.505
60	30.29	45.43	60.57	75.72	5.310
70	29.08	43.62	58.16	72.70	5.100
80	28.68	43.03	57.37	71.71	5.031
90	28.12	42.18	56.25	70.31	4.932
100	27.63	41.44	55.25	69.06	4.847

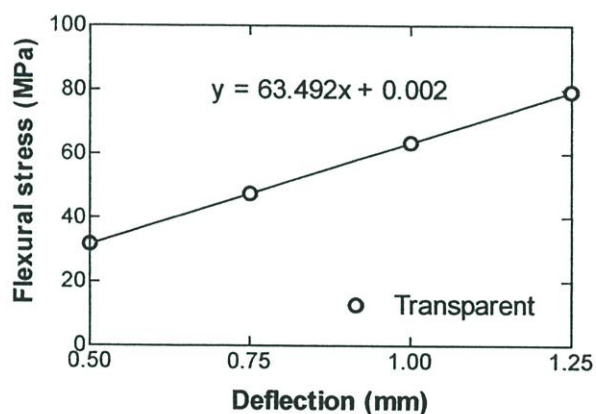
ตารางที่ 5.48 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.05-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีเขียวทดสอบด้วยวิธีทางกล

T (°C)	$\sigma_F$ 0.50 mm (MPa)	$\sigma_F$ 0.75 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.00 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.25 mm (MPa)	$E_F$ (GPa)
ไม่ได้ให้ความร้อน	31.75	47.63	63.50	79.38	5.534
60	30.52	45.77	61.03	76.29	5.319
70	29.55	44.33	59.10	73.88	5.152
80	28.77	43.15	57.54	71.92	5.016
90	28.30	42.45	56.60	70.75	4.934
100	27.88	41.81	55.75	69.69	4.860

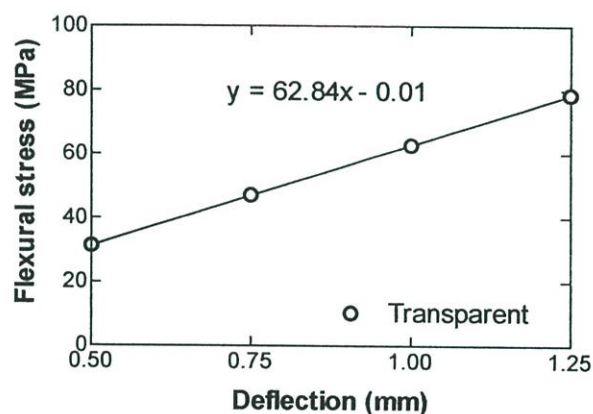
ตารางที่ 5.49 แสดงค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิก สีแดงทดสอบด้วยวิธีทางกล

T (°C)	$\sigma_F$ 0.50 mm (MPa)	$\sigma_F$ 0.75 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.00 mm (MPa)	$\sigma_F$ 1.25 mm (MPa)	$E_F$ (GPa)
ไม่ได้ให้ความร้อน	31.67	47.51	63.35	79.18	5.533
60	30.43	45.65	60.86	76.08	5.316
70	29.38	44.07	58.76	73.45	5.133
80	28.86	43.29	57.72	72.16	5.042
90	28.37	42.56	56.74	70.93	4.958
100	27.66	41.49	55.32	69.14	4.833

จากการทดลองสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดัดและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการทดสอบทางกลและทางอัลตราโซนิกของพลาสติกอะคริลิกทั้งหมด 5 สี คือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง ได้ดังต่อไปนี้ กราฟรูปที่ 5.29-5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก กราฟรูปที่ 5.34-5.38 แสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก กราฟรูปที่ 5.39 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิก ทั้ง 5 สีเมื่อยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก และสุดท้ายกราฟรูปที่ 5.40-5.44 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

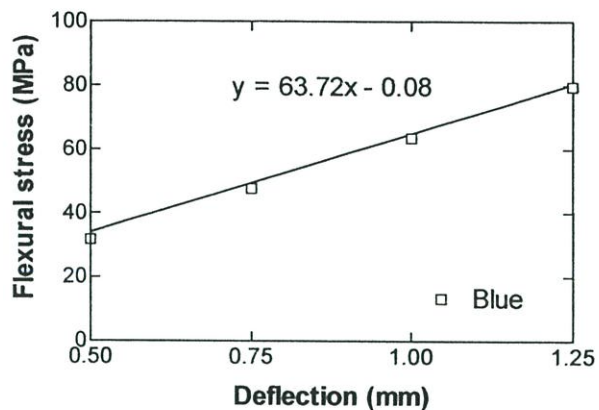


(ก) ทางกล

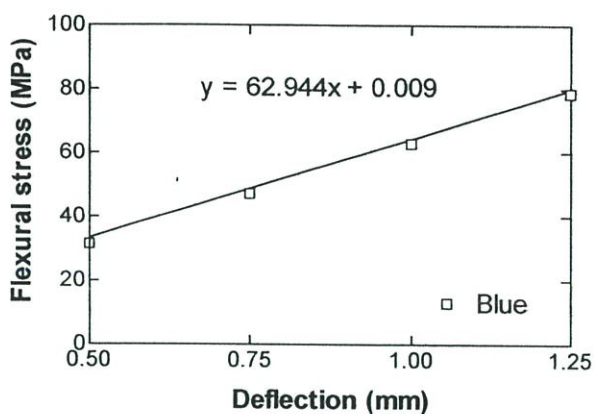


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิก  
ใสที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

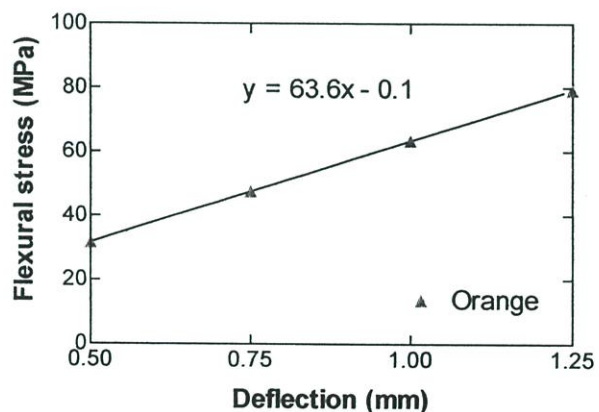


(ก) ทางกล

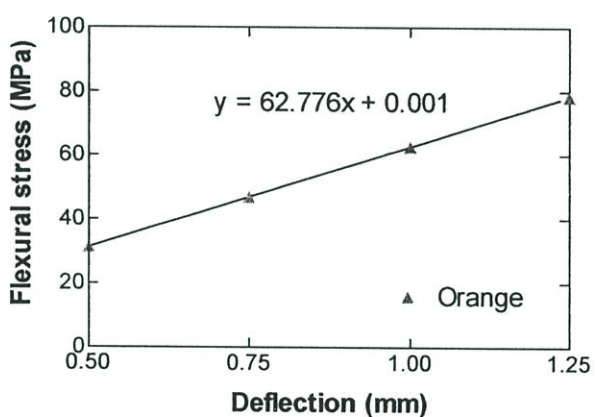


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิก สีน้ำเงินที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

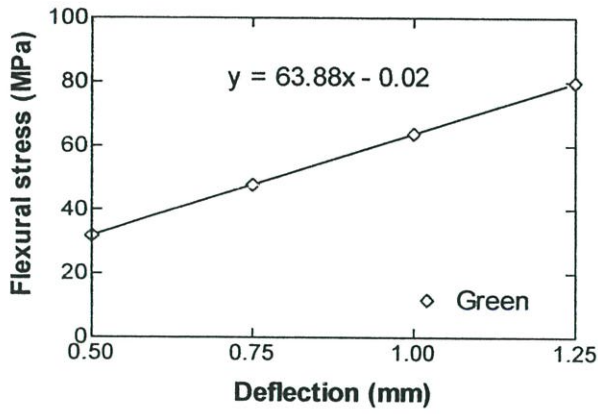


(ก) ทางกล

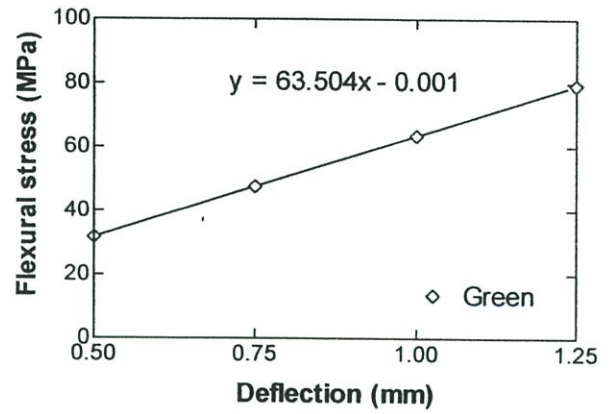


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิก สีส้มที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

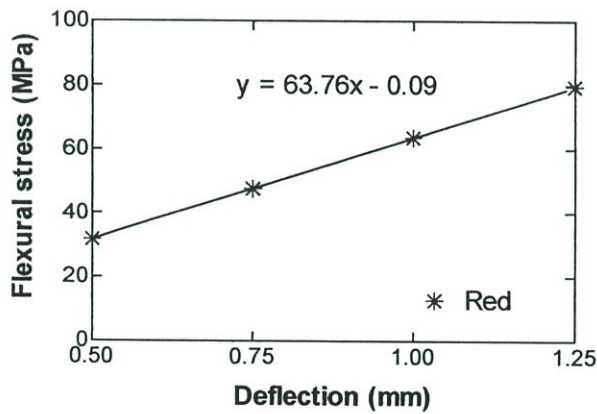


(ก) ทางกล

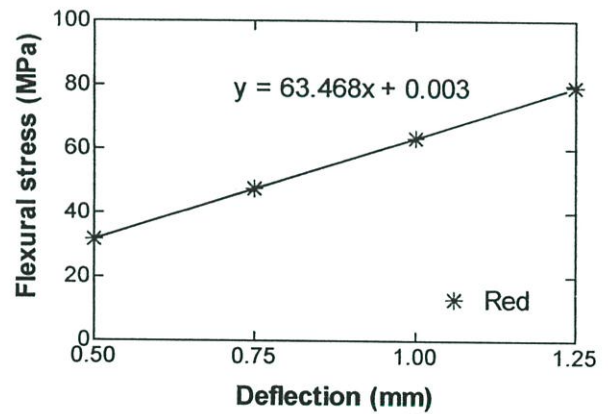


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิก สีเขียวที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

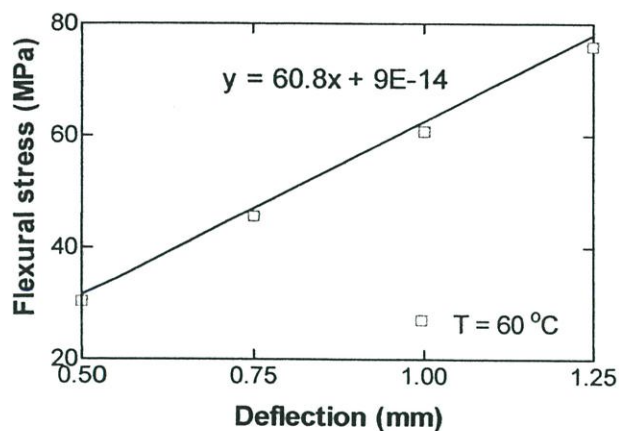


(ก) ทางกล

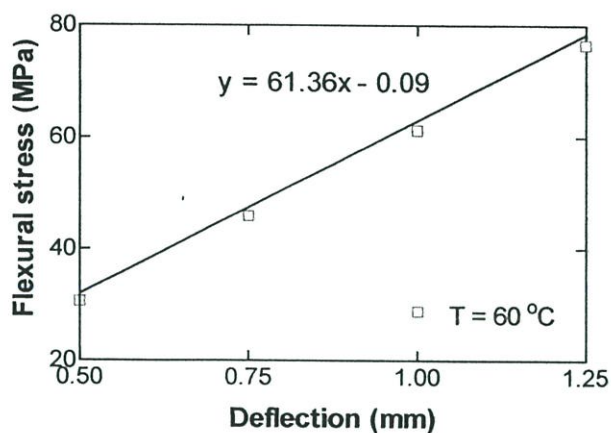


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิก สีแดงที่ยังไม่ให้ความร้อนทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

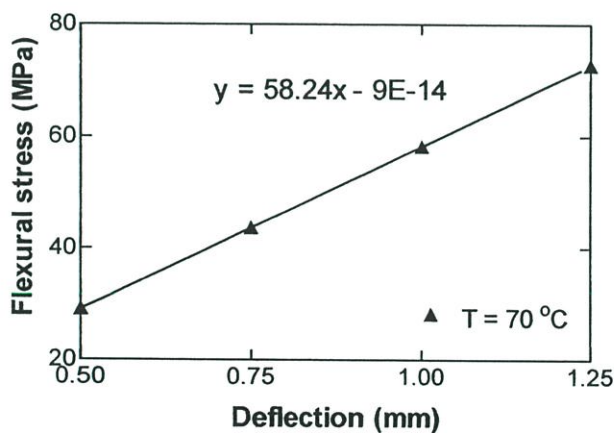


(ก) ทางกล

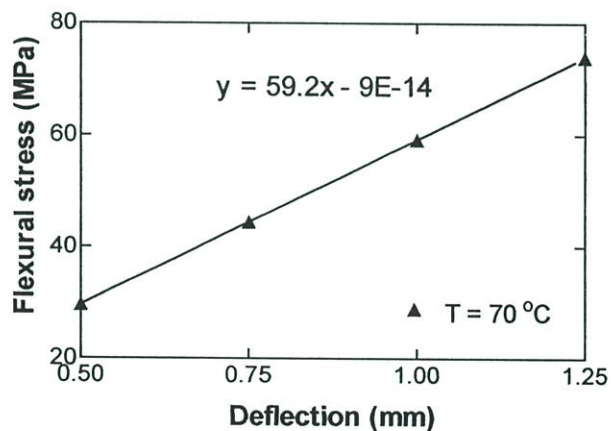


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.34 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ  $60^{\circ}\text{C}$  ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

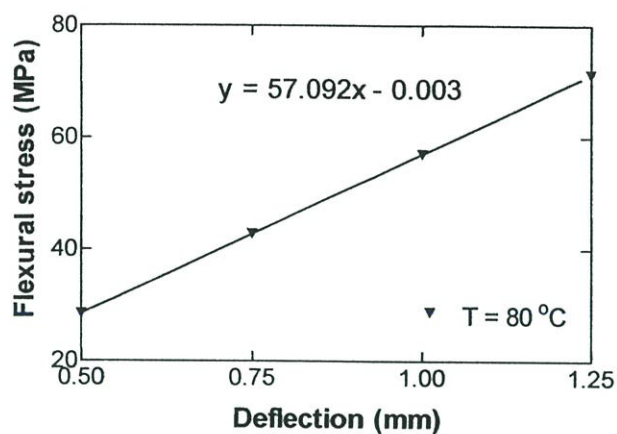


(ก) ทางกล

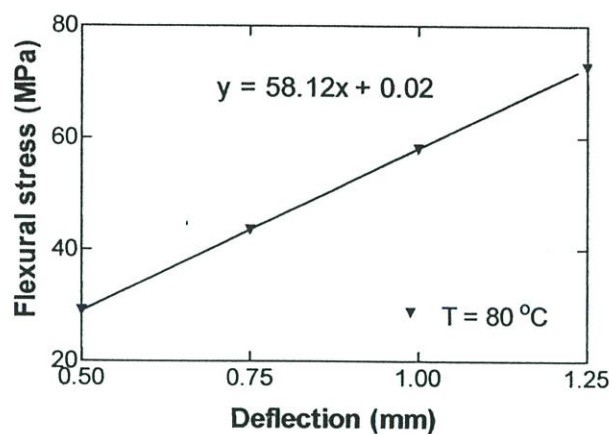


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.35 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ  $70^{\circ}\text{C}$  ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

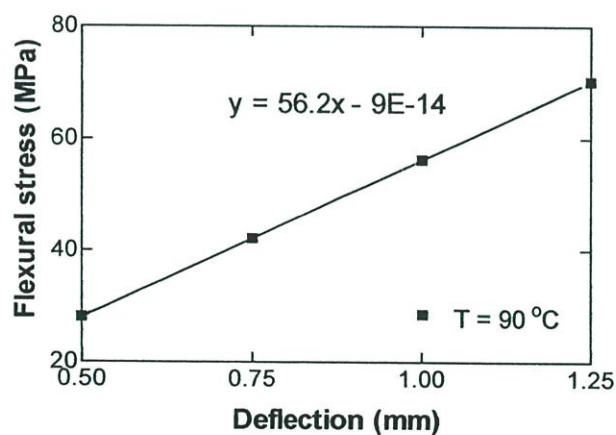


(ก) ทางกล

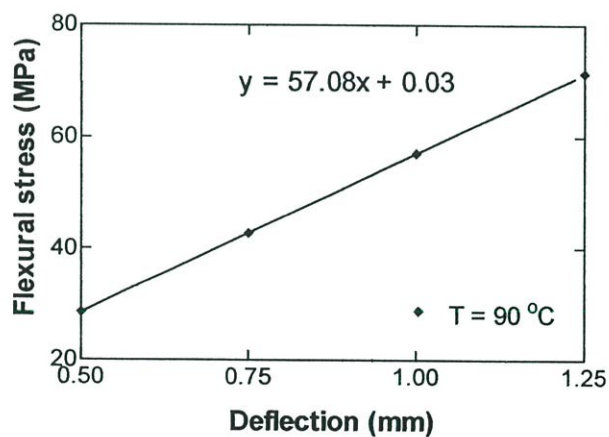


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.36 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ  $80^{\circ}\text{C}$  ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

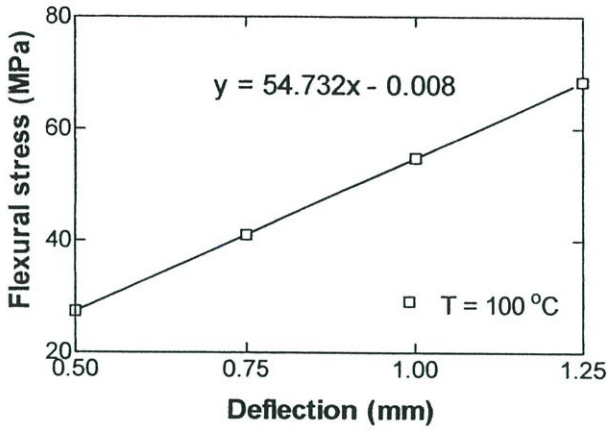


(ก) ทางกล

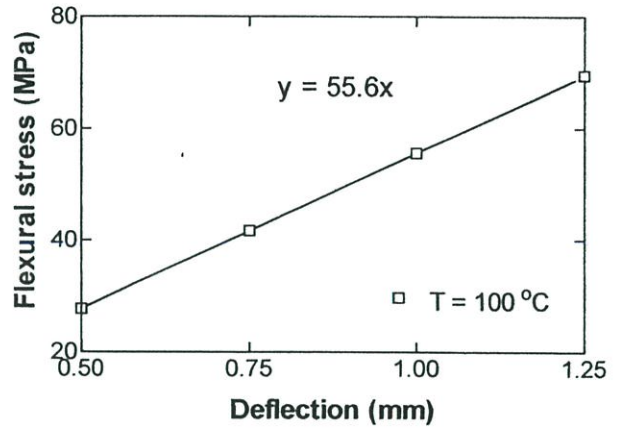


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.37 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ  $90^{\circ}\text{C}$  ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

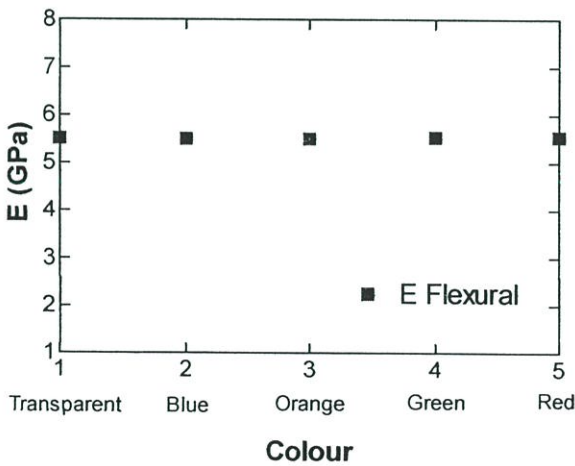


(ก) ทางกล

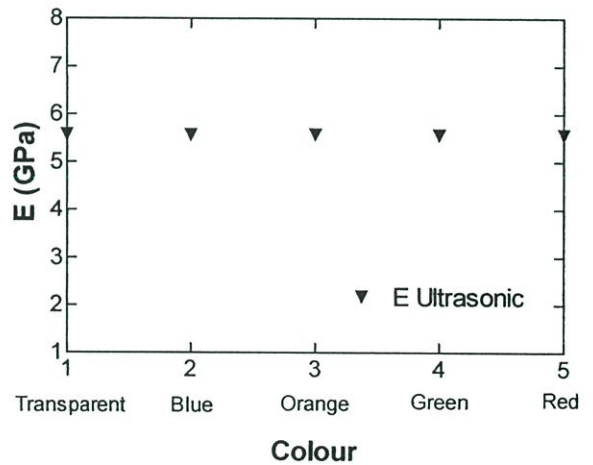


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.38 กราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดัดกับระยะดัดของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

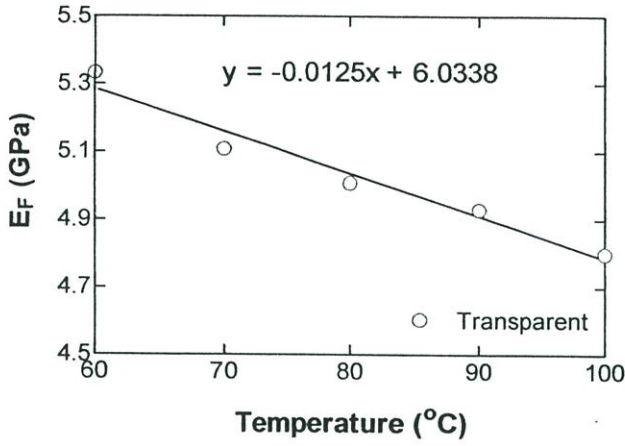


(ก) ทางกล

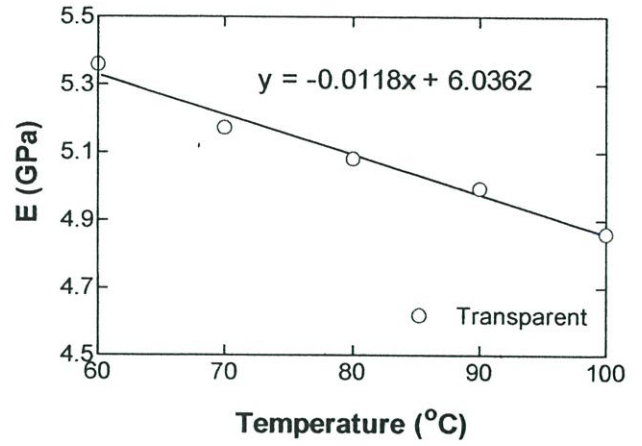


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.39 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อยังไม่ให้ความร้อน ทดสอบโดยวิธีทางทางกลและทางอัลตราโซนิก

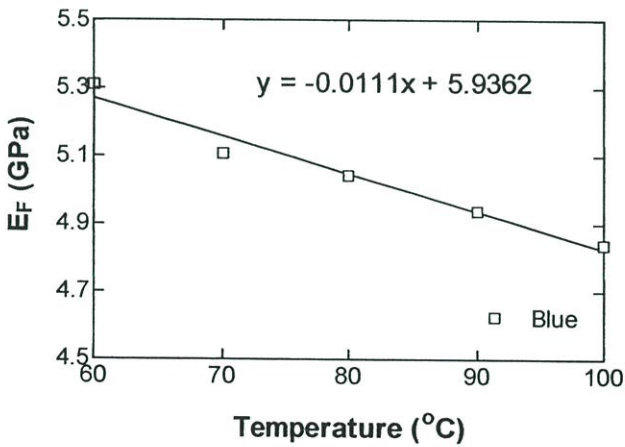


(ก) ทางกล

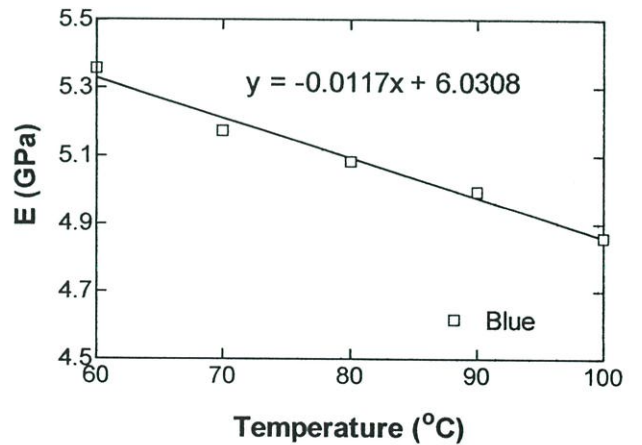


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.40 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกใสเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$  ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

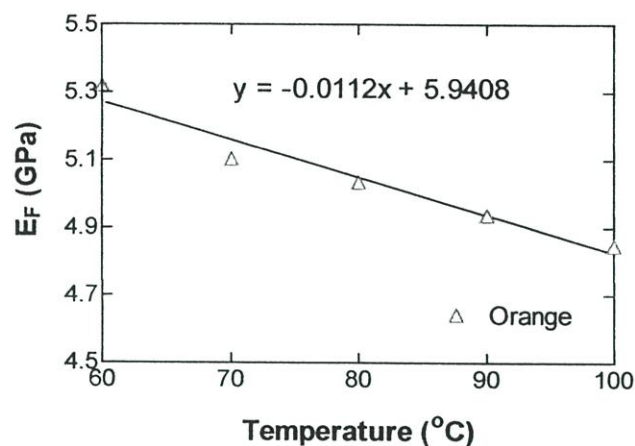


(ก) ทางกล

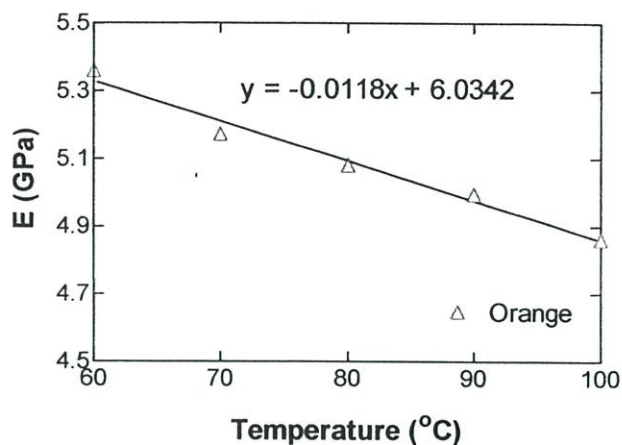


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.41 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีน้ำเงินเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100  $^{\circ}\text{C}$  ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

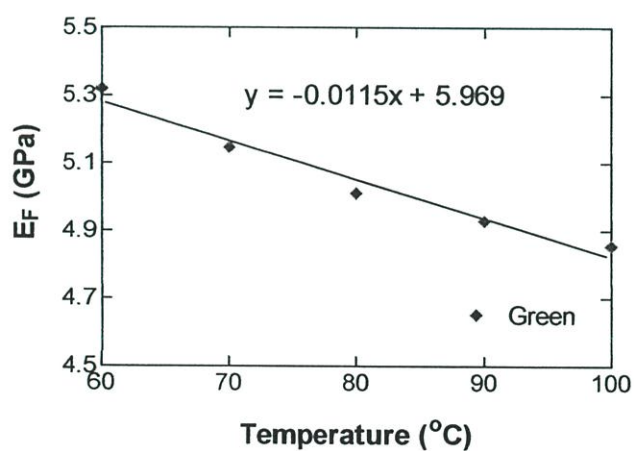


(ก) ทางกล

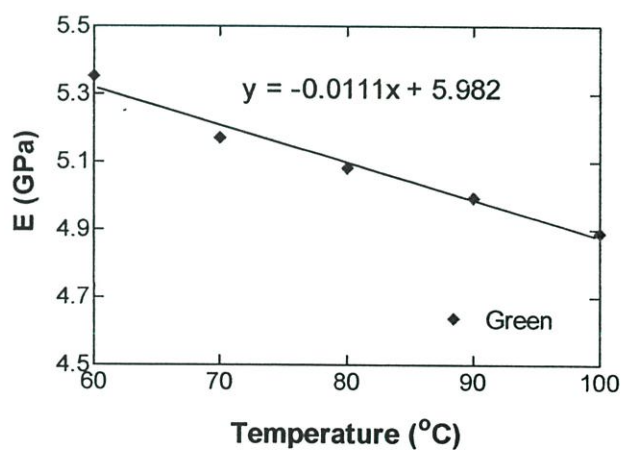


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.42 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีส้มเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

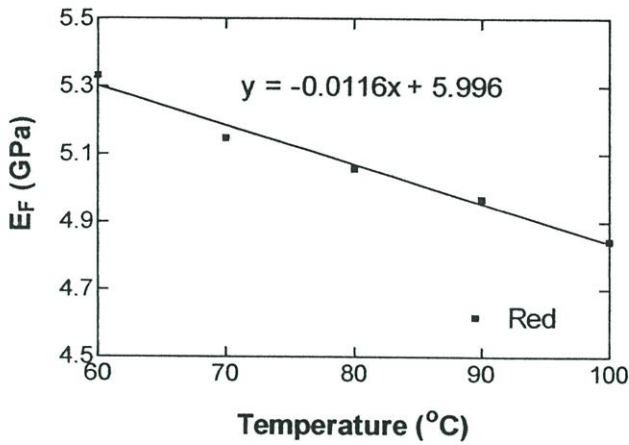


(ก) ทางกล

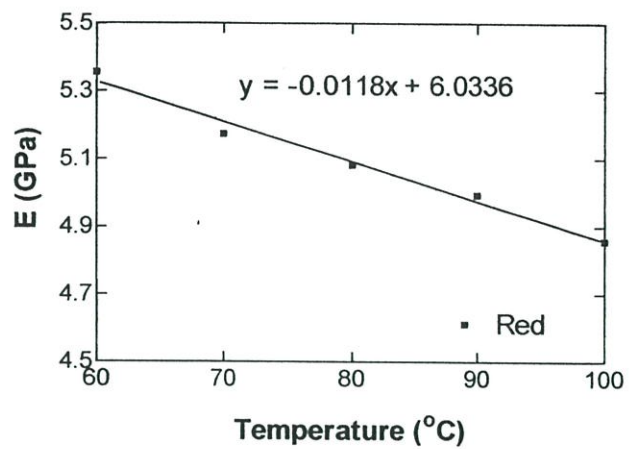


(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.43 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีเขียวเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก



(ก) ทางกล



(ข) ทางอัลตราโซนิก

รูปที่ 5.44 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกสีแดงเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C ทดสอบโดยวิธีทางกลและทางอัลตราโซนิก

จากกราฟรูปที่ 5.25-5.26 จะเห็นได้ว่าพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อยังไม่ให้อุณหภูมิความร้อน ค่าความต้านทานแรงดัดของพลาสติกอะคริลิกแต่ละสีที่ระยะดัดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งวิธีการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบทางกล คือการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัด 1.25 mm มีค่า  $79.68 \pm 0.23$  MPa ส่วนการทดสอบทางกลมีค่า  $78.93 \pm 0.45$  MPa โดยที่ค่าความต้านทานแรงดัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะดัดเพิ่มขึ้นและเมื่อให้อุณหภูมิความร้อนแก่พลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีค่าความต้านทานแรงดัดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติกอะคริลิกสูงขึ้น

ส่วนกราฟรูปที่ 5.27-5.28 แสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีเมื่อยังไม่ให้ความร้อน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกแต่ละสีมีค่าใกล้เคียงกันทั้งการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบทางกล คือมีค่า  $5.575 \pm 0.003$  GPa ของการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และมีค่า  $5.520 \pm 0.015$  GPa ของการทดสอบทางกล เมื่อให้อุณหภูมิความร้อนแก่พลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติกอะคริลิกสูงขึ้น โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพลาสติกอะคริลิกทุกสีที่ให้อุณหภูมิความร้อนระดับ 60-100 °C เมื่อการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าอยู่ในช่วง 4.860-5.355 GPa ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.006 GPa ส่วนการทดสอบทางกลมีค่าอยู่ในช่วง 4.800-5.301 GPa ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.024 GPa

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการทดลองวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการทดลองวัดเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก กับผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีทางกล การทดลองได้เตรียมแผ่นพลาสติกอะคริลิก 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง ได้แบ่งพลาสติกเป็น 2 แบบ แบบแรกทดสอบโดยไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน และแบบที่สองนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีการอบ เพื่อให้พลาสติกมีความแข็งแรงลดลง โดยสมมติฐานเมื่อพลาสติกอะคริลิกผ่านกระบวนการให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากพันธะโควาเลนต์ ในการเกิดโครงข่ายที่แข็งแรงนั้น ต้องสลายไปหรือเกิดการไหม้เกรียม ทำให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลางพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลง และจากทฤษฎีฟิสิกส์ในบทที่ 2 จะเห็นว่าวัสดุที่มีค่าความเร็วของคลื่นทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ภายในตัวกลางนั้นต่างกัน จะมีค่าสมบัติยืดหยุ่นแตกต่างกันด้วย

สำหรับในบทนี้เป็นบทสรุปผลการทดลองและวิจารณ์ของงานวิจัยการวัดสมบัติยืดหยุ่นพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ตลอดจนปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข ในส่วนของท้ายบทได้เสนอแนวทางวิจัยและการประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต โดยในรายละเอียดของบทสรุปและวิจารณ์มีดังต่อไปนี้

#### 6.1 สรุปผลการวิจัยการวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

1. การวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิก หลักการอาศัยการวัดค่าความเร็วคลื่นทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ในพลาสติกอะคริลิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ นำค่าความเร็วคลื่นที่ได้มาคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ตามสมการที่ 2.46 และนำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้ไปแทนในสมการที่ 4.22 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ซึ่งอุปกรณ์และเครื่องมือของระบบการวัดประกอบไปด้วย เครื่องพัลเซอร์และตัวรับ , ทรานสดิวเซอร์ 2 ตัว เป็นแบบตัวรับตัวส่งตัวเดียวกัน ให้กำเนิดคลื่นตามยาวความถี่กลาง 5 MHz และ

เคลื่อนตามขวางความถี่กลาง 5 MHz , ดิจิตอลลอจิสติกโคปช่วงกว้างความถี่ 100 MHz , เครื่องกำเนิดพัลส์ 30 MHz ตัวคลัปปลิงใช้น้ำผึ้ง

2. เมื่อทำการทดลองวัดค่าความเร็วคลื่นทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้ง 5 สีคือ สีใส สีน้ำเงิน สีส้ม สีเขียว และสีแดง โดยไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน ค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สี มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการทดลองวัดค่าความเร็วคลื่นทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สี ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 60 °C , 70 °C , 80 °C , 90 °C และ 100 °C ค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนในแต่ละอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
3. นำค่าความเร็วคลื่นทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีทางอัลตราโซนิกกับผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีทางกล จะเห็นว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องและมีแนวโน้มเดียวกัน คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกแต่ละสีมีค่าใกล้เคียงกันทั้งการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและทางกล เมื่อนำพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีมาผ่านกระบวนการให้ความร้อน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและทางกล จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติกอะคริลิกสูงขึ้น
4. นำค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ได้จากระบบการวัดทางอัลตราโซนิก มาคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.50-1.25 mm ของพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สี ที่ไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน และผ่านกระบวนการให้ความร้อน เปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดด้วยวิธีทางกล จะเห็นว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องและมีแนวโน้มเดียวกัน คือค่าความต้านทานแรงดัดของพลาสติกอะคริลิกแต่ละสีที่ระยะดัดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันทั้งการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบทางกล และที่ระยะดัดโก่งโค้งมากขึ้นความต้านทานแรงดัดจะมีค่ามากขึ้น เมื่อพลาสติกอะคริลิกทั้ง 5 สีที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน ค่าความต้านทานแรงดัดที่ได้จากการทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและทางกล จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่พลาสติกอะคริลิกสูงขึ้น

5. จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิความร้อนที่เพิ่มให้แก่พลาสติกอะคริลิค มีผลโดยตรงต่อความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นแก่พลาสติกอะคริลิค ค่าความเร็วเฉลี่ยคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางจะมีค่าลดลง เนื่องจากร้อนจะทำให้พลาสติกมีความแข็งแรงลดลง พันธะโควาเลนต์ ในการเกิดโครงข่ายที่แข็งแรงนั้น ต้องสลายไปหรือเกิดการไหม้เกรียม ทำให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลางพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางลดลงส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางมีค่าลดลง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานแรงดัดส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดัดของพลาสติกอะคริลิคที่ให้อุณหภูมิความร้อนมีค่าลดลงตามด้วย
6. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าความต้านทานแรงดัดที่ทดสอบด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก และทดสอบด้วยวิธีทางกลทั้ง 2 วิธีนั้นจะมีความผิดพลาดในการวัดเกิดขึ้นอยู่ในระบบวัด การวัดด้วยวิธีทางอัลตราโซนิกค่าโมดูลัสยืดหยุ่น สามารถคำนวณได้จากความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางในวัสดุตัวกลางที่ทดสอบ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.46 และ 2.48 คือ

$$\text{ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น} \quad E = \frac{V_L^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

$$\text{และค่าอัตราส่วนของปัวซองค์} \quad \nu = \frac{1 - 2 \left( \frac{V_S}{V_L} \right)^2}{2 - 2 \left( \frac{V_S}{V_L} \right)^2}$$

จะเห็นได้ว่าในกรณีของการวัดค่าอัตราส่วนของปัวซองค์ ความผิดพลาดในการวัดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากค่าความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางที่วัดได้ที่มีความถูกต้องหรือมีความผิดพลาดเท่าใด ดังนั้นเทคนิคในการวัดค่าความเร็วคลื่นให้มีความแม่นยำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ค่าอัตราส่วนของปัวซองค์ที่คำนวณได้จากค่าความเร็วมีความถูกต้องสูง จะส่งผลไปถึงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนของปัวซองค์ ดังสมการข้างต้น และมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดก็คือค่าความหนาแน่นของวัสดุ ในการทดลองเพื่อที่จะให้ค่าความหนาแน่นมี

ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด โดยการใช้เครื่องชั่งหน่วยเป็นกรัมความละเอียด 0.0001 g ทำการทดลองชั่งแล้วหาค่าเฉลี่ย ส่วนขนาดของวัสดุใช้ไมโครมิเตอร์ความละเอียด 0.001 mm ทำการทดลองวัดแล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อที่จะได้นำน้ำหนักส่วนปริมาตรในการนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นอย่างถูกต้องเท่าที่สามารถจะทำได้

7. ในงานวิจัยวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิคด้วยคลื่นอัลตราโซนิก สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความต้านทานแรงดัดที่ระยะดัดต่าง ๆ ได้ แต่ค่าความต้านทานแรงดัดที่ทดสอบด้วยวิธีทางด้านอัลตราโซนิก ยังไม่สามารถหาค่าความต้านทานแรงดัดมากที่สุดที่แผ่นวัสดุทดสอบจะสามารถรับแรงดัดได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบทำลายด้วยวิธีการดัดโค้ง ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานแรงดัดที่มากที่สุด จนกระทั่งวัสดุที่ทดสอบหัก จากจุดนี้สามารถนำไปศึกษาและเป็นแนวทางในการทำวิจัยการวัดสมบัติทางกลด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ที่สามารถวัดค่าความต้านทานแรงดัดมากที่สุดจนแผ่นวัสดุทดสอบหักได้ต่อไปในอนาคต

## 6.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

ตัวคลีปปลิงที่เหมาะสมต่อการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางพลาสติกอะคริลิคมีส่วนสำคัญในการเป็นตัวช่วยส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกให้เคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุตัวกลางที่ต้องการทดสอบได้ง่าย สำหรับในการทดลองนี้ได้ใช้ตัวคลีปปลิงน้ำผึ้งเป็นตัวคลีปปลิงแบบสัมผัส หัวโพรบอัลตราโซนิกจะแตะแนบกับพื้นผิวพลาสติกอะคริลิคที่ต้องการตรวจสอบ โดยมีตัวคลีปปลิงกันอยู่ตรงกลาง หัวโพรบอัลตราโซนิกจะถูกกดลงเพื่อลดความหนาของตัวคลีปปลิงให้บางที่สุด ถ้าหากตัวคลีปปลิงมีความหนามาก คลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเข้าไปในวัสดุตัวกลางจะเกิดพัลส์สะท้อนกลับลูกแรก คือระหว่างตัวคลีปปลิงกับพลาสติกอะคริลิค แทนที่จะเป็นพัลส์สะท้อนกลับในตัวกลางพลาสติกอะคริลิค โดยสามารถสังเกตได้จากออสซิลอสโคป ดังนั้นเพื่อต้องการลดปัญหาการเกิดพัลส์สะท้อนกลับที่ตัวคลีปปลิงจึงต้องทำตัวคลีปปลิงให้บางที่สุด หรือในการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางวัสดุด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ สามารถตัดปัญหาเรื่องความหนาของตัวคลีปปลิงที่มีผลต่อการวัดความเร็วคลื่นได้ โดยการใช่วงสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับตั้งแต่  $A_1$  เป็นต้นไป เพราะช่วงระหว่าง  $A_0$  ถึง  $A_1$  คือช่วงคลื่นอัลตราโซนิกออกจากหัวโพรบผ่านตัวคลีปปลิงแล้วผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางที่ทดสอบ ซึ่งอาจมีผลกระทบจากชั้นความหนาของตัวคลีปปลิงได้

การทดลองการวัดความเร็วของคลื่นจึงใช้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_1$  เป็นจุดเริ่มต้น แล้วปรับเครื่องกำเนิดพัลส์ให้สัญญาณอัตราการกระตุ้นลดลง เพื่อให้สัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $B_1$  ซ้อนทับกับสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ  $A_2$  แล้วจะได้ระยะเวลาของอัตราการกระตุ้นระหว่าง  $A_1$  กับ  $A_2$  ก็คือคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปกลับในตัวกลาง ดังนั้นค่าความเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุตัวกลางทดสอบจะสามารถคำนวณหาค่าได้

### 6.3 แนวทางวิจัยและการประยุกต์ใช้ในอนาคต

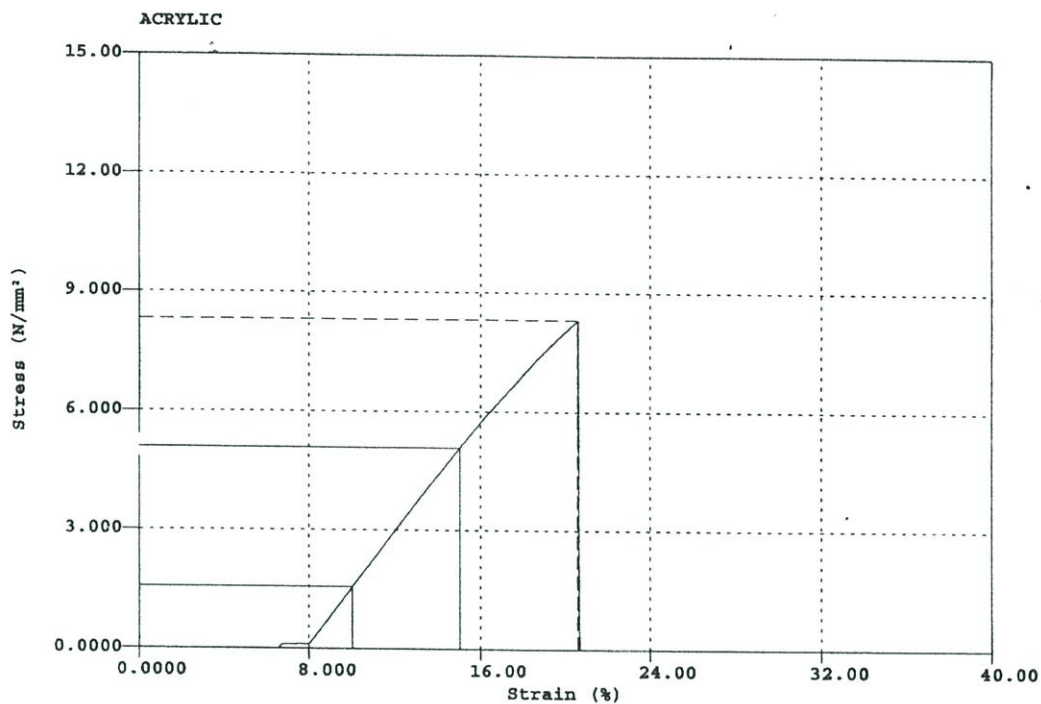
1. จากงานวิจัยการวัดสมบัติยืดหยุ่นของพลาสติกอะคริลิกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย ที่สามารถตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ทุกชิ้นงาน โดยระบบการวัดคลื่นอัลตราโซนิก สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานวัดสมบัติทางกลได้กับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น เหล็ก , สแตนเลส , ทองแดง และ พลาสติก เป็นต้น โดยข้อจำกัดของวัสดุที่จะนำมาทดสอบต้องเป็นวัสดุของแข็งที่คลื่นอัลตราโซนิกตามยาวและตามขวางสามารถผ่านเข้าไปได้ โดยไม่เกิดการกระเจิงหรือการลดทอนของคลื่น จนไม่เห็นสัญญาณของพัลส์สะท้อนกลับ
2. สามารถนำระบบการวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในงานวิจัย ไปประยุกต์ใช้วัดความเร็วคลื่นตามยาวในของเหลว เพื่อหาค่าความหนาแน่นของเหลวที่ทดสอบ หลักการวัดใช้สมบัติการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ไปชนรอยต่อของตัวกลางที่มีค่าอิมพีแดนซ์เสียงแตกต่างกัน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์เสียงจะขึ้นกับค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกและค่าความหนาแน่นของตัวกลาง ดังนั้นการวัดคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปกลับในตัวกลางและแอมพลิจูดของพัลส์สะท้อนกลับ ทำให้สามารถหาค่าความหนาแน่นของเหลวได้ สำหรับแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ เช่น สามารถนำไปวัดค่าความหนาแน่นแบบอัตโนมัติในขบวนการผลิตอุตสาหกรรมต่างๆ และสามารถประยุกต์ใช้ตรวจสอบสารเจือปนที่ทำให้ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารเหลวได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Josef Krautkramer and Herbert Krautkramer.1990. **Ultrasonic Testing of Materials**. 4th ed. New York : Springer-Verlag.
- [2] Pual McIntire (editor).1991. **Nondestructive Testing Handbook**. 2nd ed. vol.7. New York : American Society for Nondestructive Testing.
- [3] Stefan Kocis and Zdenko Figura. 1996. **Ultrasonic Measurements and Technologies**. London : Chapman & Hall.
- [4] Jack Blitz and Geoff Simpson. 1996. **Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing**. London : Chapman & Hall.
- [5] Brydson, J.A. 1999. **Plastics Materials**. London : Butterworths.
- [6] Vishu Shah. 1998. **Handbook of Plastics Testing Technology**. 2nd ed. New York : John Wiley.
- [7] Roger P. Brown. 1988. **Plastics Handbook**. 3rd ed. Singapore : Longman Scientific & Technical.
- [8] Terry L. Richardson and Erik Ladensgard. 1997. **Industrial plastics : theory and application**. Albany : Delmar.
- [9] ASTM D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [10] John P.Bentley. 1988. **Principles of Measurement Systems**. 2nd ed. New York : Longman Scientific & Technical.
- [11] Wichit Sirichote et.al., "Poisson's Ratio of Sintered Al Measured by Ultrasonic Method," Report of Tohoku National Institute, no. 28, 1995. pp.15-22.
- [12] Wichit Sirichote et.al., "Investigation of the Orientation of Glass Fiber in Glass Fiber Reinforced Plastic though Shear Modulus Ultrasonic Measurement,"TDO Quarterly, vol. 4, no.1, 1995. pp. 36-41.
- [13] Budynas, Richard G. 1999. **Advanced strength and applied stress analysis**. 2nd ed. Boston : WCB/McGraw-Hill.
- [14] Beer, Ferdinand P. 1992. **Mechanics of materials**. 2nd ed. London : McGraw-Hill.
- [15] พิษิต เลี่ยมพิพัฒน์. **พลาสติก**. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ : ป สัมพันธ์พาณิชย์. 2538
- [16] มณฑล นายอรุณ. **ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ**. กรุงเทพฯ : ยูไนเต็ทบุ๊คส์. 2531.

- [17] มานพ ตันตระบัณฑิตย์. งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2531.
- [18] เดช พุทธเจริญทอง. กลศาสตร์ของแข็งขั้นสูง. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ. 2541.
- [19] ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. กลศาสตร์ของวัสดุ. กรุงเทพฯ : หจก วีเจ พรีนติ้ง. 2543.
- [20] พุทธิิ ชาโตะ. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2543.
- [21] สุรวุฒิ กิจสัมพันธ์. "การวัดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อด้วยคลื่นอัลตราโซนิก" วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [22] บดินทร์ ดำรงค์ดี. "ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกความถี่ต่ำแบบซี-สแกน" วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.

## ภาคผนวก



กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อพื้นที่และเปอร์เซ็นต์ระยะดัดโค้ง ของการทดสอบพลาสติกอะคริลิกใสไม่ให้อุณหภูมิความร้อน แบบทำลายด้วยวิธีทางกล โดยพิจารณาในกราฟจุดสูงสุดคือค่าแรงดัดต่อพื้นที่ ที่มากที่สุดกระทำต่อวัสดุจนหัก คำนวณเป็นค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด 163.5 MPa เปอร์เซ็นต์ระยะดัดโค้ง 12.33 %

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวนীরันท์ ปิยะวิทยารธรรม เกิดวันที่ 16 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2521 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปีการศึกษา 2542 ในปี พ.ศ. 2543 ได้รับทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ของภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีผลงานวิชาการที่ตีพิมพ์และเผยแพร่คือ

“การวัดความหนาแน่นของของเหลวด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Measuring the Liquid Density by Ultrasonic Wave)” ในการประชุมวิชาการครั้งที่ 41 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2546