

การวัดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
MEASURING THE MECHANICAL PROPERTIES OF CAST-IRON BY
ULTRASONIC METHOD



นายสุรวุฒิ กิจสัมพันธ์
MR. SURAWUT KITSUMPUN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 121078
วัน, เดือน, ปี 12 ส.ย. 2555

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2540
ISBN 974-621-969-3
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**MEASURING THE MECHANICAL PROPERTIES OF CAST-IRON BY
ULTRASONIC METHOD**

SURAWUT KITSUMPUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1997

ISBN 974-621-969-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

นักศึกษา

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ระดับการศึกษา

ภาควิชา

พ.ศ.

การวัดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

นายสุรวุฒิ กิจสัมพันธ์

ผศ.วิชิต ศิริโชติ

รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ฟิสิกส์ประยุกต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2540

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ภายในวัสดุด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับขึ้น ภายในเครื่องมีส่วนประกอบหลักสองส่วนด้วยกันคือ วงจรพัลส์เซอร์สามารถกำเนิดแรงดันไฟฟ้าพัลส์ลบปลายแหลมขนาด $-100V$ และวงจรภาครับสัญญาณตอบสนองความถี่ได้ 10 MHz หลักการพื้นฐานของเทคนิคดังกล่าวอาศัยการวัดช่วงเวลาการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิกพัลส์ภายในวัสดุโดยมีความแม่นยำ $\pm 1ns$ ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกพัลส์ภายในวัสดุจะสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ โดยใช้การวัดค่าความเร็วคลื่นสองชนิดที่เคลื่อนที่ในวัสดุคือความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางจะสามารถหาค่าสมบัติทางกลของวัสดุคือ Young's Modulus, Shear Modulus และ Poisson's ratio ได้ วัสดุที่นำมาวัดสมบัติทางกลในงานวิจัยนี้คือ เหล็กหล่อ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถจะเตรียมให้มีโครงสร้างภายในแตกต่างกันได้ค่อนข้างง่าย ทำให้ได้เหล็กหล่อที่มีสมบัติทางกลที่ต่างกันได้ อีกทั้งค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อยังมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับค่าความหนาแน่นอีกด้วย เครื่องมือที่สร้างขึ้นนอกจากสามารถวัดช่วงเวลาการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิกพัลส์ภายในวัสดุได้แล้ว เครื่องมือนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการวัดอัตราการลดทอนและสเปกตรัมของอัลตราโซนิกพัลส์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่พิจารณา สำหรับใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของวัสดุโดยใช้การเชื่อมต่อเครื่องมือกับดิจิทัลสตอเรจออกสซิลโลสโคป และเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัม

Thesis Title	Measuring the Mechanical Properties of cast-iron by Ultrasonic Method
Student	Mr. Surawut Kitsumpun
Thesis Advisor	Asst.Prof. Wichit Sirichote
Thesis Co-advisor	Assoc.Prof.Dr. Aree Wichainchai
Level of Study	Master of Science in Applied Physics
Department	Applied Physics King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year	1997

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop a sound velocity measuring instrument used for measuring the mechanical properties of cast-iron. The instrument employs a Pulse-Echo-Overlap (PEO) method which is based on precisely measuring time of flight of the ultrasonic pulse transmitted through materials. Main circuit are a pulser for generating a negative impulse voltage of -100V and a receiver having bandwidth of 10 MHz. Since the propagation of ultrasonic wave is related to the mechanical properties of materials on both longitudinal and transverse waves. Such properties as Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's ratio can easily be determined nondestructively. The cast-iron specimen was used in this research by changing the internal structure via heat-treatment, i.e., varying the mechanical properties. Such engineering data as a tensile strength of the cast-iron can also be determined. In addition, the instrument can also be adapted for attenuation and spectral analysis measurement by connecting to a digitized oscilloscope and a spectrum analyzer.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจากท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชติ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดจนเป็นตัวอย่งที่ดีในการทำงานตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ทั้งสองและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญส่ง ศิวโมกษธรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรวิภา ภาลัดดา และ ดร. สมพร จงคำ ที่กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์ ที่กรุณาให้การสนับสนุนการศึกษาในระดับปริญญาโทแก่ผู้วิจัย รวมทั้งทีมงานวิจัยในสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาปัญหาทางด้านเทคนิคต่าง ๆ นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณชนะ ฐิณะกุล ซึ่งกรุณาช่วยนำวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยไปทดสอบด้วยวิธีทางกล ตลอดจนผู้ใกล้ชิดทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุรวุฒิ กิจสัมพันธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการตรวจสอบวัสดุ.....	5
1 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน.....	6
2 ความเร็วเสียง (sound velocity).....	9
3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางและผลเฉลย 1 เมตร.....	11
4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็งกับการเคลื่อนที่ ของคลื่นเสียงในตัวกลางของแข็ง.....	16
4.1 ความเค้น (stress).....	17
4.2 ความเครียด (strain).....	19
4.3 ค่าคงที่ยืดหยุ่นและสมการการเคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็งยืดหยุ่น.....	21
4.4 ค่าสมบัติยืดหยุ่น.....	24
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติยืดหยุ่นกับความเร็วคลื่นเสียงที่เคลื่อน ที่ในตัวกลางของแข็ง.....	26
5 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง.....	33
6 การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นเสียง.....	35
3. เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก.....	40
1 การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง.....	41
1.1 เทคนิค sing-around.....	45
1.2 เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ (PEO).....	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

2	การวัดอัตราการลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง.....	53
3	การวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง.....	62
4.	เครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ.....	65
1	อัลตราโซนิกโพรบ.....	67
1.1	โครงสร้างของอัลตราโซนิกโพรบ.....	71
2	วงจรพัลส์เซอร์.....	83
2.1	วงจรฐานเวลา.....	83
2.2	วงจรปรับความกว้างของสัญญาณ.....	85
2.3	วงจรขั้วเกท.....	86
2.4	วงจรดีเฟอว์เรนเชียล.....	87
3	วงจรภาครับสัญญาณ.....	89
3.1	วงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรขยายสัญญาณพัลส์.....	90
3.2	วงจรเรกติไฟล์สัญญาณไฟสลับบางแบบเต็มคลื่น.....	91
4	ส่วนแสดงผลข้อมูล.....	97
5.	การทดลอง.....	100
1	การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหาค่าสมบัติทางกล.....	101
2	การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ในเหล็กหล่อ.....	126
3	ผลการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ.....	133
3.1	การถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแต่ละชิ้น.....	137
3.2	ผลการวัดสเปกตรัมและรูปร่างสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz.....	140
3.3	ผลการวัดสเปกตรัมและรูปร่างสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 5 MHz.....	145
3.4	ผลการวัดสเปกตรัมและรูปร่างสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 7 MHz.....	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6.สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....	155
1 ผลของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก.....	157
2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ.....	157
3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับค่าความเร็วคลื่นตามยาว.....	157
4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก.....	159
5 ผลการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ.....	159
บรรณานุกรม.....	161
ภาคผนวก.....	163
ภาคผนวก ก.....	164
ใบรับรองคุณภาพอัลตราโซนิกโพรบและ calibration block ของบริษัท PANAMETRICS	
ภาคผนวก ข.....	169
วงจรเครื่องวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ	
ประวัติผู้เขียน.....	173

สารบัญตาราง

หน้า

1	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสำหรับวัสดุแต่ละชนิดโดยใช้โพรบกำเนิตคลื่นตามยาวความถี่ 2 MHz (Josef & Hebart Krautkramer).....	55
2	แสดงสมบัติเปียโซอิเล็กทริกของวัสดุในแต่ละชนิด.....	70
3	แสดงขนาดและความหนาแน่นของเหล็กหล่อที่เตรียมขึ้นโดยนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ.....	102
4	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 1.....	103
5	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 2.....	103
6	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 3.....	104
7	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 4.....	104
8	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 5.....	105
9	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 6.....	105
10	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 7.....	106
11	ค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อคือ Young's modulus (E), Shear modulus (G) และ Poisson's ratio (V) ที่วัดได้ด้วยวิธีอัลตราโซนิกและค่าความทนแรงดึง (σ_u) ที่วัดด้วยวิธีทางกล.....	107
12	แสดงขนาดและความหนาแน่นของเหล็กเหนียวและเหล็กเส้นที่เตรียมขึ้น.....	117
13	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 1.....	119

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

14	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 2.....	119
15	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 3.....	120
16	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 4.....	120
17	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 5.....	121
18	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 1.....	121
19	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 2.....	122
20	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 3.....	122
21	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 4.....	123
22	แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 5.....	123
23	ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเหนียวที่วัดได้โดยวิธีอัลตราโซนิก.....	124
24	ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่วัดได้โดยวิธีอัลตราโซนิก.....	124
25	ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเหนียวที่วัดได้โดยวิธีทดสอบทางกล.....	125
26	ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่วัดได้โดยวิธีทดสอบทางกล.....	125
27	แสดงขนาด, ความหนาแน่นของเหล็กหล่อ, อุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็ก หล่อและความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อที่เตรียมขึ้นแต่ละชิ้น.....	126
28	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ แต่ละชิ้น.....	132

สารบัญภาพ

หน้า

1	แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน.....	6
2	แบบจำลองการยึดติดกันของอนุภาคในตัวกลาง.....	8
3	คลื่นตามยาว.....	10
4	คลื่นตามขวาง.....	10
5	ความดันและความเร็วในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร.....	11
6	(ก) คลื่นความดันที่เวลา $t = 0$ (ข) คลื่นความดันที่เวลา $t = \Delta t$	15
7	ส่วนประกอบของสเตรสที่กระทำบนตัวกลางของแข็งที่มีรูปทรงเป็น สี่เหลี่ยมลูกบาศก์.....	18
8	การเปลี่ยนรูปร่างของตัวกลางที่มีสมบัติยืดหยุ่นจากหน่วยย่อย PQ มาเป็น P'Q'.....	19
9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	30
10	ลักษณะการวัดเรียงตัวและรูปร่างของกราฟไฟท์ในเหล็กหล่อโดยรูปที่ 10 (ก) เป็นเหล็กหล่อสีเทา และรูปที่ 10 (ข) เป็นเหล็กหล่อทรงกลม.....	31
11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเสียงตามยาวกับค่าความหนาแน่น (σ_u) (Ziegler และ Gerstness ปี ค.ศ. 1958).....	32
12	ตัวกลางอะลูมิเนียมที่ได้เตรียมขึ้นโดยชุดแรกมี $\alpha = 0^\circ$ และ $D = 2, 4,$ $8, 16$ mm ชุดที่สองมี $\alpha = 0^\circ$, $D = 8$ mm และ $\alpha = 10^\circ$, $D = 16$ mm.....	36
13	สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกของตัวกลางอะลูมิเนียมชุดแรกที่มี $\alpha = 0^\circ$ โดย (ก) เป็นสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิด (ข) เป็น สเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 2$ mm (ค) เป็นสเปกตรัมของตัว กลางที่มี $D = 4$ mm (ง) เป็นสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 8$ mm และ (จ) เป็นสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 16$ mm (ข้อมูลจาก the Future of Ultrasonic Spectroscopy (P.M. Reynolds, ed.) Reproduced by permission of the B.N.F. Metals Technology Centre, Wantage, England).....	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

14	สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกของตัวกลางอลูมิเนียมชุดที่สองโดยที่ (ก) แสดงสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิด (ข) แสดงสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 8 \text{ mm}$, $\alpha = 0^\circ$ และ (ค) แสดงสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 16 \text{ mm}$, $\alpha = 0^\circ$ (ข้อมูลจาก the Future of Ultrasonic Spectroscopy (P.M. Reynolds, ed.) Reproduced by permission of the B.N.F. Metals Technology Centre, Wantage, England).....	38
15	การทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นที่รอยต่อของตัวกลาง.....	41
16	แสดงขนาดความเข้มและเฟสของคลื่นทะลุผ่านและสะท้อนกลับเมื่อเคลื่อนที่ไปตกกระทบบรอยต่อของตัวกลางคนละชนิดรูปที่ 16 (ก) เมื่อ $Z_1 > Z_2$ รูปที่ 16(ข) เมื่อ $Z_1 < Z_2$	43
17	แสดงลักษณะโครงสร้างการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ.....	44
18	แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิค sing-around : (ก) เมื่อใช้ Tx และ Rx โพรบ และ (ข) เมื่อใช้โพรบชนิดเดียว (Tx/Rx).....	46
19	แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิค PEO.....	48
20	ลักษณะสัญญาณของคลื่นขณะยังไม่เกิดการซ้อนทับ.....	49
21	ลักษณะสัญญาณของคลื่นเมื่อเกิดการซ้อนทับ.....	50
22	Pulse-Echo-Overlap Timing Module Model 5053A(PANAMETRICS).....	52
23	สัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกในแอมพลิฟายเออร์.....	53
24	แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่.....	56
25	แสดงการสะท้อน การหักเห และการเปลี่ยนโหมดของคลื่นเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกตกกระทบบเป็นมุมกับรอยต่อของตัวกลาง.....	57
26	แสดงมุมวิกฤตที่หนึ่งของรอยต่อตัวกลางระหว่างน้ำกับอะลูมิเนียม.....	59
27	แสดงลักษณะสัญญาณและเวลาที่หน่วงไปเมื่อเกิดการเปลี่ยนโหมด.....	61
28	แสดงการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง.....	63
29	โครงสร้างของเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้.....	66
30	แสดงการเกิดปรากฏการณ์เปียโซอิเล็กทริกของเปียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์....	69

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

31	คลื่นยืนตัวในแผ่นผลึกเมื่อความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่น.....	68
32	อัลตราโซนิกโพรบชนิดกำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง.....	69
33	โครงสร้างของอัลตราโซนิกโพรบ.....	71
34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์ของโพรบ.....	34
35	วงจรสำหรับใช้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ลบปลายแหลม.....	73
36	ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าพัลส์ลบปลายแหลม.....	74
37	แสดงสัญญาณพัลส์ลบปลายแหลมที่ไปขับโพรบและคลื่นความดันที่โพรบกำเนิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์.....	76
38	แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบในแต่ละโหมดของบริษัท PANAMETRICS.....	79
39	โพรบกำเนิดคลื่นตามยาวรุ่น V106 : (ก) แสดงลักษณะภายนอกของโพรบ (ข) แสดงลักษณะสัญญาณคลื่นเสียงที่โพรบกำเนิดขึ้นและ (ค) แสดงลักษณะสเปกตรัมของคลื่น (ข้อมูลจากใบรับรองคุณภาพของบริษัท PANAMETRICS).....	81
40	โพรบกำเนิดคลื่นตามขวางรุ่น V154 : (ก) แสดงลักษณะภายนอกของโพรบ (ข) แสดงลักษณะสัญญาณคลื่นเสียงที่โพรบกำเนิดขึ้นและ (ค) แสดงลักษณะสเปกตรัมของคลื่น (ข้อมูลใบรับรองคุณภาพของบริษัท PANAMETRICS).....	82
41	ลักษณะวงจรและสัญญาณเอาต์พุตของวงจร VCO.....	44
42	ลักษณะวงจรและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์.....	85
43	: (ก) วงจรชุดขับเกท, (ข) สัญญาณที่ขาเกทซอสและ (ค) สัญญาณ rise time ที่ขาเกท.....	86
44	: (ก) วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเรจิสเตอร์ และ (ข) แสดงสัญญาณพัลส์ลบปลายแหลมที่ได้จากวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเรจิสเตอร์.....	88
45	แสดงวงจรภายในและสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์เบอร์ AD844.....	89
46	ลักษณะวงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรรขยายสัญญาณพัลส์.....	90
47	แสดงวงจรเรดดิไฟล์สัญญาณแบบเต็มคลื่น.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

48	แสดงวงจรภายในและสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์เบอร์ AD847.....	92
49	สัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ในแต่ละส่วนภายในวงจรภาครับสัญญาณ.....	95
50	แสดงลักษณะภายนอกและภายในของเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้.....	96
51	ดิจิตอลสตอเรจออสซิลโลสโคป (Tektronix; TDS420A).....	97
52	เครื่องนับความถี่ (Hewlett Packard; HP5316B).....	98
53	ชุดวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ.....	99
54	ลักษณะเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นในงานวิจัย.....	101
55	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและความเร็ว คลื่นตามยาว.....	108
56	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและความเร็ว คลื่นตามขวาง.....	109
57	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและอัตราส่วน ของความเร็วคลื่นตามขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว.....	110
58	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus (G) และความเร็วคลื่น ตามขวาง.....	111
59	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus (E) และ ความเร็วคลื่นตาม ขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว.....	112
60	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio (ν) และความเร็วคลื่นตาม ขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว.....	113
61	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและ ค่าความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อ.....	114
62	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อและ ความเร็วคลื่นตามยาว.....	115
63	ลักษณะเหล็กเหนียวที่เตรียมขึ้น.....	116
64	ลักษณะเหล็กเส้นที่เตรียมขึ้น.....	117
65	แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน เหล็กหล่อหมายเลข 1.....	127

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

66	แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน เหล็กหล่อหมายเลข 2.....	128
67	แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน เหล็กหล่อหมายเลข 3.....	129
68	แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน เหล็กหล่อหมายเลข 4.....	130
69	แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน เหล็กหล่อหมายเลข 5.....	131
70	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นตามยาวและค่าสัมประสิทธิ์การ ลดทอนของคลื่น.....	132
71	แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด 2.25 MHz (ข้อมูลจากบริษัท PANAMETRICS).....	134
72	แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด 5 MHz (ข้อมูลจากบริษัท PANAMETRICS).....	135
73	แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด 7 MHz	136
74	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 1.....	137
75	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 2.....	138
76	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 3.....	138
77	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 4.....	139
78	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 5.....	139
79	แสดงสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็ก หล่อแต่ละชิ้นโดยใช้โพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz	144
80	แสดงสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็ก หล่อแต่ละชิ้นโดยใช้โพรบขนาดความถี่ 5 MHz	149
81	แสดงสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็ก หล่อแต่ละชิ้นโดยใช้โพรบขนาดความถี่ 7 MHz	154

ต่างกันไปสำหรับวัสดุตัวกลางแต่ละชนิด โดยตัวแปรที่ทำให้ความเร็วในการถ่ายทอดพลังงานของอนุภาคแตกต่างกันในวัสดุตัวกลางแต่ละชนิดก็คือ ค่าสมบัติยืดหยุ่น (elastic properties) หรือค่าสมบัติทางกล (mechanical properties) สำหรับแบบจำลองอย่างง่ายของวัสดุในแต่ละชนิดที่ได้สร้างขึ้นโดยมีอนุภาคซึ่งมีมวลค่าหนึ่ง ยึดติดกับอนุภาคข้างเคียงด้วยขนาดแรงค่าหนึ่ง ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคนี้ก็คือ ค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุในแต่ละชนิดโดยเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านด้วยขนาดของค่าสมบัติยืดหยุ่นที่ต่างกันของวัสดุตัวกลางทำให้ตัวกลางความเร็วที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในวัสดุแต่ละชนิดจะต่างกันไปด้วย ดังนั้นโดยใช้เทคนิคการวัดความเร็วที่คลื่นเคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางสามารถจะบ่งถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านได้ โดยค่าสมบัติยืดหยุ่นที่มีความสัมพันธ์กันกับค่าความเร็วของคลื่นก็คือค่า Young's modulus (E) Shear modulus (G) Poisson's ratio (V), และ Tensile strength เป็นต้น

จากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลางใด ๆ พลังงานของคลื่นถูกกลดทอนลง ด้วยเหตุผลที่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางจะทำให้อนุภาคจากที่เคยอยู่ในสภาวะสมดุลเกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังกลับสอดคล้องกับจังหวะพลังงานของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังกลับของอนุภาคหรือเกิดการสั่นของอนุภาคจะมีแรงเสียดทานต้านทานการสั่นของอนุภาคทำให้พลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปกลายเป็นความร้อน และอีกกรณีหนึ่งก็คือความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุตัวกลางซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของคลื่นเสียงขึ้น พลังงานของคลื่นก็จะสูญเสียไปเนื่องจากเกิดการกระเจิงดังกล่าว ด้วยเหตุนี้เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะเกิดการลดทอนพลังงานของคลื่นเสียงขึ้น ซึ่งตัวกลางในแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นแตกต่างกันไป โดยเมื่อพลังงานคลื่นเกิดการลดทอนของพลังงานซึ่งเป็นผลมาจากการที่พลังงานสูญเสียไปกลายเป็นความร้อนหรือพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากเกิดการกระเจิงของคลื่นขึ้น จะทำให้รูปร่างสัญญาณของคลื่นมีลักษณะรูปร่างเปลี่ยนไปจากรูปร่างของคลื่นจากแหล่งกำเนิด ด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นเมื่อเกิดการลดทอนของพลังงานจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะรูปร่างและค่าความถี่กลางแตกต่างไปจากสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิด ดังนั้นด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมและวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลางก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุได้

และด้วยลักษณะพิเศษของคลื่นอัลตราโซนิคก็เป็นคลื่นที่มีขนาดความยาวของคลื่นสั้นหรือมีขนาดความถี่สูง ทำให้ลำของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุตัวกลางมีขนาดแคบจึงเหมาะที่จะนำมาใช้โพรบเข้าไปยังวัสดุตัวกลาง ซึ่งเป็นพื้นฐานในการนำคลื่นอัลตราโซนิคมาใช้ตรวจวัดสมบัติทางกลของวัสดุแบบไม่ทำลายชิ้นงาน โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีการนำคลื่นอัลตราโซนิคมาใช้ตรวจสอบวัสดุเช่น การตรวจหารอยตำหนิภายในของวัสดุ หรือในแง่ของงานวิจัยเช่น การนำเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่ส่งวนไวสำหรับภารกิจงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นอัลตราโซนิกมาตรวจวัดค่าสมบัติทางกล หรือการศึกษาลักษณะภายในของวัสดุด้วยการวัด อัตราการลดทอนรวมทั้งการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลางเป็นต้น ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมหรือในสาขาของงานที่ต้องการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานอย่างละเอียด โดยเหตุผลที่คลื่นอัลตราโซนิกถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบอย่างแพร่หลายก็คือ

1. ชิ้นงานที่ถูกตรวจสอบจะไม่ถูกทำลายไปหลังการตรวจสอบ
2. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบซึ่งประกอบไปด้วยส่วนกำเนิดคลื่น ส่วนรับคลื่น และส่วนแสดงผล มีขนาดเล็กและไม่สลับซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปใช้
3. ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีความเชื่อถือได้สูง

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดค่าสมบัติทางกลของวัสดุโดยการวัดค่าความเร็วคลื่นสองชนิดที่เคลื่อนที่ในตัวกลางคือ ความเร็วของคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) และความเร็วของคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นทั้งสองชนิดจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองวัดสำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นเหล็กหล่อ ซึ่งจะทำให้โครงสร้างภายในเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการทนความร้อน ทำให้ค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิม ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือ สร้างเครื่องมือตรวจวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ (Pulse Echo Overlap) โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะนำไปทดลองศึกษาเทคนิคการวัดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อและทดลองศึกษาเทคนิคการวัดอัตราการลดทอนรวมทั้งศึกษาเทคนิคการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

สำหรับในรายงานฉบับนี้จะได้นำเสนอเทคนิคการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความแม่นยำ และวิธีการสร้างเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับเป็นหลัก โดยในรายงานจะมีรายละเอียดแบ่งออกเป็นบทย่อยคือ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลาง ซึ่งจะอธิบายถึงสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นในวัสดุรวมถึงผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ โดยจะนำมาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางกับค่าสมบัติทางกลของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน รวมทั้งจะกล่าวถึงทฤษฎีการลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางและสเปกตรัมที่ได้เมื่อเกิดการลดทอนของคลื่น ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงหลักพื้นฐานของเครื่องอัลตราโซนิกโดยทั่วไป และเทคนิคการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลางให้มีความแม่นยำรวมทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการวัดอัตราการลดทอนและการวัดสเปกตรัมก็จะนำไปเสนอด้วย ในบทที่ 4 จะได้อธิบายถึงหลักการสร้างเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ซึ่งจะแสดงข้อมูลของส่วนประกอบทุกส่วนของเครื่องมือที่สร้างขึ้นอย่างละเอียด ในบทที่ 5 จะเป็นผลการทดลองวัดค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ, ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและสเปกตรัมของคลื่นอัตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ และในบทสุดท้ายคือบทที่ 6 จะเป็นบทสรุปผลการสร้างเครื่องมือวัดความเร็วและผลของการนำเครื่องมือมาทดลองวัดค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

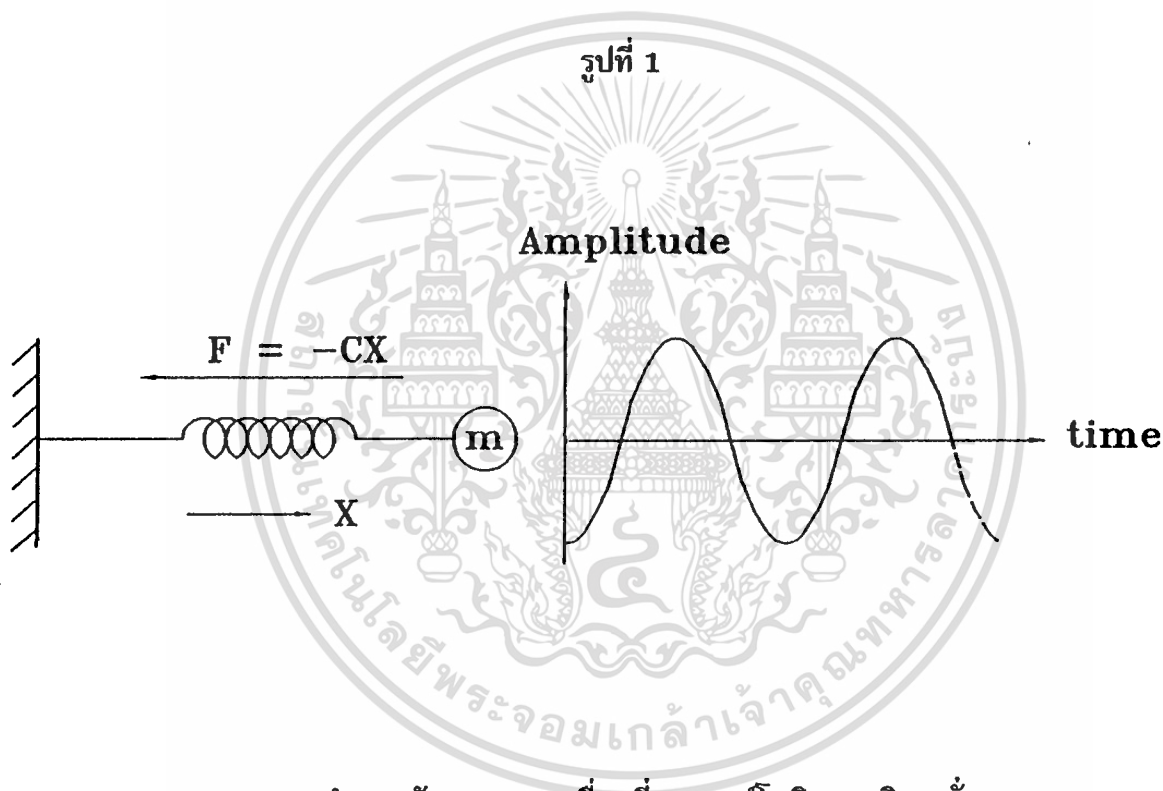
บทที่ 2

ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับการตรวจสอบวัสดุ

ด้วยลักษณะฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งมีฟังก์ชันการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน ดังนั้นเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุตัวกลางจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานให้แก่อนุภาคที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัสดุตัวกลาง ทำให้อนุภาคของตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ออกจากสภาวะสมดุล โดยมีฟังก์ชันการเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชันด้วย ลักษณะการเคลื่อนที่ที่มีฟังก์ชันเป็นแบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชันสามารถจำลองได้จากลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลที่ยึดติดกับสปริงซึ่งจะมีแรงดึงกลับของสปริงทำให้มวลพยายามเคลื่อนที่เข้าสู่สภาวะสมดุลตลอดเวลา โดยภายในวัสดุตัวกลางซึ่งประกอบกันขึ้นจากอนุภาคย่อยยึดเหนี่ยวกันขึ้นเป็นโครงข่าย ค่าแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาคก็เปรียบเสมือนค่าแรงดึงกลับของสปริงภายในระบบจำลองของการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน ดังนั้นเมื่อมีคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้อนุภาคของวัสดุตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุลและเกิดการถ่ายทอดพลังงานไปยังอนุภาคข้างเคียง โดยจะมีแรงดึงกลับของสปริงทำให้อนุภาคพยายามเคลื่อนที่เข้าสู่สภาวะสมดุล และด้วยลักษณะการถ่ายทอดพลังงานต่อกันเป็นทอด ๆ ของอนุภาคแต่ละตัวจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น จากลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกจะเห็นว่าสำหรับในวัสดุตัวกลางต่างชนิดกันซึ่งมีค่าสมบัติยืดหยุ่นต่างกัน ขนาดของอนุภาคแรงยึดเหนี่ยวรวมทั้งระยะห่างระหว่างอนุภาคจะต่างกันด้วย ทำให้อัตราในการถ่ายทอดพลังงานจากอนุภาคตัวหนึ่งไปยังอนุภาคอีกตัวหนึ่งต่างกัน ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางแต่ละชนิดก็จะต่างกันไปด้วย โดยรายละเอียดในบทนี้จะได้กล่าวถึงลักษณะการเคลื่อนที่และการถ่ายทอดพลังงานของอนุภาคในวัสดุตัวกลางเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านโดยจะแสดงถึงการได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าสมบัติทางกลของวัสดุตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งตัวแปรที่เป็นปัจจัยที่กำหนดขนาดของค่าสมบัติทางกลของวัสดุในแต่ละชนิดก็คือค่าคงที่สปริงหรือค่าคงที่ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันของอนุภาคนั่นเอง และนอกจากรายละเอียดที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าสมบัติทางกลของวัสดุตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านแล้วยังจะได้กล่าวถึงทฤษฎีการลดทอนและการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่พิจารณาซึ่งสามารถจะนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะภายในของวัสดุตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านได้

1 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน

ในการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นการนำสมบัติของคลื่นทางกล (mechanical wave) มาใช้ในการตรวจสอบ ซึ่งจะแตกต่างจากการตรวจสอบด้วยวิธีการอื่น เช่น การตรวจสอบวัสดุด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งจะนำสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) มาใช้ตรวจสอบ เป็นต้น โดยลักษณะของคลื่นกล (mechanical wave) จะมีฟังก์ชันของการเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน (harmonic oscillation) สามารถพิจารณาการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชันได้จากแบบจำลองมวลที่ยึดอยู่กับสปริง ดังรูปที่ 1



แบบจำลองลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกออสซิลเลชัน

ในรูปที่ 1 สปริงมีค่าคงที่สปริงหรือสตีเฟเนส (stiffness) คือ C (N/m) และมีค่าแรงดึงสปริง (restoring force) คือ F (N) โดยที่ F มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2.1 คือ

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

เมื่อ X คือระยะขจัด (m) ของมวล m (kg) จากตำแหน่งหยุดนิ่งและจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ d^2x/dt^2 คือ ค่าความเร่งของมวล m และโดยการแทนค่าสมการที่ (2.1) ลงในสมการที่ (2.2) จะได้

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

โดยทั้ง c และ m มีค่าเป็นบวกทั้งคู่ สามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่ได้ คือ

$$\omega_0 = \sqrt{c/m} \quad (2.4)$$

สมการที่ (2.3) จึงแสดงใหม่ได้เป็น

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2.5)$$

เห็นได้ว่าสมการที่ (2.5) ก็คือสมการดิฟเฟอเรนเชียลเชิงเส้น (linear differential equation) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของมวลที่มีแรงกระทำ หรืออยู่ภายใต้กฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์มอนิกออสซิลเลชัน โดยมีผลเฉลยของสมการ คือ

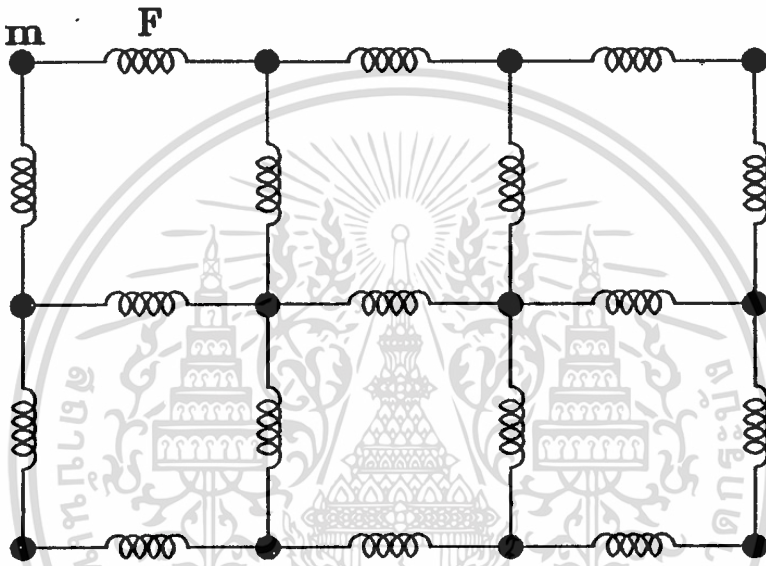
$$X(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t \quad (2.6)$$

เมื่อ A และ B คือค่าคงที่ใดๆ (arbitrary constant) และ ω_0 คือค่าความถี่เชิงมุม (angular frequency) มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที (rad/s) ในหนึ่งรอบของการเคลื่อนที่จะมีขนาด 2π เรเดียน ดังนั้นจะได้ขนาดความถี่ f_0 (Hz) สัมพันธ์กับ ω_0 คือ

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{\sqrt{c/m}}{2\pi} \quad (2.7)$$

ในสมการที่ (2.7) จะเห็นว่าถ้าขนาดของค่าคงที่สปริง (C) ลดลงหรือมวล (m) มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ (f_0) ในการสั่นมีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขที่ใช้ออกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของคลื่นกล หรือคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ต่างๆ กันภายในตัวกลางแต่ละชนิด ที่มีลักษณะโครงสร้างภายในแตกต่างกัน แบบจำลองอย่างง่ายของตัวกลางแต่ละชนิด อนุภาคแต่ละตัวจะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค แสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 2



แบบจำลองการยึดติดกันของอนุภาคในตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในตัวกลางใด ๆ เปรียบเสมือนเป็นการส่งพลังงานให้กับอนุภาคในตัวกลาง ซึ่งอนุภาคแต่ละตัวจะยึดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาค เมื่ออนุภาคได้รับพลังงานจากคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งมีการเคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชันฮาร์โมนิก ออสซิลเลชัน พลังงานที่ส่งให้กับอนุภาคก็จะเป็นฟังก์ชันของฮาร์โมนิกออสซิลเลชันด้วย จะทำให้อนุภาคเกิดการสั่นเป็นแบบฮาร์โมนิก โดยระยะขจัดในการสั่นของอนุภาคจะแปรผันกับแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่เข้ามา และค่าความหนาแน่นของอนุภาคในตัวกลางชนิดนั้น ๆ

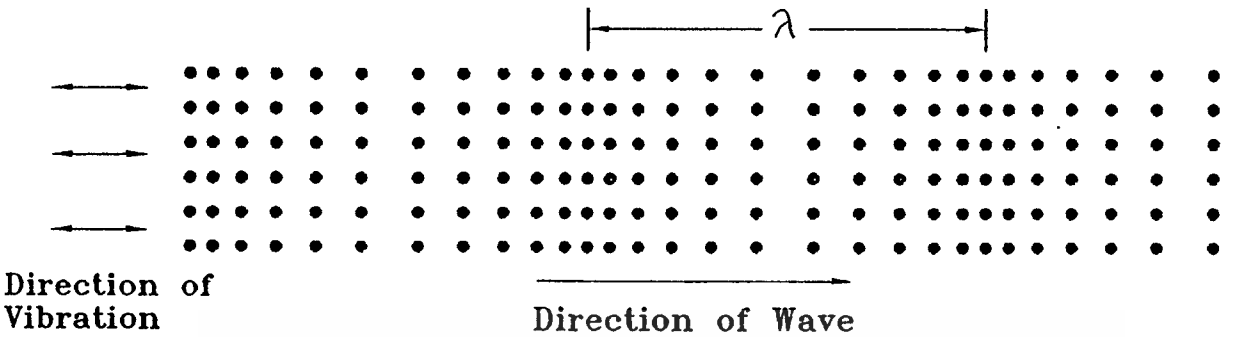
การที่อนุภาคได้รับพลังงานจากคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่เข้ามาทำให้มีแรงผลักให้อนุภาคที่เคยอยู่ในสภาวะสมดุลเกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งแรงที่มากกระทำกับอนุภาคดังกล่าวมีทิศทางทั้งแรงผลักและแรงดึงส่งมาให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถอยหลังตามจังหวะของแรงผลักและแรงดึง โดยการเคลื่อนที่ไปและกลับของอนุภาคเมื่อได้รับแรงมา กระทำจะมีการส่งพลังงานให้กับอนุภาคข้างเคียง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลังงาน ซึ่งลักษณะนี้ก็คือ การถ่ายทอดพลังงานจากอนุภาคตัวหนึ่งไปยังอนุภาคอีกตัวหนึ่ง หรืออีกนัยหนึ่งคือ เกิดการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางนั่นเอง

ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกจะครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 20 KHZ ขึ้นไป ซึ่งพบว่าไม่ใช่ทุกค่าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่จะสามารถเคลื่อนเข้าไปในตัวกลางแต่ละชนิดได้ โดยข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ที่แต่ละค่าความถี่ของคลื่นเห็นได้จากเงื่อนไขในสมการที่ (2.7) กล่าวคือถ้าค่าคงที่สปริงลดลงหรือมวลของอนุภาคเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความถี่ในการสั่นของอนุภาคลดลง ซึ่งตัวกลางในแต่ละชนิดเช่นตัวกลางที่เป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับตัวกลางที่เป็นของแข็งแล้ว จะเห็นว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างอนุภาคหรือค่าคงที่สปริง สำหรับในตัวกลางที่เป็นของแข็งจะสูงกว่าในที่เป็นตัวกลางที่เป็นของเหลว ดังนั้นค่าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็งจึงสูงกว่าในตัวกลางที่เป็นของเหลว เป็นต้น

2 ความเร็วเสียง (sound velocity)

จากลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง โดยพิจารณาจากแบบจำลองการยึดเหนี่ยวกันของอนุภาคในตัวกลาง จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นตัวกลางที่มีสถานะเป็นก๊าซ, ของเหลวหรือของแข็งก็ตาม จะพบว่าทิศทางในการสั่นของอนุภาคจะอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่ของคลื่น ซึ่งจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่ไปกลับผ่านจุดสมดุลของอนุภาคต่อวินาที ก็คือขนาดความถี่ของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่เข้ามาในตัวกลาง และขนาดความยาวคลื่นก็คือระยะห่างระหว่างระนาบของการส่งพลังงาน โดยค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางจะเป็นผลคูณระหว่างค่าความถี่และความยาวคลื่น เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า คลื่นตามยาว (longitudinal wave) หรือคลื่นอัด (compression wave) มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3

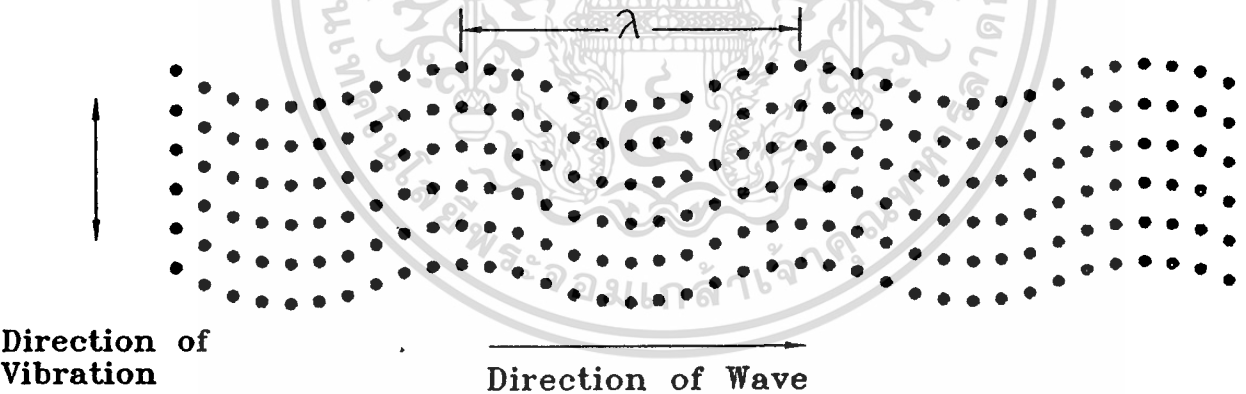
รูปที่ 3



คลื่นตามยาว

ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง นอกจากคลื่นตามยาวแล้ว ยังมีคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ก็คือ คลื่นตามขวาง (transverse wave) คลื่นชนิดนี้จะมีแนวการสั่นของอนุภาคอยู่ในแนวตามขวาง ตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4

รูปที่ 4



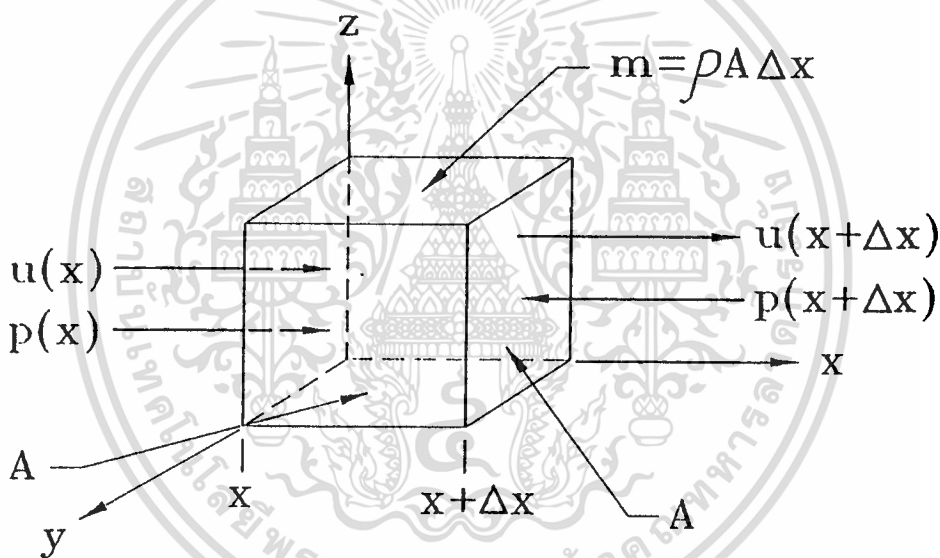
คลื่นตามขวาง

ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง พลังงานที่ใช้ถ่ายทอดไปยังอนุภาคข้างเคียงจะมีค่าต่ำกว่าคลื่นตามยาว ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางจึงต่ำกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว ซึ่งสำหรับในตัวกลางชนิดเดียวกันความเร็วคลื่นตามขวางจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าความเร็วคลื่นตามยาว

3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางและผลเฉลย 1 มิติ

ในการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง สามารถจะพิจารณาได้จากลักษณะการสั่นของโมเลกุล หรืออะตอมของตัวกลางที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน โดยระยะขจัดในการสั่นของโมเลกุลหรืออะตอมของตัวกลางจะแปรผันกับขนาดแอมพลิจูดของคลื่นเสียง รวมทั้งค่าความหนาแน่นของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน พิจารณาจากรูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรของตัวกลางเมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน โดยให้ทิศทางการแพร่ของคลื่นเสียงในตัวกลางอยู่ในแนวแกน X

รูปที่ 5



ความดันและความเร็วในวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

จากรูปที่ 5 ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรในตัวกลางเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ โดยมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทุกด้าน และเป็นวัสดุตัวกลางที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ถูกคลื่นเสียงที่มีค่าความดันคลื่น คือ $p(x)$ เคลื่อนที่ผ่านโดยมีทิศทางการแพร่ของคลื่นอยู่ในแกน X เมื่ออนุภาคในตัวกลางได้รับพลังงานจากคลื่นความดัน ส่งผลให้เกิดการสั่นในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่ของคลื่นเสียง โดยมีระยะขจัดในการสั่นของอนุภาคเท่ากับ Δx ซึ่งจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะขจัดเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของขนาดเวลา ก็คือขนาดความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางชนิดนี้นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงใน 1 มิติ (one-dimensional wave equation) จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$F = m \frac{du}{dt} = m \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ $\frac{\partial x}{\partial t} = u$ จะได้สมการที่ (2.8) เป็น

$$F = m \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.9)$$

โดยที่ค่าความดันก็คือขนาดของแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เพราะฉะนั้นขนาดแรงสุทธิบนวัสดุก็คือ

$$F = [p(x) - p(x + \Delta x)] A \quad (2.10)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์
 m คือ มวลของวัสดุมีขนาดเท่ากับ $\rho \Delta x$
 ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

นำสมการที่ (2.10) แทนลงในสมการที่ (2.9) ได้

$$\frac{p(x) - p(x + \Delta x)}{\Delta x} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

ในธรรมชาติ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุตัวกลาง เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านจะมีค่าต่ำมาก จึงสามารถกำหนดให้ Δx มีลิมิตเข้าสู่ศูนย์ ($\Delta x \rightarrow 0$) เพราะฉะนั้นจะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียล คือ

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอนุภาคในตัวกลาง เมื่อมีคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านจะมีค่าต่ำมาก เมื่อเทียบกับความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางขณะที่ยังไม่มีคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งความหนาแน่นของอนุภาคในตัวกลางสามารถพิจารณาได้มาจากผลรวมของความหนาแน่นจากสองส่วนด้วยกันคือ

$$\rho = \rho_0 + \rho_1$$

เมื่อ ρ_0 คือความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาคซึ่งมีค่าคงที่

ρ_1 คือความหนาแน่นที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลา

โดยที่ $\rho_1 \ll \rho_0$

ใช้เงื่อนไขในสมการที่ (2.12) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (2.13)$$

หรือ $\text{grad } P + \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = 0$

สมการที่ (2.13) ก็คือสมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันและค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง โดยพิจารณาได้มาจากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน และโดยใช้กฎการอนุรักษ์ของมวล (conservative of mass) จะเห็นว่ามวลสุทธิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะขจัดมีขนาดสูงสุด จะมีขนาดเท่ากับมวลสุทธิที่ลดลงภายในปริมาตรของวัสดุซึ่งจะได้

$$A[\rho(x+\Delta x)u(x+\Delta x) - \rho(x)u(x)] = -A\Delta x \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \quad (2.14)$$

เมื่อเทอมซ้ายมือของสมการที่ (2.14) คือ ขนาดมวลที่เพิ่มขึ้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา และเทอมขวามือก็คืออัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดมวลที่ลดลง ซึ่งจะได้

$$\frac{\rho(x + \Delta x)u(x + \Delta x) - \rho(x)u(x)}{\Delta x} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.15)$$

จากที่ลิมิตของ Δx เข้าสู่ศูนย์ ($\Delta x \rightarrow 0$) สมการที่ (2.15) เขียนอยู่ในรูปแบบของสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้ คือ

$$\frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

หรือ

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p_1}{\partial t} = 0 \quad (2.17)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_0 และ ρ_1 ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าไป ซึ่งสมบัติดังกล่าวในกรณีที่ตัวกลางมีสถานะเป็นของเหลวจะพิจารณาได้จากค่าคงที่คอมเพรสซิบิลิตี (compressibility constant : K) หรือค่าความสามารถในการอัดของวัสดุตัวกลาง ซึ่งจะบอกถึงขนาดความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีคลื่นเสียงซึ่งเป็นคลื่นความดันเคลื่อนที่ผ่าน โดยที่

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = KP \quad (2.18)$$

แทนความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{K} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.19)$$

ซึ่งทั้งสมการที่ (2.13) และ (2.19) ก็คือสมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันและค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่พิจารณานั้นเอง

ทำการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (2.13) เทียบกับ X จะได้

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = 0 \quad (2.20)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (2.19) เทียบกับ t จะได้

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{1}{K} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = 0 \quad (2.21)$$

นำสมการที่ (2.20) รวมกับสมการที่ (2.21) จะได้

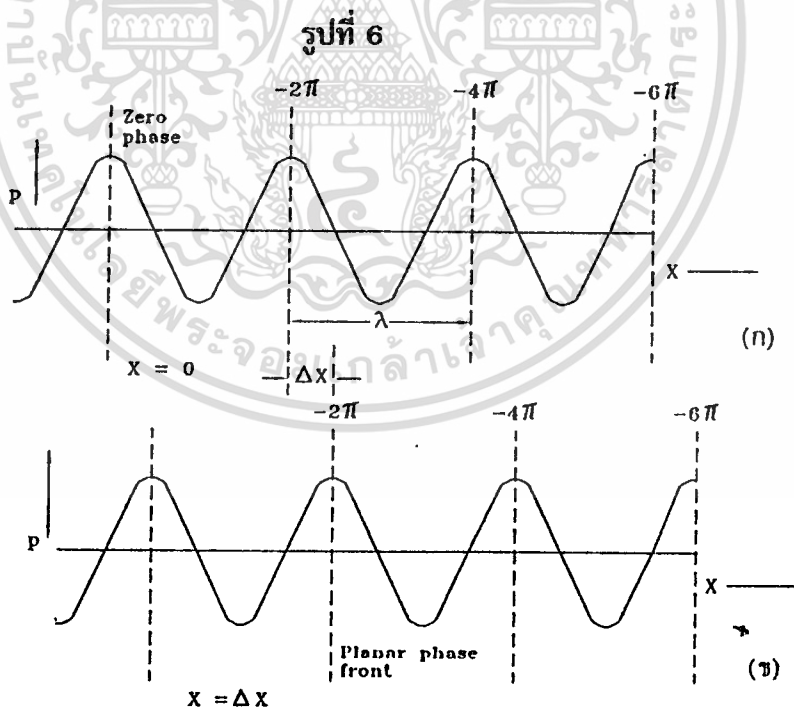
$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \rho_0 K \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (2.22)$$

ซึ่งสมการที่ (2.22) ก็คือ สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลาง โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ โดยผลเฉลยของสมการที่ (2.22) ก็คือ

$$P = A \cos (\omega t \pm kx) \quad (2.23)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดของคลื่นเสียง
 ω คือความถี่เชิงมุม
 $k^2 = \rho_0 K \omega^2$ โดยที่ k ถูกเรียกว่าค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่นเสียง (propagation constant)

เมื่อนำผลเฉลยในสมการที่ (2.23) มาพล็อตกราฟจะได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 6



(ก) คลื่นความดันที่เวลา $t = 0$

(ข) คลื่นความดันที่เวลา $t = \Delta t$

จากรูปที่ 6 สามารถคำนวณหาค่าความเร็วของคลื่นเมื่อหน้าคลื่นเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง Δx ได้จากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหน้าคลื่นเริ่มต้น ซึ่งที่ตำแหน่งนี้ผลต่างระหว่าง ωt และ kx จะมีขนาดเท่ากับศูนย์ โดยที่เวลา $t = 0$ หน้าคลื่นจะอยู่ที่ตำแหน่ง $x = 0$ และเมื่อ $t = \Delta t$ หน้าคลื่นจะเคลื่อนที่มาอยู่ที่ตำแหน่ง $x = \Delta x$ ซึ่งจะได้

$$\omega \Delta t = k \Delta x = 0 \quad (2.24)$$

หรือ

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\omega}{k} = v \quad (2.25)$$

เมื่อ v คือค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่พิจารณา

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\rho_0 K}} \quad (2.26)$$

นำสมการที่ (2.26) แทนลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.27)$$

สมการที่ (2.27) ก็คือ สมการการเคลื่อนที่ของเสียงใน 1 มิติ โดยค่าความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่าคงที่

4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็งกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางของแข็ง

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้พิจารณาถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางรวมไปถึงสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลางที่พิจารณา ซึ่งได้สร้างแบบจำลองของตัวกลางขึ้น โดยให้อนุภาคในตัวกลางยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคค่าหนึ่ง เมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับอนุภาคภายในตัวกลาง ซึ่งแรงภายนอกในที่นี้ได้มาจากแรงดันของคลื่นเสียงที่ส่งเข้ามายังตัวกลาง ก็จะเกิดผลของแรงกระทำกันระหว่างแรงจากภายนอกและแรงยึดเหนี่ยวภายในตัวกลาง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการที่ระยะห่างระหว่างอนุภาคภายในตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าเมื่อพิจารณาดูในระดับมหภาคแล้วจะเห็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

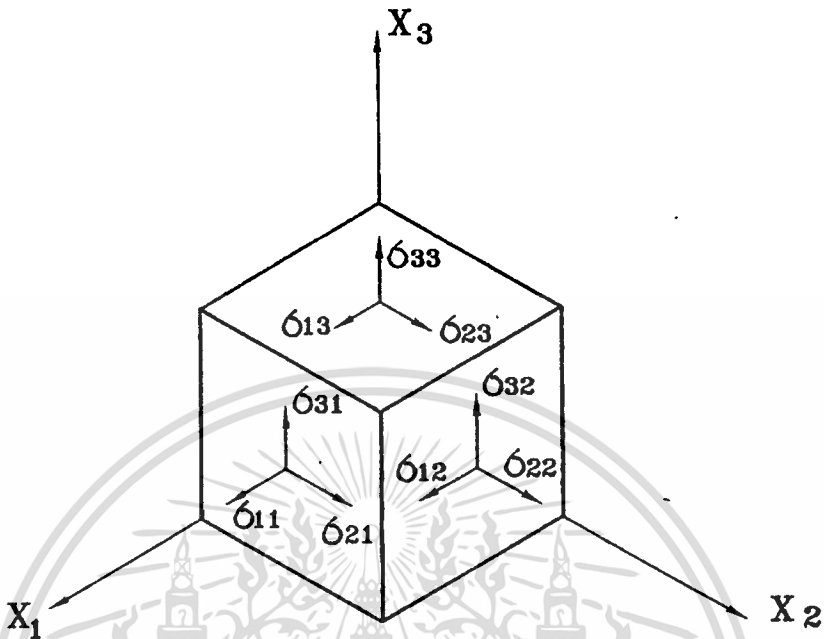
ว่าขนาดปริมาตรหรือรูปร่างของตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากขนาดหรือรูปร่างเดิม โดยอยู่ในขอบเขตของแรงภายนอกค่าหนึ่งที่ไม่ทำให้ตัวกลางเกิดการเปลี่ยนปริมาตรอย่างถาวร ตัวกลางที่สามารถกลับมามีขนาดปริมาตรและรูปร่างเหมือนเดิมเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับตัวกลางถูกนำออกไป แสดงว่าตัวกลางชนิดนี้มีสมบัติยืดหยุ่น โดยในกรณีตัวกลางที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซ ค่าคอมเพรสซิเบิลิตี้ (K) จะเป็นตัวแทนของตัวกลางในสถานะของเหลวหรือก๊าซที่ใช้ออกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางโดยมีความสัมพันธ์กับสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงดังสมการที่ (2.22) ซึ่งค่าคอมเพรสซิเบิลิตี้ (K) จะสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดความเร็วเสียงในตัวกลางในสถานะของเหลวหรือก๊าซ แสดงดังสมการที่ (2.26)

สำหรับในตัวกลางที่มีสถานะเป็นของแข็งตัวแทนที่ใช้ออกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุเรียกว่า ค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic constant) หรือค่าคงที่สติฟเนส (stiffness constant) ซึ่งค่าคงที่นี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) โดยรายละเอียดของหัวข้อนี้จะพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็ง โดยในการพิจารณาจะใช้กฎสองข้อเป็นหลักในการพิจารณาหาความสัมพันธ์คือ กฎของฮุก (Hook's law) และกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

4.1 ความเค้น (stress)

แรงภายนอกที่มากระทำกับตัวกลางของแข็งที่มีรูปทรงแน่นอน โดยทั่วไปพอจะแบ่งได้เป็นสองชนิดด้วยกัน คือ 1. แรงที่กระทำกับอนุภาคของตัวกลางทั้งหมด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับกับขนาดปริมาตรของตัวกลางที่แรงมากระทำ เช่น แรงดึงดูดของโลก ซึ่งแรงชนิดนี้จะกระทำกับอนุภาคทุก ๆ ตัวที่ประกอบกันขึ้นเป็นตัวกลาง เป็นต้น และ 2. คือแรงที่กระทำที่ผิวของตัวกลาง ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของตัวกลางที่แรงมากระทำ ความเค้นถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของแรงชนิดที่ 2 ซึ่งสามารถถูกจำกัดความได้ว่าเป็นแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของตัวกลางของแข็ง ประกอบไปด้วย $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{21}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{31}, \sigma_{32}$ และ σ_{33} ซึ่งอักษรล่างตัวแรกแสดงทิศทางของแรงที่กระทำและอักษรล่างตัวที่สองแสดงถึงทิศทางตั้งกับระนาบที่แรงมากระทำ แสดงดังรูปที่ 7 โดยพิจารณาให้ตัวกลางของแข็งมีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

รูปที่ 7



ส่วนประกอบของความเค้นที่กระทำบนตัวกลางของแข็ง
ที่มีรูปทรงเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

σ_{11} , σ_{22} และ σ_{33} เรียกว่าความเค้นตั้งฉาก (normal stress) และ σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} , σ_{21} , σ_{31} , σ_{32} เรียกว่าความเค้นเฉือน (shear stress) โดยความเค้นทั้ง 9 เขียนในรูปแบบสั้นๆ ได้เป็น σ_{ik} โดยที่ $i, k = 1, 2, 3$ หรือเขียนอยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์จะได้

$$\sigma_{ik} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

ในสมการที่ (2.28) กรณีที่มีความสมมาตรในเมตริกซ์ของความเค้นจะได้

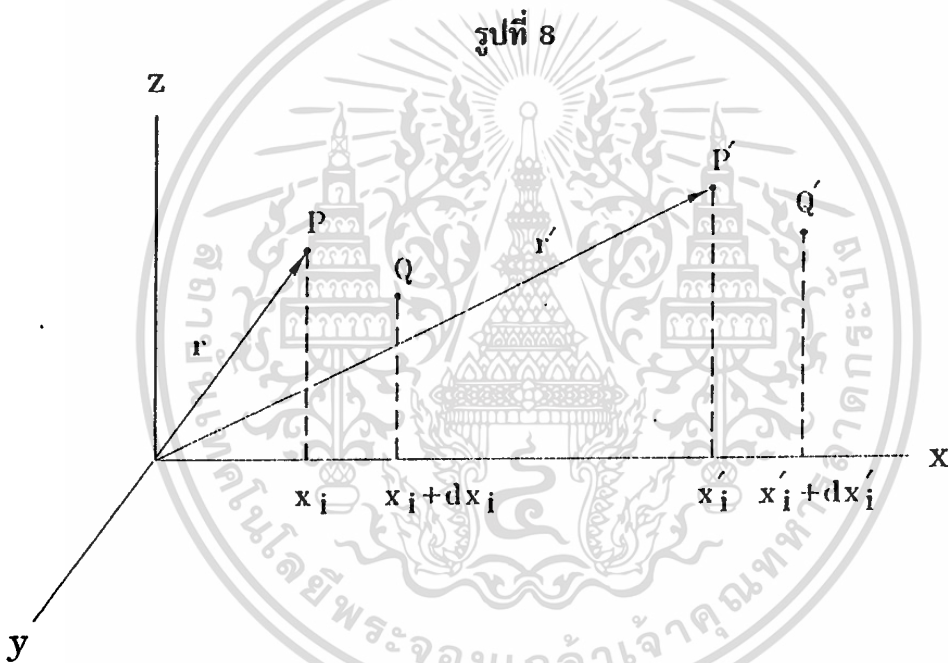
$$\sigma_{ik} = \sigma_{ki} \quad (2.29)$$

โดยความเค้นเป็นปริมาณที่มีหน่วยเป็นขนาดของแรงต่อหน่วยพื้นที่หรือพลังงานต่อหน่วยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความเครียด (strain)

กรณีที่ตัวกลางที่มีค่าสมบัติยืดหยุ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขนาดและปริมาตร เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ โดยทั่วไปแล้วพอจะแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้เป็น 3 แบบ คือ 1. การเปลี่ยนรูปร่างในแนวตามยาวของตัวกลาง 2. การเปลี่ยนรูปร่างในแนวตามขวางของตัวกลาง และ 3. การเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งมักจะเกิดกับตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ โดยการเปลี่ยนแปลงในสองแบบแรกส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ซึ่งการพิจารณาหาขนาดความเครียดที่เกิดขึ้นในตัวกลางของแข็ง สามารถจะทำได้โดยพิจารณาจุด P ใดๆ บนตัวกลางที่มีตำแหน่งโคออร์ดิเนตอยู่ที่ x_i แสดงดังรูปที่ 8



การเปลี่ยนรูปร่างของตัวกลางที่มีสมบัติยืดหยุ่นจากหน่วยย่อย PQ มาเป็น $P'Q'$

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

$$u_i = x'_i - x_i \quad (2.30)$$

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

$$\begin{aligned} u'_i &= (x'_i + dx'_i) - (x_i - dx_i) \\ &= (x'_i - x_i) + (dx'_i - dx_i) \\ &= u_i + du_i \end{aligned} \quad (2.31)$$

du_i ก็คือ ขนาดของการเปลี่ยนรูปร่างของหน่วยย่อย ในกรณีนี้ $du_i = 0$ แสดงว่าหน่วยย่อย PQ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนั่นเอง

โดยใช้ทฤษฎีของเทเลอร์ (Taylor's Theorem) ซึ่งในที่นี้จะไม่นำอนุกรมที่มีกำลังสูงมาพิจารณาจะได้

$$\begin{aligned} u'_i &= u_i + du_i \\ &= u_i + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} dx_k + \dots \\ &= u_i + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) dx_k - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) dx_k \\ &= u_i + \varepsilon_{ik} dx_k - \omega_{ik} dx_k \end{aligned} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.32) จะได้

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.33) เรียกว่าเมตริกซ์ของความเครียด ซึ่งจะเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้คือ

$$\varepsilon_{ik} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่มีความสมมาตรในเมตริกซ์ของความเครียดจะได้

$$\epsilon_{ik} = \epsilon_{ki} \quad (2.35)$$

ความเครียดเป็นอัตราส่วนของความยาว จึงเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

4.3 ค่าคงที่ยืดหยุ่นและสมการการเคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็งยืดหยุ่น

เพื่อจะหาความสัมพันธ์ระหว่างสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็ง กับค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็ง โดยจากที่กล่าวมาจะเห็นว่านอกจากคลื่นตามยาวที่ทำให้อนุภาคในตัวกลางของแข็งเกิดการสั่นในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่ของคลื่นซึ่งจะเกิดความเค้นปกติ และความเครียดในแนวตามยาวขึ้นแล้ว ยังมีคลื่นตามขวางที่สามารถเคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็งได้ โดยจะทำให้อนุภาคในตัวกลางเกิดการสั่นในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น ซึ่งจะเกิดความเค้นเฉือนและความเครียดในแนวตามขวางขึ้น ด้วยเหตุนี้การพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็ง จะต่างจากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงสำหรับตัวกลางที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งจะมีเฉพาะคลื่นตามยาวที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยแสดงในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งจะพิจารณาใน 1 มิติเท่านั้นแต่สำหรับในตัวกลางที่เป็นของแข็งแล้วสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจะถูกพิจารณาในระบบ 3 มิติ โดยในตัวกลางของแข็งที่มีคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้ามาเปรียบเสมือนมีความเค้นมากจะทำให้ตัวกลางของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำให้เกิดความเครียดขึ้น ซึ่งจากกฎของฮุกจะหาความสัมพันธ์ของหน่วยย่อยความเค้นจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับหน่วยย่อยความเครียด

โดยมีค่าคงที่ยืดหยุ่นหรือค่าคงที่สติฟเนสเป็นค่าคงที่ที่อยู่ในความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างหน่วยย่อยความเค้น และหน่วยย่อยความเครียด ดังสมการที่ (2.36) คือ

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= C_{11}\epsilon_{11} + C_{12}\epsilon_{22} + C_{13}\epsilon_{33} + C_{14}\epsilon_{23} + C_{15}\epsilon_{31} + C_{15}\epsilon_{12}; \\ \sigma_{22} &= C_{21}\epsilon_{11} + C_{22}\epsilon_{22} + C_{23}\epsilon_{33} + C_{24}\epsilon_{23} + C_{25}\epsilon_{31} + C_{26}\epsilon_{12}; \\ \sigma_{33} &= C_{31}\epsilon_{11} + C_{32}\epsilon_{22} + C_{33}\epsilon_{33} + C_{34}\epsilon_{23} + C_{35}\epsilon_{31} + C_{36}\epsilon_{12}; \\ \sigma_{23} &= C_{41}\epsilon_{11} + C_{42}\epsilon_{22} + C_{43}\epsilon_{33} + C_{44}\epsilon_{23} + C_{45}\epsilon_{31} + C_{46}\epsilon_{12}; \\ \sigma_{31} &= C_{51}\epsilon_{11} + C_{52}\epsilon_{22} + C_{53}\epsilon_{33} + C_{54}\epsilon_{23} + C_{55}\epsilon_{31} + C_{56}\epsilon_{12}; \\ \sigma_{12} &= C_{61}\epsilon_{11} + C_{62}\epsilon_{22} + C_{63}\epsilon_{33} + C_{64}\epsilon_{23} + C_{65}\epsilon_{31} + C_{66}\epsilon_{12}; \end{aligned} \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณ C_{11}, C_{12}, \dots ถูกเรียกว่าค่าคงที่ยืดหยุ่น หรือค่าคงที่สติฟเนส ซึ่งมีหน่วยเป็น นิวตันต่อพื้นที่หรือจุดต่อปริมาตรสมการที่ (2.36) สามารถจะเขียนให้อยู่ในรูปแบบสั้น ๆ ได้คือ

$$\sigma_{ik} = C_{iklm} \epsilon_{lm} \quad (2.37)$$

ซึ่งโดยปกติ C_{iklm} จะเป็นเมตริกซ์ที่มีหน่วยย่อยประกอบกันขึ้นเป็นจำนวน 81 หน่วยย่อย ถ้าพิจารณาตัวกลางของแข็งที่เป็นตัวกลางไอโซทรอปิก (isotropic) แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ของความเค้นและเมตริกซ์ของความเครียดขึ้น ซึ่งในกรณีที่ σ_{ik} มีความสมมาตร จะได้

$$C_{iklm} = C_{kilm} \quad (2.38)$$

และในกรณีที่ ϵ_{lm} มีความสมมาตรจะได้

$$C_{iklm} = C_{ikml} \quad (2.39)$$

ซึ่งการสมมาตรของทั้ง σ_{ik} และ ϵ_{lm} จะทำให้หน่วยย่อยของค่าคงที่ยืดหยุ่นลดลงเหลือเพียง 36 หน่วยย่อย

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ยืดหยุ่นกับสมการการเคลื่อนของคลื่นเสียงในตัวกลางของแข็ง ให้พิจารณาตัวกลางที่ถูกความเค้น σ_{ik} จากภายนอกกระทำ โดยกำหนดให้ F_i เป็นผลของแรงภายในเนื่องจากความเค้นภายนอกที่มากกระทำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรจะได้ผลรวมของแรงภายในของปริมาตรตัวกลางทั้งหมด คือ $\int_V F_i dv$ และจากทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ของเกาส์ (Gauss's divergence theorem) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับปริมาตรทั้งหมดของตัวกลางกับแรงที่กระทำที่ผิวทั้งหมดของตัวกลาง คือ

$$\int_V F_i dv = \int_S \sigma_{ik} dA_k \quad (2.40)$$

เมื่อ dA_k คือหน่วยย่อยของพื้นที่ผิว

จากสมการที่ (2.40) จะได้

$$F_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นสมการการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน โดยเป็นผลมาจากความเค้นภายนอกที่กระทำกับตัวกลาง ทำให้เกิดผลของแรงภายในตัวกลางต่อปริมาตรหนึ่งหน่วยจะเป็นผลคูณของความเร่งและมวลต่อปริมาตรหนึ่งหน่วย คือ

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \rho \ddot{u}_i \quad (2.42)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง และ u_i คือ เวกเตอร์เคลื่อนย้ายโดยกำหนดให้ $\partial_k = \frac{\partial}{\partial x_k}$ สมการที่ (2.42) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\partial_k \sigma_{ik} = \rho \ddot{u}_i \quad (2.43)$$

โดยตัวกลางของแข็งในแต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในแตกต่างกันไป ซึ่งค่าคงที่ยืดหยุ่นของตัวกลางแต่ละชนิดก็จะต่างกันไปด้วย ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่กับค่าคงที่ยืดหยุ่นของตัวกลาง ในกรณีนี้ได้ยกตัวอย่างตัวกลางไอโซทรอปิกที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบผลึกคิวบิก (cubic crystal) ซึ่งมีเมตริกซ์ของค่าคงที่ยืดหยุ่น คือ

	ϵ_{11}	ϵ_{22}	ϵ_{33}	ϵ_{23}	ϵ_{31}	ϵ_{12}
σ_{11}	C_{11}	C_{12}	C_{12}	0	0	0
σ_{22}	C_{12}	C_{11}	C_{12}	0	0	0
σ_{33}	C_{12}	C_{12}	C_{11}	0	0	0
σ_{23}	0	0	0	C_{44}	0	0
σ_{31}	0	0	0	0	C_{44}	0
σ_{12}	0	0	0	0	0	C_{44}

(2.44)

โดยที่ $C_{61} = C_{62} = C_{63} = C_{64} = C_{65} = 0$, $C_{12} = C_{13} = C_{14} = C_{15} = C_{16} = 0$
และ $C_{66} = C_{44}$

ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความเครียดสำหรับตัวกลางไอโซทรอปิก คือ

$$\begin{aligned} \sigma_{ik} &= (C_{11} - C_{12}) \epsilon_{ik} + C_{12} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \delta_{ik} \\ &= (C_{11} - C_{12}) \epsilon_{ik} + C_{12} \theta \delta_{ik} \end{aligned} \quad (2.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลาง เมื่อมีความเค้นจากภายนอกมากระทำกับตัวกลางทำให้เกิดความเครียดขึ้น จะมีค่าคงที่อยู่สองตัว ซึ่งใช้เป็นปริมาณที่บอกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลาง คือ λ และ G เรียกว่าค่าคงที่ลามเ (Lame constants) ซึ่ง λ และ G จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ยืดหยุ่นของตัวกลางไอโซทรอปิกในแต่ละชนิด คือ $\lambda = C_{12}$ และ $G = \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12})$ สมการที่ (2.45) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma_{ik} = 2G\varepsilon_{ik} + \lambda\theta\delta_{ik} \quad (2.46)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.43) เมื่อนำมารวมกับสมการที่ (2.46) จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็ง คือ

$$\begin{aligned} \rho\ddot{u}_i &= (\lambda+G)\partial_i\theta + G\partial_k\partial_k u_i \\ &= (\lambda+G)\text{grad div } u_i + G\nabla^2 u_i \end{aligned} \quad (2.47)$$

4.4 ค่าสมบัติยืดหยุ่น

ค่าสมบัติยืดหยุ่น เป็นค่าสมบัติเฉพาะของตัวกลางในแต่ละชนิด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณที่ใช้บอกค่าสมบัติยืดหยุ่นในตัวกลางของแข็งอยู่สามปริมาณที่เป็นหลักด้วยกัน คือ

โมดูลัสของยังค์ (Young's modulus, E), เชียร์โมดูลัส (Shear modulus, G) และอัตราส่วนปัวซงค์ (Poisson's ratio, ν) โดยแต่ละปริมาณจะมีความสัมพันธ์กับค่าสมบัติยืดหยุ่น λ และ G ดังนี้ คือ

1. เชียร์โมดูลัส (G) :

ให้พิจารณาความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.46) ในกรณีที่ $i \neq k$ จะเกิดความเค้นเฉือนและความเครียดในแนวตามขวางขึ้นจะได้ $\sigma_{ik} = 2G\varepsilon_{ik}$ ดังนั้น $2G$ จึงเป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน และความเครียดเฉือนค่า G ถูกเรียกว่าค่าเชียร์โมดูลัส

2. โมดูลัสของยังค์ (E) :

ให้พิจารณาตัวกลางยืดหยุ่นที่ถูกแรงภายนอกมา กระทำในทิศทาง x_1 แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะในทิศทาง x_1 โดยจะมีเฉพาะความเค้นในแนวตามยาว (σ_{11}) เท่านั้น และจากสมการที่ (2.46) จะได้

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= 2G\varepsilon_{11} + \lambda\theta \\ 0 &= 2G\varepsilon_{22} + \lambda\theta \\ 0 &= 2G\varepsilon_{33} + \lambda\theta\end{aligned}$$

อัตราส่วนระหว่างความเค้นตามยาวและความเครียดตามยาวเรียกว่า โมดูลัสของยังค์ (E) ซึ่งจะได้

$$E = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} = \frac{G(2G + 3\lambda)}{\lambda + G} \quad (2.48)$$

3. อัตราส่วนของปัวซองค์ (V) :

จะเป็นอัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวข้างกับความเครียดในแนวยาว ซึ่งจะได้

$$V = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad (2.49)$$

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติยืดหยุ่นกับความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็ง

การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกความถี่สูงมาตรวจหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็งเป็นแนวทางหนึ่งในการนำสมบัติของคลื่นเสียงความถี่สูงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็งมาใช้ โดยสมบัติของคลื่นเสียงที่เป็นปริมาณที่บอกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านก็คือ ค่าความเร็วที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในตัวกลาง ซึ่งในวัสดุที่เป็นของแข็งจะมีคลื่นเสียงอยู่สองชนิดที่สามารถเคลื่อนที่ได้ คือ คลื่นตามยาวและคลื่นขวาง โดยคลื่นตามยาว อนุภาคของวัสดุจะสั่นในทิศทางเดียวกับทิศทางการแพร่ของคลื่น และคลื่นตามขวางอนุภาคของวัสดุจะสั่นในทิศตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น ดังนั้นจะมีค่าความเร็วคลื่นเสียงอยู่สองชนิดที่ใช้เป็นปริมาณบอกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน คือ ค่าความเร็วคลื่นตามยาวและค่าความเร็วคลื่นตามขวาง

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นทั้งสองชนิดกับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุของแข็ง ให้พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ในตัวกลางของแข็งยืดหยุ่นตามสมการที่ (2.47) คือ

$$\rho \ddot{u}_i = (\lambda + G) \text{grad div } u_i + G \nabla^2 u_i$$

เมื่อ $\nabla^2 u_i = \text{grad div } u_i - \text{curl curl } u_i$

สมการที่ (2.47) จึงเขียนได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u}_i &= (\lambda + G) \text{grad div } u_i + G(\text{grad div } u_i - \text{curl curl } u_i) \\ &= (\lambda + 2G) \text{grad div } u_i + G \text{curl curl } u_i \end{aligned} \quad (2.50)$$

จากสมการที่ (2.50) สามารถแบ่งการพิจารณาออกได้เป็นสองส่วน คือ

1. ส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ของ u_i ในแนวตามยาว โดย $\theta = \text{div } u_i$ จะมีลิมิตจำกัด และ $\text{curl } u_i = 0$
2. ส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ของ u_i ในแนวตามขวาง โดยที่ $\text{div } u_i = 0$ และ $\text{curl } u_i \neq 0$

คลื่นตามยาว :

พิจารณาในส่วนที่ 1 เมื่อ $\text{curl } u_i = 0$ จะได้สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u}_i &= (\lambda + 2G) \text{grad div } u_i \\ &= (\lambda + 2G) \nabla^2 u_i\end{aligned}\quad (2.51)$$

กำหนดให้ u_i เคลื่อนที่เฉพาะในทิศทาง x_1 เทียบกับเวลาโดยสมการที่ (2.51) สามารถแสดงอยู่ในระบบพิกัด x_1, x_2, x_3 ได้เป็น

$$\begin{aligned}\rho \ddot{u}_1 &= (\lambda + 2G) \partial^2 u_1 / \partial x_1^2 \\ \rho \ddot{u}_2 &= (\lambda + 2G) \partial^2 u_2 / \partial x_1^2 \\ \rho \ddot{u}_3 &= (\lambda + 2G) \partial^2 u_3 / \partial x_1^2\end{aligned}\quad (2.52)$$

เมื่อ $\text{curl } u_i = 0$ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_3}{\partial x_2} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = 0 \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_3} &= \frac{\partial u_3}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_2} = 0\end{aligned}\quad (2.53)$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ที่สองและสามในสมการที่ (2.52) มีค่าเป็นศูนย์ โดยความสัมพันธ์ที่หนึ่งในสมการที่ (2.52) ก็คือ สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวในวัสดุของแข็ง ซึ่งแสดงใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} = \frac{1}{V_L^2} \ddot{u}_1\quad (2.54)$$

เมื่อ V_L คือ ความเร็วของคลื่นตามยาว โดยมีสัมพันธ์กับค่าคงที่ยืดหยุ่นดังสมการที่ (2.55) คือ

$$v_L = \left(\frac{\lambda + 2G}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.55)$$

คลื่นตามขวาง :

พิจารณาในส่วนที่ 2 เมื่อ $\text{div } u_i = 0$ จะได้สมการการเคลื่อนที่ คือ

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u}_i &= -G \text{curl curl } u_i \\ &= G \nabla^2 u_i \end{aligned} \quad (2.56)$$

กำหนดให้คลื่นมีทิศทางการเคลื่อนที่เฉพาะในทิศทาง x_1 เทียบกับเวลาโดยสมการที่ (2.56) สามารถแสดงอยู่ในระบบพิกัด x_1, x_2, x_3 ได้เป็น

$$\begin{aligned} \rho \ddot{u}_1 &= G \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} \\ \rho \ddot{u}_2 &= G \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} \\ \rho \ddot{u}_3 &= G \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} \end{aligned} \quad (2.57)$$

เมื่อ $\text{div } u_i \equiv \partial u_i / \partial x_i = 0$ จะได้ความสัมพันธ์ที่หนึ่งในสมการที่ (2.57) มีค่าเป็นศูนย์ โดยความสัมพันธ์ที่สองและสามก็คือสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางในวัสดุของแข็ง ซึ่งมีทิศทางการสั่นของอนุภาคตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น แสดงได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} &= \frac{1}{V_s^2} \ddot{u}_2 \\ \text{และ} \quad \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} &= \frac{1}{V_s^2} \ddot{u}_3 \end{aligned} \quad (2.58)$$

เมื่อ V_s คือ ความเร็วของคลื่นตามขวาง โดยมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ยืดหยุ่น ดังสมการที่ (2.59) คือ

$$V_s = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2} \quad (2.59)$$

ซึ่งจากที่กล่าวสามารถสรุปเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็ง กับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุได้เป็นความสัมพันธ์หลักอยู่สามความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$E = \frac{[V_L^2 \rho (1 + \nu) (1 - 2\nu)]}{(1 - \nu)} \quad (2.60)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.61)$$

$$\nu = \frac{[1 - 2(V_s / V_L)^2]}{[2 - 2(V_s / V_L)^2]} \quad (2.62)$$

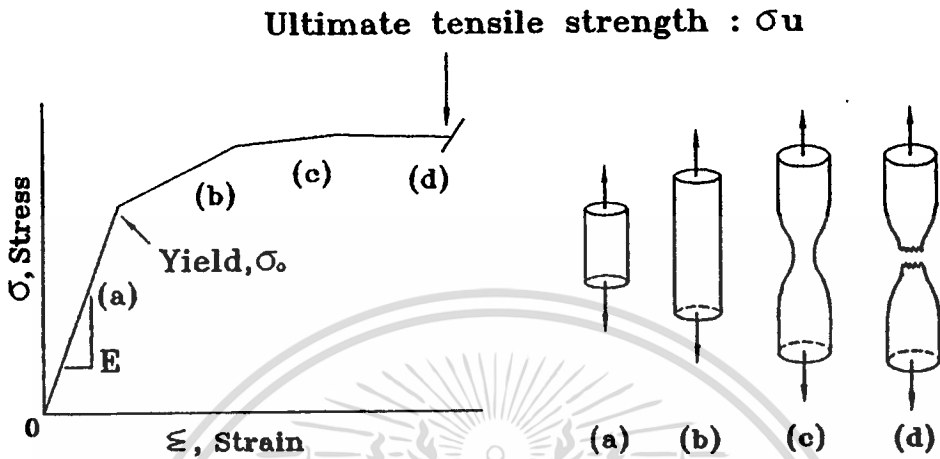
เมื่อ	ρ	=	ความหนาแน่น (kgm^{-3})
	ν	=	อัตราส่วนของปัวซองค์ (Poisson's ratio)
	E	=	โมดูลของยังค์ (Young's modulus ($\text{kgs}^{-2} \text{m}^{-1}$ or Pa))
	G	=	เชียร์โมดูลัส (Shear modulus ($\text{kgs}^{-2} \text{m}^{-1}$ or Pa))
	V_L	=	ความเร็วคลื่นตามยาว (m/s)
	V_s	=	ความยาวคลื่นตามขวาง (m/s)

ซึ่งความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.60), (2.61) และ (2.62) จึงเป็นความสัมพันธ์ที่ถูกนำมาใช้หาค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลางของแข็ง โดยใช้วิธีวัดค่าความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็งสองชนิด ก็คือค่าความเร็วคลื่นตามยาวและค่าความเร็วคลื่นตามขวาง

นอกจากค่าสมบัติยืดหยุ่นที่ได้กล่าวมาทั้งสามค่า คือ โมดูลัสของยังค์ (E), เชียร์โมดูลัส (G) และอัตราส่วนของปัวซองค์ (ν) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางแล้ว ยังมีค่าสมบัติยืดหยุ่นอีกค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้บอกถึงความแข็งแรงของวัสดุของแข็งที่สามารถทนต่อแรงภายนอกที่มากกระทำสูงสุดแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ก็คือค่าความทนแรงดึง (tensile strength, σ_u) โดยใช้วิธีการตรวจสอบทางกลสามารถหาขนาดค่าความทนแรงดึง ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แสดงดังรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

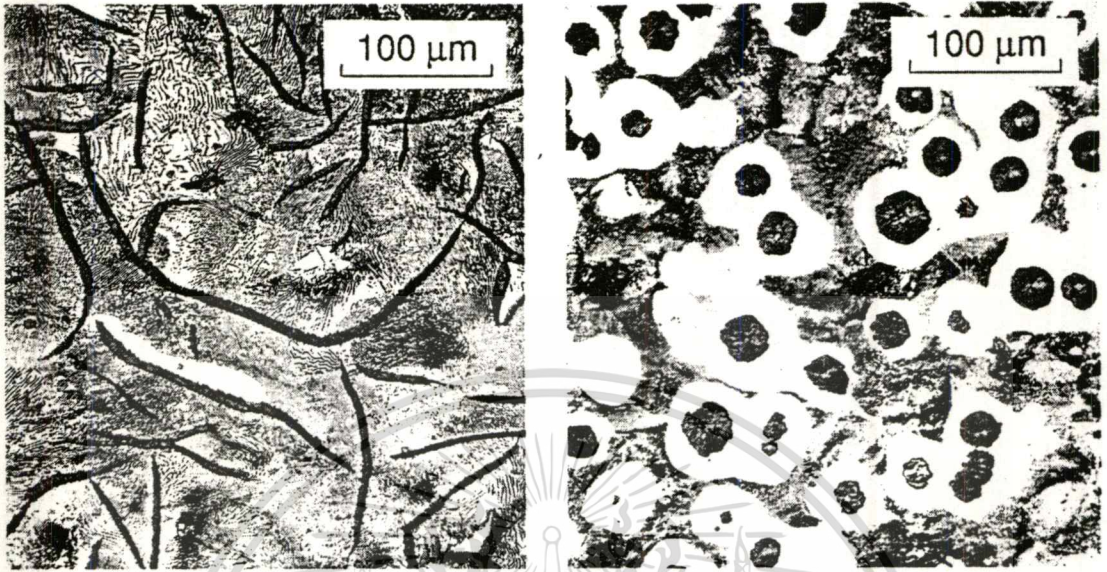
รูปที่ 9



ในรูปที่ 9 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการนำวัสดุของแข็งมาตรวจหาค่าสมบัตียืดหยุ่นด้วยวิธีทางกล โดยพิจารณาในกราฟค่าความทนแรงดึง (σ_u) ก็คือ ปริมาณความเค้นสูงสุดเมื่อวัสดุของแข็งถูกแรงจากภายนอกมากกระทำให้ยืดออก และก่อนที่จะขาดออกจากกัน

ในงานวิจัยนี้ วัสดุที่นำมาตรวจวัดหาค่าสมบัติยืดหยุ่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ก็คือเหล็กหล่อ โดยเป็นเหล็กที่สามารถแบ่งแยกประเภทได้จากลักษณะการรวมตัวกันของคาร์บอนและรูปร่างของกราฟไฟต์เป็นหลัก โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ เหล็กหล่อสีเทา (gray cast iron) และเหล็กหล่อทรงกลม (ductile cast-iron) โดยเหล็กหล่อทั้งสองชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างในระดับจุลภาค แสดงดังรูปที่ 10

รูปที่ 10



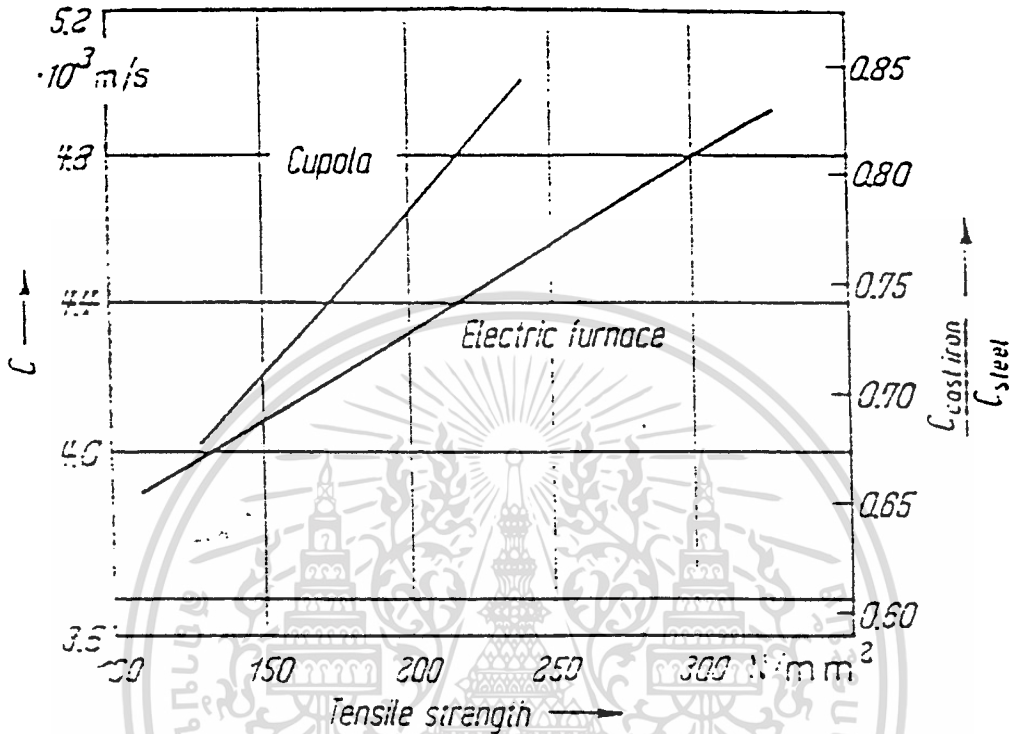
(ก)

(ข)

ลักษณะการจัดเรียงตัวและรูปร่างของกราฟไฟท์ในเหล็กหล่อ
โดยรูปที่ 10 (ก) เป็นเหล็กหล่อสีเทา และรูปที่ 10 (ข)
เป็นเหล็กหล่อทรงกลม

สำหรับค่าสมบัติยืดหยุ่นวัสดุที่เป็นเหล็กหล่อ นอกจากค่าโมดูลัสต่างๆ ที่มีสัมพันธ์โดยตรงกันกับค่าความเร็วเสียง โดยมีสมการที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ และค่า ความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อ ซึ่งมีขนาดสอดคล้องกันกับลักษณะการจัดเรียงตัว ขนาดและรูปร่างของกราฟไฟท์จะมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับค่าความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อด้วย โดยความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่าง σ_u กับความเร็วเสียงนำเสนอโดย Ziegler และ Gerstner ในปี ค.ศ. 1958 ได้ทดลองเตรียมเหล็กหล่อชนิดเหล็กหล่อสีเทา แล้วนำมาผ่านขบวนการให้ความร้อน (heat treatment) เพื่อให้เหล็กหล้อมีโครงสร้างภายในเปลี่ยนไปโดยมีค่าความเร็วเสียงต่างๆ กัน จากนั้นจึงนำเหล็กหล่อที่มีค่าความเร็วต่างๆ กันมาหาขนาดของค่า σ_u แล้วนำค่าทั้งสองมาหาความสัมพันธ์ จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 11

รูปที่ 11



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเสียงตามยาวกับความทนแรงดึง (σ_u) (Ziegler และ Gerstner ปี ค.ศ. 1958)

จากข้อมูลในรูปที่ 11 จึงสรุปได้เป็นความสัมพันธ์ที่มีฟังก์ชันเชิงเส้นระหว่างค่า ความทนแรงดึง และค่าความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อ

5 การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง

การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางใด ๆ จะเกิดการลดทอนพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น โดยค่าพลังงานที่ลดทอนไปมีสาเหตุมาจากปัจจัยหลัก 2 ประการ การที่พลังงานส่วนหนึ่งถูกดูดกลืน (absorption) กลายเป็นพลังงานความร้อน และอีกส่วนหนึ่งสูญเสียไปเนื่องจากเกิดการกระเจิง (scattering) ของคลื่นเสียงขึ้น ซึ่งสาเหตุที่สองประการจะทำให้เกิดการลดทอนของแอมพลิจูดของคลื่นหรือพลังงานของคลื่นขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องมาจากการกระเจิงของคลื่นขึ้นเป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) ของตัวกลาง ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียง (acoustic impedance) ในแต่ละบริเวณแตกต่างกันไป เช่น ในตัวกลางที่เป็นเหล็กหล่อ ซึ่งโครงสร้างภายในมีการจัดเรียงตัวตามลักษณะ ขนาดและรูปร่างของกราไฟท์แตกต่างกันไปในแต่ละตำแหน่ง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจึงทำให้เกิดการกระเจิงขึ้นได้ง่าย เป็นต้น โดยในตัวกลางที่มีโครงสร้างภายในไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะของการกระเจิงสามารถจะพิจารณาได้จากอัตราส่วนของขนาดความยาวคลื่น (λ) ต่อขนาดของตัวกระเจิง (\bar{D}) โดยที่ f คือความถี่ของคลื่นเสียงและ α_s คือ สัมประสิทธิ์ของการกระเจิง ซึ่งจะมีลักษณะของการกระเจิงอยู่สามลักษณะด้วยกันคือ

1. เมื่อ $\lambda \gg \bar{D}$ จะเกิดการกระเจิงแบบราเลย์ (Rayleigh scattering) โดยที่ $\alpha_s \propto \bar{D}^3 f^4$
2. เมื่อ $\lambda \simeq \bar{D}$ จะเกิดการกระเจิงแบบแรนดอมเฟสหรือสโตคาสติก (random phase or stochastic scattering) ขึ้นโดยที่ $\alpha_s \propto \bar{D} f^2$
3. เมื่อ $\lambda \leq \bar{D}$ จะเกิดการกระเจิงแบบดิฟฟิวชัน (diffusion scattering) ขึ้นโดยที่ $\alpha_s \propto 1/\bar{D}$

ซึ่งในทางปฏิบัติสำหรับการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการตรวจสอบลักษณะการกระเจิงแบบแรนดอมเฟส มักจะมีผลกระทบสำหรับการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาตรวจสอบตัวกลางที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการกระเจิงชนิดอื่น ๆ

สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนพลังงานคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางขึ้นคือ การที่พลังของคลื่นเสียงถูกดูดกลืน โดยจะเปลี่ยนรูปของพลังงานจากพลังงานของคลื่นเสียงกลายเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปมีผลมาจากแรงเสียดทานของอนุภาคภายในตัวกลาง โดยเมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกลางจะทำให้อนุภาคในตัวกลางเกิดการสั่น ซึ่งจะมีแรงเสียดทานภายในต้านต่อการสั่นของอนุภาค จึงมีพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อน เนื่องจากแรงเสียดทานดังกล่าว โดยจำนวนครั้งของการสั่นของอนุภาคต่อวินาทีขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่เข้ามาในตัวกลาง เพราะฉะนั้นคลื่นเสียงที่มีตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สูงเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาในตัวกลางจะทำให้อนุภาคมีจำนวนรอบในการสั่นต่อวินาทีสูง ค่าพลังงานที่ถูกดูดกลืนกลายเป็นพลังงานความร้อนก็จะมีค่าสูงกว่าในกรณีของคลื่นเสียงที่มีค่าความถี่ต่ำ

จากสาเหตุทั้งสองที่ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลาง ก็คือการถูกดูดกลืนและการกระเจิงของคลื่น เป็นผลให้ขนาดแอมพลิจูดหรือขนาดความเข้มของคลื่นมีขนาดลดลงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ถ้ากำหนดให้ A_0 เป็นแอมพลิจูดของคลื่นเริ่มต้น และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางโดยมีระยะทางเท่ากับ d ทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลงจนมีขนาดเท่ากับ A จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.63) คือ

$$A = A_0 e^{-\alpha d} \quad (2.63)$$

เมื่อ α คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่น เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่พิจารณา โดยจะเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การกระเจิง คือ

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (2.64)$$

เมื่อ α_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน
 α_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง

ซึ่งจากสมการที่ (2.63) จะได้

$$\alpha d = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (N_p) \quad (2.65)$$

สมการที่ (2.65) ก็คือสมการที่แสดงขนาดสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่น เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเป็นระยะทาง d โดย αd จะมีหน่วยเป็นเนเปอร์ (N_p) หรือ α จะมีหน่วยเป็นเนเปอร์ต่อเซนติเมตร (N_p/cm) ซึ่งโดยทั่วไปหน่วยของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนมักจะแสดงในหน่วยเดซิเบล (dB) สมการที่ (2.65) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\alpha d = 20 \log \frac{A_0}{A_1} \quad (dB) \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } 1 N_p &= 8.686 \text{ dB} \\ 1 N_p \text{ cm}^{-1} &= 0.87^{-3} \text{ dB mm}^{-1} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.66) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนผ่านตัวกลาง สามารถจะพิจารณาได้จากอัตราการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่นเสียง โดยตัวกลางที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นสูง แสดงให้เห็นว่าตัวกลางที่พิจารณามีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่สูง จึงทำให้เกิดการลดทอนของพลังงานกลายเป็นพลังงานความร้อนและเกิดการกระเจิงขึ้นได้ง่าย

6 การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นเสียง

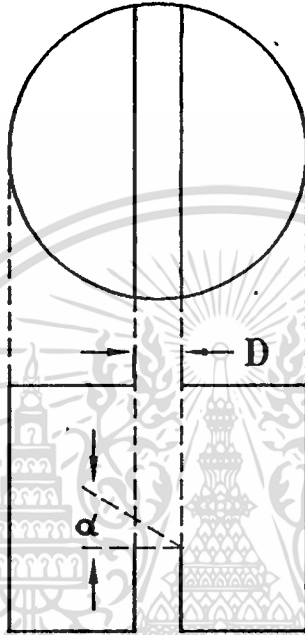
งานวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องกับการนำสมบัติของคลื่นเสียงความถี่สูงมาใช้ เช่น การนำคลื่นเสียงมาตรวจหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของตัวกลาง หรือการวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เพื่อนำค่าที่ได้มาประมาณหาขนาดของโครงสร้างภายในตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน จัดเป็นการประยุกต์ใช้งานหัวข้อหลักของคลื่นเสียงความถี่สูงโดยได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งนอกจากการนำคลื่นเสียงความถี่สูงมาประยุกต์ใช้ทั้งสองลักษณะ ไม่ว่าจะเป็นการวัดความเร็วของคลื่นหรือการวัดอัตราการลดทอนของคลื่นในตัวกลาง เป็นต้น ยังมีการประยุกต์ใช้งานที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือ การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่พิจารณา โดยสเปกตรัมของคลื่นที่ได้จะมีความสอดคล้องและสัมพันธ์กันกับทฤษฎีการลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ที่พิจารณาก็คือพลังงานจะสูญเสียไปเมื่อเกิดการกระเจิง รวมทั้งเกิดการดูดกลืนของพลังงานขึ้น ซึ่งจากการที่คลื่นเสียงเกิดการลดทอนขึ้นในตัวกลางจะส่งผลทำให้สเปกตรัมของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางมีลักษณะรูปร่างและความถี่กลางแตกต่างไปจากสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิด ด้วยเหตุนี้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นเสียงและการวัดอัตราการลดทอนของคลื่นจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถศึกษาลักษณะภายในของวัสดุได้

การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิก กระทำขึ้นครั้งแรกโดย O.R.Gericke ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นเสียง โดยใช้ตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านคืออะลูมิเนียม ซึ่งอะลูมิเนียมที่ได้เตรียมขึ้นจะเป็นการจำลองขนาดเกรนของตัวกลาง รวมทั้งมุมของระนาบเกรนที่กระทำกับแนวระดับ โดยได้สร้างรอยตำหนิที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) คือ 2, 4, 8 และ 16 มิลลิเมตรขึ้น ซึ่งตัวกลางชุดแรกเตรียมให้มีมุมที่รอยตำหนิกระทำกับแนวระดับมีขนาดเป็นศูนย์ ($\alpha = 0^\circ$) และตัวกลางชุดที่สองถูกเตรียมให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอยตำหนิเท่ากับ 8 และ 16 มิลลิเมตร โดยตัวกลางที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 8 มิลลิเมตร มีมุมที่กระทำกับแนวราบเท่ากับศูนย์องศา ($\alpha = 0^\circ$) และตัวกลางที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 16 มิลลิเมตร มีมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กระทำกับแนวราบเท่ากับ 10 องศา ($\alpha = 10^\circ$) โดยลักษณะตัวกลางอะลูมิเนียมที่ได้เตรียมขึ้น ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 12

รูปที่ 12

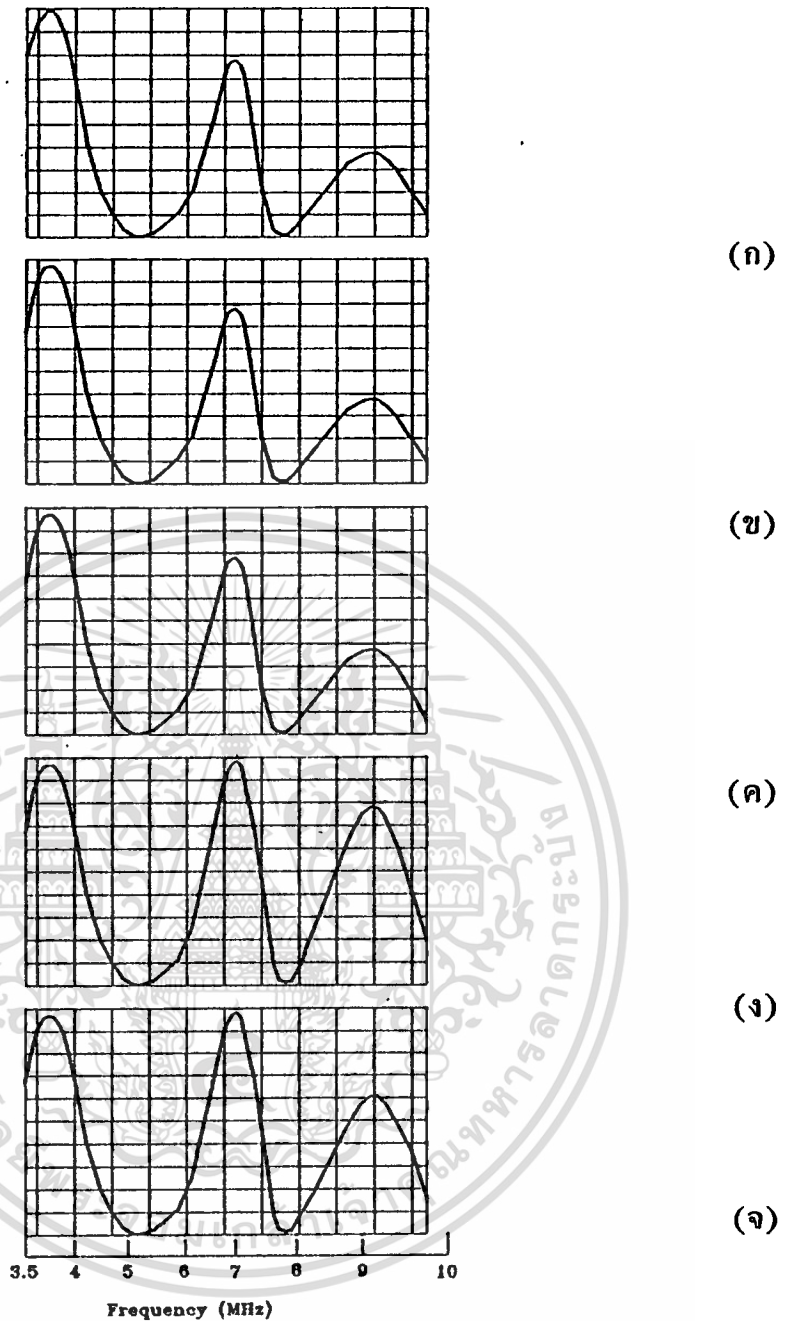


ตัวกลางอะลูมิเนียมที่ได้เตรียมขึ้นโดยชุดแรกมี $\alpha = 0^\circ$ และ $D = 2, 4, 8, 16$ mm ชุดที่สองมี $\alpha = 0^\circ, D = 8$ mm และ $\alpha = 10^\circ, D = 16$ mm

ในการทดลองวัดสเปกตรัมของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ได้เตรียมขึ้น เครื่องมือที่ใช้จะมีพื้นฐานอยู่บนวิธีพัลส์สะท้อนกลับ (pulse - echo) โดยการส่งคลื่นเสียงที่มีความถี่ตอบสนองในช่วงกว้าง (broad - band transducer) ให้เคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางและเก็บสัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับมาเพื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัม โดยการสะท้อนกลับของคลื่นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเกิดความไม่ต่อเนื่อง หรือรอยต่อของตัวกลางขึ้น และทิศทางของคลื่นสะท้อนจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของรอยต่อหรือมุมที่คลื่นตกกระทบ คลื่นที่เกิดการสะท้อนไปยังทิศทางต่างๆ รวมทั้งบางส่วนที่เกิดการกระเจิงขึ้น สามารถจะเกิดการรวมกันได้ ซึ่งจะทำให้รูปร่างสัญญาณของคลื่นมีลักษณะเปลี่ยนไปจากรูปร่างสัญญาณของคลื่นจากแหล่งกำเนิด ส่งผลให้สเปกตรัมของคลื่นมีลักษณะรูปร่างแตกต่างไปจากสเปกตรัมของแหล่งกำเนิด โดยสเปกตรัมของตัวกลางอะลูมิเนียมชุดแรก แสดงในรูปที่ 13 และสเปกตรัมของตัวกลางอะลูมิเนียมชุดสอง แสดงในรูปที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

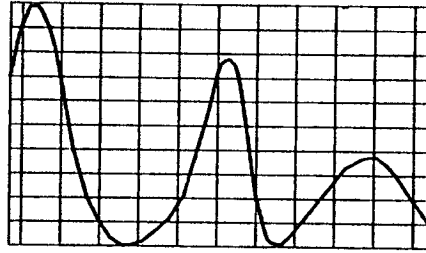
รูปที่ 13



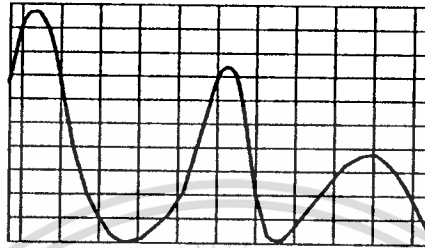
สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกของตัวกลางอะลูมิเนียมชุดแรกที่มี $\alpha = 0^\circ$ โดย (ก) เป็นสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิด (ข) เป็นสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 2 \text{ mm}$ (ค) เป็นสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 4 \text{ mm}$ (ง) เป็นสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 8 \text{ mm}$ และ (จ) เป็นสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 16 \text{ mm}$ (ข้อมูลจาก the Future of Ultrasonic Spectroscopy (P.M.Reynolds, ed.) Reproduced by permission of the B.N.F. Metals Technology Centre, Wantage, England)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

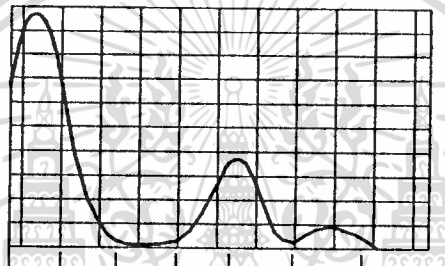
รูปที่ 14



(ก)



(ข)



(ค)

สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกของตัวกลางอะลูมิเนียมชุดที่สอง โดยที่ (ก) แสดงสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิด (ข) แสดงสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 8 \text{ mm}$, $\alpha = 0^\circ$ และ (ค) แสดงสเปกตรัมของตัวกลางที่มี $D = 16 \text{ mm}$, $\alpha = 10^\circ$ (ข้อมูลจาก the Future of Ultrasonic Spectroscopy (P.M.Reynolds, ed.) Reproduced by permission of the B.N.F. Metals Technology Centre, Wantage, England)

จากข้อมูลในรูปที่ 13 จะเห็นว่าคลื่นเสียงที่ถูกส่งเข้าไปในตัวกลางอะลูมิเนียม ซึ่งมีความถี่กลางของคลื่นจากแหล่งกำเนิดอยู่ที่ 3.75, 7 และ 9.5 MHz โดยเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบรอยตำหนิที่เตรียมขึ้นซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ กัน และทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นที่สะท้อนกลับจากรอยตำหนิ จะเห็นว่าที่แต่ละขนาดของรอยตำหนิจะทำให้เกิดอัตราการลดทอนของคลื่นแตกต่างกันไปในแต่ละค่าความถี่กลางของคลื่นเสียง ซึ่งจะมีขนาดแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่ค่าความถี่กลางแตกต่างกันไปในตัวกลางแต่ละชนิด โดยข้อมูลในรูปที่ 2.14 ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมุมตกกระทบของคลื่นเสียงไม่ตั้งฉากกับระนาบของรอยตำหนิจะทำให้รูปร่าง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสเปกตรัมเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีขนาดของความถี่กลางเปลี่ยนไปและมีขนาดแอมพลิจูดลดลง ซึ่งก็คือมีอัตราการลดทอนสูงขึ้นนั่นเอง โดยจากข้อมูลในรูปที่ 13 และ 14 เป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นเสียงในตัวกลางที่ได้เตรียมขึ้นมาโดยขนาดของรอยตำหนิในที่นี้เปรียบเสมือนขนาดเกรนของตัวกลางที่พิจารณาและมุมที่คลื่นตกกระทบบนระนาบของรอยตำหนิก็เปรียบเสมือนลักษณะการจัดเรียงตัวของเกรนที่ทำมุมกับแนวระนาบอ้างอิงแตกต่างกันไป ซึ่งในตัวกลางที่มีขนาดเกรนรวมไปถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของเกรนแตกต่างกัน ขนาดของอัตราการลดทอนรวมทั้งสเปกตรัมของคลื่นเสียงก็จะต่างกันไปด้วย ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นและการวัดอัตราการลดทอนของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางที่พิจารณา จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการนำมาวิเคราะห์โครงสร้างของตัวกลางในระดับจุลภาคได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ในบทที่ 2 ได้อธิบายถึงฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่นำมาใช้ตรวจสอบวัสดุซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของการตรวจสอบออกเป็นสองหัวข้อหลักก็คือ การนำคลื่นอัลตราโซ-นิกมาใช้ตรวจวัดสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ และการวัดอัตราการลดทอนของคลื่น รวมทั้งการวัดสเปกตรัมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยในการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาตรวจวัดสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุหรือเรียกว่า elastometry นั้นปริมาณทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่สามารถนำมาใช้วัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเช่น Young's modulus, Shear modulus และ Poisson's ratio เป็นต้น ก็คือค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสมบัติยืดหยุ่นดังกล่าวของวัสดุดังแสดงในสมการที่ (2.60), (2.61) และ (2.62) ดังนั้นในการวัดหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุนอกจากการตรวจสอบโดยอาศัยวิธีทางกล ซึ่งจะนำวัสดุที่ต้องการวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นมา กระทำด้วยแรงขนาดต่าง ๆ แล้วทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนขนาดรูปร่าง โดยความสัมพันธ์ของขนาดสัดส่วนรูปร่างที่เปลี่ยนไปของวัสดุเนื่องจากค่าของแรงที่มากกระทำขนาดต่าง ๆ ก็จะเป็นค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ ซึ่งหลังจากการตรวจสอบด้วยวิธีทางกลชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบจะถูกทำลายไป ดังนั้นการตรวจสอบด้วยวิธีทางกลจึงเรียกได้ว่าเป็นการตรวจสอบแบบทำลายชิ้นงาน (destructive testing) อีกแนวทางหนึ่งในการตรวจวัดค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุก็คือการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการตรวจสอบซึ่งอาศัยการวัดค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุตรวจสอบเพื่อนำมาหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ โดยวิธีคลื่นอัลตราโซนิกวัสดุจะไม่ถูกทำลายไปหลังจากการตรวจสอบ จึงเรียกวินี้ว่าเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (non-destructive testing)

อีกลักษณะหนึ่งของการตรวจสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุโดยอาศัยการวัดอัตราการลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งจากทฤษฎีการลดทอนของคลื่น ค่าอัตราการลดทอนสามารถจะวัดได้จากขนาดอัตราส่วนของค่าแอมพลิจูดที่ลดลงเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางและเมื่อเกิดการลดทอนของคลื่นขึ้นซึ่งจะส่งผลให้สเปกตรัมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางมีลักษณะรูปร่างและค่าความถี่กลางแตกต่างไปจากสเปกตรัมของคลื่นจากแหล่งกำเนิดดังนั้นในการวัดขนาดอัตราการลดทอนของคลื่นและการวัดสเปกตรัมของคลื่นจึงเป็นลักษณะการตรวจสอบอีกแนวทางหนึ่งเพื่อใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุได้ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเทคนิคในการวัดค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุที่มีความแม่นยำสูงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุและเทคนิคที่ใช้วัดอัตรา

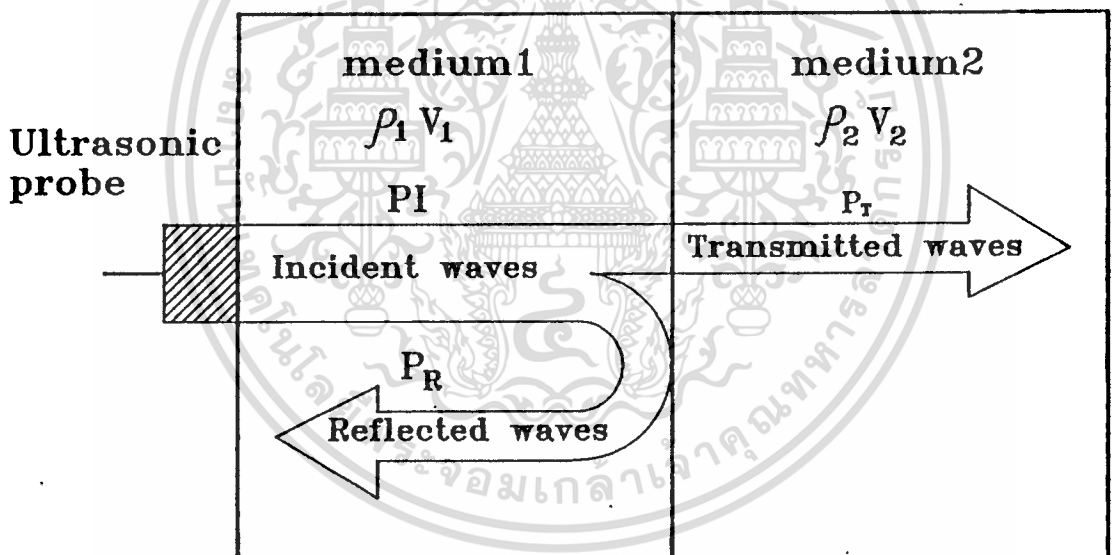
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดทอนของคลื่นรวมถึงเทคนิคในการวัดสเปกตรัมของคลื่นเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน

1 การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง

โดยพื้นฐานของเทคนิคที่ใช้ในการวัดปริมาณต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคในการวัดค่าความเร็วของคลื่น เทคนิคในการวัดอัตราการลดทอนของคลื่นหรือเทคนิคในการวัดสเปกตรัมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางที่พิจารณาจะมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ (pulse-echo) ซึ่งจะอาศัยสมบัติของการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ไปชนรอยต่อของตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์เสียง (acoustic impedance) ที่ต่างกัน โดยพิจารณาในรูปที่ 15

รูปที่ 15



การทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นที่รอยต่อของตัวกลาง

เมื่อคลื่นเสียงที่กำเนิดจากอัลตราโซนิกโพรบเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่หนึ่งและไปชนรอยต่อระหว่างตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง ซึ่งเป็นตัวกลางคนละชนิดกันจะทำให้คลื่นเสียงส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับและอีกส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่สอง โดยปริมาณความเข้มของเสียงที่ทะลุผ่าน (P_T) และปริมาณความเข้มของเสียงที่สะท้อนกลับ (P_R) สามารถแสดงอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (R) และค่าสัมประสิทธิ์ของการทะลุผ่าน (T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad R &= \frac{P_R}{P_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ \text{และ} \quad T &= \frac{P_T}{P_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

เมื่อ	R	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน
	T	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการทะลุผ่าน
	P_1	=	ความเข้มเสียงตกกระทบ
	P_R	=	ความเข้มเสียงสะท้อนกลับ
	P_T	=	ความเข้มเสียงทะลุผ่าน
	Z	=	อิมพีแดนซ์เสียงซึ่งเป็นผลคูณของค่าความเร็วเสียง (V) และค่าความหนาแน่น (ρ) ของตัวกลาง

ตัวอย่างเช่นกรณีที่ตัวกลางเป็นรอยต่อระหว่างเหล็กกับน้ำโดยกำหนดให้

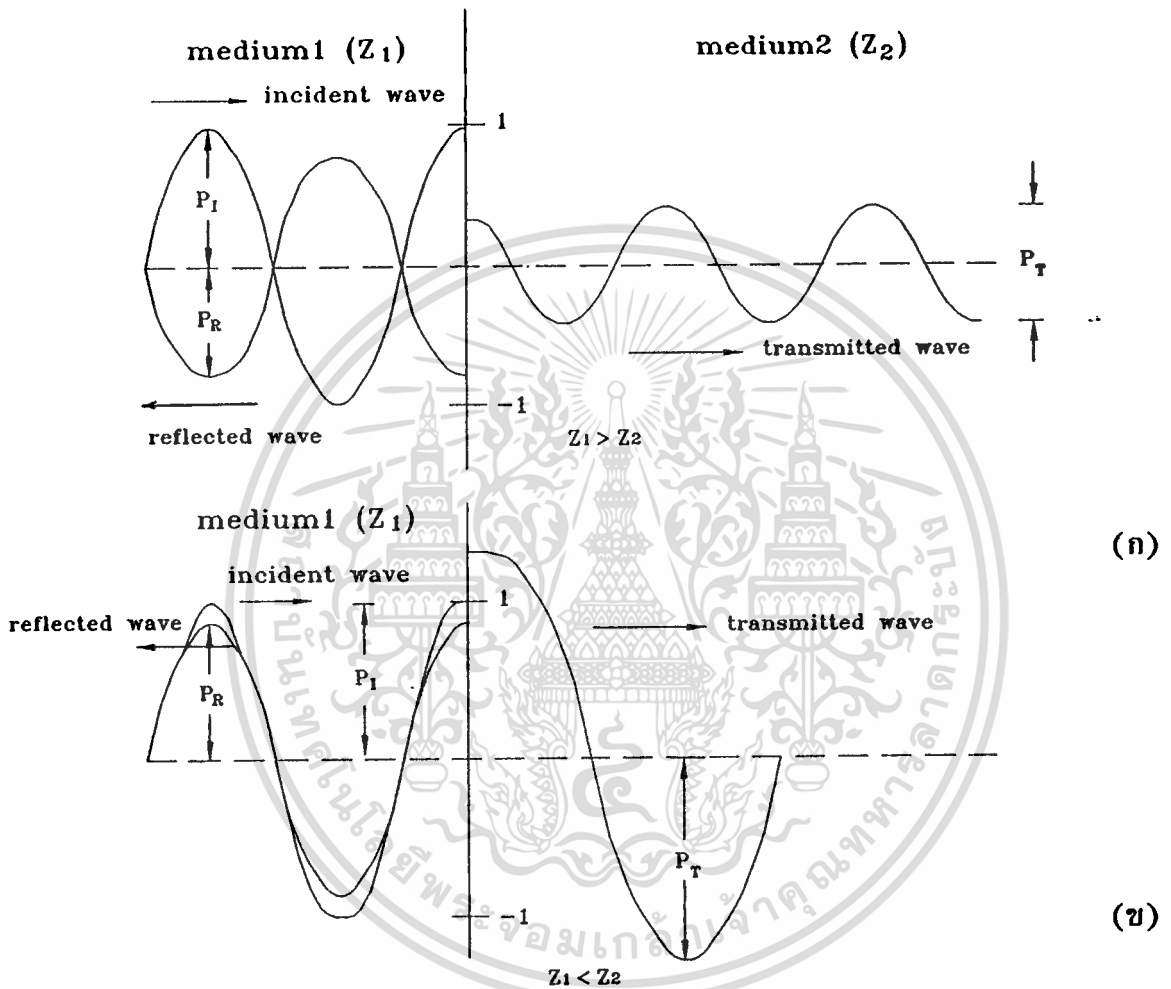
Z_1 เป็นอิมพีแดนซ์เสียงของเหล็กมีขนาดเท่ากับ $45 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$

Z_2 เป็นอิมพีแดนซ์เสียงของน้ำมีขนาดเท่ากับ $1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } R = \frac{1.5 - 45}{1.5 + 45} = -0.935 \text{ และ } T = \frac{2 \times 1.5}{1.5 + 45} = 0.065$$

จากขนาดของ R และ T ที่ได้หมายความว่าประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ ของความเข้มเสียงที่ตกกระทบที่รอยต่อของเหล็กกับน้ำจะสะท้อนกลับและประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มเสียงตกกระทบจะผ่านเข้าไปในน้ำ ซึ่งค่าที่เป็นลบของ R หมายถึงเกิดการกลับเฟสของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ 180 องศาเมื่อเทียบกับเฟสของสัญญาณคลื่นตกกระทบ ในรูปที่ 16 จะแสดงการทะลุผ่านและการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อไปชนรอยต่อของตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์เสียงที่ต่างกัน

รูปที่ 16

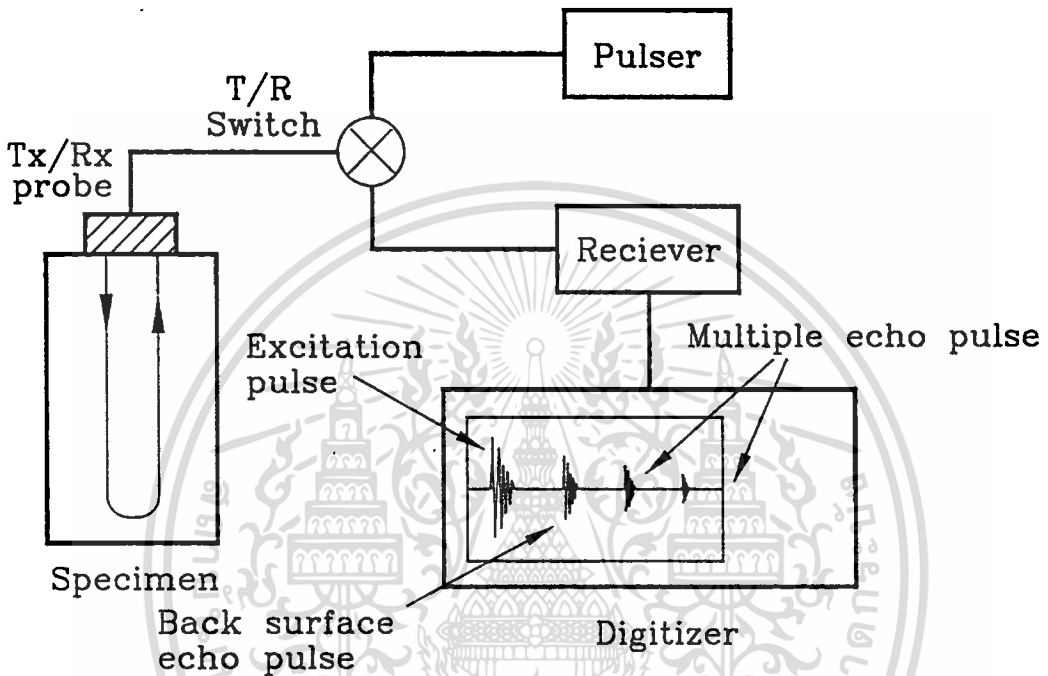


แสดงขนาดความเข้มและเฟสของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตกกระทบรอยต่อของตัวกลางคนละชนิด รูปที่ 16 (ก) เมื่อ $Z_1 > Z_2$ รูปที่ 16 (ข) เมื่อ $Z_1 < Z_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับของเครื่องอัลตราโซนิกจะมีส่วนประกอบหลักสามส่วนด้วยกันคือ พัลส์เซอร์ (pulser) ภาครับสัญญาณ (reciever) และส่วนแสดงผลแสดงดังรูปที่ 17

รูปที่ 17



แสดงลักษณะโครงสร้างการทำงานของเครื่องอัลตราโซนิกเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ

จากรูปที่ 17 เมื่ออัลตราโซนิกโพรบถูกขับด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงจากพัลส์เซอร์จะกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น ซึ่งที่เวลานี้จะได้สัญญาณพัลส์กระตุ้น (excitation pulse) แสดงที่ ส่วนแสดงผล จากนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางและตกกระทบรอยต่อของตัวกลางซึ่ง มีอิมพีแดนซ์เสียงที่ต่างกันเช่น รอยต่อของตัวกลางที่เป็นเหล็กกับอากาศ เป็นต้น คลื่นจะเกิดการ สะท้อนมายังอัลตราโซนิกโพรบ ส่วนรับสัญญาณจะทำหน้าที่รับสัญญาณที่คลื่นสะท้อนกลับมาแล้ว จึงไปนำแสดงผลที่ส่วนแสดงผลซึ่งจะปรากฏสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับสุดท้าย (back surface echo pulse) ขึ้น คาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้นและสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับสุดท้าย จะเป็นคาบเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลางพิจารณา โดยความเร็วของคลื่น อัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลางสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v = \frac{2d}{t} \quad (3.2)$$

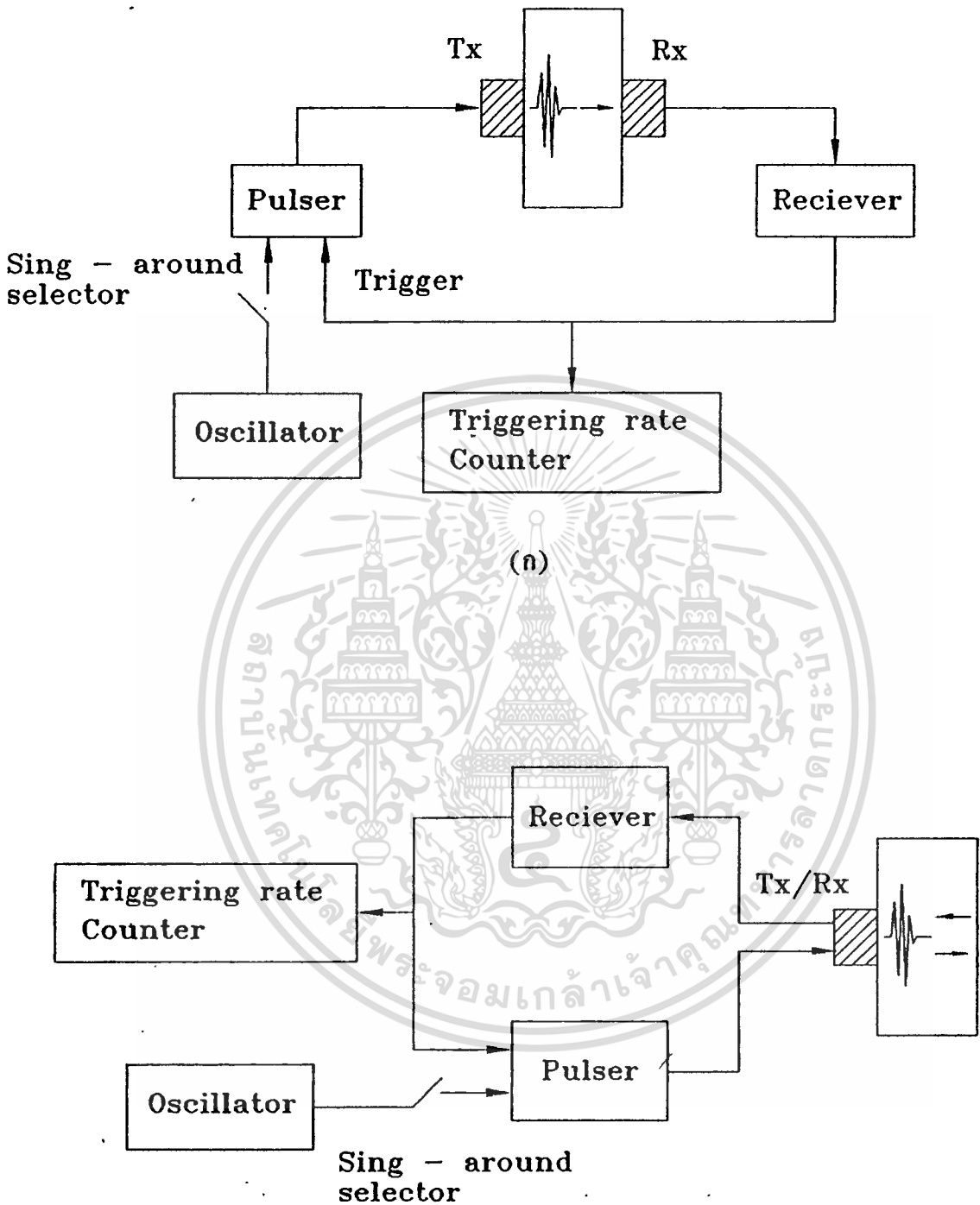
เมื่อ v = ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง (m/s)
 d = ความหนาของวัสดุ (m)
 t = คาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้นและสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับ
 สุดท้าย (s)

ซึ่งจากสมการที่ (3.2) จะเห็นว่าเราสามารถคำนวณหาค่าความเร็วที่คลื่นเสียงใช้เคลื่อนที่ในตัวกลางที่พิจารณาได้จากการวัดคาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้นและสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับสุดท้าย ซึ่งค่าความถูกต้องแม่นยำของค่าความเร็วที่คำนวณได้จะมีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการวัดคาบเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์กระตุ้นและสัญญาณพัลส์สะท้อนกลับสุดท้าย ดังนั้นเทคนิคในการวัดคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีความแม่นยำสูงจึงมีความสำคัญสำหรับการคำนวณหาค่าความเร็วที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในตัวกลาง ซึ่งเทคนิคการวัดคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีความแม่นยำสูงจะมีอยู่สองเทคนิคหลักๆ ด้วยกันคือ เทคนิค sing-around และเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ (Pulse-Echo-Overlap : PEO) โดยเทคนิคทั้งสองจะมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซึ่งอาศัยสมบัติการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ไปตกกระทบรอยต่อของตัวกลางโดยในรายละเอียดของเทคนิคทั้งสองมีดังนี้

1.1 เทคนิค sing-around

เทคนิค sing-around เป็นเทคนิคการวัดค่าความเร็วที่มีความแม่นยำสูงโดยเป็นเทคนิคที่มีลักษณะการวัดแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะใช้วิธีนับและเฉลี่ยคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในตัวกลาง โดยภายในระบบจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำเนิดฐานเวลาที่มีเสถียรภาพสูงซึ่งจะใช้วิธีวัดคาบเวลาระหว่างพัลส์ของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ภายในตัวกลางที่ถูกตรวจสอบ มีโครงสร้างการทำงานของระบบ แสดงดังรูปที่ 18

รูปที่ 18



(ข)

แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิค sing-around : (ก) เมื่อใช้ Tx และ Rx
 โพรบและ (ข) เมื่อใช้โพรบชนิดเดี่ยว (Tx/Rx)

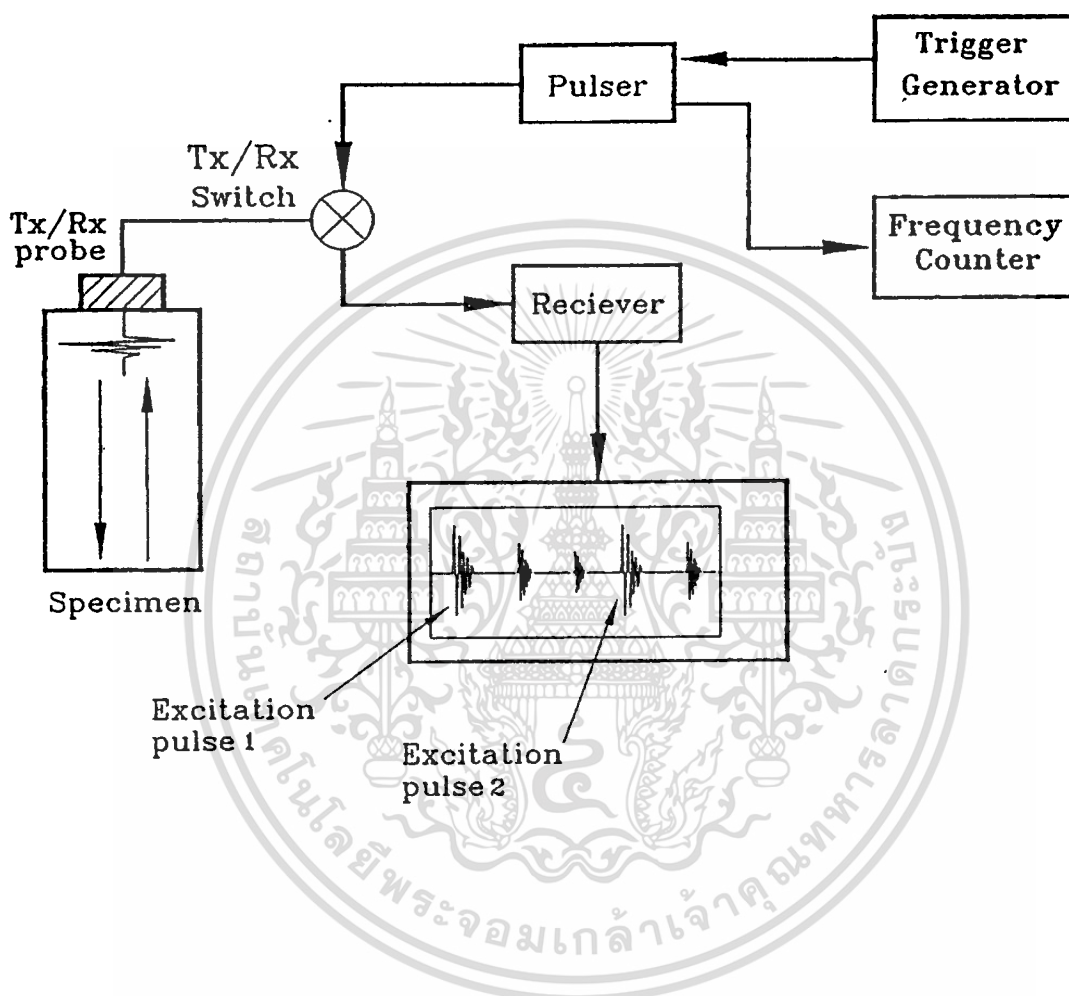
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 18 อัลตราโซนิกโพรบที่ใช้มีอยู่สองชนิดคือ 1) เป็นโพรบชนิดเดี่ยวซึ่งจะมีตัวรับและตัวส่งคลื่นอยู่ภายในโพรบเดียวกันดังรูปที่ 18 (ข) และ 2) เป็นโพรบชนิดที่มีตัวรับและตัวส่งคลื่นอยู่คนละโพรบกันดังรูปที่ 18 (ก) โดยการทำงานของระบบจะเริ่มขึ้นเมื่อพัลส์เซอร์ (pulser) ได้รับสัญญาณทริกเกอร์จากออสซิลเลเตอร์ (oscillator) ซึ่งใช้กำเนิดสัญญาณทริกเกอร์ความถี่ต่ำ พัลส์เซอร์จะกำเนิดแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงไปขับโพรบให้กำเนิดคลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง จากนั้นภาครับสัญญาณ (reciever) จะทำหน้าที่รับและขยายสัญญาณที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเมื่อใช้โพรบชนิด Tx และ Rx โพรบหรือสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ เมื่อใช้โพรบชนิดเดี่ยว ซึ่งสัญญาณจากภาครับสัญญาณจะทริกเกอร์ให้ออสซิลเลเตอร์หยุดการทำงานและทริกเกอร์ให้พัลส์เซอร์กำเนิดพัลส์ส่งต่อไปเพื่อไปขับโพรบ ซึ่งคาบเวลาระหว่าง พัลส์หรือคาบเวลาที่คลื่นเสียงใช้เคลื่อนที่ภายในตัวกลางก็คือ อัตราของการทริกเกอร์ซึ่งสามารถจะวัดได้จากเครื่องนับอัตราการทริกเกอร์ (Triggering rate counter) นั่นเอง โดยวิธีการวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุด้วยเทคนิค sing-around ถูกพัฒนาขึ้นในปี.ศ.1960 โดย Forgacs สามารถวัดเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ในวัสดุด้วยความแม่นยำประมาณ 10 ppm

1.2 เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ (PEO)

การวัดความเร็วของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในตัวกลางด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ โดยพื้นฐานจะอยู่บนวิธีพัลส์สะท้อนกลับเช่นเดียวกับกับเทคนิค sing-around ซึ่งอาศัยการส่งพลังงานจากพัลส์เซอร์ไปขับอัลตราโซนิกโพรบให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตกกระทบรอยต่อของวัสดุก็จะเกิดการสะท้อนกลับมายังภาครับสัญญาณและถูกนำไปแสดงผลในโหมดของแอมพลิจูด (A-mode) โดยใช้เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานแสดงดังรูปที่ 19

รูปที่ 19

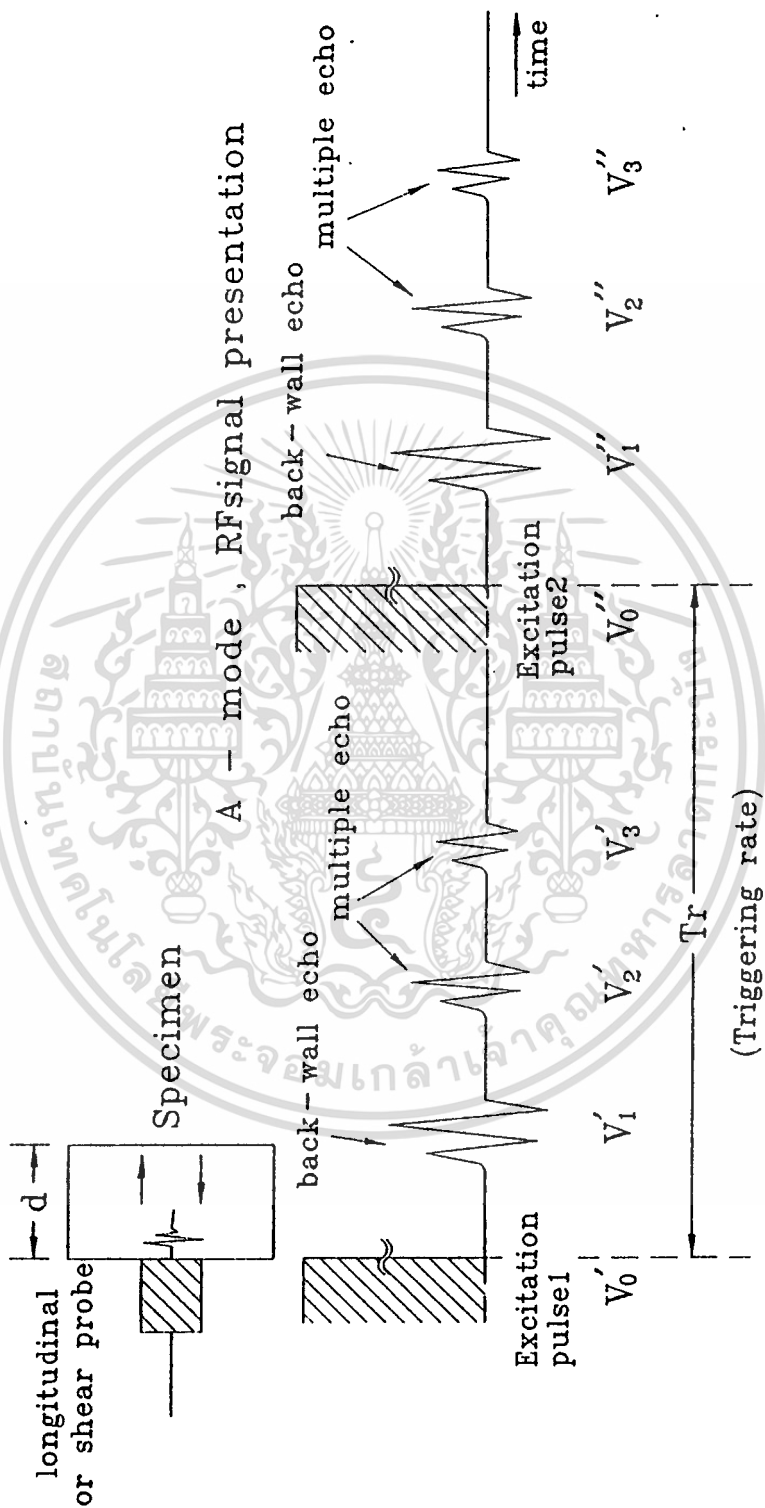


แสดงโครงสร้างการทำงานของเทคนิค PEO

จากรูปที่ 19 พัลส์เซอร์ซึ่งทำหน้าที่กำเนิดแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงเพื่อไปขับโพรบ จะมีอัตราการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับฐานเวลาที่สามารปรับค่าความถี่ได้ โดยเรียกขนาดของฐานเวลานี้ว่าอัตราการกระตุ้น (Tr) เมื่อโพรบได้รับพลังงานจากพัลส์เซอร์ก็จะกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางและเกิดการสะท้อนกลับเมื่อชนรอยต่อของตัวกลางที่เวลานี้จะได้ลักษณะสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกแสดงดังรูปที่ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

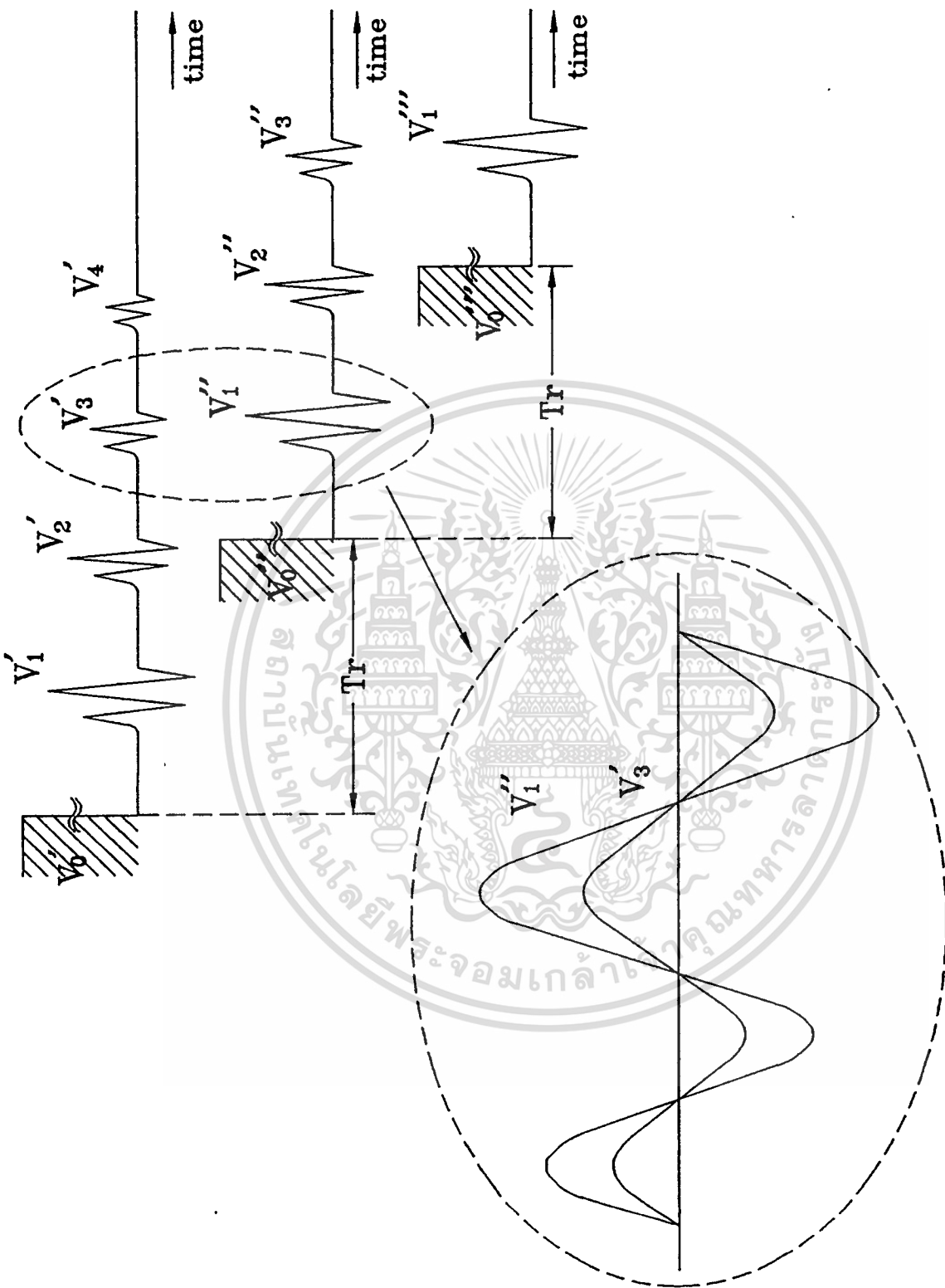
รูปที่ 20



ลักษณะสัญญาณของคลื่นขณะยังไม่เกิดการซ้อนทับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 21



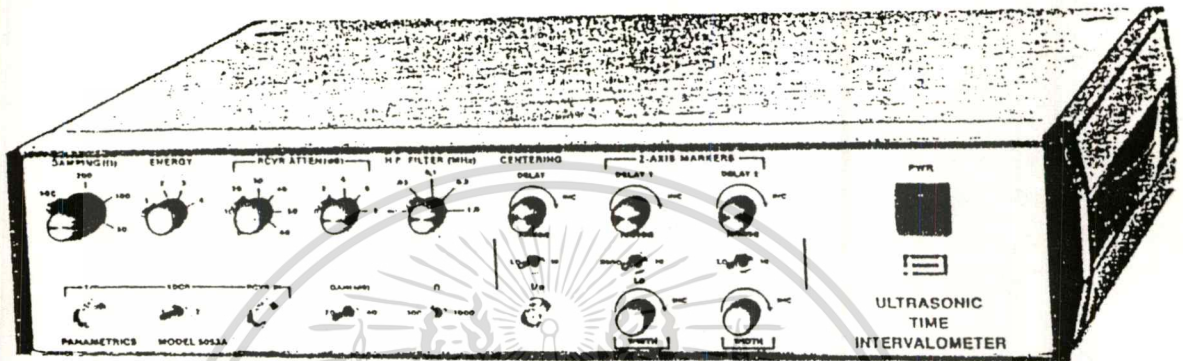
Overlapping of ideal echos

ลักษณะสัญญาณของคลื่นเมื่อเกิดการซ้อนทับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในรูปที่ 20 เมื่อพัลส์เซอร์ได้รับสัญญาณกระตุ้นคือ V_0' , V_0'' , ..., V_0^n ก็จะปล่อยแรงดันไฟฟ้าไปขับโพรบให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางและเกิดการสะท้อนกลับที่ด้านปลายของตัวกลางทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนกลับลำดับที่หนึ่งขึ้น สัญญาณสะท้อนกลับลำดับที่หนึ่งเมื่อเคลื่อนที่มาถึงปลายด้านที่สัมผัสอยู่กับโพรบก็จะเกิดการสะท้อนกลับเข้าไปในตัวกลางอีกครั้งหนึ่ง และเมื่อคลื่นที่สะท้อนจากปลายด้านสัมผัสกับโพรบเคลื่อนที่ที่มากกระทบที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวกลางก็จะเกิดสัญญาณสะท้อนกลับลำดับที่สองขึ้น ด้วยลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางที่มีการสะท้อนกลับไปมาของคลื่นภายในตัวกลางจะทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนหลายครั้งขึ้นคือ V_1^n , V_2^n , V_3^n , ..., V_n^n ; ($n=1,2,3$) ซึ่งคาบเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปกลับในตัวกลางก็คือคาบเวลาระหว่างสัญญาณสะท้อน V_1^n และสัญญาณสะท้อน V_2^n โดยระยะเวลาของอัตราการกระตุ้นในขณะนี้ มีขนาดเท่ากับ T_r จากนั้นทำการปรับระยะเวลาการกระตุ้นให้ลดลงเพื่อให้สัญญาณสะท้อน V_1^{n+1} เกิดการซ้อนทับกับสัญญาณสะท้อน V_3^n แสดงดังรูปที่ 21 ซึ่งจากรูปที่ 21 จะเห็นว่าระยะเวลาของอัตราการกระตุ้น (T_r) ในขณะนี้ก็คือสองเท่าของระยะเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลางซึ่งสามารถจะวัดได้จากเครื่องนับความถี่ (frequency counter) ซึ่งคาบเวลาที่วัดได้สามารถจะนำมาคำนวณหาขนาดความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่พิจารณาได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยในช่วงแรกที่ได้พบวิธีวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับคือในปีค.ศ.1961 โดย McSkimin ในช่วงเวลาดังกล่าวค่าความเร็วที่วัดได้ด้วยเทคนิคนี้มีค่าความแม่นยำเพียง 1 ใน 5000 ส่วนเท่านั้น จนมาถึงในปัจจุบันเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับของบริษัท PANAMETRICS รุ่น 5053A สามารถจะวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุโดยมีความแม่นยำถึง 3ppm ได้ เครื่องดังกล่าวภายในจะมีวงจรรักษาสัญญาณตอบสนองความถี่ได้ตั้งแต่ 10 KHz ถึง 35 MHz มีช่วงอัตราขยายสัญญาณตั้งแต่ 0 dB ถึง 68 dB และมีวงจรพัลส์เซอร์กำเนิดแรงดันพัลส์ได้ถึง -300 V สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุโดยใช้การวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุที่พิจารณาได้ โดยลักษณะของเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิค PEO ของบริษัท PANAMETRICS รุ่น 5053A แสดงดังรูปที่ 22

รูปที่ 22



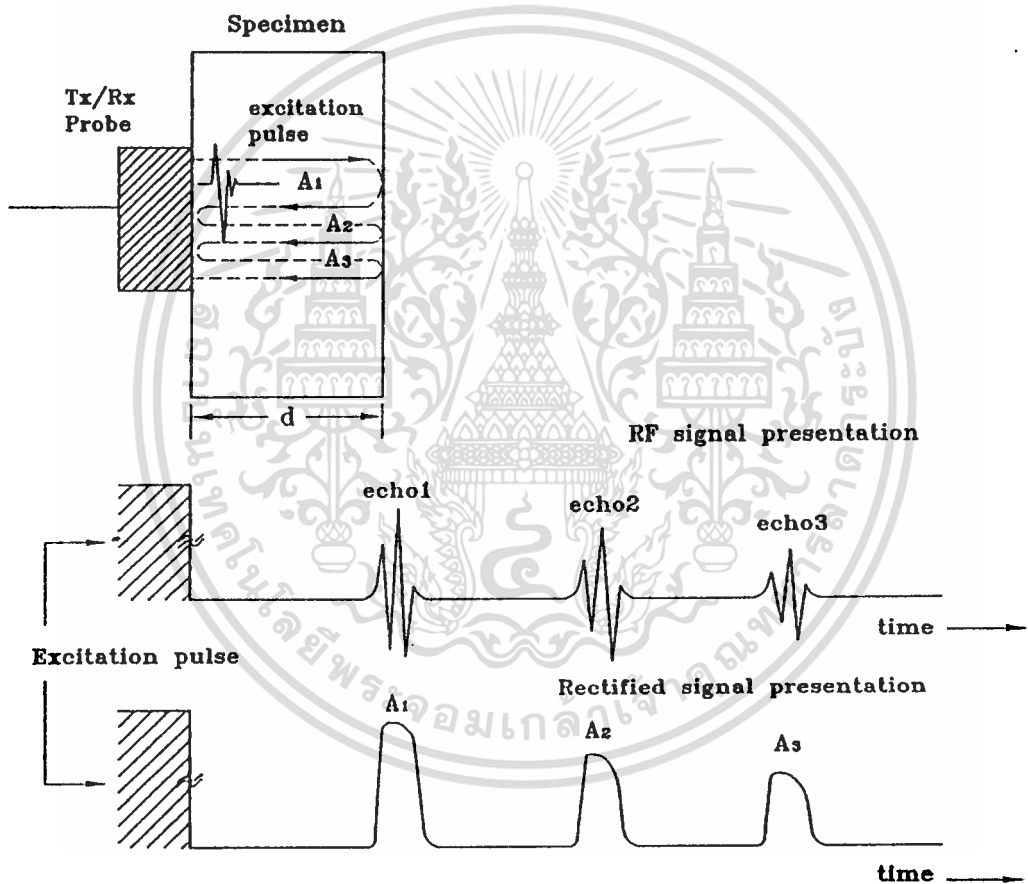
Pulse-Echo-Overlap Timing Module Model 5053 A (PANAMETRICS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 การวัดอัตราการลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

จากทฤษฎีการลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางพิจารณาโดยใช้เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นได้จากอัตราส่วนของแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับหลายครั้งในตัวกลาง พิจารณาในกรณีเลือกใช้อัลตราโซนิกโพรบชนิดสัมผัสโดยตรง (direct contact) กับตัวกลางที่พิจารณาแสดงดังรูปที่ 23

รูปที่ 23



สัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกในแอมพลิฟายด์โหมด

จากรูปที่ 23 พัลส์กระตุ้น (excitation pulse) จะเป็นพัลส์เริ่มต้นของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง และจะสะท้อนกลับเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ชนรอยบริเวณรอยต่อตัวกลางและอากาศ จะเกิดสัญญาณสะท้อนที่ 1 (echo1) เมื่อสัญญาณสะท้อนที่ 1 เคลื่อนที่ที่มากกระทบรอยต่อของตัวกลางก็จะเกิดการสะท้อนกลับไปมาของคลื่นเสียงจะได้สัญญาณสะท้อนที่ 2 และที่ 3 ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับ แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงภายในตัวกลางมีการสูญเสียพลังงานทำให้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนที่ลำดับสูงขึ้นมีขนาดลดลง ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นสามารถวัดได้จากอัตราส่วนแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนที่มีลำดับติดกัน โดยขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนสามารถวัดได้จากแรงดันไฟฟ้าของคลื่นเสียงเมื่อผ่านขบวนการเรดิโพลสัญญาณแบบเต็มคลื่นแล้ว ซึ่งจะได้อัตราส่วนแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อน 1, 2 และ 3 มีขนาด A_1 , A_2 , และ A_3 ตามลำดับ โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.66) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\alpha d = 20 \log \frac{1}{S_n} \text{ (dB)} \quad (3.8)$$

เมื่อ

α คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่น (dB/m)

d คือความหนาของตัวกลาง (m)

S_n คืออัตราส่วนของขนาดแอมพลิจูดสัญญาณสะท้อนที่ลำดับติดกันโดยที่ $S_n = A_{n+1}/A_n$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$

ค่าอัตราการลดทอนของคลื่นในวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยในวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นชนิดหล่อ (cast structure) ซึ่งภายในวัสดุจะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่มาก ทำให้คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการกระเจิงขึ้นได้ง่าย อัตราการลดทอนจะมีค่าสูงกว่าอัตราการลดทอนของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่มีโครงสร้างชนิดอัดแน่น (impact structure) ซึ่งมีปริมาณของตัวกระเจิงน้อยกว่า โดยใช้โพรมบ์กำเนิดความถี่ขนาด 2MHz ชนิดกำเนิดคลื่นตามยาวจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นในวัสดุแต่ละชนิดที่มีโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันแสดงได้ดังตารางที่ 1

สำหรับในวัสดุที่มีโครงสร้างชนิดหล่อซึ่งมีตัวกระเจิงอยู่มากหรือวัสดุที่มีโพรงอากาศ (porosity) อยู่ภายในมากนอกจากจะทำให้อัตราการลดทอนมีค่าสูงแล้ว โครงสร้างลักษณะนี้ซึ่งมีตัวกระเจิงหรือโพรงจากอยู่มากจะทำให้ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุมีค่าลดลงด้วยโดยการศึกษการวัดอัตราการลดทอน, ค่าความเร็วหรือวิเคราะหส์เปกตรัมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุสามารถจะนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านได้

ตารางที่ 1

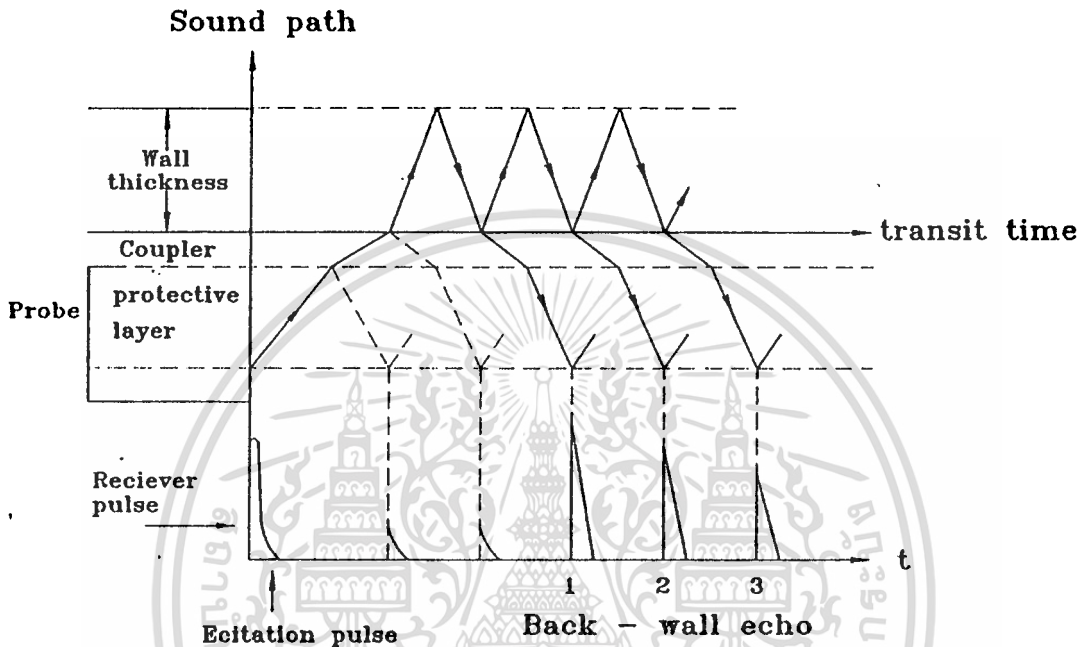
ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน α (dB/m)	$\alpha < 10$	$10 \leq \alpha \leq 100$	$\alpha > 100$
วัสดุ	Cast : aluminium, magnesium, pure and slightly alloyed Worked : steel, aluminium, magnesium, nickel, silver, titanium, tungsten (all pure and alloyed) Non-metals : glass, porcelain	Predominantly absorption Plastics (polystyrene, perspex, rubber pvc, synthetic resins) Predominately Scattering Cast aluminium and magnesium, alloyed Cast steel, slightly alloyed, high-quality cast iron Worked : copper, zinc, brass bronze, lead, stellite, sintered metals	Plastics and rubber, with fillers, vulcanized rubber, wood Cast steel, highly alloyed, lowstrength cast iron, cast copper, zinc brass, bronze Non-metals : porous ceramics, rocks

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสำหรับวัสดุแต่ละชนิดโดยใช้โพรบกำเนิดคลื่นตามยาว ความถี่ 2 MHz (Josef & Herbert Krautkramer)

จากเทคนิคในการวัดค่าความเร็วและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นจะเห็นได้ว่าการวัดปริมาณทั้งสองจะมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ ซึ่งโดยทั่วไปการวัดปริมาณต่างๆ โดยอาศัยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับจะมีสาเหตุที่ทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดได้อยู่หลายประการเช่นในกรณีวัดค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุซึ่งได้เสนอเทคนิคการวัดความเร็วที่มีความแม่นยำ มาสองเทคนิคก็คือ เทคนิค sing-around และเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ โดยใช้เทคนิค sing around ค่าเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในวัสดุสามารถวัดได้จากอัตราการกระดุนของพัลส์เซอร์เมื่อได้สัญญาณทริกเกอร์จากสัญญาณสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งค่าความผิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาดในการวัดมักมีสาเหตุหลักมาจากบริเวณสัมผัสกันระหว่างโพรบกับวัสดุที่ทำการวัด
พิจารณาในรูปที่ 24

รูปที่ 24



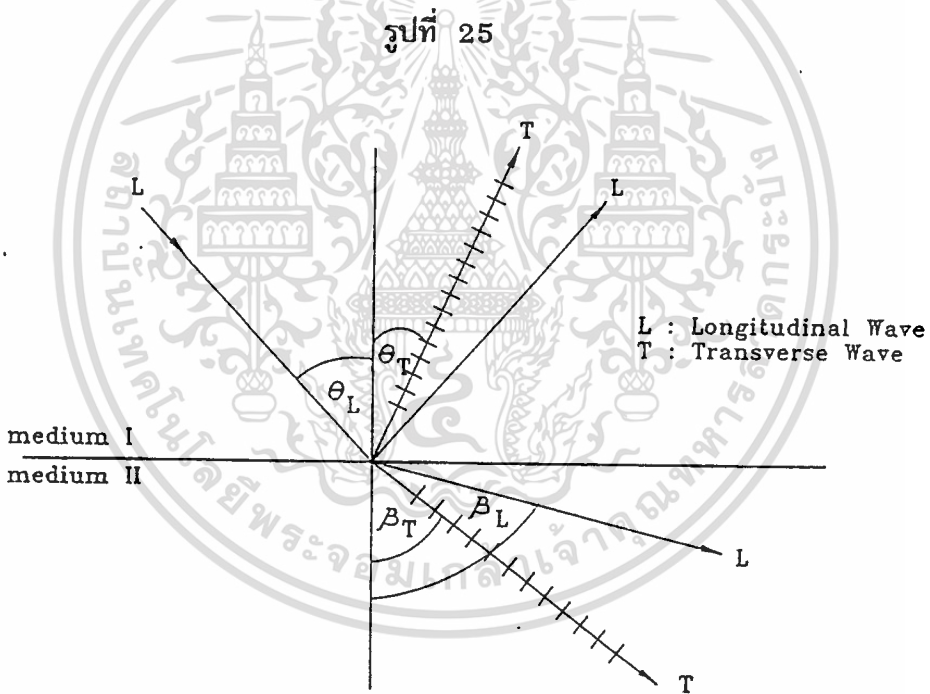
แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่

จากรูปที่ 24 จะเห็นว่าเวลาที่วัดได้โดยใช้เทคนิค sing-around จะประกอบไปด้วยเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในวัสดุรวมกับเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในตัวช่วยส่งผ่านคลื่น (coupler) ซึ่งมีเพื่อให้คลื่นสามารถเคลื่อนที่จากโพรบเข้าไปในวัสดุได้และเวลาที่คลื่นใช้เคลื่อนที่ในชั้นป้องกันผิวหน้าของโพรบ (protective layer) ซึ่งในการวัดความเร็วของวัสดุที่มีขนาดบางมากๆ หรือมีค่าความเร็วที่คลื่นใช้เคลื่อนที่สูง ค่าเวลาที่หน่วงไปในวัสดุชั้นของคลีปเปอร์และชั้นป้องกันผิวหน้าของโพรบจำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย

อีกเทคนิคหนึ่งในการวัดค่าความเร็วของคลื่นคือเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ซึ่งค่าความผิดพลาดในการวัดที่เกิดขึ้นนอกจากจะมาจากการสัมผัสกันระหว่างโพรบกับวัสดุแล้วสาเหตุหลักอีกประการหนึ่งก็คือประเภทของวัสดุที่จะทำการวัดโดยวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างภายในที่ก่อให้เกิดการลดทอนของคลื่นได้ง่ายซึ่งจะส่งผลทำให้คลื่นสะท้อนกลับลำดับที่ 1, 2, 3..... มีเฟสและรูปร่างแตกต่างกัน ซึ่งการวัดความเร็วด้วยเทคนิคนี้จะได้มาจากการวัดอัตราการกระตุ้นเมื่อเกิดการซ้อนทับของคลื่นสะท้อนกลับและด้วยเหตุนี้ในกรณีที่คลื่นสะท้อนกลับที่ลำดับต่างๆ

มีเฟสและรูปร่างแตกต่างกัน ดังนั้นการจะปรับให้คลื่นสะท้อนกลับเกิดการซ้อนทับจึงเป็น อาจทำได้ค่อนข้างลำบาก

สำหรับแหล่งที่มาของความผิดพลาดในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นนอกจากจะมาก จากการสัมผัสกันระหว่างโพรบกับวัสดุซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของคลื่นขึ้นในชั้นของคลีปเปอร์และชั้นป้องกันผิวหน้าของโพรบแล้ว การเลือกขนาดความถี่ของโพรบให้เหมาะสมกับประเภทของวัสดุก็เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากที่แต่ละค่าความถี่ของโพรบจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นที่แตกต่างกันไปสำหรับวัสดุชิ้นเดียวกัน อีกส่วนหนึ่งของความผิดพลาดในการวัดก็คือการเกิดการเปลี่ยนโหมด (mode conversion) ของคลื่นจากคลื่นตามยาวไปเป็นคลื่นตามขวางหรือจากคลื่นตามขวางมาเป็นคลื่นตามยาว โดยในกรณีที่คลื่นอัลตราโซนิกตกกระทบไม่ตั้งฉากกับรอยต่อของตัวกลาง คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีความซับซ้อนมากขึ้น พิจารณา รูปที่ 25



แสดงการสะท้อน การหักเห และการเปลี่ยนโหมดของคลื่นเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกตกกระทบ เป็นมุมกับรอยต่อของตัวกลาง

จากรูปที่ 25 เมื่อคลื่นตามยาวตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลางที่ 1 และ 2 โดยตกกระทบเป็นมุม θ_L กันเส้นปกติ จะเกิดการสะท้อนของคลื่นขึ้นโดยมีมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ และในขณะเดียวกันก็จะเกิดการเปลี่ยนโหมดของคลื่นจากคลื่นตามยาวมาเป็นคลื่นตามขวางโดยสะท้อนเป็นมุม θ_T ขนาดของมุม θ_T สามารถคำนวณได้ตามกฎหักเหของสเนลล์ (Snell's law)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3.4)$$

เมื่อ V_1 คือ ความเร็วคลื่นในตัวกลางที่หนึ่ง
 V_2 คือ ความเร็วคลื่นในตัวกลางที่สอง

และเมื่อเกิดการตกกระทบของคลื่นที่บริเวณรอยต่อของตัวกลาง คลื่นเสียงบางส่วนยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สองได้เช่นกัน ซึ่งจะเกิดการหักเหของคลื่นที่บริเวณรอยต่อของตัวกลางขึ้น ในกรณีนี้มุมหักเหคือ β_L สามารถคำนวณได้จากกฎของสเนลล์เช่นกัน และนอกเหนือจากคลื่นตามยาวที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ได้แล้ว การที่คลื่นตามยาวตกกระทบเป็นมุมที่รอยต่อของตัวกลาง ยังสามารถจะทำให้เกิดคลื่นตามขวางเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ได้อีกด้วย ซึ่งมุมหักเหของคลื่นตามขวางที่เปลี่ยนโหมดมาจากคลื่นตามยาวคือ β_T ก็สามารถจะคำนวณได้จากกฎของสเนลล์เช่นกัน พิจารณาในกรณีที่คลื่นสะท้อนเกิดการเปลี่ยนโหมดโดยชนิดของคลื่นสะท้อนจะเปลี่ยนไปจากชนิดของคลื่นตกกระทบ

ตัวอย่างเช่น คลื่นตามยาวเคลื่อนที่อยู่ในเหล็กกล้ามีมุมตกกระทบที่ผิวของเหล็กกล้าเท่ากับ 60° ($\theta_L = 60^\circ$) ความเร็วของคลื่นตามยาวในเหล็กกล้าเท่ากับ 6×10^3 m/s ($V_L = 6 \times 10^3$ m/s) คลื่นที่สะท้อนกลับมากจะมีทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง กำหนดให้ความเร็วของคลื่นตามขวางในเหล็กกล้าเท่ากับ 3.2×10^3 m/s ($V_T = 3.2 \times 10^3$ m/s)

จากกฎของสเนลล์จะได้

$$\frac{\sin\theta_T}{\sin\theta_L} = \frac{V_T}{V_L} = 0.55$$

$$\sin \theta_T = 0.55 \times 0.87 = 0.48$$

$$\theta_T = 29^\circ$$

จะได้คลื่นตามขวางสะท้อนกลับเป็นมุม 29° เมื่อคลื่นตามยาวตกกระทบเป็นมุม 60° ดังนั้นสำหรับมุมตกกระทบค่าหนึ่งอาจทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับเกิดการเปลี่ยนโหมดเป็นคลื่นชนิดอื่นได้ มุมตกกระทบดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.5) คือ

$$\frac{\sin \theta_L}{\sin \theta_T} = \frac{V_L}{V_T}$$

$$\text{เมื่อ } \theta_T \approx 90^\circ - \theta_L$$

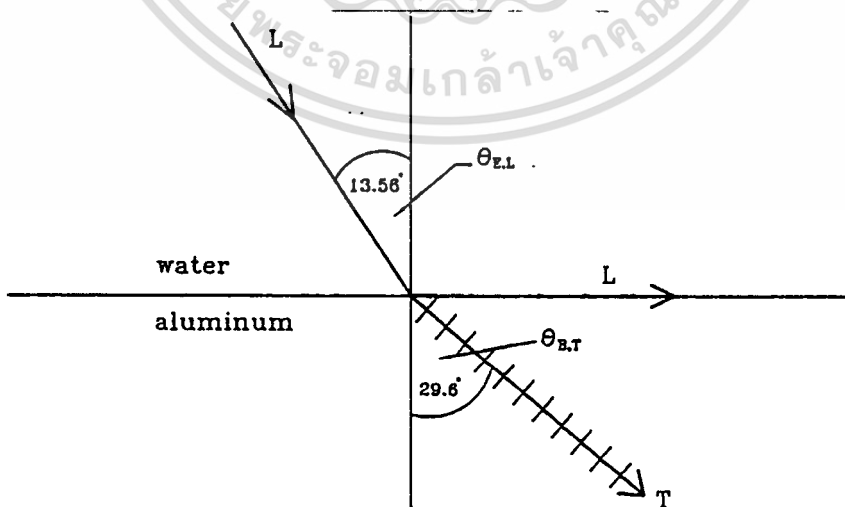
$$\text{จะได้ } \frac{\sin \theta_L}{\sin (90^\circ - \theta_L)} = \frac{\sin \theta_L}{\cos \theta_T} = \tan \theta_L = \frac{V_L}{V_T} \quad (3.5)$$

ในการพิจารณาการเกิดการเปลี่ยนโหมดของคลื่นจากคลื่นชนิดหนึ่งไปเป็นคลื่นอีกชนิดหนึ่งไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนโหมดเนื่องจากการสะท้อนกลับหรือการทะลุผ่านของคลื่นเมื่อเกิดรอยต่อของตัวกลางมักจะพิจารณาในกรณีที่เป็นรอยต่อของตัวกลางที่มีสถานะเป็นของเหลวและของแข็ง ซึ่งมักพบได้บ่อยสำหรับการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ตัวอย่างเช่นกรณีรอยต่อของน้ำกับอะลูมิเนียม

กำหนดให้	$V_{L, \text{water}}$	=	1488 m/s
	$V_{L, \text{aluminium}}$	=	6.32×10^3 m/s
	$V_{T, \text{aluminium}}$	=	3.13×10^3 m/s

มุมที่คลื่นตกกระทบในน้ำแล้วทำให้ไม่ปรากฏคลื่นตามยาวหักเหเข้าไปในอะลูมิเนียมถูกเรียกว่า มุมวิกฤตที่หนึ่ง (first critical angle) พิจารณาดังรูปที่ 26

รูปที่ 26



แสดงมุมวิกฤตที่หนึ่งของรอยต่อตัวกลางระหว่างน้ำกับอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้ } \theta_E &= \text{มุมตกกระทบตัวกลางที่ I} \\ \theta_R &= \text{มุมสะท้อนตัวกลางที่ I} \\ \theta_B &= \text{มุมหักเหตัวกลางที่ II} \end{aligned}$$

โดยสัญลักษณ์ L และ T แทนชนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางตามลำดับ เช่น

$\theta_{E,L}$ หมายถึงขนาดมุมตกกระทบของคลื่นตามยาวในตัวกลางที่ I

$\theta_{E,T}$ หมายถึงขนาดมุมตกกระทบของคลื่นตามขวางในตัวกลางที่ I เป็นต้น

โดยใช้กฎของสเนลล์สามารถคำนวณมุมวิกฤตที่หนึ่งได้คือ

$$\frac{\sin \theta_{E,L}}{\sin \theta_{R,L}} = \frac{V_{L, \text{water}}}{V_{L, \text{aluminum}}}$$

$$\text{โดยที่ } \theta_{R,L} = 90^\circ \text{ จะได้ } \sin \theta_{R,L} = 1$$

$$\text{ดังนั้น } \sin \theta_{E,L} = \frac{1483}{6320} = 0.234$$

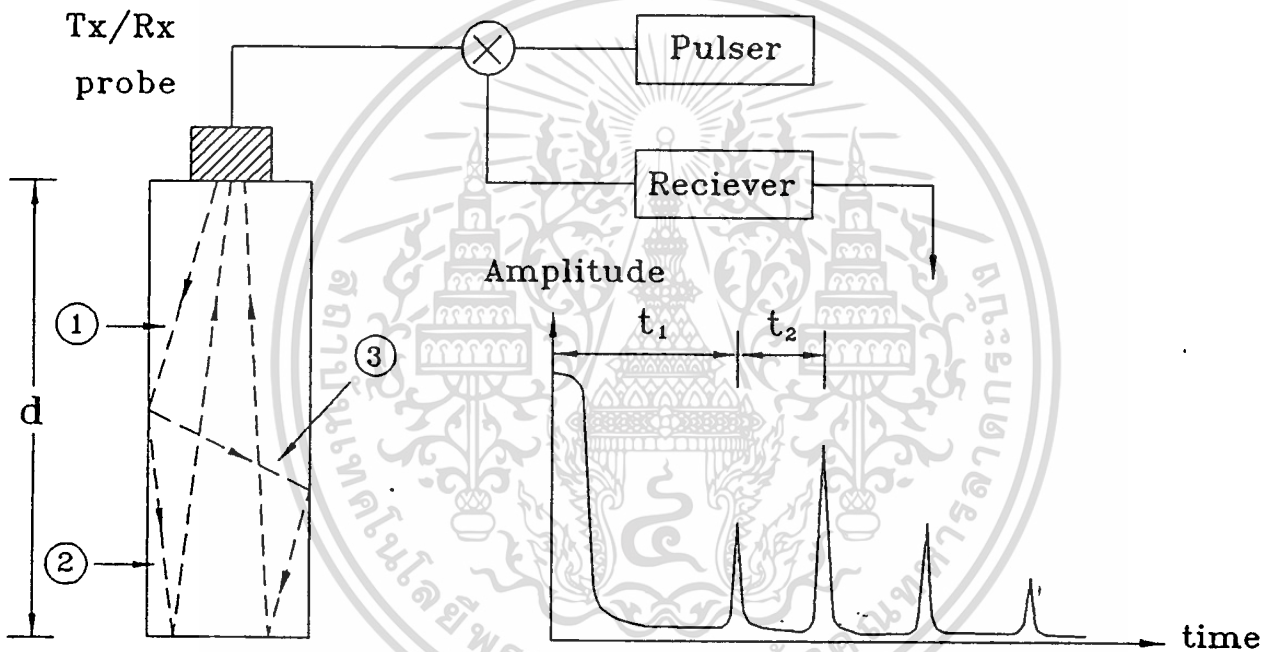
$$\theta_{E,L} = 13.56^\circ$$

จะได้มุมวิกฤตที่หนึ่งของรอยต่อตัวกลางระหว่างน้ำกับอะลูมิเนียมเท่ากับ 13.56° โดยที่ตำแหน่งค่ามุมวิกฤตที่หนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนโหมดจากคลื่นตามยาวเป็นคลื่นตามขวางเคลื่อนที่เข้าไปในอะลูมิเนียม มุมหักเหของคลื่นตามขวาง ($\theta_{B,T}$) ในตัวกลางอะลูมิเนียมสามารถคำนวณได้จากกฎของสเนลล์เช่นกัน ซึ่งที่มุมวิกฤตที่หนึ่งจะได้มุมหักเหของคลื่นขวางในอะลูมิเนียมเท่ากับ 29.6°

สำหรับมุมวิกฤตที่สอง (second critical angle) ของรอยต่อตัวกลางระหว่างน้ำกับอะลูมิเนียมก็คือมุมที่คลื่นตกกระทบในน้ำแล้วทำให้ไม่ปรากฏคลื่นตามขวางหักเหเข้าไปในอะลูมิเนียม โดยจะมีเฉพาะคลื่นตามยาวหักเหเข้าไปในอะลูมิเนียมเท่านั้น การคำนวณหาขนาดมุมวิกฤตที่สองก็สามารถจะใช้กฎของสเนลล์ดังกรณีของการคำนวณมุมวิกฤตที่หนึ่งได้ ซึ่งนอกจากรอยต่อของตัวกลางที่มีสถานะของเหลวและของแข็งแล้ว รอยต่อของตัวกลางในสถานะอื่นๆ เช่น รอยต่อของตัวกลางที่มีสถานะของแข็งกับของแข็งค่ามุมวิกฤตที่หนึ่งและสองก็สามารถจะคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน

โดยสรุปแล้วถ้ามีคลื่นตามยาวตกกระทบเป็นมุมที่รอยต่อของตัวกลางคลื่นที่สะท้อนกลับสามารถจะเป็นได้ทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง และยังมีคลื่นที่หักเหเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ซึ่งมีทั้งคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางเช่นกัน ในการเกิดการเปลี่ยนโหมดของคลื่นจากคลื่นตามยาวมาเป็นคลื่นตามขวางหรือจากคลื่นตามขวางมาเป็นคลื่นตามยาว มักจะเกิดขึ้นในกรณีที่วัสดุที่จะทำการวัดมีลักษณะเป็นแท่งกลมยาวมากทำให้เกิดมุมตกกระทบที่บริเวณผิวข้างของวัสดุพิจารณาในรูปที่ 27

รูปที่ 27



- 1 : INCIDENT LONGITUDINAL WAVE
 2 : REFLECTED LONGITUDINAL WAVE
 3 : REFLECTED TRANSVERSE WAVE

แสดงลักษณะสัญญาณและเวลาที่หน่วงไปเมื่อเกิดการเปลี่ยนโหมด

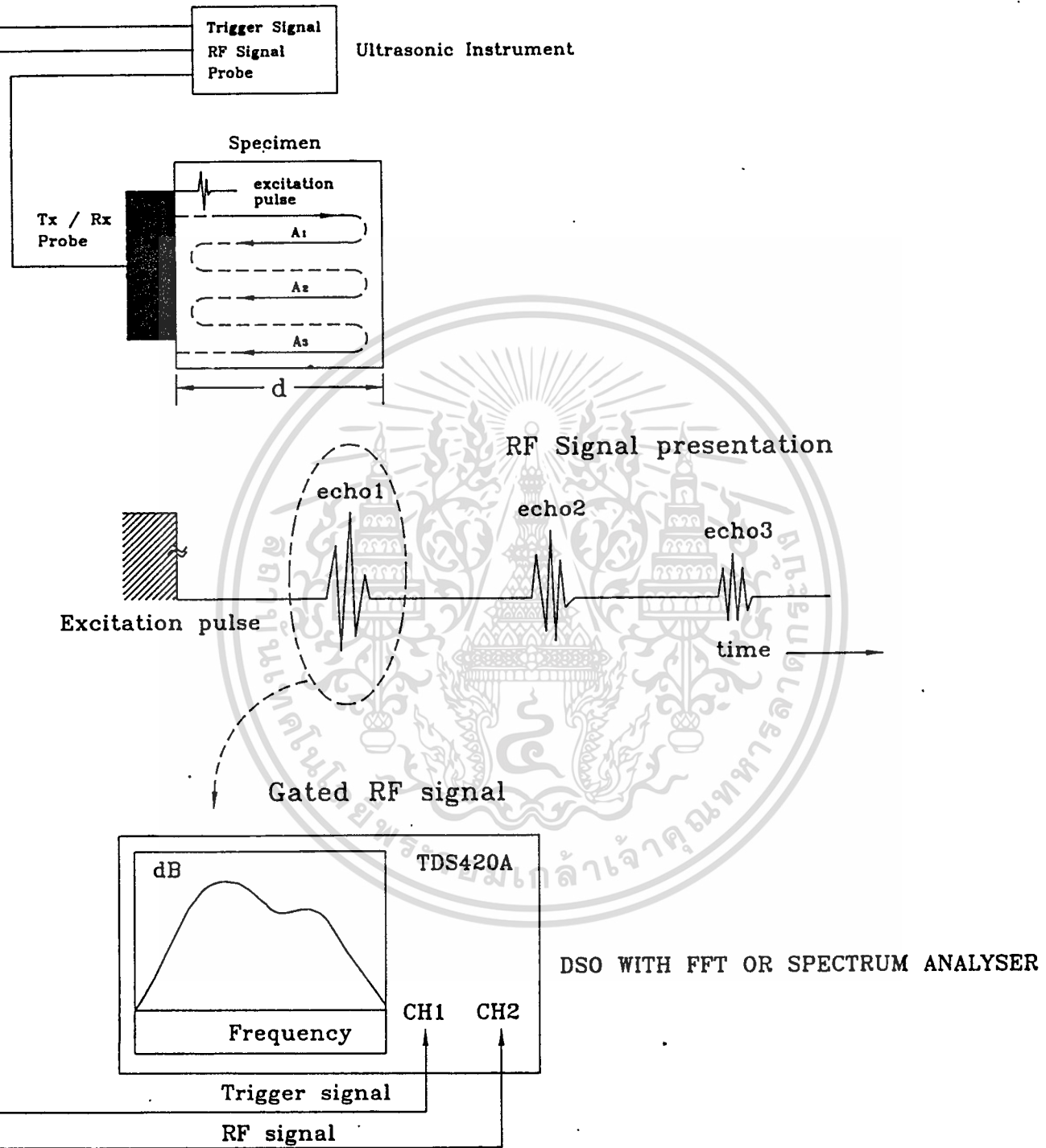
ในรูปที่ 27 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุและลำของคลื่นบานออกเป็นมุมโดเวอร์เวนต์ตั้งเส้นทางที่ 1 ทำให้คลื่นเกิดการตกกระทบกับผิวข้างของวัสดุเป็นมุมค่าหนึ่ง คลื่นเสียงซึ่งเป็นคลื่นตามยาวจะเกิดการเปลี่ยนโหมดกลายเป็นคลื่นตามขวาง ตั้งเส้นทางที่ 3 ซึ่งมุมสะท้อนที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นตามขวางจะมีค่าต่างไปจากมุมตกกระทบที่เป็นคลื่นตามยาว โดยเวลา t_1 ก็คือเวลาที่ใช้เคลื่อนที่ในเส้นทางที่ 1, 2 และสะท้อนที่ปลายวัสดุมายังโพรบ ส่วนเวลา t_2 ก็คือเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนโหมดไปเป็นการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อคลื่นเกิดการเปลี่ยนโหมดพลังงานของคลื่นตามยาวที่โพรบกำเนิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานของคลื่นตามขวางซึ่งจะมีขนาดอัตราการลดทอนสูงกว่าคลื่นตามยาว ด้วยเหตุนี้ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นจึงควรเตรียมวัสดุที่มีความยาวที่จะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนโหมดของคลื่น ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้

3 การวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

จากทฤษฎีในบทที่ 2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) และสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง สามารถจะนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านได้ ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของตัวกลางด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นมีพื้นฐานมาจากการที่ตัวกลางในแต่ละชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างภายในต่าง ๆ กันเช่น ตัวกลางบางชนิดอาจจะมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่สูง หรือมีโพรงอากาศอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก เป็นต้น ด้วยลักษณะความแตกต่างของโครงสร้างภายในของตัวกลาง เมื่อมีคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้รูปร่างและค่าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกแตกต่างกัน สำหรับตัวกลางคนละชนิด เมื่อนำคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางมาทำการวัดสเปกตรัมจะเห็นว่าการที่คลื่นอัลตราโซนิกจะมีรูปร่างและค่าความถี่แตกต่างกันเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่ำชนิดกัน สเปกตรัมที่ได้ก็จะมีค่าความถี่กลางและรูปร่างแตกต่างกันไปด้วย การวัดสเปกตรัมจึงนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของตัวกลางได้ โดยเทคนิคที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมจะมีลักษณะเหมือนกับเทคนิคที่ใช้วัดค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางและเทคนิคที่ใช้วัดอัตราการลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางคือมีพื้นฐานอยู่บนเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ พิจารณาในรูปที่ 28 ซึ่งแสดงการวัดสเปกตรัมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

รูปที่ 28



แสดงการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดสเปกตรัมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะเริ่มต้นจากการพิจารณาคัดเลือกสัญญาณของคลื่นที่ต้องการวัดสเปกตรัมก่อนเป็นลำดับแรกจากรูปที่ 28 จะเห็นว่าด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับจะได้สัญญาณสะท้อนลำดับที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งการคัดเลือกสัญญาณคลื่นเพื่อมาทำการวัดสเปกตรัมจะใช้สัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลำดับที่ 1 มาทำการวัด โดยสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลำดับที่ 1 จะเป็นสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลาง ส่วนสัญญาณสะท้อนกลับลำดับที่ 2 และ 3 เป็นสัญญาณที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลางเป็นจำนวน 2 และ 3 รอบตามลำดับ จึงไม่ถูกนำมาใช้ในการวัดสเปกตรัมสำหรับวิธีการคัดเลือกสัญญาณสะท้อนกลับลูกที่ 1 เพื่อวัดสเปกตรัมในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคในการคัดเลือกสัญญาณโดยใช้ฟังก์ชันควบคุมการหน่วงเวลาทริกเกอร์ (time delay control) ของดิจิตอลสโตเรจอสซิลโลสโคปของบริษัท Tektronix รุ่น TDS420A ซึ่งฟังก์ชันการหน่วงเวลาทริกเกอร์จะอาศัยการเลื่อนเวลาของสัญญาณทริกเกอร์จากสัญญาณทริกเกอร์ของเครื่องอัลตราโซนิกไปจนกระทั่งถึงตำแหน่งของสัญญาณสะท้อนกลับลำดับที่ 1 จะได้สัญญาณสะท้อนกลับลำดับที่ 1 ปรากฏบนหน้าจอของ DSO และด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์ของ DSO ซึ่งมีฟังก์ชัน FFT (Fast-Fourier Transform) รวมอยู่ด้วย สามารถจะวัดสเปกตรัมของสัญญาณที่ปรากฏบนจอซึ่งผ่านคัดเลือกแล้วได้ ดังนั้นสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกสะท้อนกลับลำดับที่ 1 จึงสามารถจะถูกวัดสเปกตรัมได้ ซึ่งโดยสรุปเทคนิคการวัดสเปกตรัมของคลื่นก็คือผู้ทำการวัดสเปกตรัมจะต้องคัดเลือกสัญญาณคลื่นที่ต้องการพิจารณาสเปกตรัมให้ได้ก่อน จากนั้นจึงนำสัญญาณคลื่นที่คัดเลือกแล้วไปวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องมือที่มีฟังก์ชันของการวัดสเปกตรัมสัญญาณ เช่น spectrum analyser, DSO ที่มีฟังก์ชัน FFT หรืออาจจะใช้วิธีเปลี่ยนข้อมูลสัญญาณคลื่นที่คัดเลือกให้เป็นข้อมูลดิจิตอลแล้วจึงนำไปวัดสเปกตรัมด้วยซอฟต์แวร์ที่มีอัลกอริทึม (algorithm) ที่เป็นแบบ FFT เป็นต้น

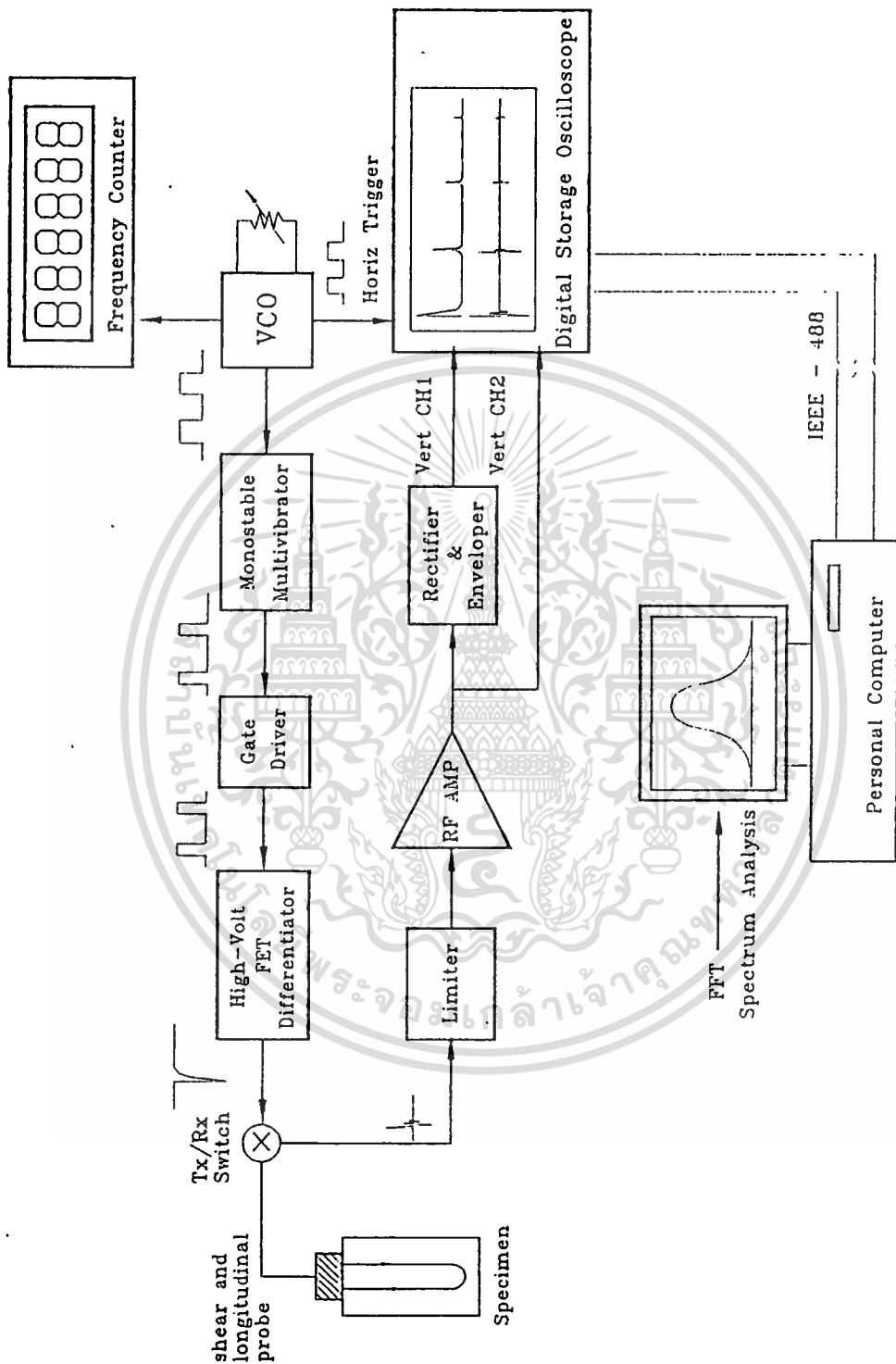
บทที่ 4

เครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

ดังที่ได้กล่าวในข้างต้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิคในวัสดุจะสัมพันธ์กับค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ เช่น Young's modulus, Shear modulus, Poisson's ratio และ ค่าความทนแรงดึง เป็นต้น โดยใช้การตรวจวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคที่เคลื่อนที่ในวัสดุก็สามารถจะทราบค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุได้ ซึ่งความเร็วที่จะต้องทำการตรวจวัดเพื่อนำมาใช้หาค่าสมบัติยืดหยุ่นมีอยู่สองชนิดด้วยกันคือ ความเร็วของคลื่นตามยาวและความเร็วของคลื่นตามขวาง ในบทนี้จะได้อธิบายถึงการสร้างเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค ด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ โดยมีหลักการพื้นฐานของการวัดดังกล่าวอาศัยการวัดช่วงเวลาการเคลื่อนที่ของพัลส์อัลตราโซนิคภายในวัสดุด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ซึ่งเทคนิคดังกล่าวสามารถวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคได้ค่อนข้างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดความเร็วด้วยวิธีอื่นและสามารถสร้างเครื่องมือขึ้นมาเองได้ไม่ยากนัก อาศัยหลักการวัดอัตราการกระตุ่นของสัญญาณที่ใช้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิค ซึ่งคาบเวลาของสัญญาณกระตุ่นจะถูกปรับจนมีขนาดเท่ากับคาบเวลาระหว่างสัญญาณสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิค ซึ่งที่ตำแหน่งนี้จะทำการปรับอัตราการกระตุ่นให้เกิดการซ้อนทับของคลื่นสะท้อนกลับ ดังนั้นระยะเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิคเคลื่อนที่ไปและกลับในตัวกลางสามารถจะวัดได้จากส่วนกลับของอัตราการกระตุ่นของสัญญาณที่ใช้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิคนั้นเอง โดยเครื่องมือดังกล่าวได้ออกแบบให้สามารถตอบสนองความถี่ได้ 10 MHz ซึ่งนอกจากการวัดความเร็วของคลื่นเสียงแล้วเครื่องมือนี้ยังสามารถใช้วัดอัตราการลดทอนและวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิคเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลางได้อีกด้วย โดยใช้การเชื่อมต่อการทำงานของเครื่องมือที่สร้างขึ้นร่วมกับดิจิตอลสตอเรจออสซิลโลสโคปและคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยโครงสร้างของเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 29 ซึ่งมีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ส่วนด้วยกันคือ 1. อัลตราโซนิคโพรบ 2. วงจรพัลส์เซอร์ 3. วงจรภาครับสัญญาณและ 4. ส่วนแสดงผลข้อมูล โดยในส่วนที่ได้สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยก็คือ ส่วนของวงจรพัลส์เซอร์และวงจรภาครับสัญญาณ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบวงจรทั้งสองส่วนรวมทั้งส่วนประกอบหลักในส่วนอื่น ๆ มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 29

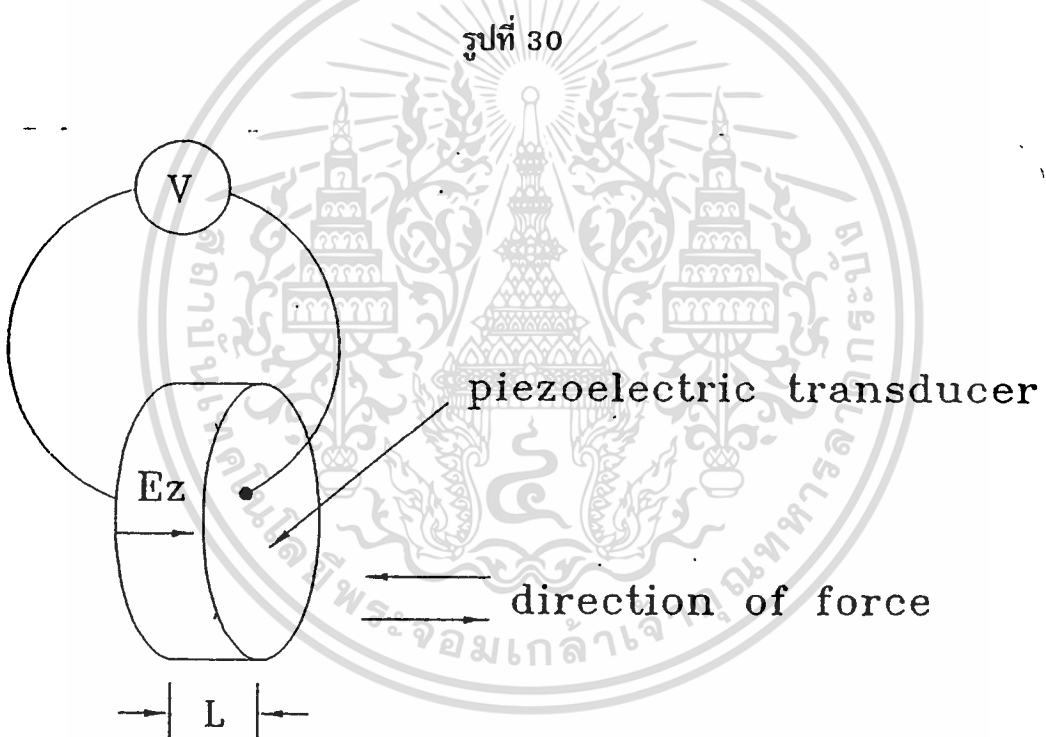


โครงสร้างของเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 อัลตราโซนิกโพรบ

อัลตราโซนิกโพรบหรือเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric transducer) จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณของคลื่นเสียงและในทางกลับกันก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณของคลื่นเสียงมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยวัสดุที่เป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ตามธรรมชาติก็คือ ผลึกควอตซ์ (Quartz) ถ้ามีแรงจากภายนอกมากระทำกับแผ่นผลึกจะทำให้ความหนาของแผ่นผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง รวมทั้งความสมดุลงของความต่างศักย์ด้วย ก็จะเกิดปรากฏเพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (direct piezoelectric effect) ขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น โดยเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของผลึกแสดงดังรูปที่ 30



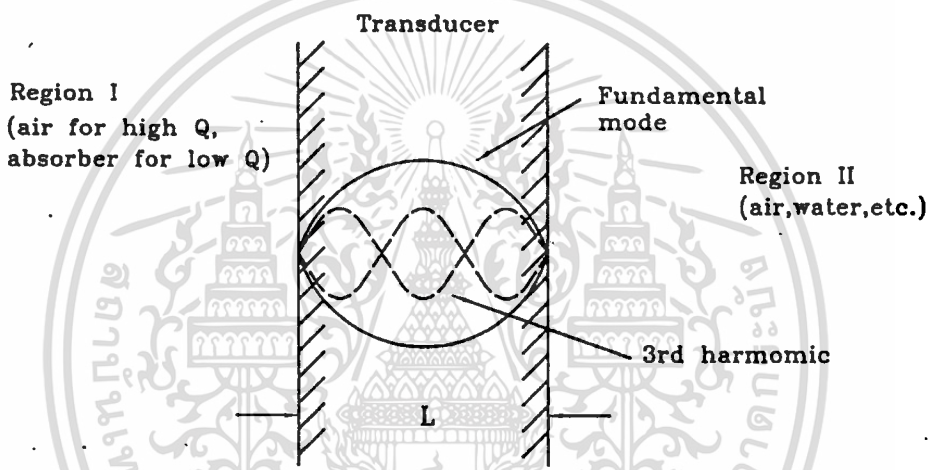
แสดงการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

โดยแรงภายนอกที่มากระทำแล้วทำให้โพรบเกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวเช่นความดันของคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาตกกระทบกับโพรบ เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นที่ผิวของโพรบเปลี่ยนไปมาสอดคล้องกับแรงที่มากระทำซึ่งในกรณีนี้เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะประพฤติตัวเป็นตัวรับสัญญาณของคลื่น และในกรณีที่ใส่แรงดันไฟฟ้าเข้าไปที่ผิวของแผ่นผลึกก็จะเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกย้อนกลับ (indirect piezoelectric effect) ขึ้น ซึ่งจะทำให้ความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเปลี่ยนแปลงไป โดยมีขนาดเพิ่มหรือลดขึ้นอยู่กับข้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงดันไฟฟ้าที่ส่งเข้ามา โดยถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ส่งมาให้กับผลึกมีลักษณะแรงดันที่เป็นแบบพัลส์สั้น ๆ จะทำให้แผ่นผลึกสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของแผ่นผลึก ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์จะมีขนาดขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแผ่นผลึก โดยผลึกที่มีขนาดบางมากเท่าใดจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่มีค่าสูงขึ้น เหตุนี้จึงสามารถสร้างคลื่นอัลตราโซนิคที่มีความถี่หลักที่ต้องการได้ โดยการเลือกขนาดความหนาของแผ่นผลึกซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการโดยให้ความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่นจากความถี่หลักที่ต้องการ พิจารณาดังรูปที่ 31

รูปที่ 31



คลื่นยืนตัวในแผ่นผลึกเมื่อความหนาของแผ่นผลึกมีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่น

โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์เสียงของแผ่นผลึกจะมีค่าสูงกว่าอิมพีแดนซ์เสียงของตัวกลางที่สัมผัสอยู่กับแผ่นผลึกเช่น อากาศ, น้ำ หรือวัสดุที่เป็นโลหะเป็นต้น ดังนั้นเมื่อแผ่นผลึกถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์จากพัลส์เซอร์ทำให้แผ่นผลึกสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นผลึกจะเกิดคลื่นขึ้นในแผ่นผลึก และด้วยค่าอิมพีแดนซ์เสียงที่มีขนาดสูงของแผ่นผลึกจะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณภายในแผ่นผลึก เงื่อนไขที่จะทำให้เกิดคลื่นยืนตัว (standing wave) ขึ้นในแผ่นผลึกหรือเงื่อนไขที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (R) ของคลื่นภายในแผ่นผลึกมีค่าเท่ากับ -1 ก็คือ จะต้องทำให้ค่าความดันที่บริเวณผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึกมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นความหนาของแผ่นผลึกจึงต้องถูกคำนวณให้มีขนาดเป็นจำนวนคี่ของครึ่งความยาวคลื่นจากความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ที่ต้องการ เพื่อให้เกิดคลื่นยืนตัวขึ้นในแผ่นผลึกเมื่อถูกกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

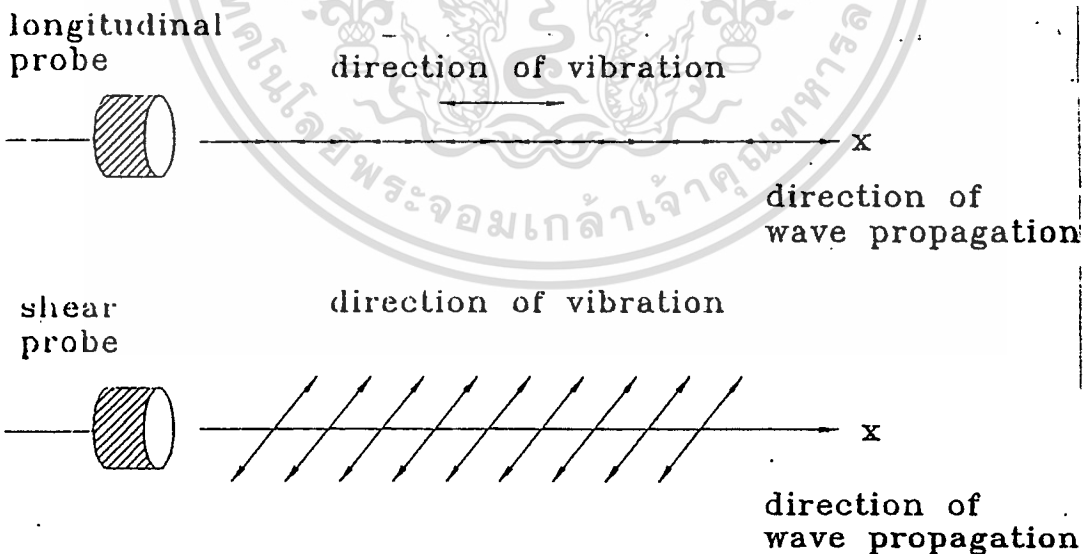
ด้วยสัญญาณพัลส์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นผลึกกับค่าความถี่เรโซแนนซ์แสดงดังสมการที่ (4.1) คือ

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ	C	คือความเร็วของคลื่นเสียงในแผ่นผลึก (m/s)
	f_0	คือความถี่เรโซแนนซ์ของแผ่นผลึก (Hz)
	L	คือความหนาของแผ่นผลึก (m)
	λ	คือความยาวคลื่นเสียงในแผ่นผลึก (m)

ผลึกเปียโซอิเล็กทริกที่พบตามธรรมชาติคือ ควอตซ์ (quartz) ซึ่งในระยะเริ่มแรกนิยมนำมาใช้ทำเป็นตัวรับและตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก โดยการตัดแผ่นผลึกให้ตั้งฉากกับระนาบแกน X (X-cut) คลื่นอัลตราโซนิกที่กำเนิดขึ้นจะเป็นคลื่นตามยาว และถ้าตัดแผ่นผลึกให้ตั้งฉากกับระนาบแกน Y (Y-cut) คลื่นอัลตราโซนิกที่กำเนิดขึ้นจะเป็นคลื่นตามขวาง โดยลักษณะโพรบที่กำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางแสดงดังรูปที่ 32

รูปที่ 32



อัลตราโซนิกโพรบชนิดกำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในปัจจุบันอัลตราโซนิกโพรบไม่ค่อยจะใช้ผลึกควอ์ซกันแล้ว แต่นิยมใช้โพรบที่สร้างขึ้นจากการโพลาริซชันเตอร์เซรามิก เช่น lead zirconate titanate (PZT) ซึ่งมีสมบัติของ piezoelectric moduls (d) และ electromechanical coupling factor (k) สูง โดยค่าคงที่ d ก็คืออัตราส่วนของสเตรนที่เกิดขึ้นจากการใส่สนามไฟฟ้าให้แก่ piezoelectric เซรามิกกับขนาดของสนามไฟฟ้าที่ใส่ให้แก่เซรามิก หรืออัตราส่วนของประจุที่ผิวของเซรามิกที่เกิดขึ้นจากการที่มีแรงภายนอกมากระทำ เซรามิกกับขนาดของแรงภายนอกที่มากกระทำกับเซรามิก ซึ่งการที่ piezoelectric เซรามิกมีค่าคงที่ d สูงนั้นหมายถึงเซรามิกดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นตัวกำเนิดคลื่นได้ดีเพราะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสเตรนได้มาก ส่วนค่าคงที่ k ก็คืออัตราส่วนของพลังงานทางกลที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานทางกลขาเข้าทั้งหมด หรือในทางกลับกันก็คืออัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางกลกับพลังงานไฟฟ้าที่ใส่ให้กับเซรามิกทั้งหมด โดยเซรามิกที่มีค่า k มากแสดงว่ามีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงานทางกลสูง หรือในทางกลับกันก็คือมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนจากพลังงานทางกลมาเป็นพลังงานไฟฟ้าสูง ดังนั้นเซรามิกที่มีค่า k สูงจึงสามารถเกิดปรากฏการณ์ piezoelectric ได้เป็นอย่างดี สำหรับวัสดุที่สามารถจะเกิดปรากฏการณ์ piezoelectric มีหลายชนิดด้วยกันซึ่งแต่ละชนิดก็มีสมบัติของ piezoelectric แตกต่างกันไป โดยสมบัติ piezoelectric ของวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2

Material	Density ρ_0 (kg/m ³)	Elastic stiffness C_{11} (N/m ²)	Phase velocity C_t (m/s)	Acoustic impedance Z (kg/m ² s)	Relative dielectric constant ϵ_r	Piezoelectrics tress coeff. e_{11} (N/Vm)	Electromechanical coupling factor k_{33}	Piezoelectric modulus d_{33} (m/v)
Quartz (x-cut)	2.7×10^3	86×10^9	5.8×10^3	15×10^6	4.5	.17	0.1	2.3
Barium titanate	5.7×10^3	110×10^9	5.3×10^3	30×10^6	1700	8.6	0.48	149
Lead zirconium titanate (PZT)	7.5×10^3	83×10^9	4.0×10^3	30×10^6	1200	9.2	0.675	374
Poly (vinylidene fluoride) (PVDF)	1.8×10^3	3×10^9	1.4×10^3	2.5×10^6	12	.069	0.42	85

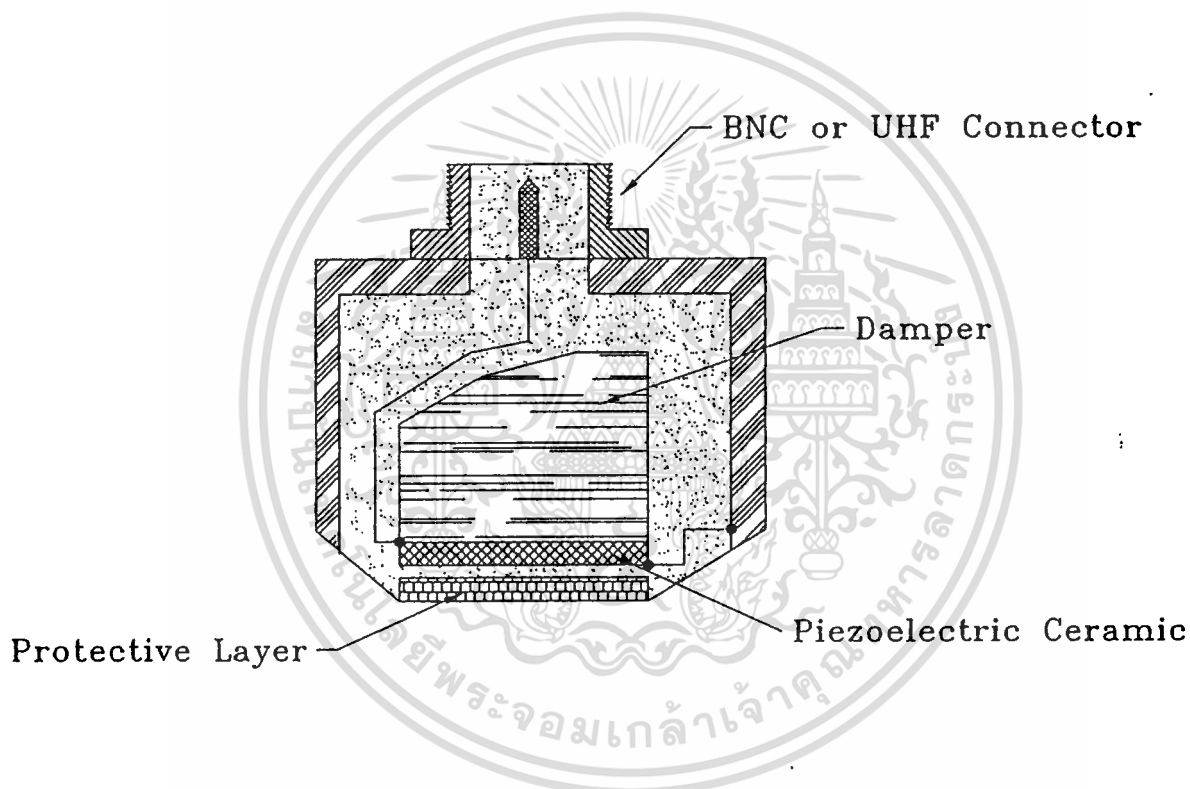
แสดงสมบัติ piezoelectric ของวัสดุในแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 โครงสร้างของอัลตราโซนิกโพรบ

โครงสร้างของอัลตราโซนิกโพรบแสดงดังรูปที่ 33 ซึ่งภายในจะบรรจุแผ่นเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกไว้ด้านหลังของเซรามิกจะติดด้วยวัสดุช่วยลดการสั่น (damper) ซึ่งมีหน้าที่ทำให้เซรามิกหยุดสั่นให้เร็วที่สุดซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะในเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับที่ต้องส่งพัลส์ของคลื่นเสียงออกไปจากเซรามิกเป็นเวลาสั้น ๆ

รูปที่ 33

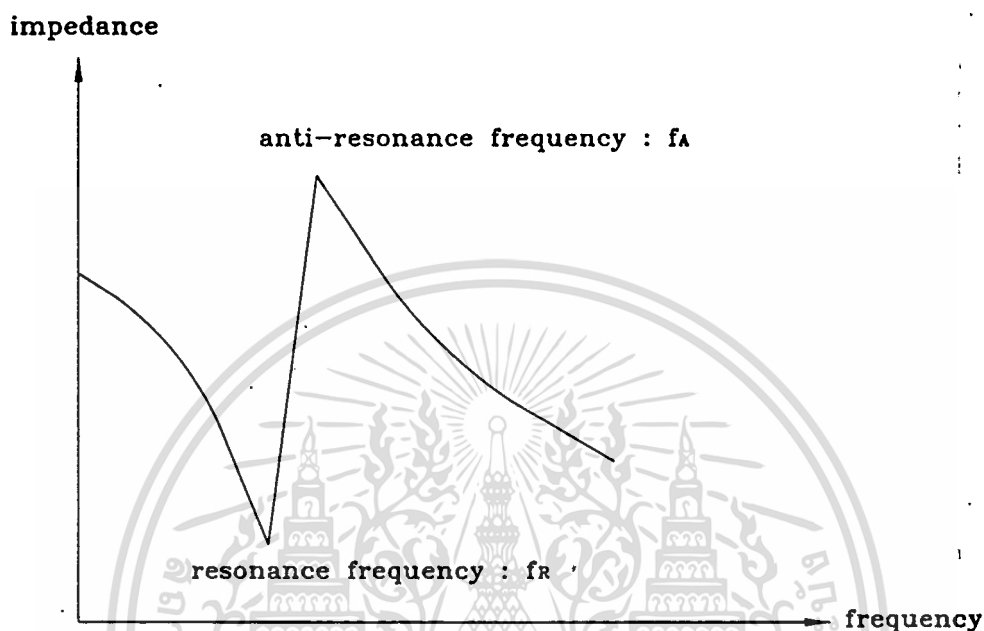


โครงสร้างของอัลตราโซนิกโพรบ

นอกจากวัสดุช่วยลดการสะท้อนแล้วยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อีกเช่น Protective layer ซึ่งช่วยป้องกันผิวหน้าของเซรามิกไม่ให้เกิดความเสียหายเมื่อนำไปสัมผัสกับชิ้นงานเป็นต้น โดยเมื่อเซรามิกถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดการสั่นสะท้อน ขนาดแอมพลิจูดในการสั่นของเซรามิกจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่นำมาใช้กระตุ้น ช่วงความถี่ที่ใกล้กับความถี่เรโซแนนซ์ (f_0) ของเซรามิกจะทำให้เซรามิกมีแอมพลิจูดในการสั่นสูงที่สุด พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่มากกระตุ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ (Z) ของเซรามิก

เอกสารแสดงดังรูปที่ 34 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 34



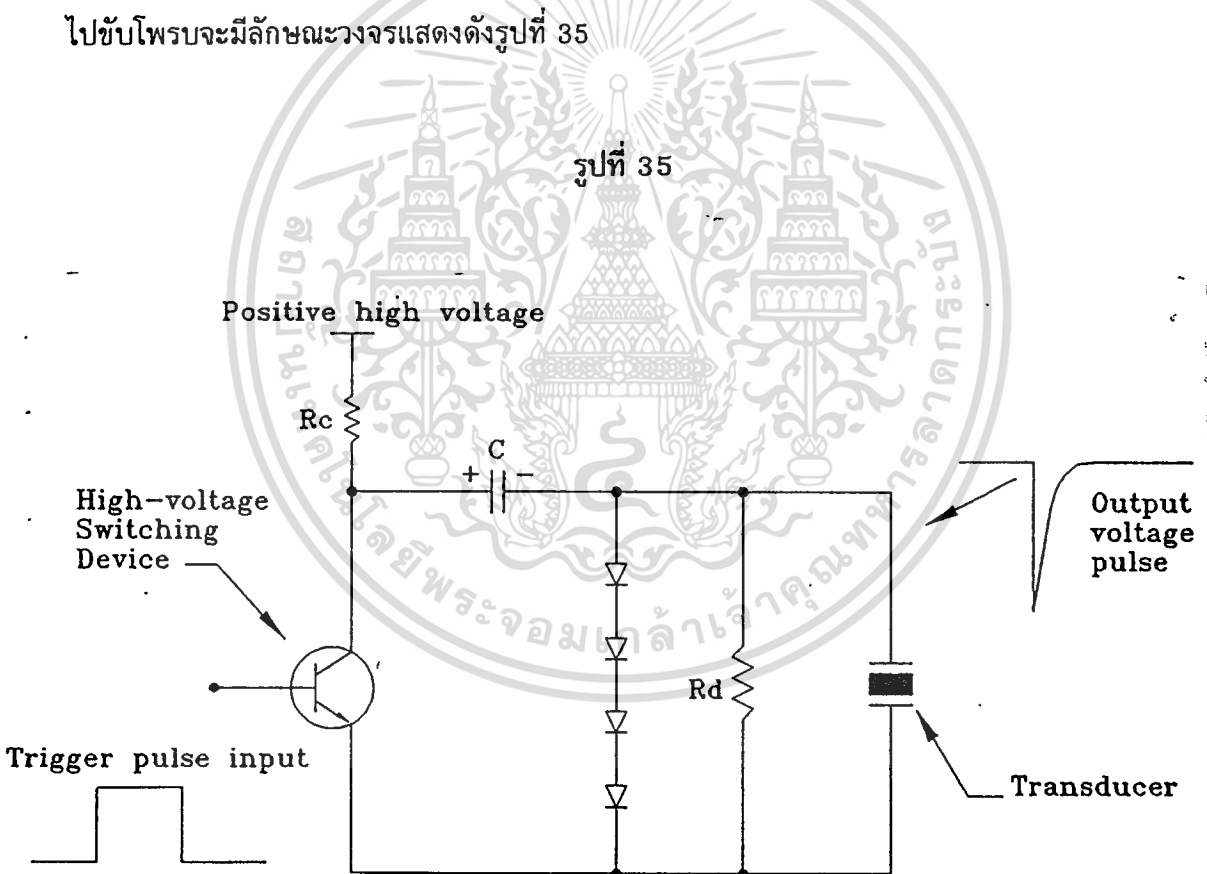
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์ของโพรบ

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 34 แสดงให้เห็นว่าเปียโซอิเล็กทริกเซรามิกจะมีขนาดอิมพีแดนซ์ตอบสนองความถี่หลักสองความถี่คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์อัลตราโซนิกโพรบจะมีค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ศูนย์และที่ค่าความถี่แอนติ-เรโซแนนซ์อัลตราโซนิกโพรบจะมีค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้อนันต์ ดังนั้นเมื่อโพรบถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบต่อเนื่องที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบจะทำให้ โพรบเกิดการสั่นโดยมีขนาดแอมพลิจูดในการสั่นสูงที่สุดเนื่องจากที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์โพรบจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่กระตุ้นโพรบในเทคนิคพัลส์ สะท้อนกลับจะไม่ใช้แรงดันไฟฟ้าแบบต่อเนื่องแต่จะใช้แรงดันไฟฟ้าที่เป็นแบบพัลส์ เมื่อโพรบได้รับสัญญาณกระตุ้นที่เป็นพัลส์จะเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบเอง โดยจากที่กล่าวมาจะเห็นว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบสามารถจะถูกกำหนดได้จากขนาดความหนาของแผ่นเซรามิก ดังนั้นจึงสามารถสร้างโพรบที่มีความถี่ตามต้องการได้โดยคำนวณจากความหนาของเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเทคนิคการให้พลังงานเป็นพัลส์แก่โพรบเมื่อโพรบถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์จะทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นโดยมีความถี่ของคลื่นเท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบ คลื่นอัลตราโซนิกเกิดขึ้นจากการกระตุ้นโพรบด้วยสัญญาณพัลส์จะมีระยะเวลาในการเดมป์ของสัญญาณหรือระยะเวลาในการสั่นของโพรบสัมพันธ์กับค่า Quality factor (Q) ของโพรบ

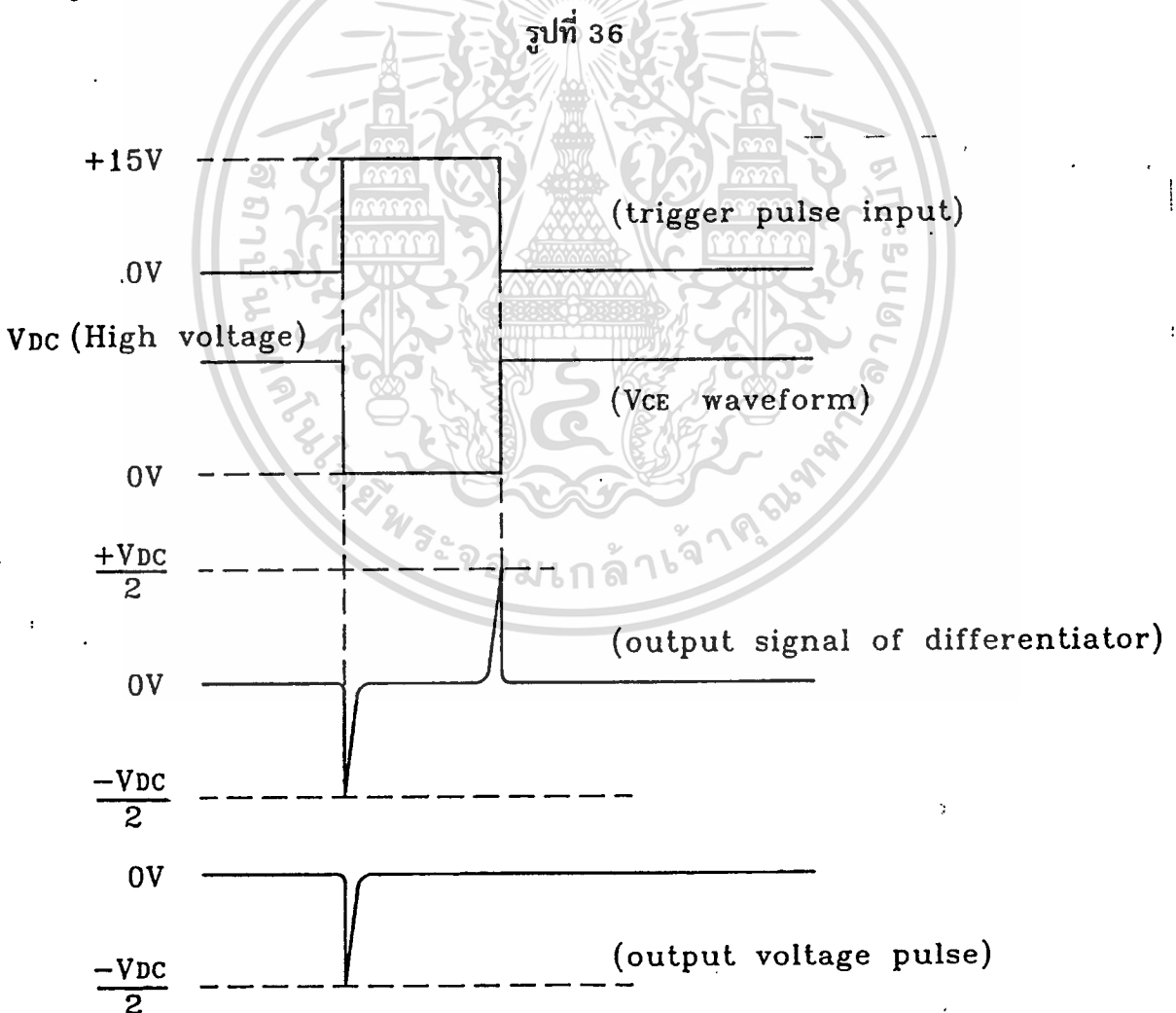
รายละเอียดในส่วนนี้จะได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาในการเดมป์ของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกกับค่า Q ของโพรบที่ใช้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งจากปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกจะเห็นว่าโพรบจะกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกได้ก็ต่อเมื่อเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริคย้อนกลับขึ้นกับโพรบ ปรากฏการณ์ย้อนกลับดังกล่าวได้มาจากการที่โพรบได้รับพลังงานไฟฟ้าเป็นแบบพัลส์สั้น ๆ ทำให้โพรบเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบ ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น โดยวงจรพื้นฐานสำหรับใช้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ปลายแหลมเพื่อไปขับโพรบจะมีลักษณะวงจรแสดงดังรูปที่ 35



วงจรสำหรับใช้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ปลายแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทำงานของวงจรในรูปที่ 35 เป็นวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์สลับปลายแหลม โดยมีอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าสูง (high-voltage switching device) เช่น BJT, IGBT, SCR หรือ MOSFET เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ตัดต่อซึ่งถูกควบคุมโดยสัญญาณพัลส์ทริกเกอร์อินพุท (trigger pulse input) เมื่ออุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอยู่ในสถานะไม่นำกระแส ตัวเก็บประจุ (C) จะถูกชาร์จด้วยแรงดันไฟฟ้าบวกขนาดสูง (positive high voltage) และเมื่อมีสัญญาณพัลส์มาทริกเกอร์ จะทำให้อุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอยู่ในสถานะนำกระแส โดยค่าความต้านทานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งจะมีขนาดต่ำ ทำให้ตัวเก็บประจุเกิดการคายประจุผ่านลงสู่กราวด์ของวงจร ซึ่งจะเกิดแรงดันพัลส์สลับปลายแหลมตกคร่อมที่ขั้วของโพรบ โดยที่แรงดันพัลส์บวกปลายแหลมจะไบแอสไดโอดผ่านลงสู่กราวด์ของวงจรเหลือเพียงแรงดันพัลส์สลับปลายแหลมเพื่อนำไปขับโพรบ ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรสำหรับกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์สลับปลายแหลมในแต่ละส่วนแสดงดังรูปที่ 36

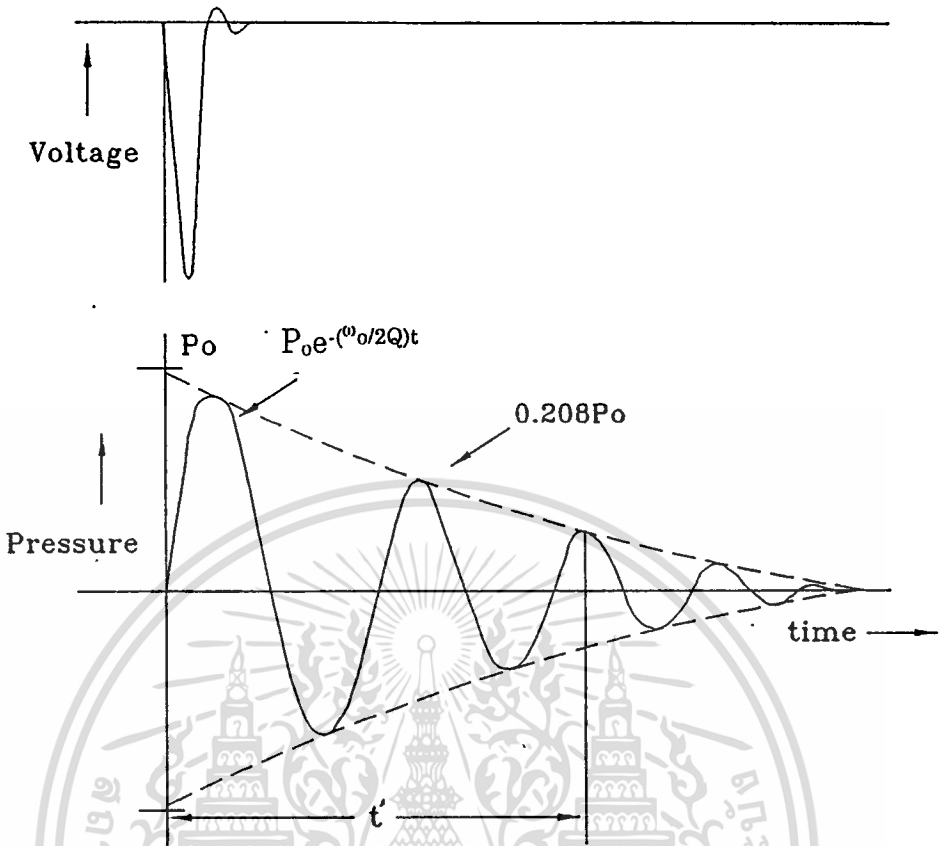


ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าภายในวงจรกำเนิดแรงดันไฟฟ้าพัลส์สลับปลายแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะสัญญาณในรูปที่ 36 เมื่ออุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์ ทริกเกอร์อินพุททำให้เกิดการนำกระแส จะได้สัญญาณที่คอลเล็กเตอร์และอิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของอุปกรณ์ สวิตซ์มีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณพัลส์ทริกเกอร์สัญญาณ V_{CE} จะถูกดิฟเฟอเรนเชียลด้วย วงจร RC ดิฟเฟอเรนเชียลเรซิวเตอร์ปรากฏเป็นสัญญาณพัลส์บวกโดยมีแอมพลิจูดของพัลส์บวกและลบเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่ขาคอลเล็กเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งสัญญาณเอาต์พุทที่ได้จากวงจรจะมีเฉพาะสัญญาณพัลส์ลบ โดยสัญญาณพัลส์บวกจะไปไบแอสไดโอดที่ต่อขนานอยู่กับค่าความต้านทาน R_d ให้ปรากฏเฉพาะพัลส์ลบที่เอาต์พุทวงจรสำหรับค่าความต้านทาน R_d ในวงจรจะทำหน้าที่เป็นเดมปีเปอร์ของสัญญาณพัลส์โดยเป็นตัวกำหนดขนาดความกว้างและรูปร่างของสัญญาณพัลส์ปลายแหลม เมื่อโพรบถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์ปลายแหลมโพรบจะเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของโพรบ โดยมีช่วงเวลาในการสั่นสัมพันธ์กับอัตราการสูญเสียพลังงานเทียบกับเวลาในการสั่นของโพรบ ซึ่งลักษณะการสั่นของโพรบเมื่อมีสัญญาณพัลส์มากระตุ้นสามารถจะเปรียบเทียบได้จาก “การตีระฆัง” โดยระฆังในที่นี้ก็เปรียบเสมือนกับโพรบ และแรงที่มาตีระฆังก็เปรียบเสมือนสัญญาณพัลส์ที่มากระตุ้นโพรบ เมื่อระฆังถูกตีด้วยแรงขนาดหนึ่ง ระฆังจะเกิดการสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ของระฆังเอง โดยแอมพลิจูดในการสั่นของระฆังหรืออีกนัยหนึ่งก็คือความดังของเสียงระฆังจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปแสดงว่าในการสั่นของระฆังเมื่อถูกตีจะเกิดการสูญเสียของพลังงานขึ้นทำให้ความดังของเสียงระฆังลดลงไปเรื่อยๆ ซึ่งในกรณีการสั่นของอัลตราโซนิกโพรบก็มีลักษณะเช่นเดียวกับระฆังที่ถูกตี โดยค่าเวลาในการสั่นของโพรบเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์จะสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Q ของโพรบ ในรูปที่ 37 จะแสดงลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ไปกระตุ้นโพรบและลักษณะคลื่นความดันที่โพรบกำเนิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์

รูปที่ 37



แสดงสัญญาณพัลส์ลบลายแหลมที่ไปขับโพรบและคลื่นความดันที่โพรบกำเนิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณพัลส์

ด้วยเหตุที่อัตราในการสูญเสียพลังงานในแผ่นผลึกเมื่อเกิดการสั่นจะสัมพันธ์กับค่า Q ของแผ่นผลึก ค่า Q สามารถถูกจำกัดความได้โดยมีความสัมพันธ์แสดงอยู่ในรูปของพลังงานที่สูญเสียไปต่อหนึ่งรอบในการสั่นของโพรบที่ค่าความถี่เรโซแนนซ์ ความสัมพันธ์ของค่า Q แสดงดังสมการที่ (4.2) คือ

$$Q = \left(\frac{\text{พลังงานที่บรรจุอยู่ในแผ่นผลึกเมื่อเกิดการสั่น}}{\text{พลังงานที่สูญเสียไปต่อหนึ่งรอบในการสั่นของแผ่นผลึก}} \cdot 2\pi \right) \quad (4.2)$$

โดยกำหนดให้ J คือค่าพลังงานที่บรรจุอยู่ในแผ่นผลึกเมื่อเกิดการสั่น สมการที่ (4.2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้ใหม่เป็น

$$\frac{dJ}{dt} \frac{1}{f_0} = \frac{2\pi J}{Q} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ f_0 คือค่าความถี่เรโซแนนซ์ในการสั่นของโพรบ ซึ่งผลเฉลยของสมการที่ (4.3) พบว่าค่าพลังงานที่บรรจุอยู่ในแผ่นผลึกเมื่อเกิดการสั่นจะมีอัตราการลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเทียบกับเวลาแสดงดังสมการที่ (4.4) คือ

$$J = J_0 e^{-\gamma t} \quad (4.4)$$

เมื่อนำสมการที่ (4.4) แทนค่าลงในสมการ (4.3) จะได้ผลเฉลยของอัตราการลดลงของพลังงาน (γ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า Q ของโพรบคือ

$$\gamma = \frac{2\pi f_0}{Q} = \frac{\omega_0}{Q} \quad (4.5)$$

โดยขนาดของค่าความดันคลื่น (pressure wave) ที่โพรบกำเนิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแรงดันพัลส์จะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของค่าพลังงานที่บรรจุอยู่ในโพรบเมื่อเกิดการสั่น จะมีความสัมพันธ์ของค่าความดันคลื่นกับค่า Q คือ

$$P = (J)^{1/2} = P_0 e^{-(\gamma/2)t} = P_0 e^{-(\omega_0/2Q)t} \quad (4.6)$$

เมื่อ P คือค่าความดันคลื่นอัลตราโซนิกที่โพรบกำเนิดขึ้น

ซึ่งจากสมการที่ (4.5) จะเห็นว่าอัตราในการลดของพลังงาน (γ) จะแปรผกผันกับค่า Q โดยโพรบที่มีค่า Q สูงจะมีอัตราในการลดของพลังงานต่ำจึงทำให้คลื่นอัลตราโซนิกที่กำเนิดขึ้นมีจำนวนลูกของสัญญาณพัลส์มากกว่าโพรบที่มีค่า Q ต่ำเมื่อกระตุ้นด้วยพัลส์ปลายแหลมความกว้างเท่ากัน และวัสดุลดการสั่นชนิดเดียวกัน ซึ่งจะมีอัตราในการลดของพลังงานสูง โดยจากรูปที่ 37 ถ้ากำหนดให้ที่ค่าความดันคลื่นเท่ากับ $0.208 P_0$ เป็นจุดสิ้นสุดของการลดลงของพลังงานคลื่น โดยมีระยะเวลาในการลดของพลังงานเท่ากับ t' ดังนั้นจากสมการที่ (4.6) จะได้ขนาดของ t' สัมพันธ์กับค่า Q คือ

$$\frac{\omega_0}{2Q} t' = \frac{\pi}{2} ; (e^{-\pi/2} = 0.208)$$

$$\text{หรือ} \quad t' = \frac{Q}{2f_0} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.7) จะได้ระยะเวลาในการลดลงของพลังงานคลื่นแปรผันโดยตรงกับค่า Q ของโพรบนั้นเอง

สำหรับการนำโพรบที่มีค่า Q สูงมาใช้ในระบบตรวจวัดเช่นการวัดรอยตำหนิภายในวัสดุ เป็นต้นจะมีความไว (sensitivity) ในการตรวจวัดสูงกว่าโพรบที่มีค่า Q ต่ำแต่ความสามารถในการแยกแยะ (resolution) ของการตรวจวัดจะต่ำลง เนื่องจากสัญญาณสะท้อนกลับที่อยู่ใกล้กันอาจรวมกันเป็นสัญญาณเดียวจึงไม่สามารถจะแยกความแตกต่างออกได้ ดังนั้นการเลือกใช้โพรบจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าความถี่และค่า Q ให้เหมาะสมกับลักษณะและชนิดวัสดุที่จะนำมาตรวจวัด สำหรับโพรบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โพรบของบริษัท PANAMETRICS ซึ่งมีโหมดในการแตมภ์ของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกอยู่ 3 โหมดด้วยกันคือ ACCUSCAN “S” โหมด, ACCUSCAN “R” โหมด และ VIDEOSCAN โหมด โดยโพรบที่กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกในแต่ละโหมดจะมีค่า Q ขนาดต่างๆ กัน สำหรับในโหมด ACCUSCAN “S” ค่า Q จะมีขนาดสูงที่สุด และในโหมด VIDEOSCAN ค่า Q จะมีขนาดต่ำที่สุดในรูปที่ 38 จะแสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากอัลตราโซนิกโพรบในแต่ละโหมดของบริษัท PANAMETRICS



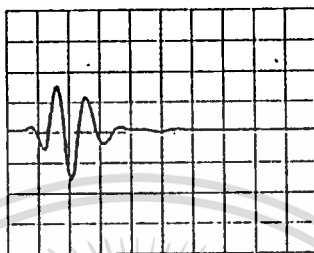
รูปที่ 38

ACCUSCAN "S"

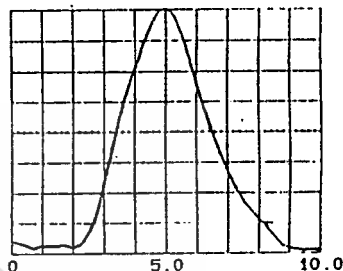
The Accuscan S series is intended to provide excellent sensitivity in those situations where axial resolution is not of primary importance. Typically this series will have a longer wave form duration and a relatively narrow bandwidth.

WAVEFORM

VERTICAL SENSITIVITY: 200 mv/div
HORIZONTAL RESOLUTION: .20 us/div

**SPECTRUM**

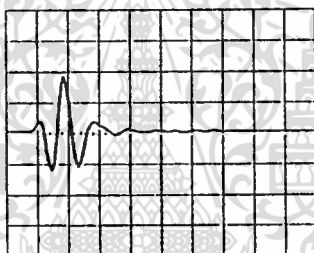
SCALE FORMAT: LINEAR (MHZ)

**ACCUSCAN "R"**

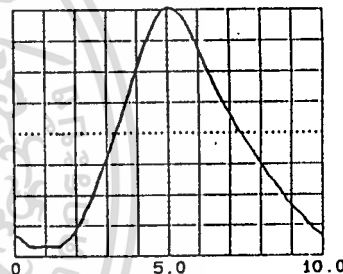
The Accuscan R series is designed to reduce excitation pulse and interface echo recovery time while maintaining good sensitivity at the transducer center frequency.

WAVEFORM

VERTICAL SENSITIVITY: 200 mv/div
HORIZONTAL RESOLUTION: .20 us/div

**SPECTRUM**

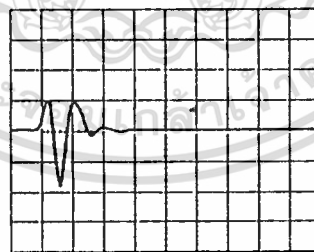
SCALE FORMAT: LINEAR (MHZ)

**VIDEOSCAN**

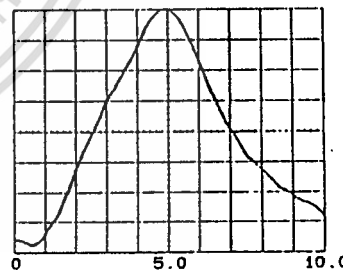
Videoscan Transducers are untuned transducers which provide heavily damped broadband performance. They are the best choice in many applications where good axial or distance resolution is necessary or in tests which require improved signal-to-noise in attenuating or scattering materials.

WAVEFORM

VERTICAL SENSITIVITY: 200 mv/div
HORIZONTAL RESOLUTION: .20 us/div

**SPECTRUM**

SCALE FORMAT: LINEAR (MHZ)

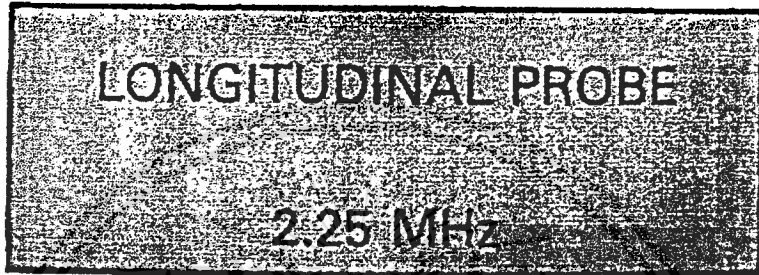
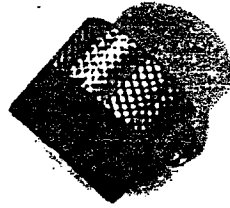


รูปที่ 38 แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบในแต่ละ
โมเดลของบริษัท PANAMETRICS

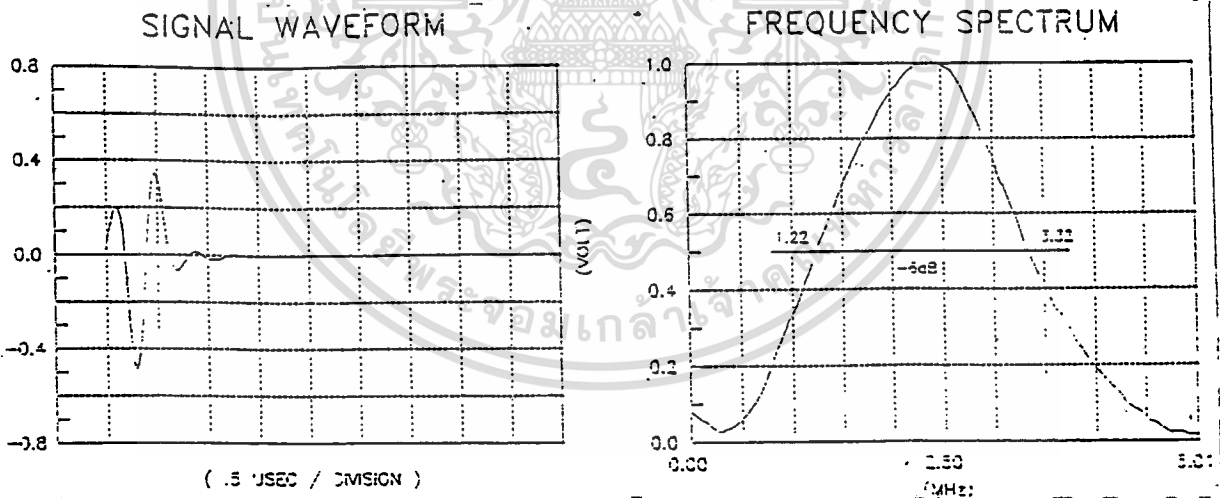
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรบของบริษัท PANAMETRIC ในโหมด ACCUSCAN “R” จะมีระยะเวลาในการแตมป์ของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกมาก ความไวในการตรวจวัดสูงจึงเหมาะนำมาใช้ในการตรวจวัดรอยตำหนิภายในวัสดุเช่น เหล็กหล่อหรือโลหะหล่อชนิดอื่นๆ เป็นต้น โดยโพรบที่นำมาใช้วัดความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุ ในงานวิจัยนี้จะใช้โพรบโหมด VIDEOSCAN ซึ่งเป็นโพรบที่มีค่า Q ต่ำหรือมีการแตมป์ของสัญญาณสูงจึงกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกที่มีจำนวนพัลส์ของคลื่นเพียง 2-3 ลูกเท่านั้น โพรบในโหมดนี้มีความสามารถในการแยกแยะของสัญญาณสูงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการวัดความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ซึ่งโพรบที่ใช้ในการวัดความเร็วมีอยู่สองชนิดด้วยกันคือ โพรบที่กำเนิดคลื่นตามยาว (compress probe) เลือกใช้โพรบรุ่น V 106 มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.25 MHz ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว และโพรบกำเนิดคลื่นตามขวาง (shear probe) เลือกใช้โพรบรุ่น V154 มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.25 MHz ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว โพรบทั้งสองเป็นชนิดสัมผัสโดยตรงกับวัสดุมีรูปร่างของโพรบรวมทั้งสัญญาณคลื่นเสียงที่โพรบกำเนิดขึ้นและลักษณะสเปกตรัมของคลื่นเสียงจะแสดงดังรูปที่ 39 สำหรับโพรบกำเนิดคลื่นตามยาว และรูปที่ 40 สำหรับโพรบกำเนิดคลื่นตามขวาง โดยในภาคผนวก ก. จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าของโพรบและมาตรฐานที่ใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้าของโพรบทั้งสองชนิด

รูปที่ 39



(ก)



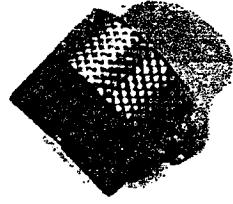
(ข)

(ค)

โพรบก้าเนิดคลื่นตามยาวรุ่น V106 : (ก) แสดงลักษณะภายนอกของโพรบ, (ข) แสดงลักษณะสัญญาณคลื่นเสียงที่โพรบก้าเนิดขึ้นและ (ค) แสดงลักษณะสเปกตรัมของคลื่น (ข้อมูลจากใบรับรองคุณภาพของบริษัท PANAMETRICS)

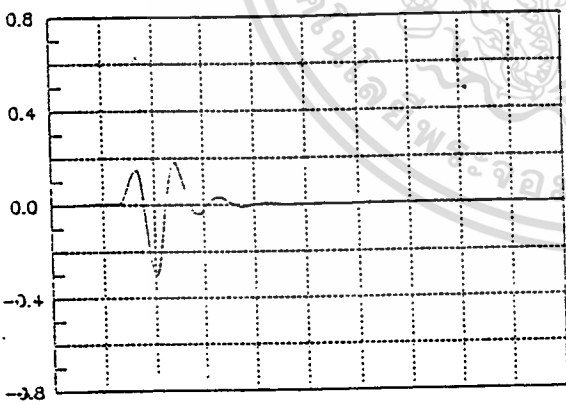
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 40



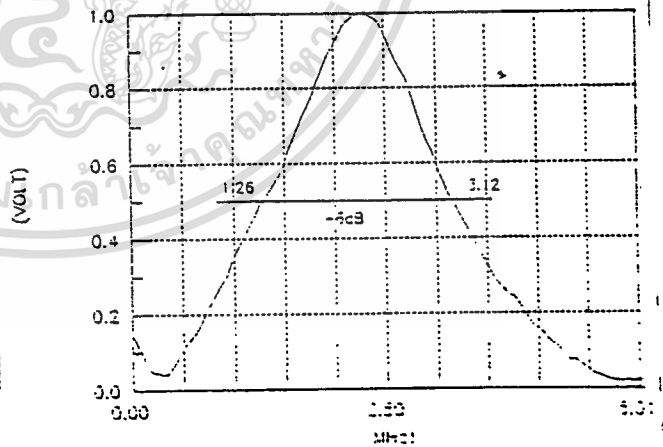
(ก)

SIGNAL WAVEFORM



(ข)

FREQUENCY SPECTRUM



(ค)

โพรบกำเนิดคลื่นตามขวางรุ่น V154 : (ก) แสดงลักษณะภายนอกของโพรบ, (ข) แสดงลักษณะสัญญาณคลื่นเสียงที่โพรบกำเนิดขึ้นและ (ค) แสดงลักษณะสเปกตรัมของคลื่น (ข้อมูลจากใบรับรองคุณภาพของบริษัท PANAMETRICS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

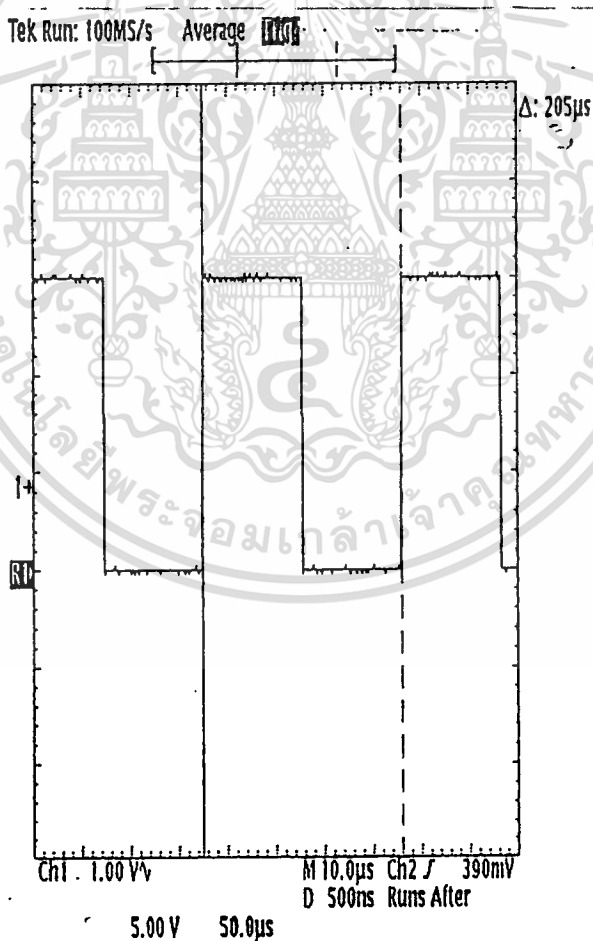
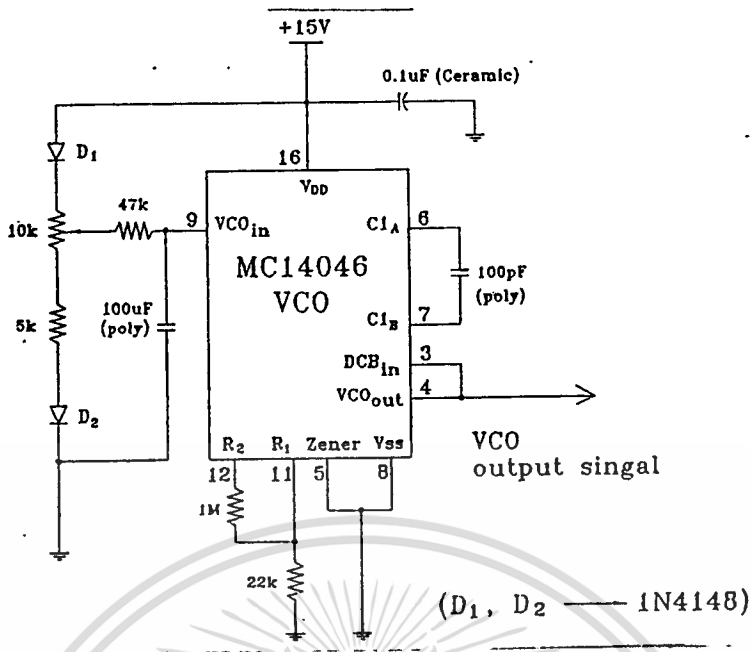
2 วงจรพัลส์เซอร์

พัลส์เซอร์เป็นวงจรที่ทำหน้าที่กำเนิดแรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ลบปลายแหลมเพื่อไปขับอัลตราโซนิกโพรบให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกและกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น ซึ่งลักษณะการให้พลังงานแก่อัลตราโซนิกโพรบเพื่อกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับใช้หาค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุ จะมีลักษณะการให้พลังงานเป็นจังหวะหรือพัลส์โหมด (pulse mode) ซึ่งพลังงานที่ให้โพรบจะเป็นพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง โดยจังหวะการให้พลังงานแก่โพรบถูกเรียกว่าอัตราการกระตุ้น (Tr) ซึ่งสามารถจะเปลี่ยนขนาดของอัตราการกระตุ้นได้จากวงจรฐานเวลาภายในพัลส์เซอร์ ดังนั้นพัลส์เซอร์ที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้นอกจากจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่กำเนิดแรงดันไฟฟ้าเพื่อไปขับโพรบให้มีรูปร่างเป็นพัลส์ลบปลายแหลมแล้ว ยังมีหน้าที่กำเนิดอัตราการให้พลังงานแก่อัลตราโซนิกโพรบเพื่อกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกอีกด้วย ลักษณะการทำงานในแต่ละส่วนมีดังนี้

2.1 วงจรฐานเวลา

วงจรฐานเวลาของพัลส์เซอร์จะใช้ชิป MC14046 ซึ่งเป็นชิปเฟสล็อกคูลูป (phase locked loop) ประกอบขึ้นเป็นวงจร VCO (Voltage Controlled Oscillator) เพื่อทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณความถี่ขึ้น โดยวงจร VCO สามารถจะปรับขนาดความถี่ได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าขาเข้าโดยมีช่วงความถี่ที่สามารถปรับได้ตั้งแต่ 5 KHz-500KHz หรือคาบเวลาดั้งแต่ $2\mu\text{s}$ - $200\mu\text{s}$ โดยสัญญาณเอาต์พุทของ VCO จะมี $V_p = 15\text{V}$ และมี duty cycle ของสัญญาณเท่ากับ 50% ลักษณะวงจรและสัญญาณเอาต์พุทของวงจรแสดงดังรูปที่ 41

รูปที่ 41

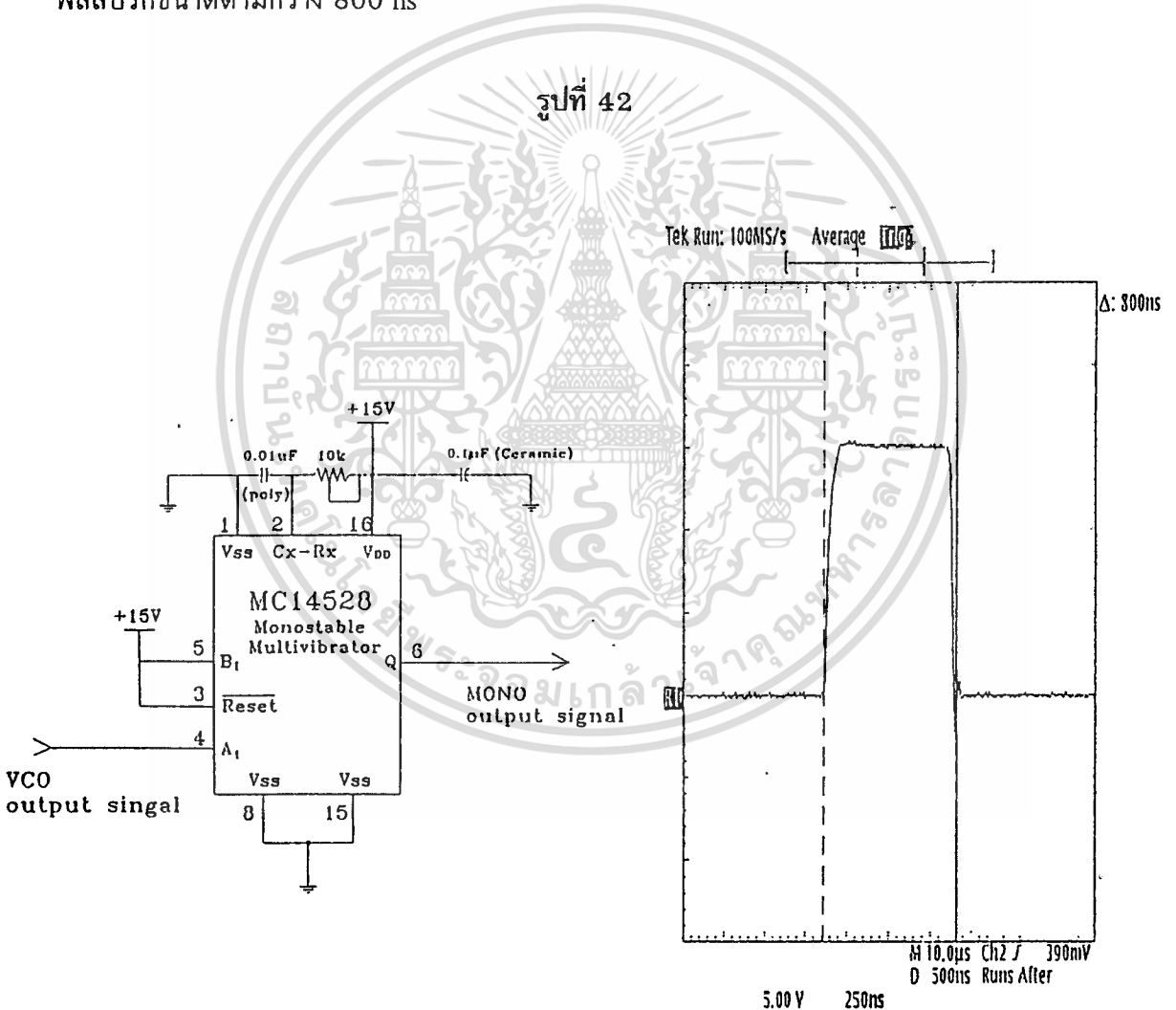


ลักษณะวงจรและสัญญาณเอาต์พุตของวงจร VCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 วงจรปรับความกว้างของสัญญาณ

สัญญาณเอาต์พุตของวงจร VCO จะถูกปรับให้มีขนาดความกว้างของสัญญาณลดลงจนมีขนาดเท่ากับ 800 ns ด้วยชิป MC14528 ประกอบขึ้นเป็นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติ-ไวเบรเตอร์ (monostable multivibrator) มีลักษณะวงจรและรูปร่างของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 42 สัญญาณอินพุตจะรับจากเอาต์พุตของวงจร VCO ป้อนเข้าที่ขากระตุ้น A_1 เมื่อสัญญาณจาก VCO มีการเปลี่ยนแปลงจาก 0V เป็น +15V หรือช่วงขอบขาขึ้นจะทำให้ชิป MC14528 กำเนิดพัลส์บวกความกว้างกำหนดด้วยตัวเก็บประจุ $0.01 \mu\text{F}$ ที่ขา 1, 2 และ ตัวต้านทาน $10 \text{ k}\Omega$ จะกำเนิดพัลส์บวกขนาดตามกว้าง 800 ns



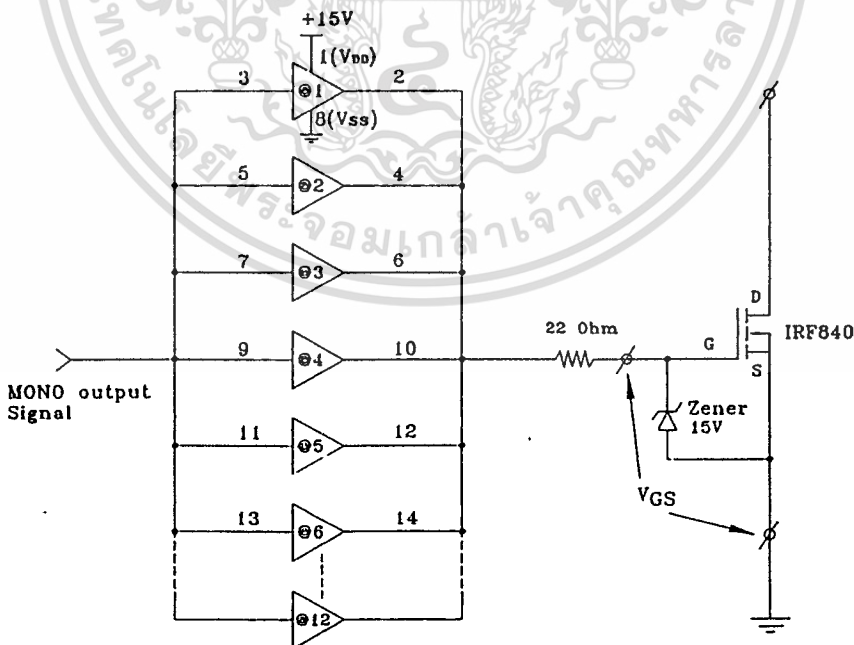
ลักษณะวงจรและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วงจรขับเกท

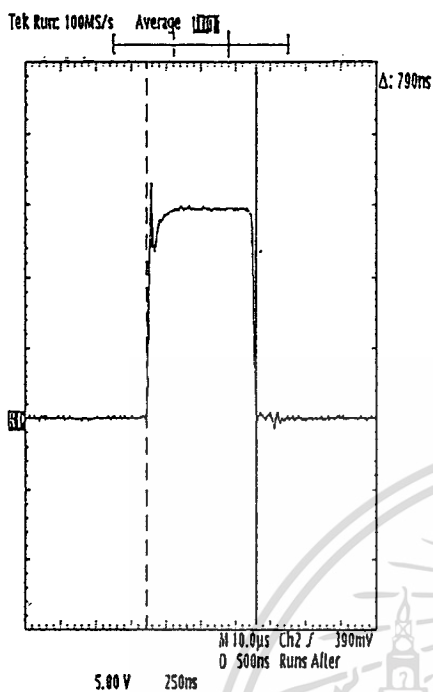
สัญญาณเอาต์พุตของวงจรโมนอสเตเบิลที่ได้จะถูกนำไปขับที่ขาเกทของเฟทโดยผ่านชุดขับเกท (gate driver) ซึ่งได้จากการนำชิป MC14050 ซึ่งทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) มาต่อขนานกันเป็นจำนวน 12 ตัว เพื่อให้มีขนาดกระแสเพียงพอที่จะไปขับขาเกทของเฟทซึ่งมีค่าตัวเก็บประจุอินพุทโดยทั่วไปอยู่ประมาณ 1,500 pF แล้วทำให้เฟทเกิดการนำกระแสอย่างรวดเร็ว โดยมีรูปร่างของสัญญาณไฟฟ้าเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม (square pulse) อย่างสมบูรณ์ ค่ากระแสใช้ขับเกทจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ $i = c(dv/dt)$ เมื่อ C เป็นความจุไฟฟ้าระหว่างเกทของอส dv/dt เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขับเกท เนื่องจากเราต้องการให้เฟทนำกระแสในของเวลาที่สั้นมากจึงต้องขับเกทด้วยความเร็วสูง วงจรที่สร้างขึ้นได้ใช้บัฟเฟอร์จำนวน 12 ตัวมาต่อขนานกันเพื่อไปขับเฟทเบอร์ IRF840 ของบริษัท Motorola ซึ่งมี $V_{DS} = 500V$, $R_{DS} (on) = 0.85 \Omega$ และ $I_D = 8.0A$ โดยในวงจรชุดขับเกทจะใช้ความต้านทานขนาด 22Ω มาต่ออยู่ระหว่างชุดกับเกทกับขาเกทของเฟทเพื่อป้องกันการสั่น (ringing) ของสัญญาณที่ขาเกทเนื่องจากอินดักแตนซ์ของสายอินพุท และเกทคาปาซิแตนซ์และมีเซนเนอร์ไดโอดขนาด 15 V จำกัดแรงดันที่ขาเกท-อส (V_{GS}) ของเฟทไว้ไม่ให้เกิน 15 V โดยมี rise time ของสัญญาณที่ขาเกทเท่ากับ 98.0 ns ลักษณะวงจรขับเกทและรูปร่างของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 43

รูปที่ 43

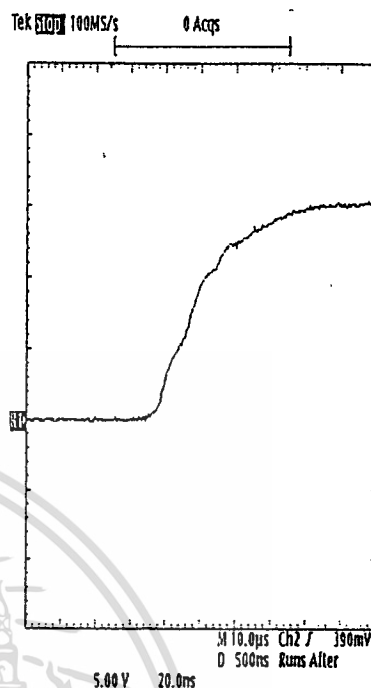


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)

(ก) วงจรชุดขับเกท, (ข) สัญญาณที่ขาเกทชอสและ (ค) สัญญาณ rise time ที่ขาเกท

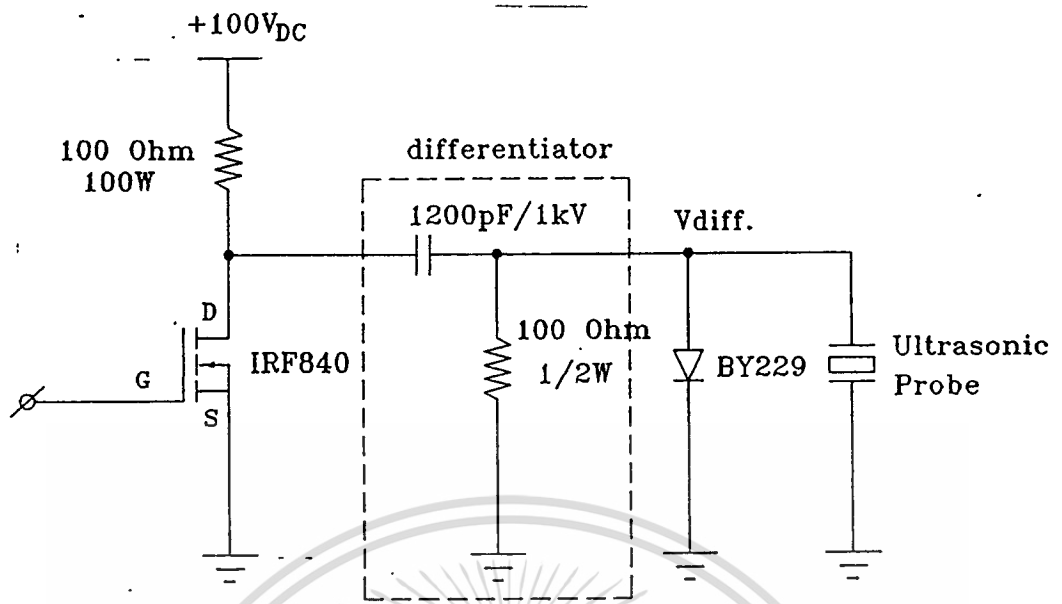
2.4 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์

เมื่อเฟลทถูกขับโดยสัญญาณเอาต์พุตของชุดขับเกท ลักษณะการทำงานของเฟลทในวงจรจะอยู่ในโหมด saturation ซึ่งเฟลทจะมีลักษณะการทำงานเป็นสวิตช์โดยควบคุมการเปิดปิดด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่ขาเกท ช่วงเวลาที่เฟลทเกิดการนำกระแสจะสอดคล้องกับสัญญาณพัลส์ที่มากกระตุ้นที่ขาเกทของเฟลทคือมีขนาดเท่ากับ 800 ns ซึ่งสัญญาณที่ขาเดรนของเฟลทจะถูกดิฟเฟอเรนเชียลเพื่อกำเนิดพัลส์ปลายแหลมด้วยวงจร RC ดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์ โดยเงื่อนไขที่ทำให้เกิดพัลส์ปลายแหลมคือค่า RC time constant จะต้องมิต่ำกว่าช่วงเวลาที่เฟลทนำกระแส โดยในวงจรได้ให้ขนาด $R = 100 \Omega$ และ $C = 1200 \text{ PF}$ ซึ่งจะมีค่า RC time constant เท่ากับ 120 ns ซึ่งมีค่าต่ำกว่าช่วงเวลาที่เฟลทนำกระแสคือ 800 ns สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์จะปรากฏเป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งมีแอมพลิจูดทั้งซีกบวกและซีกลบ สัญญาณพัลส์ซีกบวกจะถูกนำไปไบแอสไดโอด BY229 ให้ผ่านลงสู่กราวด์ของวงจรเหลือแต่สัญญาณพัลส์ซีกลบเพื่อนำไปใช้กระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบให้กำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกขึ้น โดยลักษณะวงจรดิฟเฟอเรนเชียลเอเตอร์และรูปร่างของสัญญาณพัลส์ปลายแหลมที่จะนำไปขับอัลตราโซนิกโพรบซึ่งมีแอมพลิจูด -100 V และมี rise time เท่ากับ 66 ns แสดงดังรูปที่ 44

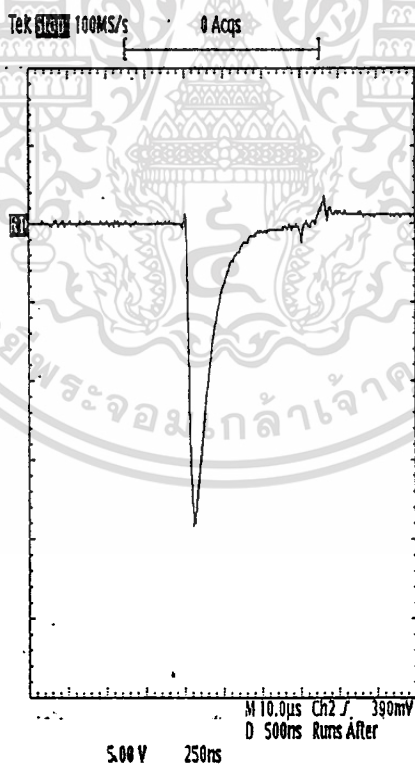
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 44



(ก)



(ข)

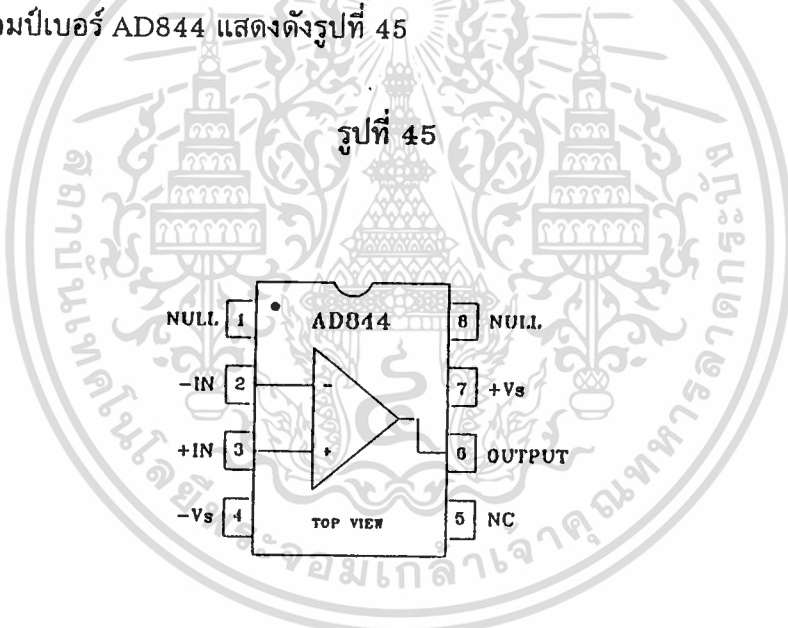
(ก) วงจรดิฟเฟอเรนเชียล และ (ข) แสดงสัญญาณพัลส์ลบปลายแหลมที่ได้

จากวงจรดิฟเฟอเรนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 วงจรภาครับสัญญาณ

วงจรภาครับสัญญาณมีหน้าที่หลักคือ รับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนกลับมาของสัญญาณสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิกโดยอัลตราโซนิกโพรบ ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำมาขยาย และถูกนำมาปรับสภาพของสัญญาณ (signal conditioning) แล้วจึงนำไปแสดงผลยังส่วนแสดงผลโดยมีโหมดการแสดงผลอยู่ในแอมพลิฟายเออร์โหมด (A-mode) ตัวขยายสัญญาณในวงจรได้ใช้ออปแอมป์ของบริษัท Analog Device เบอร์ AD844 ซึ่งเป็นออปแอมป์ชนิดป้อนกลับด้วยกระแส (current feedback) มีความถี่ตอบสนองสูงสุดเมื่ออัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1 ที่ความถี่ 60 MHz และมี slew rate เท่ากับ $2000\text{V}/\mu\text{s}$ ซึ่งโดยคุณสมบัติแล้วเป็นออปแอมป์ที่เหมาะสมในการนำมาขยายสัญญาณที่เป็นพัลส์โดยมีความถี่ของพัลส์อยู่ในช่วงความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่จะนำมาใช้วัดค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุ ลักษณะวงจรภายใน และสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์เบอร์ AD844 แสดงดังรูปที่ 45



- Wide Bandwidth : 60 MHz @ Gain of -1
- 33 MHz @ Gain of -10
- Very High Output Slew Rate : Up to 2000 V/ μs
- High Output Drive : 50 mA into 50 Ohm load
- Low Offset Voltage : 150 μV (max)
- Low Quiescent Current : 0.5 mA

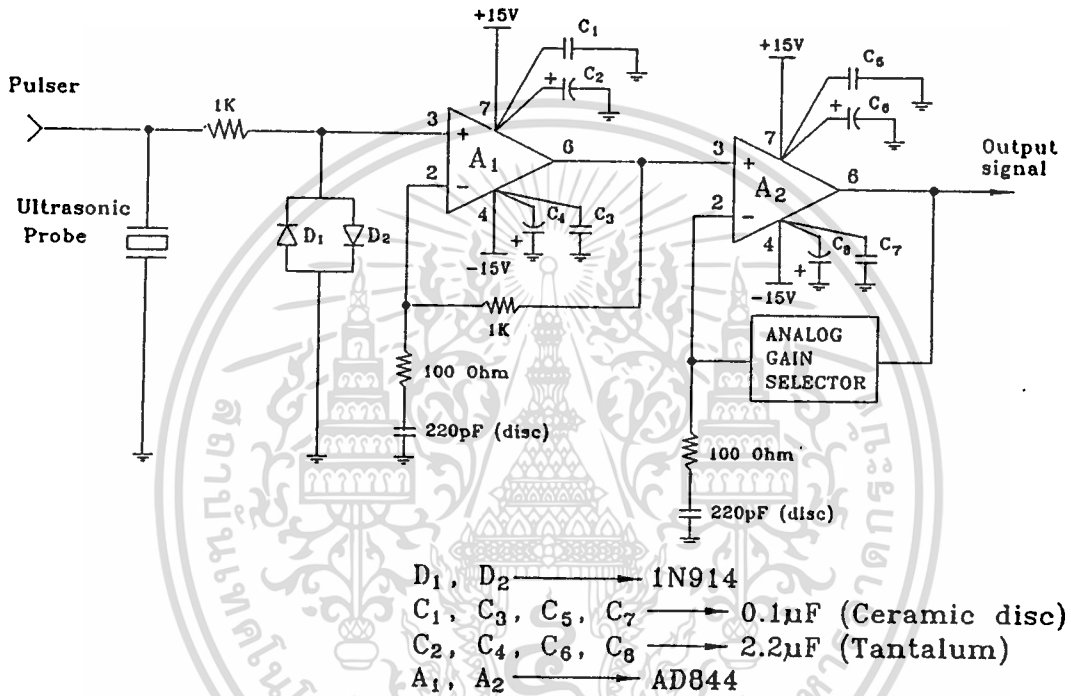
แสดงวงจรภายในและสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์เบอร์ AD844

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 วงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรถยายสัญญาณพัลส์

อินพุทของวงจรมารับสัญญาณจะต่อร่วมกับวงจรพัลส์เซอร์เพื่อรับสัญญาณพัลส์ของคลื่นที่สะท้อนกลับมาแล้วจึงนำมาขยายสัญญาณให้มีขนาดสัญญาณสูงขึ้น โดยลักษณะวงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรถยายสัญญาณพัลส์แสดงในรูปที่ 46

รูปที่ 46



ลักษณะวงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าและวงจรถยายสัญญาณพัลส์

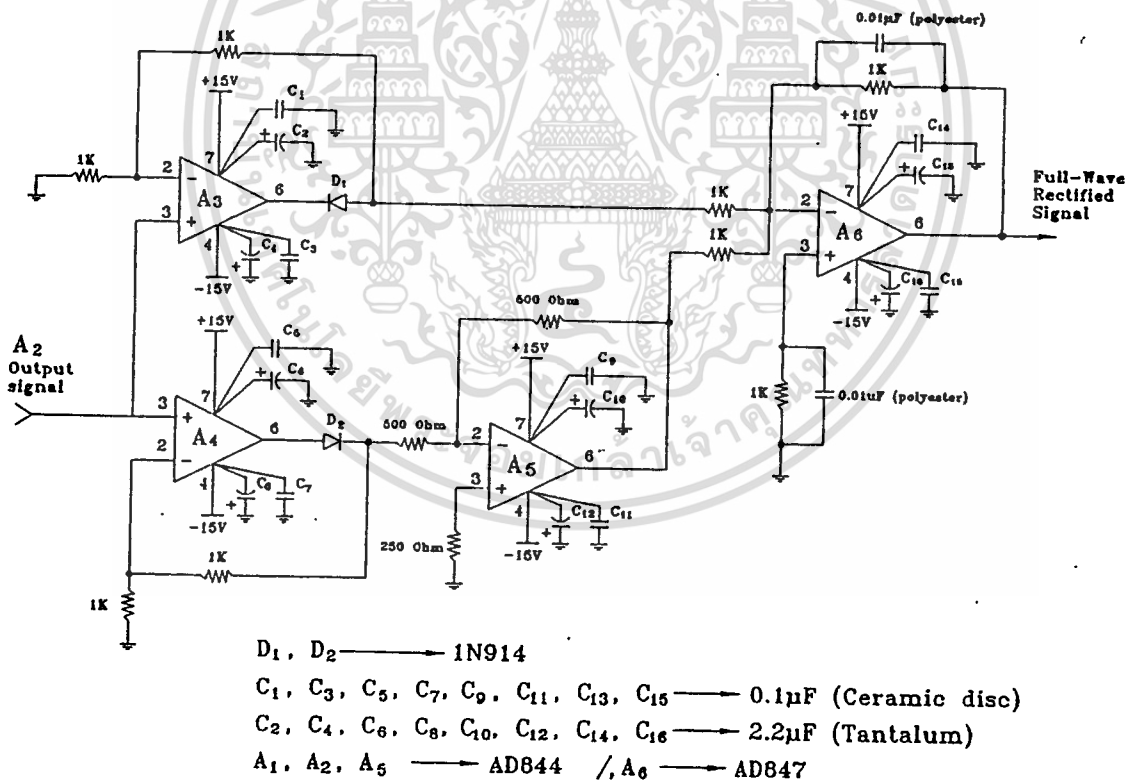
จากรูปที่ 46 อินพุทของวงจรมารับจะมีวงจรจำกัดแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงที่มาจากพัลส์เซอร์ไม่ให้นำไปยังอินพุทของวงจรถยายโดยใช้ค่าความต้านทาน $1\text{ K}\Omega$ ต่อร่วมกับไดโอด 1N914 ซึ่งสัญญาณจะถูกจำกัดไว้ไม่ให้มีขนาดเกิน ± 0.7 โวลต์ จากนั้นสัญญาณจะถูกนำมาขยายด้วยวงจรถยายความถี่สูงไฟสลับโดยใช้โอปแอมป์ A1 ประกอบขึ้นเป็นวงจรถยายนอนอินเวอร์ตติ้งโดยมีอัตราขยาย 11 เท่า, CLBW (Close Loop Bandwidth) เท่ากับ 33 MHz ซึ่งที่ขาอินเวอร์ตติ้งของโอปแอมป์ A1 จะมีตัวเก็บประจุขนาด 220 pF ต่ออนุกรมอยู่กับค่าความต้านทาน 100Ω และปลายอีกด้านของตัวเก็บประจุต่อกราวด์ของวงจรเพื่อให้ในรูปการป้อนกลับของโอปแอมป์ A1 มีเฉพาะสัญญาณไฟสลับเท่านั้น ซึ่งสัญญาณไฟตรงจะไม่สามารถผ่านตัวเก็บประจุ 220 pF ได้ โอปแอมป์ A1 จึงทำหน้าที่ขยายเฉพาะสัญญาณไฟสลับเท่านั้น จากนั้นสัญญาณเอาท์พุทจากโอปแอมป์ A1 จะถูกนำมาขยายด้วยโอปแอมป์ A2 อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งวงจร

ขยายของออปแอมป์ A2 ประกอบขึ้นโดยมีหน้าที่การทำงานเหมือนออปแอมป์ A1 เพียงแต่ค่าความต้านทานป้อนกลับที่อยู่ระหว่างขาเอาต์พุตและขาอินเวอร์ตติงของออปแอมป์ A2 สามารถจะปรับขนาดได้ด้วยตัวเลือกอัตราขยาย (analog gain selector) ซึ่งอัตราขยายของออปแอมป์ A2 สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดได้ 5 ระดับคือที่ 5, 10, 20, 30, และ 35 dB ซึ่งที่อัตราขยายสูงสุดจะมี CLBW เท่ากับ 10 MHz

3.2 วงจรเรกติไฟส์สัญญาณไฟสลบแบบเต็มคลื่น

เอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณออปแอมป์ A2 จะเป็นสัญญาณไฟสลบความถี่สูง ซึ่งจะถูกนำมาเรกติไฟส์สัญญาณให้เป็นสัญญาณชนิดเต็มคลื่นโดยวงจรเรกติไฟส์สัญญาณแสดงดังรูปที่ 47

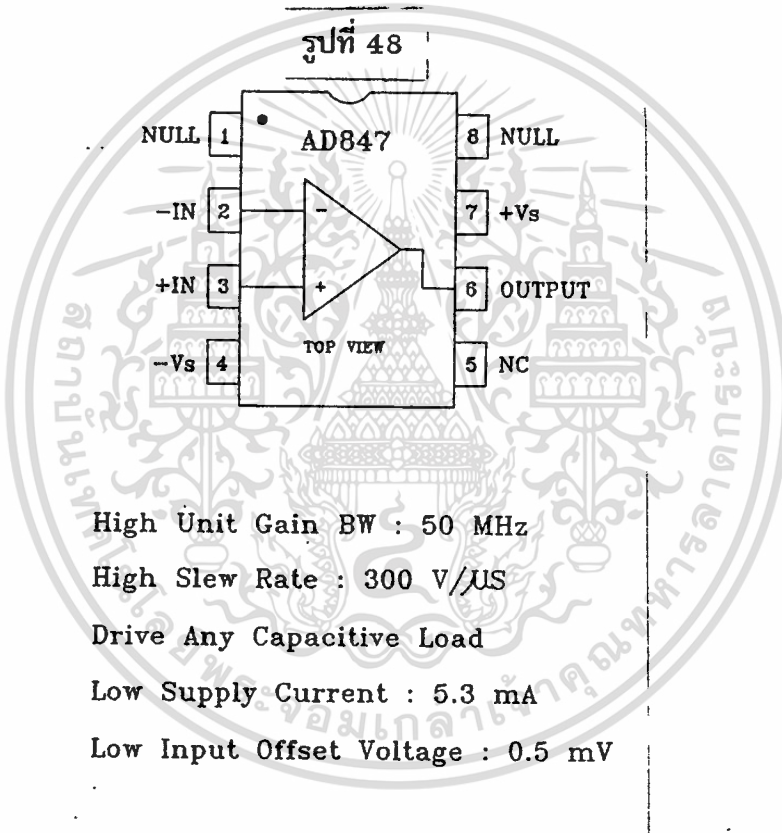
รูปที่ 47



แสดงวงจรเรกติไฟส์สัญญาณแบบเต็มคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 47 สัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ A2 จะถูกนำมาเรคตีไฟส์ให้เป็นสัญญาณเต็มคลื่น โดยออปแอมป์ A3 ทำหน้าที่เรคตีไฟส์สัญญาณซีกลบและออปแอมป์ A4 ทำหน้าที่เรคตีไฟส์สัญญาณซีกบวก โดยมีออปแอมป์ A5 ประกอบขึ้นเป็นวงจรขยายชนิดกลับเฟส (inverting amplifier) ทำหน้าที่กลับเฟสของสัญญาณเอาต์พุตจากออปแอมป์ A4 จากนั้นสัญญาณเรคตีไฟส์ทั้งซีกลบและซีกบวกที่ถูกกลับเฟสแล้วจะถูกนำมารวมกันด้วยออปแอมป์เบอร์ AD847 ของบริษัท Analog Device ชนิดป้อนกลับด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage feedback) มีลักษณะวงจรรภายในและสมบัติทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 48 ประกอบขึ้นเป็นวงจรขยายกลับเฟสชนิดรวมสัญญาณ (inverting summing amplifier)



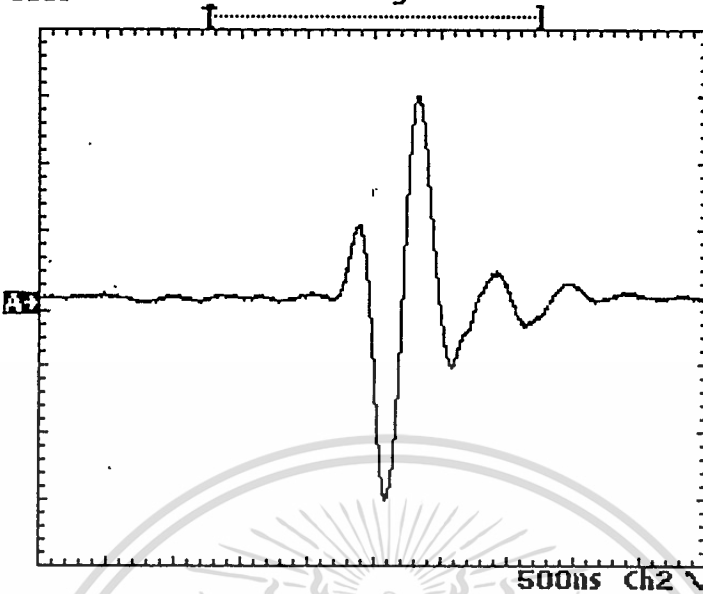
... แสดงวงจรรภายในและสมบัติทางไฟฟ้าของออปแอมป์เบอร์ AD847

สัญญาณเอาต์พุตได้จากออปแอมป์ A6 จะเป็นสัญญาณเรคตีไฟส์แบบเต็มคลื่นโดยจะถูกนำไปแสดงผลยังส่วนแสดงผลต่อไป ซึ่งจะเห็นว่าภาครับสัญญาณที่ออกแบบสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สัญญาณที่นำไปแสดงผลสามารถแสดงผลได้ทั้งสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกโดยตรงและสัญญาณที่เรคตีไฟส์แบบเต็มคลื่นแล้วโดยสัญญาณเอาต์พุตของออปแอมป์ในแต่ละส่วนแสดงดังรูปที่ 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 49

TekRun: 500MS/s Average



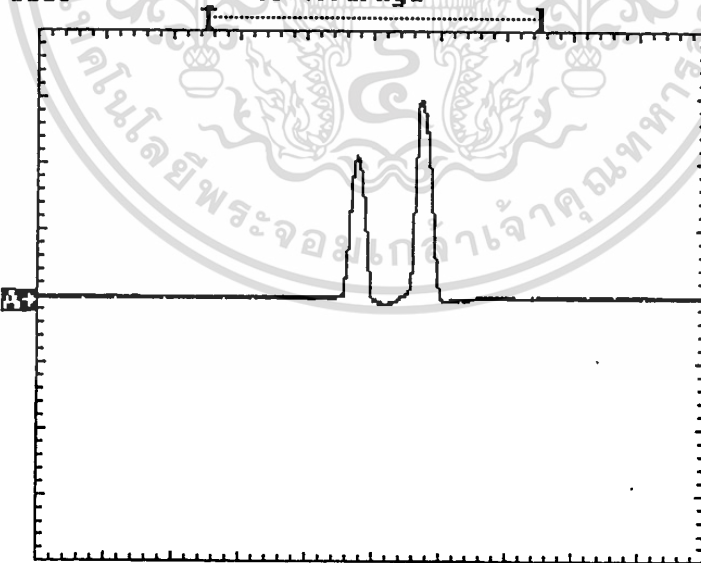
20 V 500ns

500ns Ch2

RF SIGNAL

(OUTPUT SIGNAL OF A2)

TekRun: 500MS/s Average



2 V 500ns

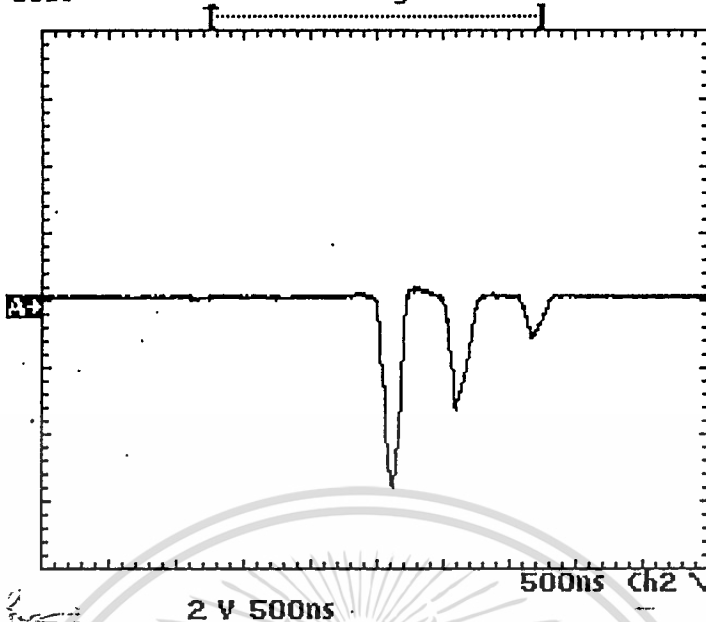
500ns Ch2

POSITIVE RECTIFIED SIGNAL

(OUTPUT SIGNAL OF A4)

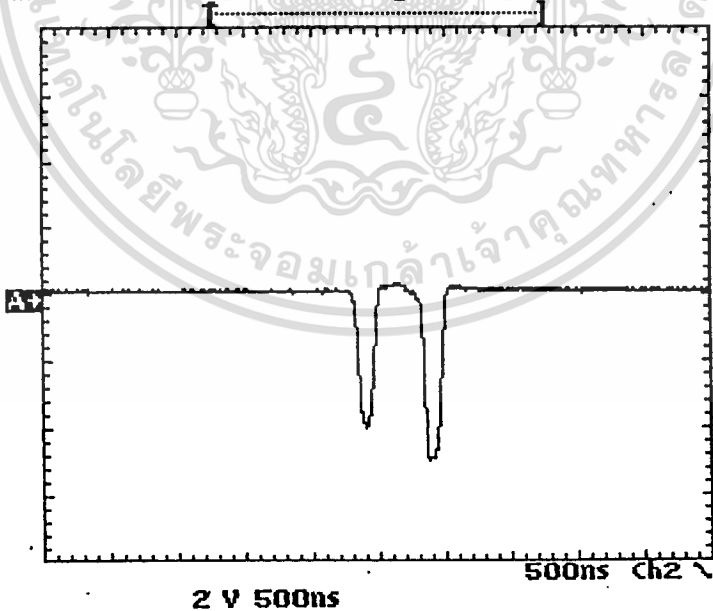
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tek Run: 500MS/s Average



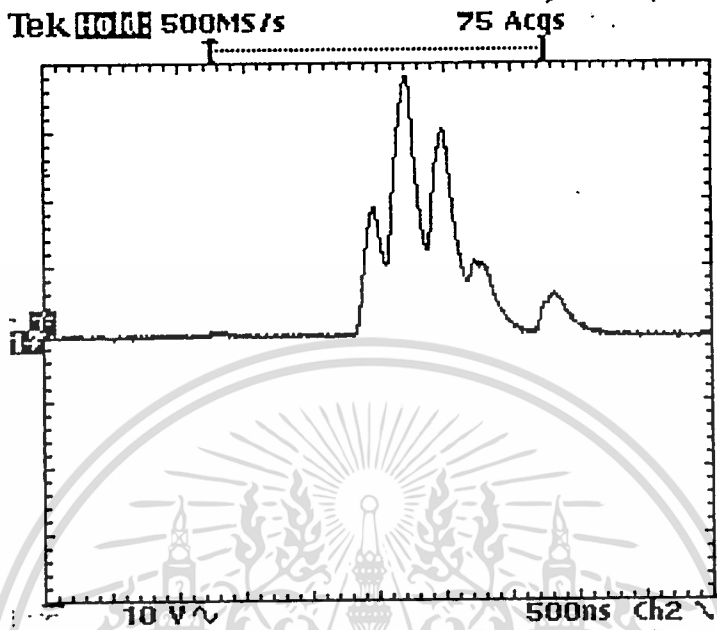
NEGATIVE RECTIFIED SIGNAL
(OUTPUT SIGNAL OF A3)

Tek Run: 500MS/s Average



INVERSE POSITIVE RECTIFIED SIGNAL
(OUTPUT SIGNAL OF A5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

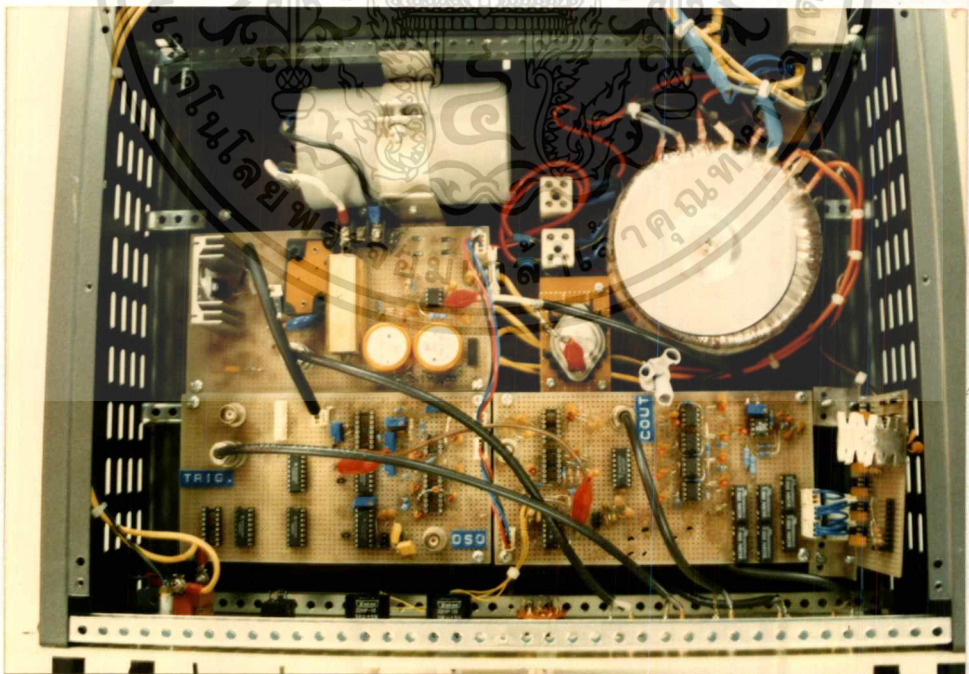
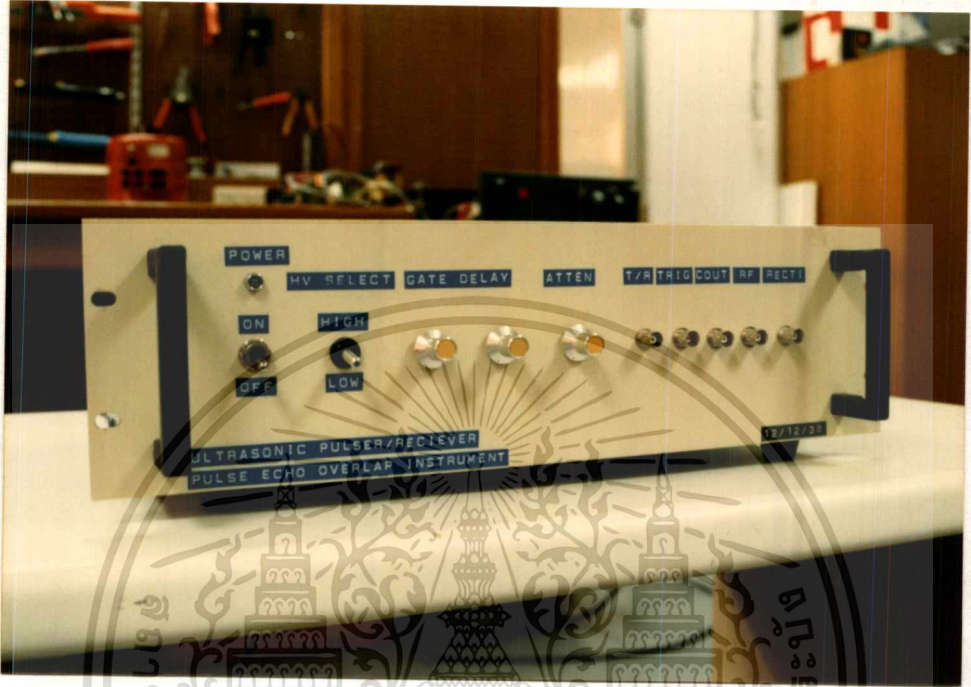


INTREGATED POSITIVE & NEGATIVE RECTIFIED SIGNAL
(OUTPUT SIGNAL OF A6)

สัญญาณเอาต์พุทของออปแอมป์ในแต่ละส่วนภายในวงจรภาครับสัญญาณ

สำหรับวงจรรวมของพัลส์เซอร์ วงจรภาครับสัญญาณและแหล่งจ่ายไฟที่ใช้ในวงจรทั้งหมดจะแสดงอยู่ในภาคผนวก ข. โดยเครื่องมือวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะภายนอกและลักษณะภายในแสดงดังภาพที่ 50

ภาพที่ 50



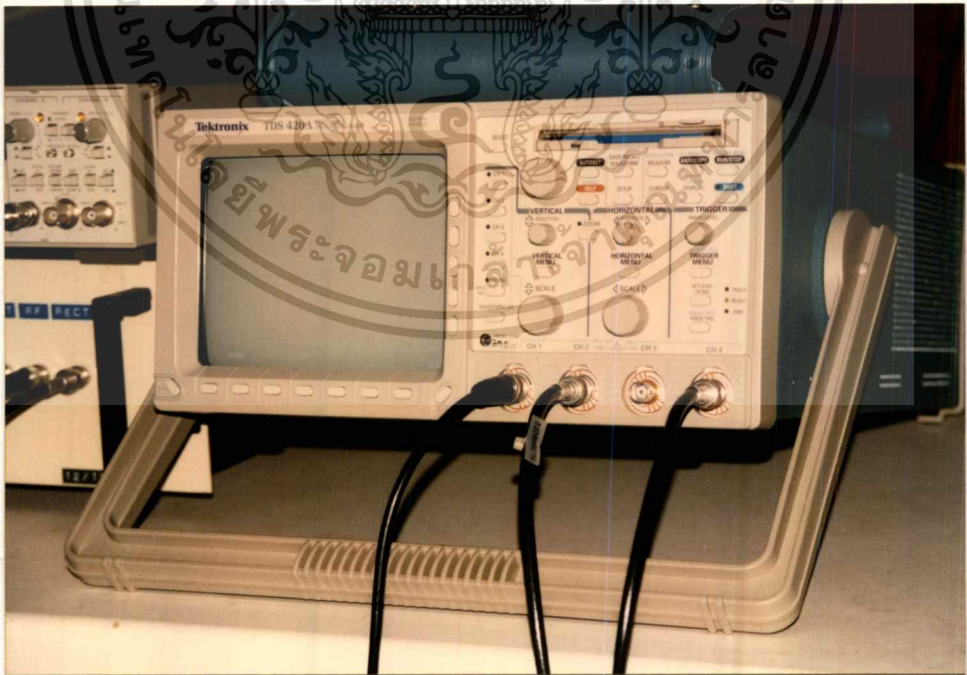
แสดงลักษณะภายนอกและภายในของเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่สร้างขึ้น
ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ส่วนแสดงผลข้อมูล

จากโครงสร้างการทำงานของเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ ส่วนแสดงผลที่ได้จะมีอยู่สองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแสดงผลรูปร่างลักษณะของสัญญาณที่ได้จากเอาต์พุตของภาครับสัญญาณโดยจะใช้ดิจิทัลสตอเรจออสซิลโลสโคป (DSO) ของบริษัท Tektronix รุ่น TDS420A ซึ่งเป็นออสซิลโลสโคปขนาด 4 ช่องสัญญาณ มี bandwidth 200 MHz, sampling rate 100 MS/s, DC gain accuracy $\pm 1.5\%$, maximum input voltage ± 400 V และมีฟังก์ชันหน่วงเวลาทริกเกอร์โดยมี time delay range ตั้งแต่ 0 ns ถึง 20 s ทำหน้าที่แสดงรูปร่างและลักษณะสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกโดยจะมีฟังก์ชัน FFT (Fast Fourier Transform) สามารถวัดสเปกตรัมของสัญญาณในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึง 25 MHz เพื่อวัดสเปกตรัมสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่คัดเลือกมาได้และสามารถเชื่อมต่อการทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านมาตรฐาน IEEE-488 เพื่อนำข้อมูลไปเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ต่อไปได้ โดยรูปร่างลักษณะของ DSO แสดงดังภาพที่ 51

ภาพที่ 51

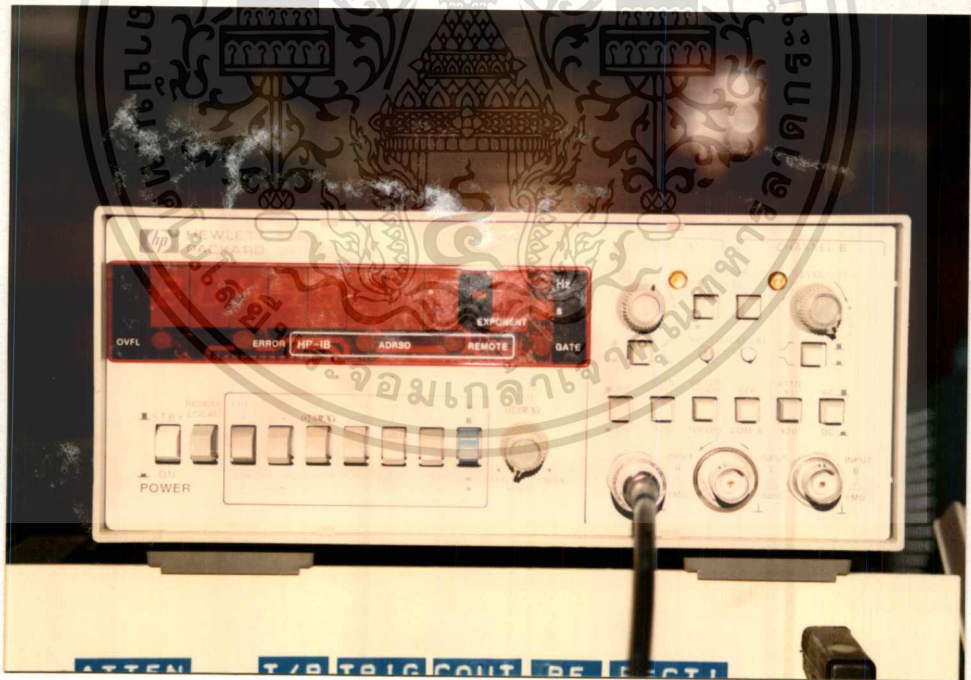


ดิจิทัลสตอเรจออสซิลโลสโคป (Tektronix ; TDS420A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนแสดงผลในส่วนที่สองก็คือเครื่องนับความถี่ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องนับความถี่ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น HP 5316B มีช่วงตอบสนองสัญญาณชนิด AC coupled ตั้งแต่ 30 Hz ถึง 100 MHz และสัญญาณชนิด DC coupled ตั้งแต่ 0 ถึง 100 MHz, input impedance $1\text{ M}\Omega$ และ input capacitance น้อยกว่า 40 pF สามารถวัดความถี่ของสัญญาณที่มีช่วงแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ +2.5 Vdc ถึง -2.5 Vdc โดยมีระดับการทริกเกอร์สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ +2.5 Vdc ถึง -2.5 Vdc เพื่อทำหน้าที่วัดคาบเวลาของสัญญาณเอาท์พุทจาก VCO เพื่อวัดเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้เคลื่อนที่ในวัสดุตรวจสอบ เมื่อทำการปรับให้เกิดการซ้อนทับของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกบนจอของ DSO โดยรูปร่างลักษณะของเครื่องนับความถี่แสดงดังภาพที่ 52

ภาพที่ 52

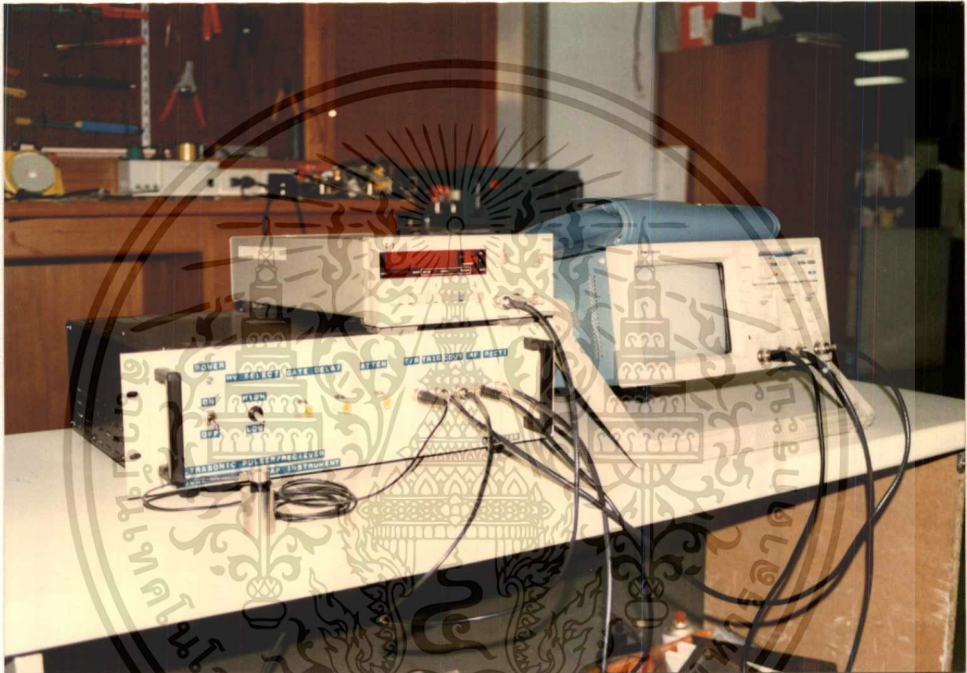


เครื่องนับความถี่ (Hewlett Packard ; HP5316B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยชุดวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดความเร็วที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้, DSO, เครื่องนับความถี่, อัลตราโซนิกโพรบ และวัสดุที่ทำการวัดความเร็วแสดงดังภาพที่ 53

ภาพที่ 53



ชุดวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลอง

สำหรับวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ก็คือเพื่อสร้างเครื่องมือวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางใด ๆ ด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ โดยได้ทดลองศึกษาเทคนิคการวัดสมบัติทางกลกับวัสดุตัวกลางที่เป็นเหล็กหล่อด้วยเครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่สร้างขึ้น รวมทั้งศึกษาการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในของเหล็กหล่อ ด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกและวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตัวกลาง ในการทดลองจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. การทดลองวัดค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกสองชนิดที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อคือ ความเร็วคลื่นตามยาว (V_L) และความเร็วคลื่นยาวขวาง (V_S) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อคือ Young's modulus (E), Shear modulus (G), Poisson's ratio (ν) และ นำค่าความเร็วที่วัดได้มาพิจารณาหาความสัมพันธ์กับค่าความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อ
2. การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ
3. การทดลองวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

เหล็กหล่อที่จะนำมาใช้ในการวัดค่าสมบัติทางกล อัตราการลดทอนของคลื่นและสเปกตรัมของคลื่น จะถูกเตรียมให้มีโครงสร้างภายในที่แตกต่างกัน โดยนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีการชุบแข็ง (Quenching technique) กระทำโดยนำเหล็กหล่อมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ เป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงนำเหล็กหล่อขณะที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยทำให้มีอุณหภูมิของเหล็กหล่อลดลงอย่างรวดเร็วด้วยการนำไปชุบในน้ำมันที่มีสมบัติฉนวนหรือชุบในน้ำที่มีอุณหภูมิอยู่ในอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิของเหล็กหล่อก็จะลดลงอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างภายในของเหล็กหล่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ทำให้โครงสร้างของเหล็กหล่อมีความแข็งแรงขึ้นแต่ก็มีความเปราะมากขึ้นด้วย กระบวนการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้จึงเรียกว่าวิธีการชุบแข็งที่แต่ละค่าอุณหภูมิของการให้ความร้อนจะทำให้เหล็กหล่อมีความแข็งแรงแตกต่างกันไปทำให้มีโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นด้วยกระบวนการให้ความร้อนสามารถจะเตรียมเหล็กหล่อให้มีโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันไป เพื่อนำไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองวัดค่าสมบัติทางกลด้วยวิธีวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกรวมทั้งวัดอัตราการลดทอนและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ ผลการทดลองในแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

- 1 การทดลองวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อคำนวณหาค่าสมบัติทางกล ได้เตรียมเหล็กหล่อโดยนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่างๆ มีลักษณะดังภาพที่ 54

ภาพที่ 54



ลักษณะเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นในงานวิจัย

จากภาพที่ 54 เหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นมีขนาดความยาวประมาณ 50 mm และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 26 mm เมื่อนำเหล็กหล่อที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมาวัดความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ด้วยเครื่องมือวัดความเร็วที่สร้างขึ้น โดยได้ทดลองวัดความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อแต่ละชิ้นเป็นจำนวน 10 ครั้ง แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นที่วัดได้ จากนั้นนำค่าความเร็วเฉลี่ยที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.60), (2.61) และ (2.62) สำหรับอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้กำเนิดคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางสำหรับวัดความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อได้ใช้ความถี่ขนาด 2.25 MHz ของบริษัท PANAMETRICS ชนิดโหมด Videoscan โดยในตารางที่ 3 จะแสดงขนาดของเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นเมื่อนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ และในตารางที่ 4 - 10 แสดงค่าความเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้ด้วยเครื่องมือวัดความเร็วที่สร้างขึ้นสำหรับเหล็กหล่อแต่ละชั้น

สำหรับค่าที่แสดงในตาราง t_L จะเป็นเวลาที่คลื่นตามยาวเคลื่อนที่ไปและกลับในวัสดุตัวกลาง t_S จะเป็นเวลาที่คลื่นตามขวางเคลื่อนที่ไปและกลับในวัสดุตัวกลางและ V_L , V_S คือความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางตามลำดับ

ตารางที่ 3

เหล็กหล่อ หมายเลข	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	อุณหภูมิที่ให้แก่ เหล็กหล่อ (°C)
1	48.12	26.19	7014	800
2	46.84	26.01	7054	700
3	47.22	26.23	7071	600
4	47.82	26.78	7021	600
5	48.19	26.36	7029	500
6	46.06	26.03	7100	500
7	47.43	26.40	7022	400

แสดงขนาดและความหนาแน่นของเหล็กหล่อที่เตรียมขึ้นโดยนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ

ตารางที่ 4

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_s (μ s)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	23.869	39.611	4031	2429
2	23.886	39.612	4029	2429
3	23.867	39.613	4032	2429
4	23.876	39.610	4030	2429
5	23.873	39.612	4031	2429
6	23.867	39.612	4032	2429
7	23.871	39.610	4031	2429
8	23.871	39.611	4031	2429
9	23.877	39.611	4030	2429
10	23.871	39.612	4031	2429
V_L (avg) = 4030 m/s, V_s (avg) = 2429 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ
ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 1

ตารางที่ 5

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_s (μ s)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	22.007	37.546	4257	2495
2	22.004	37.547	4257	2495
3	22.006	37.548	4257	2494
4	22.010	37.547	4256	2495
5	22.007	37.546	4256	2495
6	22.010	37.546	4256	2495
7	22.015	37.548	4255	2494
8	22.009	37.547	4256	2495
9	22.012	37.547	4255	2495
10	22.007	37.548	4256	2498
V_L (avg) = 4256 m/s, V_s (avg) = 2494 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ
ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_S (μ s)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	21.816	37.951	4328	2488
2	21.814	37.951	4329	2488
3	21.823	37.951	4327	2488
4	21.827	37.951	4326	2488
5	21.814	37.954	4329	2488
6	21.826	37.952	4326	2488
7	21.827	37.952	4326	2488
8	21.829	37.953	4326	2488
9	21.839	37.954	4324	2488
10	21.827	37.954	4326	2488
V_L (avg) = 4326 m/s, V_S (avg) = 2488 m/s				

๖ แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 3

ตารางที่ 7

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_S (μ s)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	21.835	38.256	4380	2499
2	21.812	38.257	4384	2499
3	21.812	38.257	4384	2499
4	21.815	38.257	4384	2499
5	21.806	38.258	4385	2499
6	21.810	38.254	4385	2500
7	21.832	38.257	4380	2499
8	21.815	38.256	4384	2499
9	21.832	38.257	4380	2499
10	21.827	38.255	4381	2500
V_L (avg) = 4382 m/s, V_S (avg) = 2499 m/s				

๗ แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_S (μ s)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	20.997	37.178	4590	2592
2	20.997	37.176	4590	2592
3	21.001	37.176	4589	2592
4	20.987	37.175	4592	2592
5	20.996	37.178	4590	2592
6	20.995	37.176	4590	2592
7	21.010	37.176	4587	2592
8	21.010	37.178	4587	2592
9	20.992	37.176	4591	2592
10	20.997	37.177	4590	2592
V_L (avg) = 4589 m/s, V_S (avg) = 2592 m/s				

ตารางนี้ แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 5

ตารางที่ 9

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_S (μ s)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	20.473	36.037	4499	2556
2	20.476	36.034	4498	2556
3	20.530	36.038	4487	2556
4	20.546	36.036	4483	2556
5	20.539	36.036	4485	2556
6	20.540	36.035	4484	2556
7	20.532	36.035	4486	2556
8	20.540	36.036	4484	2556
9	20.525	36.038	4488	2556
10	20.540	36.037	4484	2556
V_L (avg) = 4485 m/s, V_S (avg) = 2556 m/s				

ตารางนี้ แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 6

ตารางที่ 10

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_s (μ s)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	21.150	37.278	4485	2544
2	21.156	37.279	4483	2544
3	21.165	37.279	4481	2544
4	21.159	37.276	4483	2544
5	21.171	37.277	4480	2544
6	21.161	37.278	4482	2544
7	21.160	37.276	4482	2544
8	21.165	37.278	4481	2544
9	21.166	37.276	4481	2544
10	21.148	37.275	4485	2544
V_L (avg) = 4482 m/s, V_s (avg) = 2544 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อหมายเลข 7

เหล็กหล่อทั้ง 7 ชิ้นที่มีความเร็วคลื่นตามยาว (V_L) และความเร็วคลื่นตามขวาง (V_s) ที่แตกต่างกันจะถูกนำมาหาค่าสมบัติทางกลคือ Young's modulus (E), Shear modulus (G) และ Poisson's ratio (ν) โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.60), (2.61) และ (2.62) และนำเหล็กหล่อแต่ละชิ้นไปวัดค่า ความทนแรงดึง (σ_u) ด้วยวิธีทางกลผลที่ได้จะแสดงในตารางที่ 11 ในรูปที่ 55 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและความเร็วคลื่นตามยาว รูปที่ 56 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและความเร็วคลื่นตามขวาง รูปที่ 57 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและอัตราส่วนของความเร็วคลื่นตามขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว รูปที่ 58 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus (G) และความเร็วคลื่นตามขวาง รูปที่ 59 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus (E) และความเร็วคลื่นตามขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว รูปที่ 60 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio และความเร็วคลื่นตามขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว รูปที่ 61 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและค่าความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อ และรูปที่ 62 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อและความเร็วคลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11

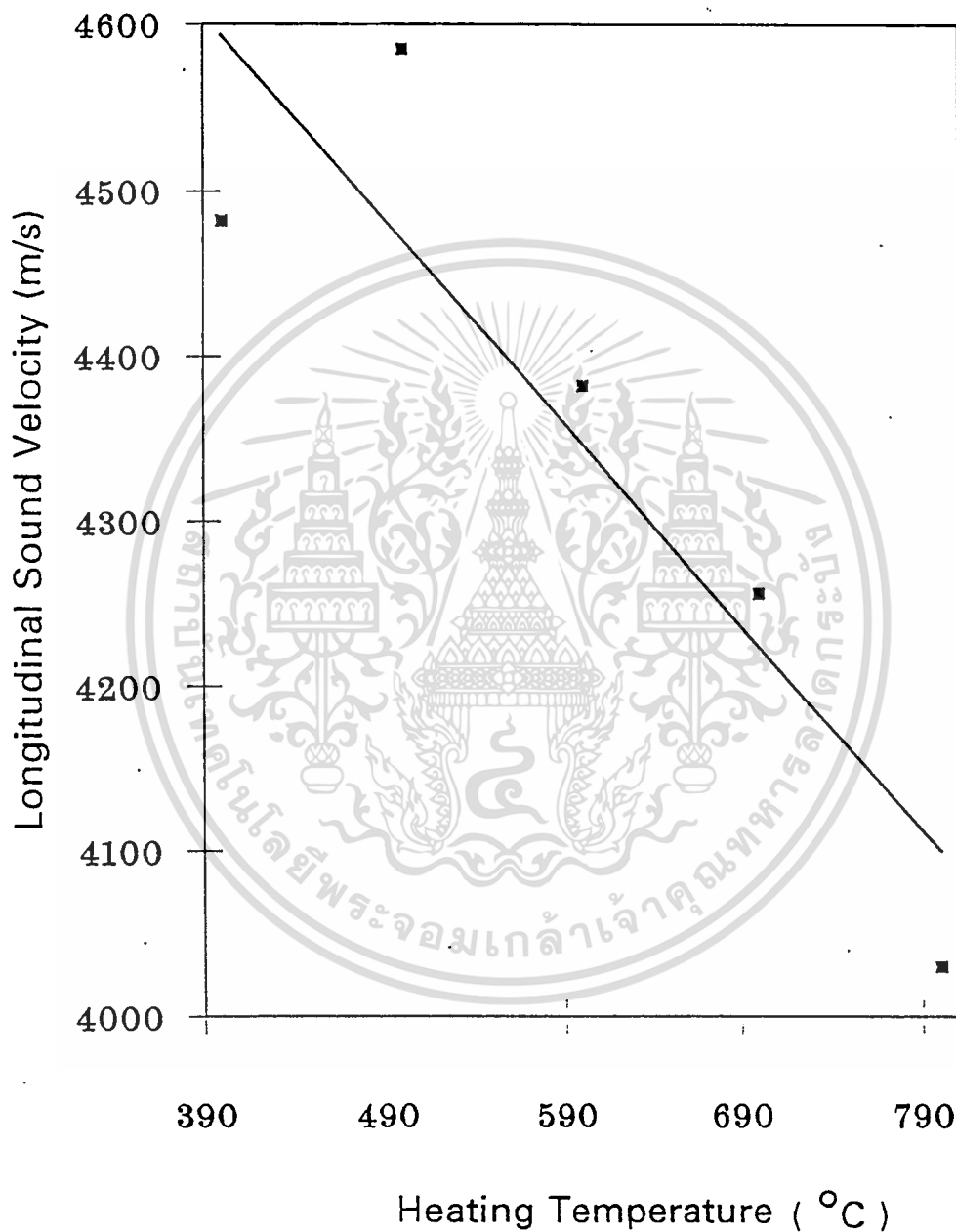
เหล็กหล่อ หมายเลข	อุณหภูมิ ที่ให้แก่ เหล็กหล่อ (°C)	ρ (kg/m ³)	V_L (m/s)	V_S (m/s)	V_S/V_L	E (GPa)	G (GPa)	ν	σ_u (MPa)
1	800	7014	4030	2429	0.602	100.497	41.382	0.215	126.510
2	700	7054	4256	2494	0.585	108.269	43.876	0.240	145.732
3	600	7071	4326	2488	0.575	109.650	43.770	0.253	155.440
4	600	7021	4382	2499	0.570	110.407	43.846	0.259	166.444
5	500	7029	4589	2592	0.564	119.484	47.224	0.266	168.650
6	500	7100	4585	2556	0.557	118.119	46.385	0.275	179.095
7	400	7022	4482	2544	0.567	114.582	45.445	0.263	208.163

ค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อคือ Young's modulus (E), Shear modulus (G) และ Poisson's ratio (ν) ที่วัดได้ด้วยวิธีอัลตราโซนิก และค่าความทนแรงดึง (σ_u) ที่วัดด้วยวิธีทางกล

(หมายเหตุ : ความสัมพันธ์ในกราฟรูปที่ 55-62 ใช้การเฉลี่ยค่าข้อมูลที่ได้จากการวัดเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น)

รูปที่ 55

Heating Temperature versus Longitudinal Sound Velocity

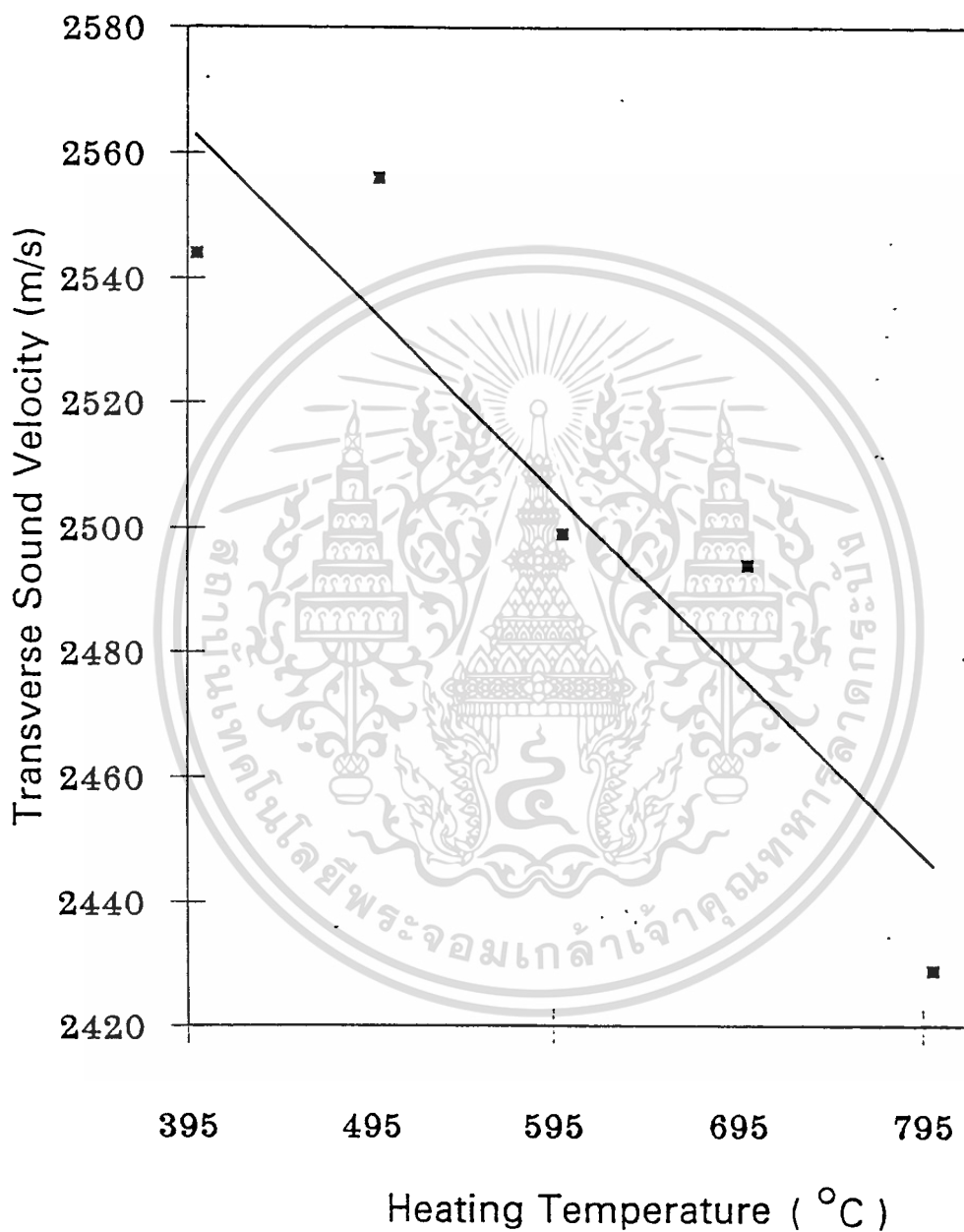


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและความเร็วคลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 56

Heating Temperature versus Transverse Sound Velocity

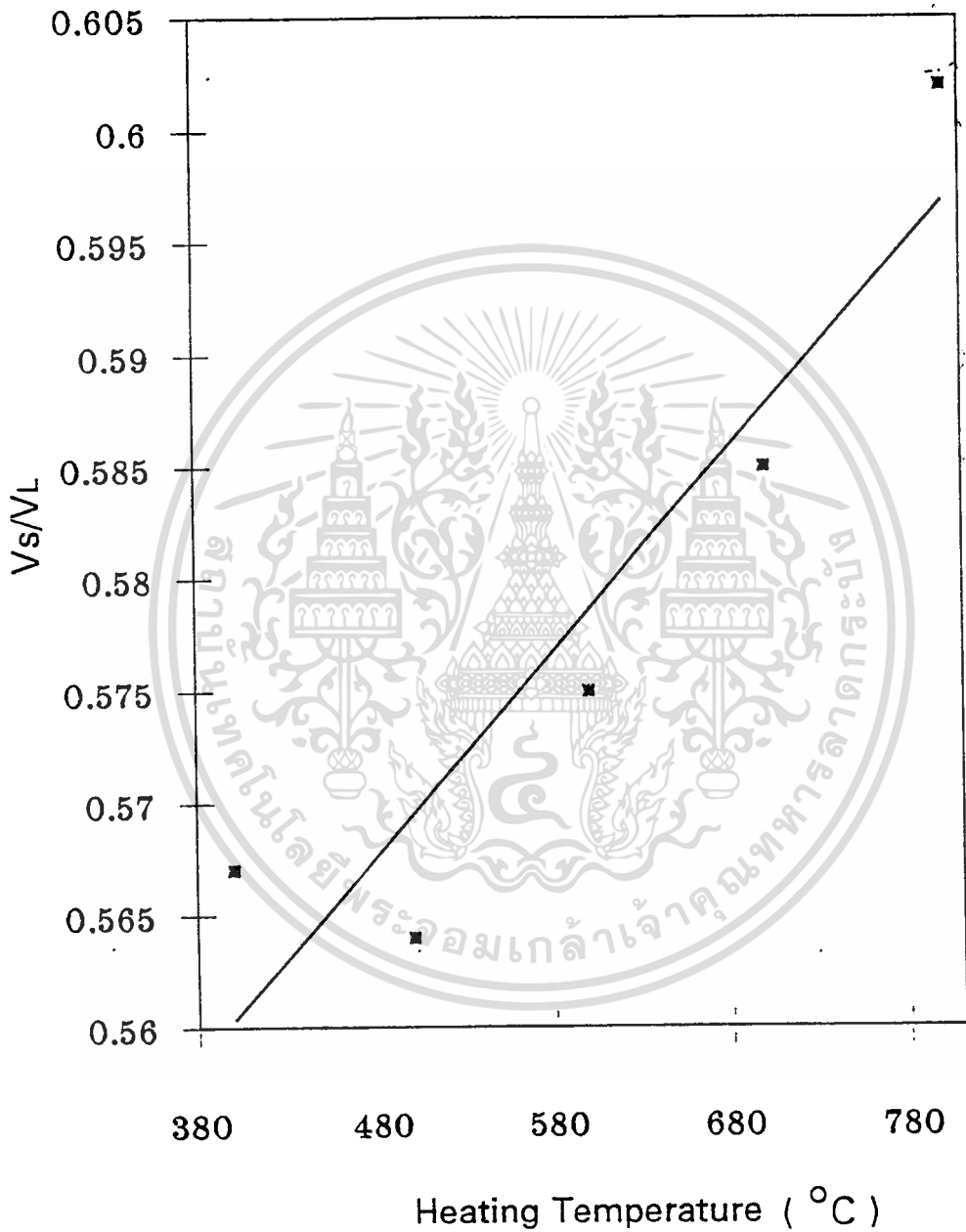


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่วัสดุและความเร็วคลื่นตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 57

Heating Temperature versus the ratio of
Transverse and Longitudinal Sound Velocity

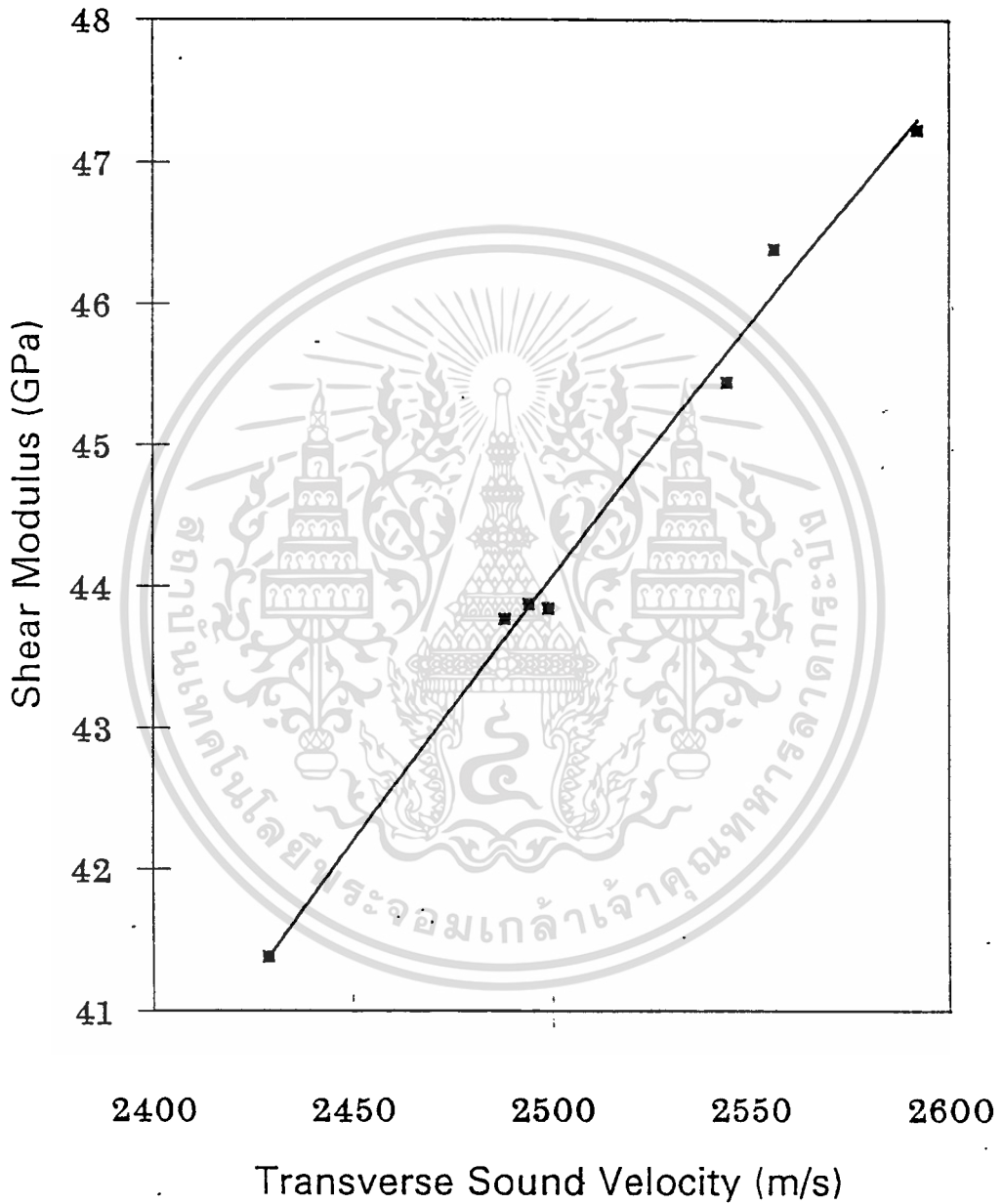


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและอัตราส่วนของความเร็วคลื่นตามขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 58

Transverse Sound Velocity versus Shear Modulus

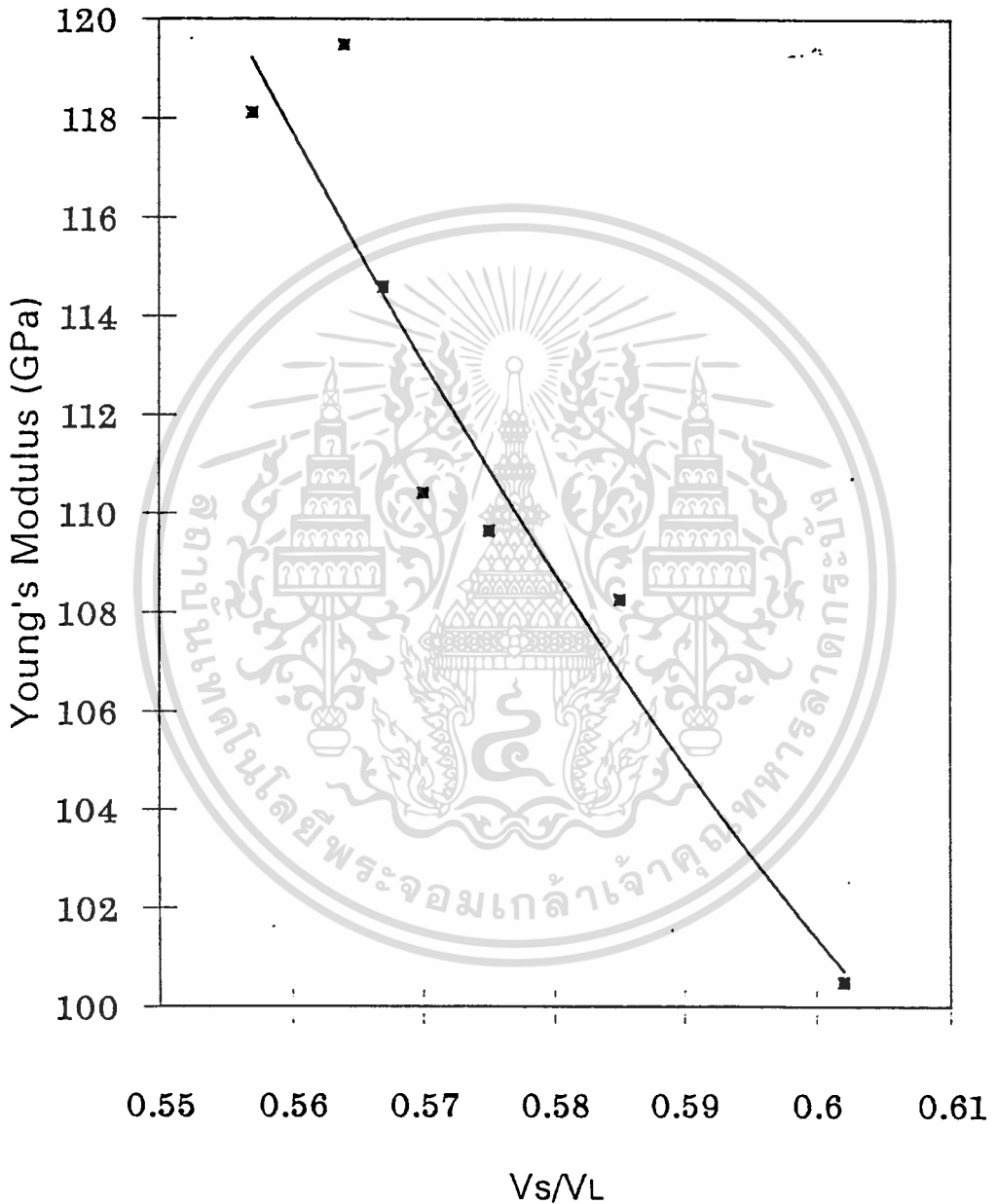


กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Shear modulus(G) และความเร็วคลื่นตามขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 59

The ratio of Transverse and Longitudinal
Sound Velocity versus Young's Modulus

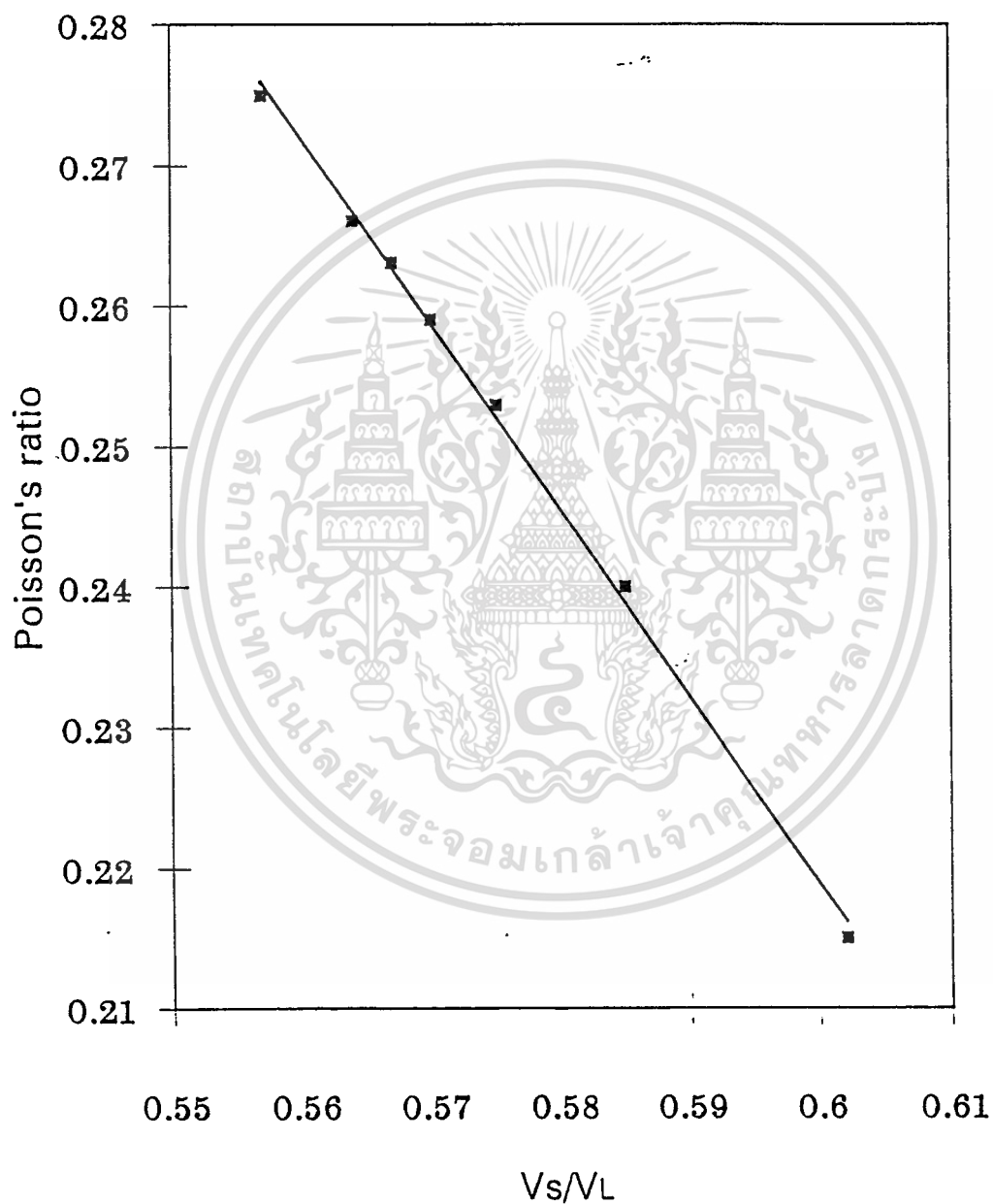


กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Young's modulus (E) และความเร็วคลื่นตาม
ขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 60

The ratio of Transverse and Longitudinal
Sound Velocity versus Poisson's ratio

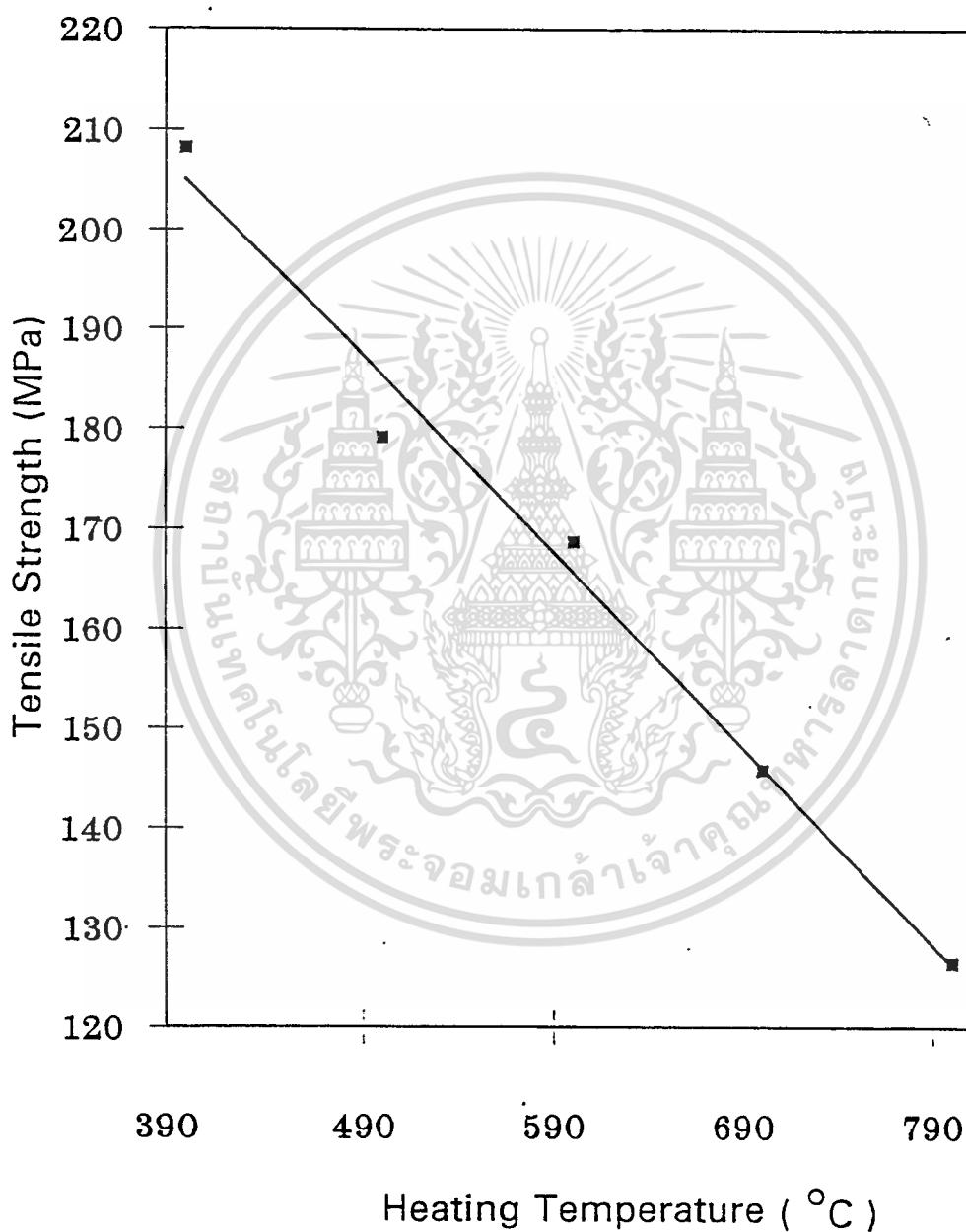


กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Poisson's ratio (ν) และความเร็วจลื่นตามขวาง
ต่อความเร็วจลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 61

Heating Temperature versus Tensile Strength

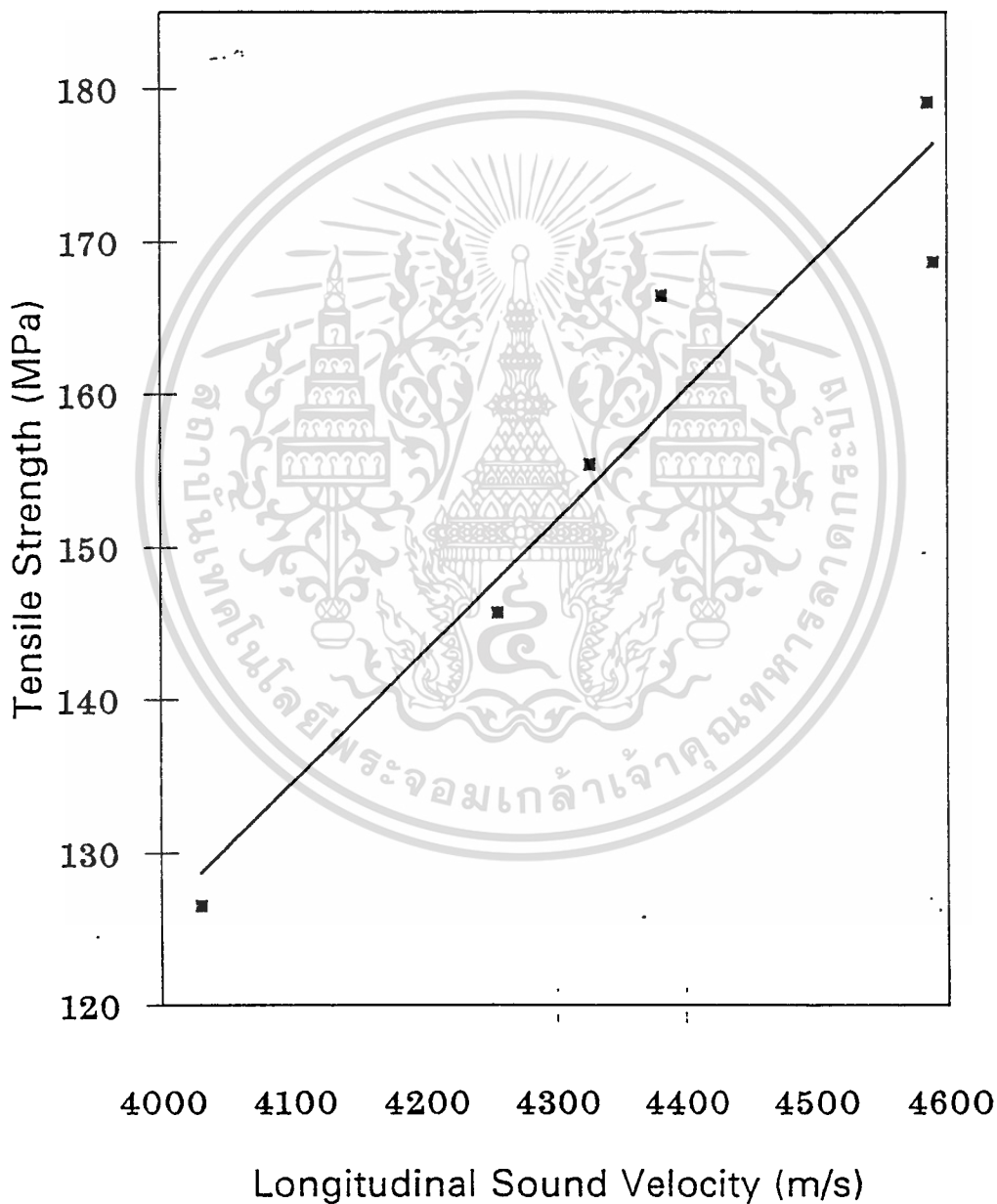


กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและ
ค่าความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 62

Longitudinal Sound Velocity versus Tensile
Strength



กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความทนแรงดึง (σ_u) ของเหล็กหล่อและ
ความเร็วคลื่นตามยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเหล็กหล่อที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ด้วยการนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อน เพื่อให้เหล็กหล้อมีโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อแต่ละชั้นมีขนาดแตกต่างกัน การที่เหล็กหล่อถูกนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนนี้เองเหล็กหล่อจะมีความแข็งแรงแต่มีความเปราะมากขึ้น โดยใช้วิธีการทดสอบทางกลไม่สามารถจะหาค่าโมดูลัสต่าง ๆ ของเหล็กหล่อได้เนื่องจากเหล็กหล้อมีความเปราะมาก ดังนั้น ด้วยวิธีทดสอบทางกลเมื่อมีแรงมากระทำกับเหล็กหล่อจนถึงขนาดแรงค่าหนึ่งเหล็กหล่อจะเกิดการแตกหักขึ้น สมบัติทางกลที่สามารถจะวัดได้จึงมีเพียงค่าความทนแรงดึง (σ_u) เพียงค่าเดียว ด้วยเหตุนี้ในการทดลองเปรียบเทียบผลการวัดค่าสมบัติทางกลด้วยวิธีอัลตราโซนิกกับวิธีทางกลจึงใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเหล็กหล่อซึ่งสามารถจะหาค่า โมดูลัสต่าง ๆ ด้วยวิธีทางกลได้ ในการทดลองจึงได้ใช้วัสดุสองชนิดเพื่อทำการทดลองวัดเปรียบเทียบ ด้วยวิธีการทั้งสองวิธีคือ เหล็กเหนียวและเหล็กเส้น ซึ่งมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 63 และ 64 ตามลำดับ โดยในตารางที่ 12 แสดงขนาดและความหนาแน่นของเหล็กทั้งสองชนิดที่เตรียมขึ้น

ภาพที่ 63

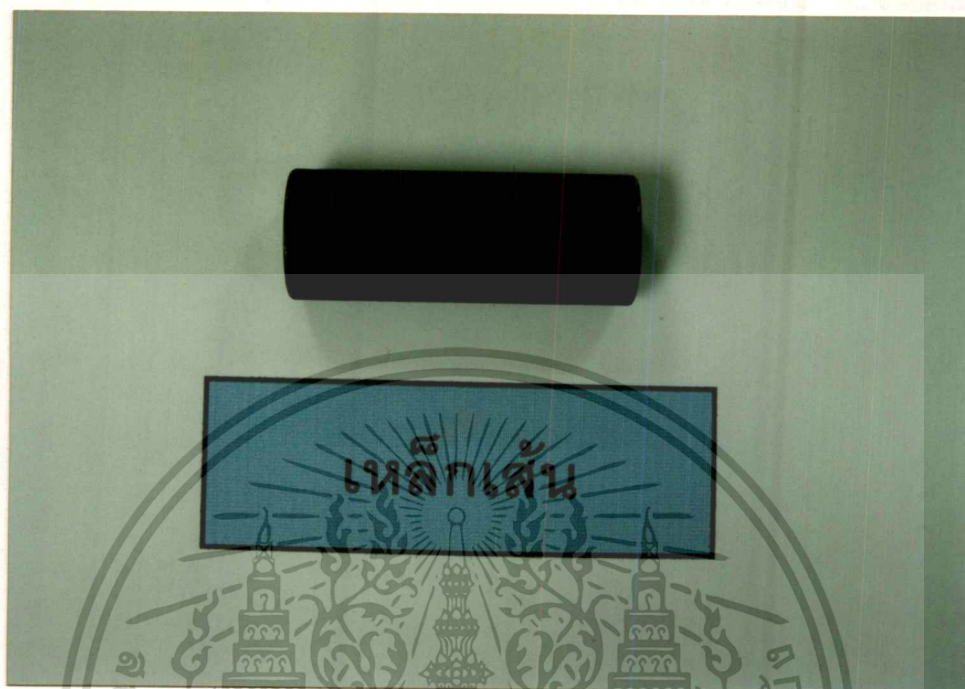


เหล็กเหนียว

ลักษณะเหล็กเหนียวที่เตรียมขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 64



ลักษณะเหล็กเส้นที่เตรียมขึ้น

ตารางที่ 12

เหล็กเหนียว หมายเลข	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	มวล (g)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
1	50.13	22.85	159.0	7744
2	50.10	22.76	158.6	7782
3	50.59	22.94	162.7	7784
4	50.06	22.74	156.7	7707
5	51.37	22.43	158.0	7806

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กเส้น หมายเลข	ความหนา (mm)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	มวล (g)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
1	48.26	18.56	94.6	7249
2	49.79	18.66	97.7	7178
3	51.07	18.39	99.5	7343
4	49.66	18.34	97.0	7398
5	51.00	18.81	101.0	7137

แสดงขนาดและความหนาแน่นของเหล็กเหนียวและเหล็กเส้นที่เตรียมขึ้น

ได้ทดลองวัดความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวและเหล็กเส้นด้วยเครื่องวัดความเร็วพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ โดยค่าความเร็วที่วัดได้สำหรับเหล็กเหนียวแต่ละชิ้นแสดงในตารางที่ 13 - 17 และสำหรับเหล็กเส้นแต่ละชิ้นแสดงในตารางที่ 18 - 22

ตารางที่ 13

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_s (μ s)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	17.029	30.998	5887	3234
2	17.038	31.000	5883	3234
3	17.040	30.999	5883	3234
4	17.035	30.999	5885	3234
5	17.036	31.002	5885	3233
6	17.032	31.002	5886	3233
7	17.031	30.998	5886	3234
8	17.031	31.001	5886	3234
9	17.032	31.001	5886	3234
10	17.029	31.002	5887	3233
V_L (avg) = 5885 m/s, V_s (avg) = 3234 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 1

ตารางที่ 14

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_s (μ s)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	16.958	30.910	5908	3241
2	16.940	30.910	5914	3241
3	16.953	30.912	5910	3241
4	16.948	30.911	5912	3241
5	16.953	30.969	5910	3241
6	16.946	30.910	5912	3241
7	16.951	30.908	5910	3241
8	16.951	30.908	4591	3241
9	16.950	30.909	5911	3241
10	16.951	30.908	5910	3241
V_L (avg) = 5910 m/s, V_s (avg) = 3241 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 2

ตารางที่ 15

ลำดับในการวัด	t_L (μs)	t_s (μs)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	17.185	31.447	5887	3217
2	17.193	31.447	5884	3217
3	17.188	31.448	5886	3217
4	17.188	31.447	5886	3217
5	17.192	31.448	5885	3217
6	17.186	31.447	5887	3217
7	17.190	31.448	5885	3217
8	17.190	31.446	5885	3217
9	17.186	31.445	5885	3217
10	17.193	31.448	5884	3217
V_L (avg) = 5885 m/s, V_s (avg) = 3217 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 3

ตารางที่ 16

ลำดับในการวัด	t_L (μs)	t_s (μs)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	17.131	30.947	5844	3235
2	17.130	30.948	5844	3235
3	17.131	30.946	5844	3235
4	17.134	30.947	5843	3235
5	17.135	30.946	5843	3235
6	17.130	30.948	5844	3235
7	17.130	30.945	5844	3235
8	17.131	30.946	5844	3235
9	17.133	30.946	5843	3235
10	17.130	30.948	5844	3235
V_L (avg) = 5844 m/s, V_s (avg) = 3235 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 17

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_S (μ s)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	17.325	31.747	5930	3236
2	17.330	31.745	5927	3236
3	17.326	31.747	5929	3236
4	17.322	31.748	2931	3236
5	17.332	31.747	5927	3236
6	17.334	31.745	5927	3236
7	17.334	31.745	5927	3236
8	17.330	31.747	5928	3236
9	17.333	31.746	5927	3236
10	17.332	31.745	5927	3236
V_L (avg) = 5928 m/s, V_S (avg) = 3236 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ
ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเหนียวหมายเลข 5

ตารางที่ 18

ลำดับในการวัด	t_L (μ s)	t_S (μ s)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	16.478	30.121	5857	3204
2	16.476	30.121	5856	3204
3	16.483	30.120	5855	3204
4	16.480	30.122	5856	3204
5	16.482	30.123	5855	3204
6	16.482	30.122	5856	3204
7	16.481	30.122	5856	3204
8	16.483	30.123	5855	3204
9	16.482	30.122	5856	3204
10	16.483	30.124	5855	3204
V_L (avg) = 5855 m/s, V_S (avg) = 3204 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและ
ค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19

ลำดับในการวัด	t_L (μs)	t_S (μs)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	17.149	30.910	5806	3221
2	17.148	30.910	5806	3221
3	17.152	30.911	5805	3221
4	17.152	30.910	5805	3221
5	17.152	30.911	5805	3221
6	17.150	30.912	5806	3221
7	17.155	30.912	5805	3221
8	17.149	30.911	5806	3221
9	17.151	30.911	5805	3221
10	17.150	30.912	5806	3221
V_L (avg) = 5805 m/s, V_S (avg) = 3221 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 2

ตารางที่ 20

ลำดับในการวัด	t_L (μs)	t_S (μs)	V_L (m/s)	V_S (m/s)
1	17.485	31.722	5847	3219
2	17.467	31.721	5847	3219
3	17.467	31.721	5847	3219
4	17.467	31.721	5847	3219
5	17.468	31.721	5847	3219
6	17.467	31.722	5847	3219
7	17.467	31.723	5847	3219
8	17.467	31.720	5847	3219
9	17.467	31.720	5847	3219
10	17.467	31.722	5847	3219
V_L (avg) = 5847 m/s, V_S (avg) = 3219 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 3

ตารางที่ 20

ลำดับในการวัด	t_L (μs)	t_s (μs)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	13.329	31.090	5731	3194
2	17.328	31.089	5731	3194
3	17.327	31.090	5732	3194
4	17.326	31.089	5732	3194
5	17.326	31.090	5732	3194
6	17.327	31.089	5731	3194
7	17.327	31.089	5732	3194
8	17.327	31.090	5731	3194
9	17.326	31.090	5732	3194
10	17.327	31.091	5731	3194
V_L (avg) = 5731 m/s, V_s (avg) = 3194 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 4

ตารางที่ 22

ลำดับในการวัด	t_L (μs)	t_s (μs)	V_L (m/s)	V_s (m/s)
1	17.453	31.796	5844	3207
2	17.452	31.796	5844	3207
3	17.450	31.795	5845	3208
4	17.451	31.795	5844	3208
5	17.452	31.795	5844	3208
6	17.451	31.800	5844	3207
7	17.450	31.795	5845	3208
8	17.451	31.798	5844	3207
9	17.451	31.796	5844	3207
10	17.451	31.796	5844	3207
V_L (avg) = 5844 m/s, V_s (avg) = 3207 m/s				

แสดงค่าความเร็วคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้แต่ละครั้งและค่าความเร็วเฉลี่ยของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กเส้นหมายเลข 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยวิธีอัลตราโซนิกขนาดความเร็วของคลื่นตามยาวและคลื่นตามขวางที่วัดได้สำหรับ เหล็กเหนียวและเหล็กเส้นแต่ละชิ้นสามารถนำมาคำนวณค่า Young's modulus (E), Shear modulus (G) และ Poisson's ratio (ν) ได้โดยแสดงในตารางที่ 23 สำหรับเหล็กเหนียวและ ตารางที่ 24 สำหรับเหล็กเส้น

ตารางที่ 23

เหล็กเหนียว หมายเลข	V_L (m/s)	V_s (m/s)	V_s/V_L	E (GPa)	G (GPa)	ν
1	5885	3234	0.549	207.775	80.992	0.284
2	5910	3241	0.548	210.054	81.742	0.285
3	5885	3217	0.546	207.297	80.557	0.287
4	5844	3235	0.553	200.856	80.655	0.290
5	5928	3236	0.545	210.400	81.742	0.288

ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเหนียวที่วัดได้โดยวิธีอัลตราโซนิก

ตารางที่ 24

เหล็กเส้น หมายเลข	V_L (m/s)	V_s (m/s)	V_s/V_L	E (GPa)	G (GPa)	ν
1	5855	3204	0.547	191.565	74.415	0.286
2	5805	3210	0.554	190.101	74.470	0.278
3	5847	3219	0.550	194.956	76.087	0.283
4	5731	3194	0.557	192.291	75.471	0.275
5	5844	3207	0.548	188.365	73.402	0.285

ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่วัดได้โดยวิธีอัลตราโซนิก

เพื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติทางกลที่วัดได้โดยวิธีอัลตราโซนิกและวิธีทดสอบทางกลในการทดลองจึงได้นำเหล็กเหนียวและเหล็กเส้นแต่ละชิ้นไปวัดค่าสมบัติทางกลด้วยวิธีทดสอบทางกลจะได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 25 สำหรับเหล็กเหนียวและตารางที่ 26 สำหรับเหล็กเส้น

ตารางที่ 25

เหล็กเหนียวหมายเลข	E (GPa)	ν
1	208.6	0.25
2	212.1	0.25
3	190.6	0.25
4	201.9	0.25
5	208.6	0.25

ตารางที่ 26 ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่วัดได้โดยวิธีทดสอบทางกล

ตารางที่ 26

เหล็กเส้นหมายเลข	E (GPa)	ν
1	196.7	0.25
2	189.4	0.25
3	191.4	0.25
4	192.0	0.25
5	193.9	0.25

ค่าสมบัติทางกลของเหล็กเส้นที่วัดได้โดยวิธีทดสอบทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 การทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ในเหล็กหล่อ

ในการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ในเหล็กหล่อเพื่อศึกษาโครงสร้างภายใน สำหรับการทดลองนี้ได้เตรียมเหล็กหล่อที่มีค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ภายในเหล็กหล่อต่างๆ กันจำนวน 5 ตัวอย่าง โดยเหล็กหล่อทั้ง 5 ชิ้นถูกเตรียมขึ้นจากการนำไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่างๆ กัน เพื่อให้มีโครงสร้างภายในที่แตกต่างกันแล้วจึงนำมาวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่น โดยอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้กำเนิดคลื่นมีขนาดความถี่ 2.25 MHz ชนิดกำเนิดคลื่นตามยาวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ของบริษัท PANAMETRICS ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่วัดได้สำหรับเหล็กหล่อแต่ละชิ้นจะนำไปใช้พิจารณาพร้อมกับสเปกตรัมของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างภายในของเหล็กหล่อ ในตารางที่ 27 จะแสดงขนาดความหนา, อุณหภูมิ ความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อและความเร็วคลื่นตามยาวที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อแต่ละชิ้นที่เตรียมขึ้นสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิก ในรูปที่ 65 - 69 จะแสดงรูปร่างและขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้น ซึ่งขนาดแอมพลิจูดที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.66) และในตารางที่ 28 จะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นที่วัดได้จากเหล็กหล่อแต่ละชิ้น

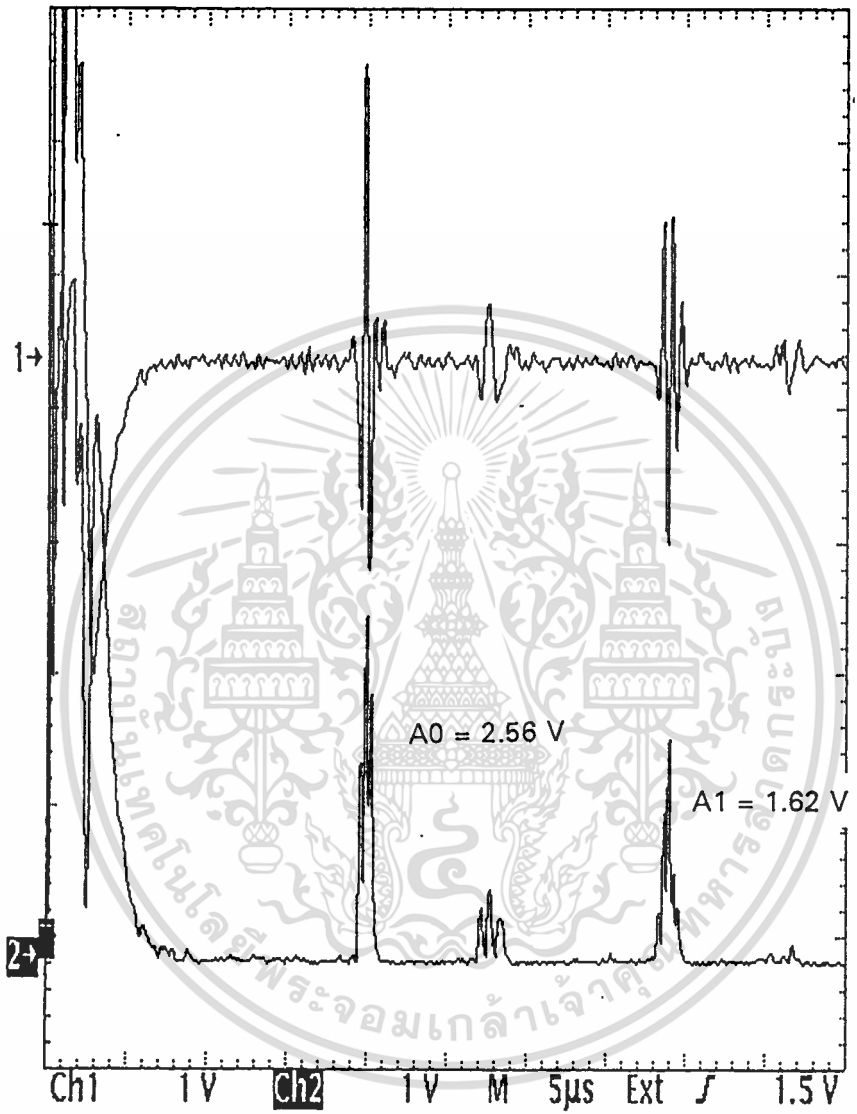
ตารางที่ 27

เหล็กหล่อ หมายเลข	ความหนา (mm)	อุณหภูมิ ความ ร้อนที่ให้ แก่ เหล็กหล่อ (°C)	t_L (μ s)	V_L (m/s)
1	41.44	500	19.036	4353
2	35.73	800	16.832	4245
3	38.74	700	18.650	4154
4	38.66	850	19.000	4069
5	38.77	750	19.100	4059

แสดงขนาด, ความหนาของเหล็กหล่อ, อุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อ
และความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อที่เตรียมขึ้นแต่ละชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 65



$$A_0 = 2.56 \text{ V} \text{ และ } A_1 = 1.62 \text{ V}$$

$$\alpha_d = 3.97 \text{ dB}$$

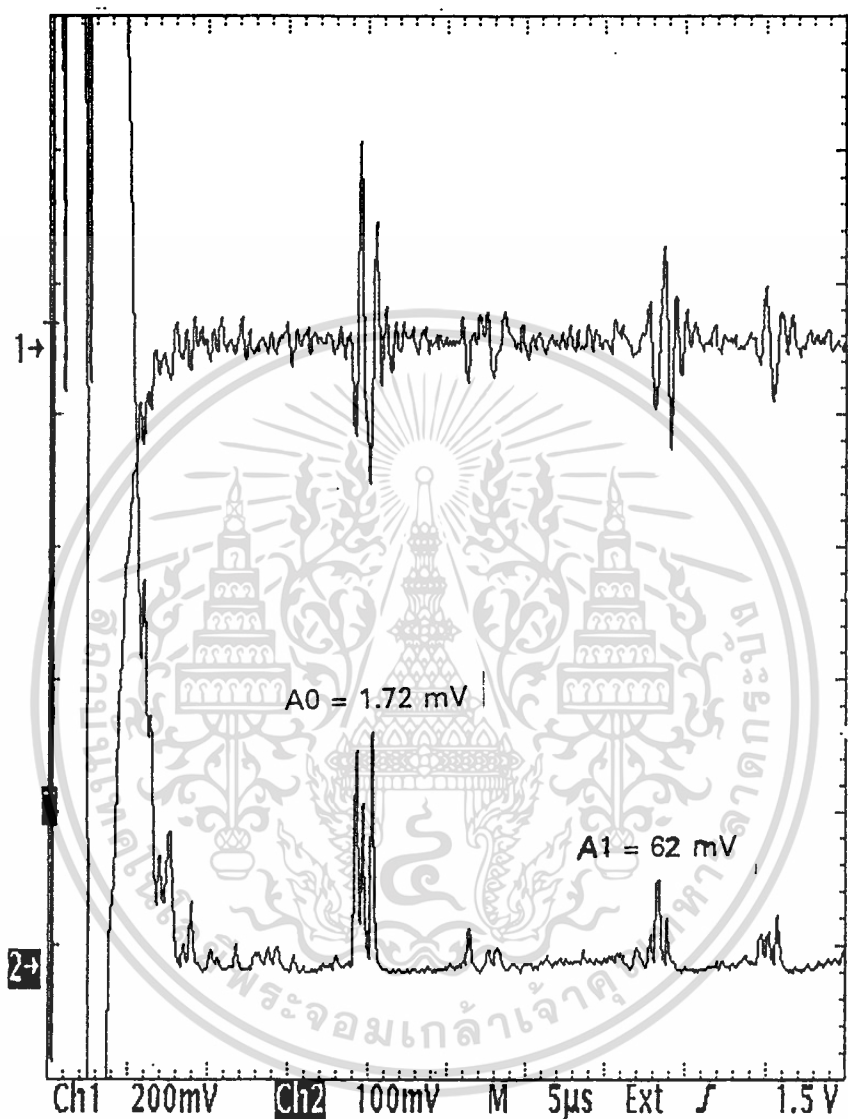
$$\alpha = 95.80 \text{ dB/m}$$

แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

หมายเลข 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 66



$$A_0 = 1.72 \text{ mV} \text{ และ } A_1 = 62 \text{ mV}$$

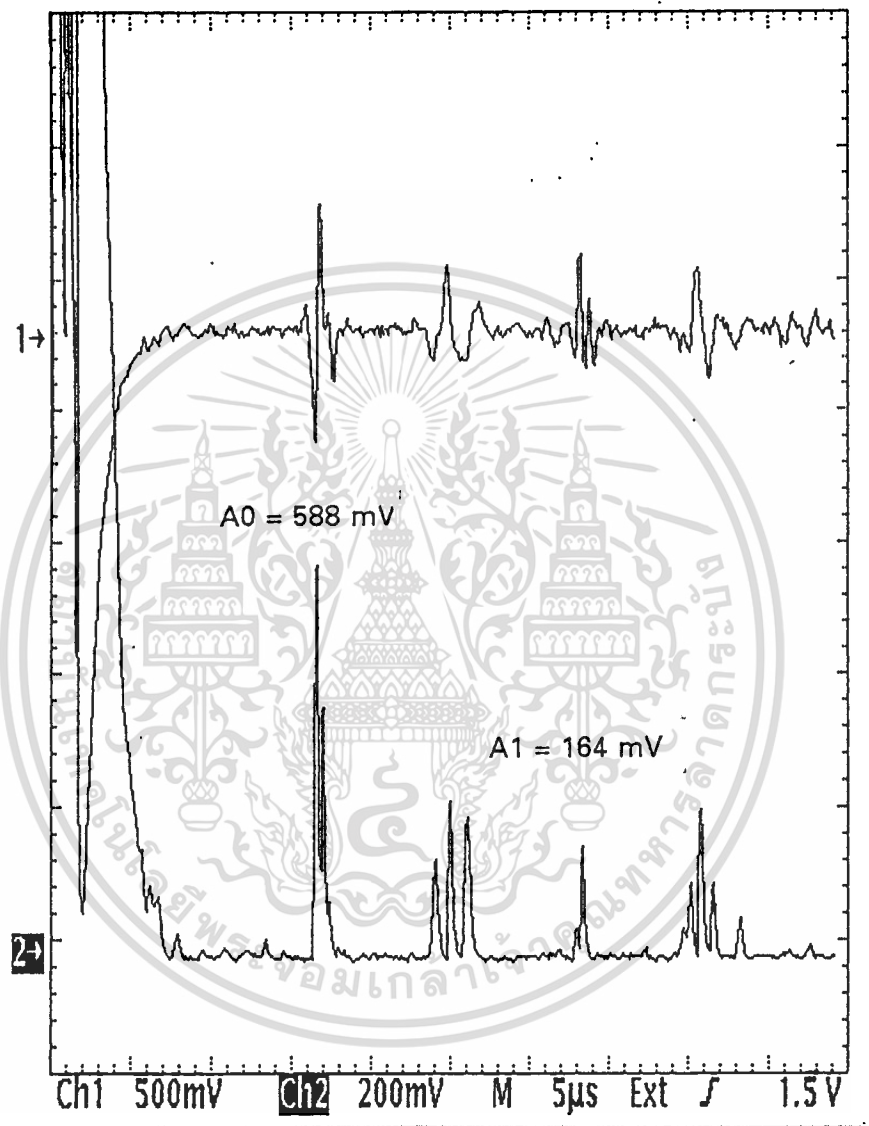
$$\alpha_d = 8.86 \text{ dB}$$

$$\alpha = 228.70 \text{ dB/m}$$

แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ
หมายเลข 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 67



$$A_0 = 588 \text{ mV} \text{ และ } A_1 = 164 \text{ mV}$$

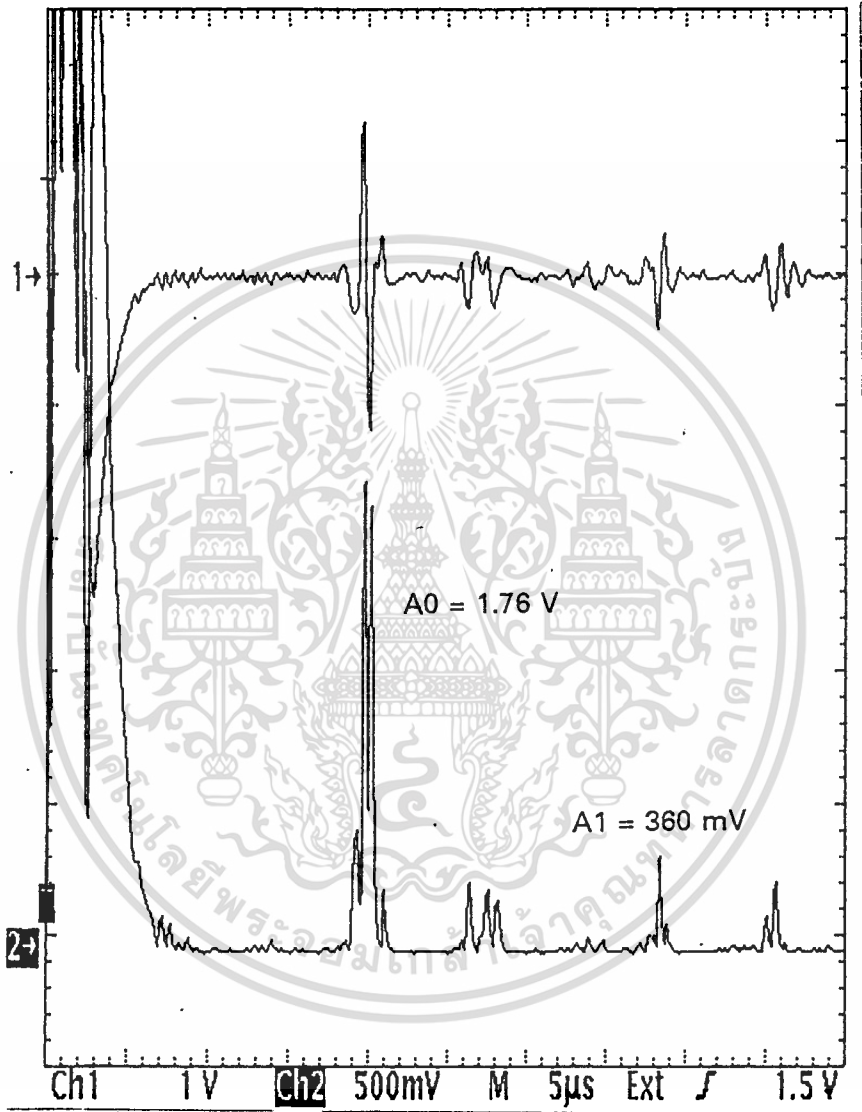
$$\alpha_d = 11.09 \text{ dB}$$

$$\alpha = 310.38 \text{ dB/m}$$

∴ แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ
หมายเลข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 68



$$A_0 = 1.76 \text{ V และ } A_1 = 360 \text{ mV}$$

$$\alpha_d = 13.78 \text{ dB}$$

$$\alpha = 355.12 \text{ dB/m}$$

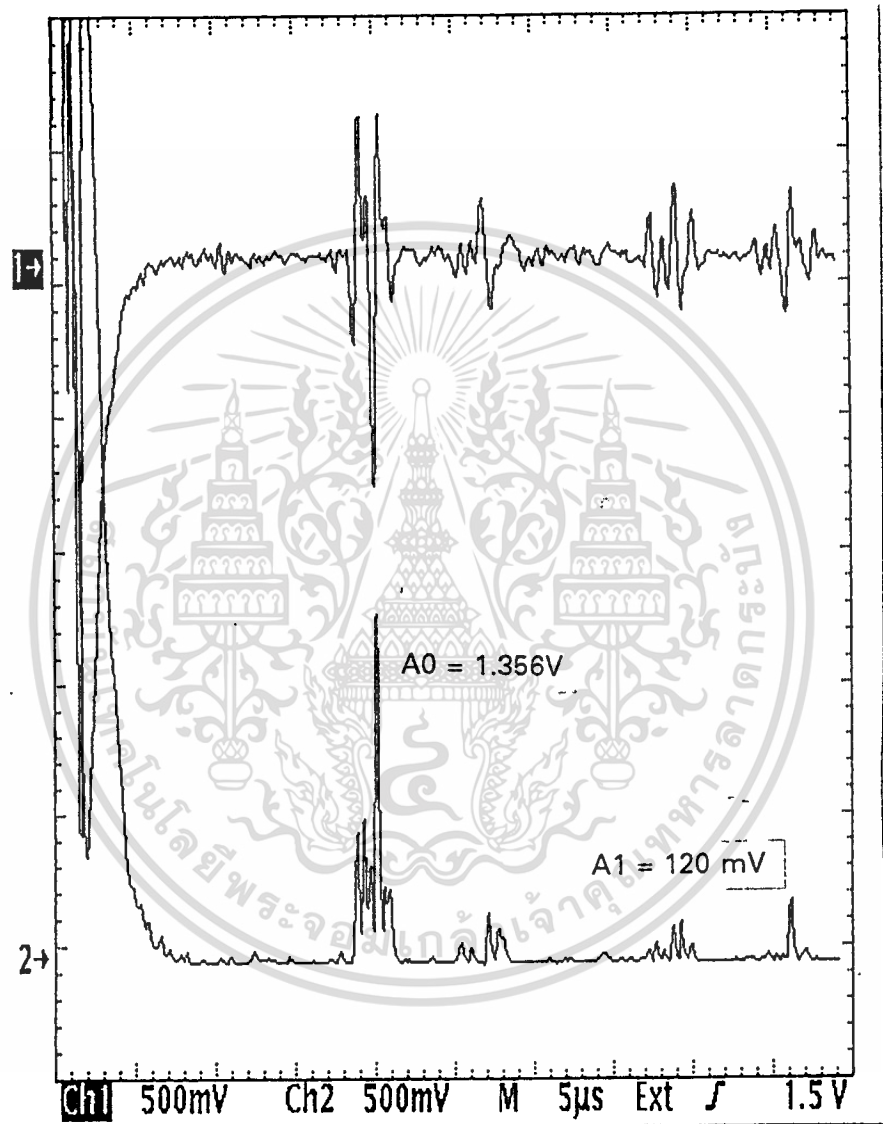
แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

หมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 69



$$A_0 = 1.356 \text{ V และ } A_1 = 120 \text{ mV}$$

$$\alpha_d = 21.06 \text{ dB}$$

$$\alpha = 734.82 \text{ dB/m}$$

แสดงรูปร่างและขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารหมายเลข 5 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 28

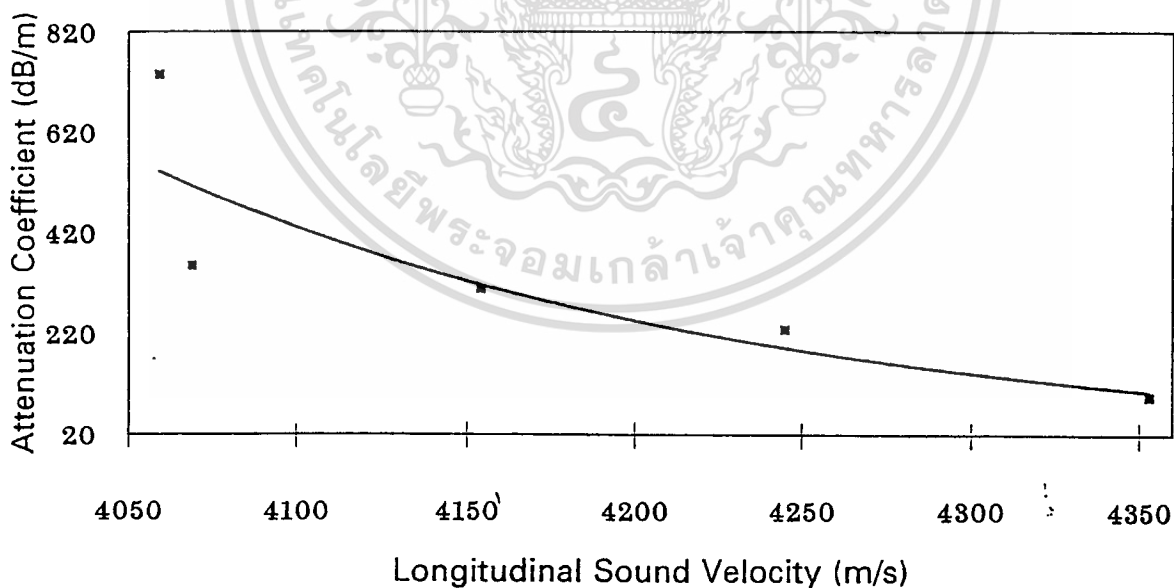
เหล็กหล่อหมายเลข	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นอัลตราโซนิก (dB/m)
1	95.8
2	228.7
3	310.3
4	355.4
5	734.8

ภาพที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้น

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นมาพล็อตกราฟโดยมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อแต่ละชิ้นจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 70

รูปที่ 70

Longitudinal Sound Velocity versus Attenuation Coefficient



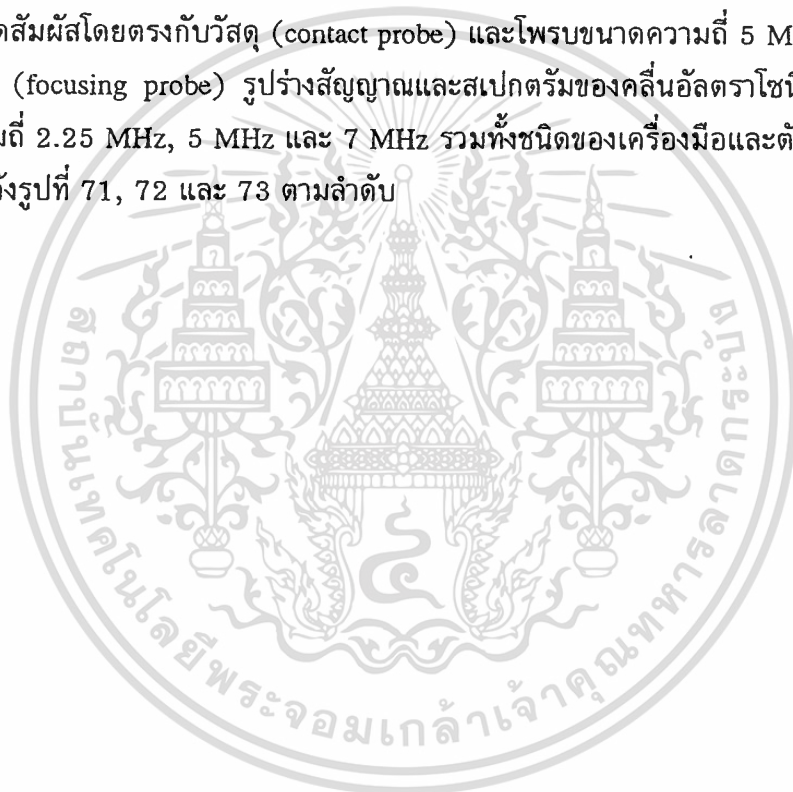
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นตามยาวและค่าสัมประสิทธิ์การ

ลดทอนของคลื่น

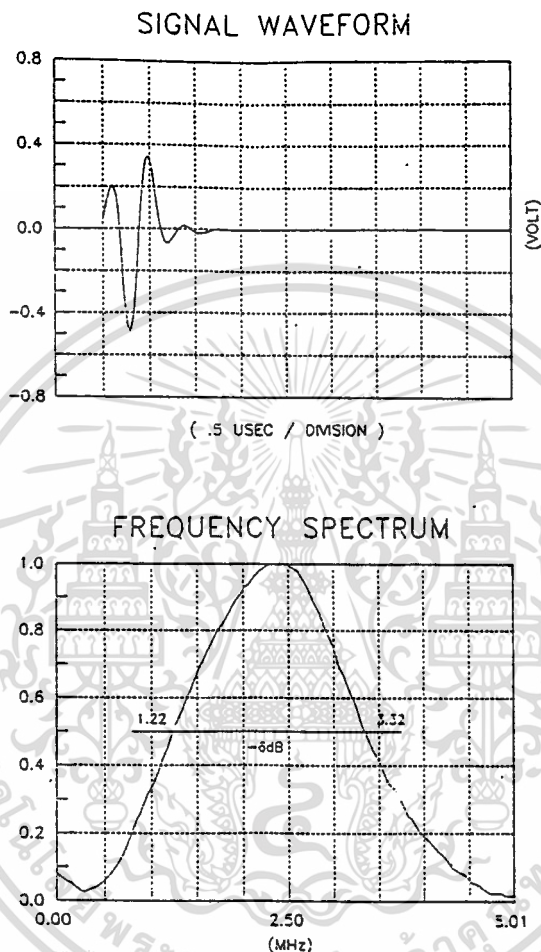
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 การทดลองวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

ในการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อจะใช้เหล็กหล่อชุดเดียวกันกับเหล็กหล่อที่ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นผลที่ได้จากการทดลองวัดสเปกตรัมจะนำไปใช้พิจารณาพร้อมกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นในเหล็กหล่อที่เตรียมขึ้นแต่ละชั้นเพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของเหล็กหล่อ ในการทดลองจะใช้อัลตราโซนิกโพรบกำเนิดคลื่นตามยาวขนาดความถี่ 2.25 MHz และ 5 MHz และ 7 MHz เป็นโพรบกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก โดยที่โพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz และ 7 MHz จะเป็นโพรบชนิดสัมผัสโดยตรงกับวัสดุ (contact probe) และโพรบขนาดความถี่ 5 MHz จะเป็นโพรบชนิดโฟกัส (focusing probe) รูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz, 5 MHz และ 7 MHz รวมทั้งชนิดของเครื่องมือและตัวกลางที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูปที่ 71, 72 และ 73 ตามลำดับ



รูปที่ 71

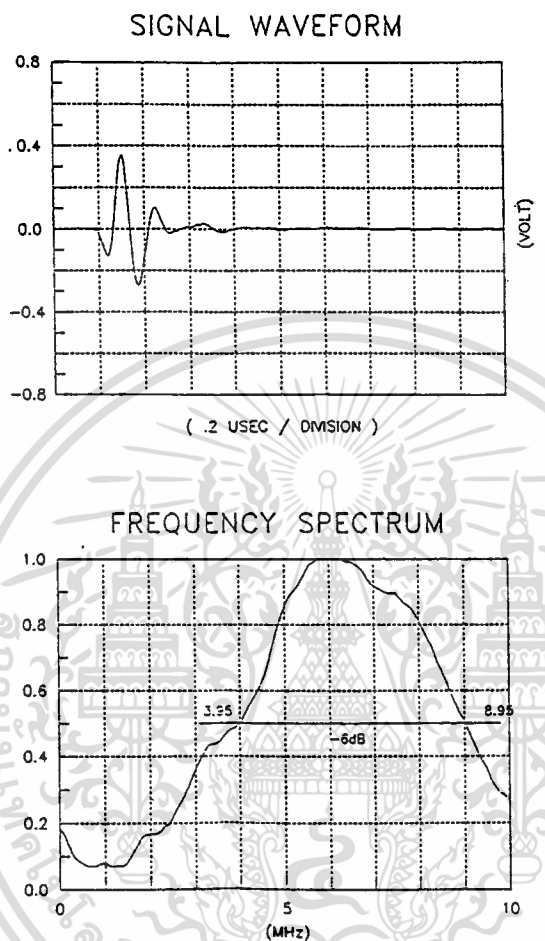


อัลตราโซนิกโพรบ	:	ขนาดความถี่ 2.25 MHz ของบริษัท PANAMETRICS เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ชนิดสัมผัสโดยตรง
เครื่องอัลตราโซนิก (Pulser/Receiver)	:	PANAMETRICS 5052
ดิจิตอลออสซิลโลสโคป	:	LECROY 9400
วัสดุตัวกลาง	:	เหล็กขนาด 1.3 นิ้ว

:- แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด
2.25 MHz (ข้อมูลจากบริษัท PANAMETRICS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 72

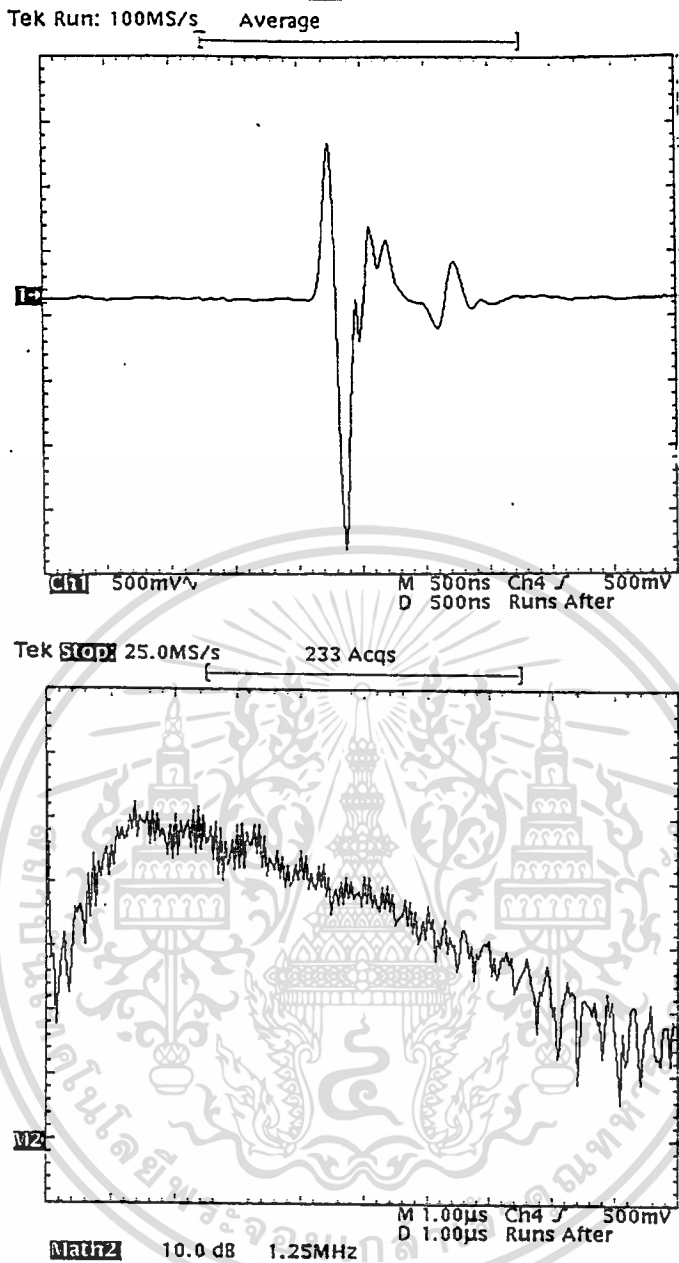


- อัลตราโซนิกโพรบ : ขนาดความถี่ 5 MHz ของบริษัท
PANAMETRICS เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว
ชนิดโฟกัส ระยะโฟกัส 0.75 นิ้ว
- เครื่องอัลตราโซนิก (Pulser/Receiver) : PANAMETRICS 5052
- ดิิจิตอลออสซิลโลสโคป : LECROY 9400
- วัสดุตัวกลาง : 0.25 in STEEL BALL; WATER PATH 0.8130

แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด
5 MHz (ข้อมูลจากบริษัท PANAMETRICS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 73



- อัลตราโซนิกโพรบ : ขนาดความถี่ 7 MHz ของบริษัท
KARL DEUTSCH เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว
ชนิดสัมผัสโดยตรง
- เครื่องอัลตราโซนิก (Pulser/Reciver) : ใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้
- ดิจิตอลออสซิลโลสโคป : TEKTRONIX TDS420
- วัสดุตัวกลาง : Calibration block (stainless steel) ของบริษัท
PANAMETRICS ตามมาตรฐาน ASTM E 164-90

แสดงรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด 7 MHz

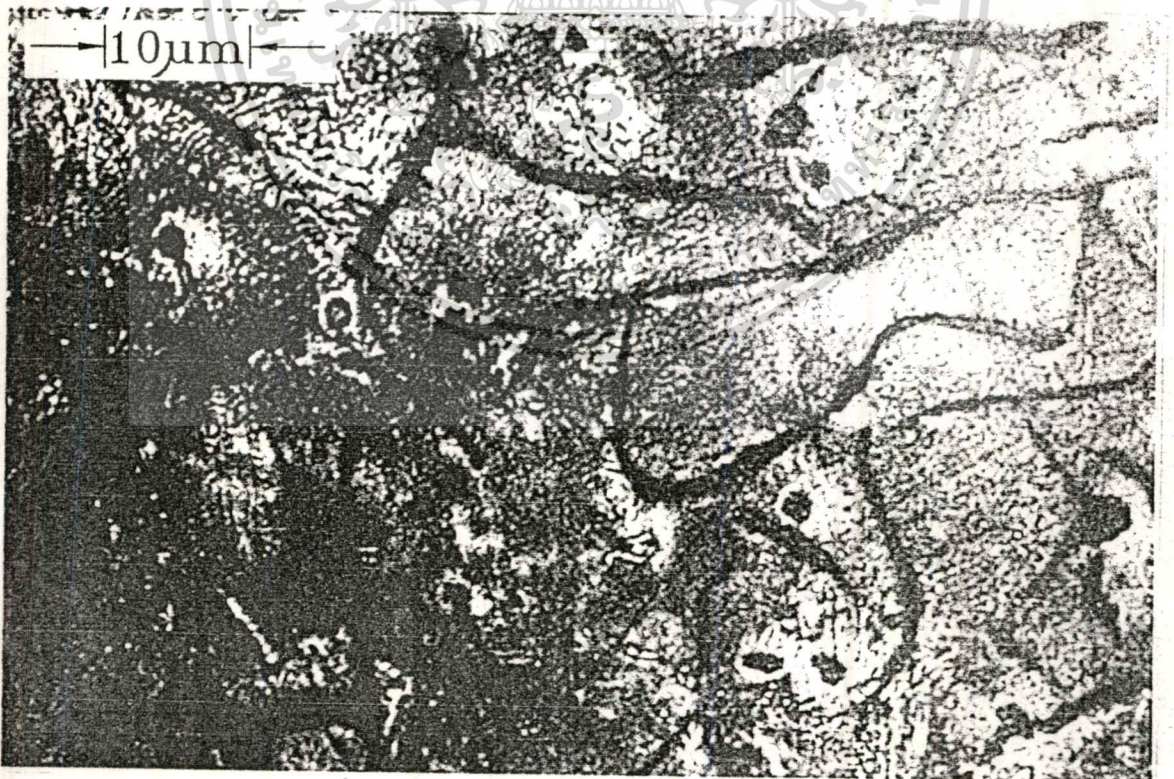
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 71 และ 72 เป็นรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz และ 5 MHz โดยข้อมูลในรูปได้มาจากไบรรับรองมาตรฐานของบริษัท PANAMETRICS ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก. และข้อมูลในรูปที่ 73 เป็นรูปร่างสัญญาณและสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่ได้จากโพรบขนาด 7 MHz โดยเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการวัดเป็นเครื่องที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ตัวกลางที่ใช้ในการวัดคือ Calibration block ทำมาจากวัสดุ stainless steel ของบริษัท PANAMETRICS ตามมาตรฐาน ASTM E 164-90 โดยมีไบรรับรองมาตรฐานแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

ในการทดลองวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อทั้ง 5 ชั้น จะทำการวัดสเปกตรัมของคลื่นที่ได้จากโพรบทั้งสามค่าความถี่เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชั้น โดยสเปกตรัมที่วัดได้แต่ละค่าความถี่ของโพรบจะนำไปพิจารณาร่วมกับภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อในแต่ละชั้น รูปร่างสัญญาณ, สเปกตรัมของคลื่นแต่ละค่าความถี่เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อรวมทั้งภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแต่ละชั้นมีดังนี้

3.1 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อแต่ละชั้น

ภาพที่ 74



ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 75



ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 2

ภาพที่ 76



ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 77



ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 4

ภาพที่ 78

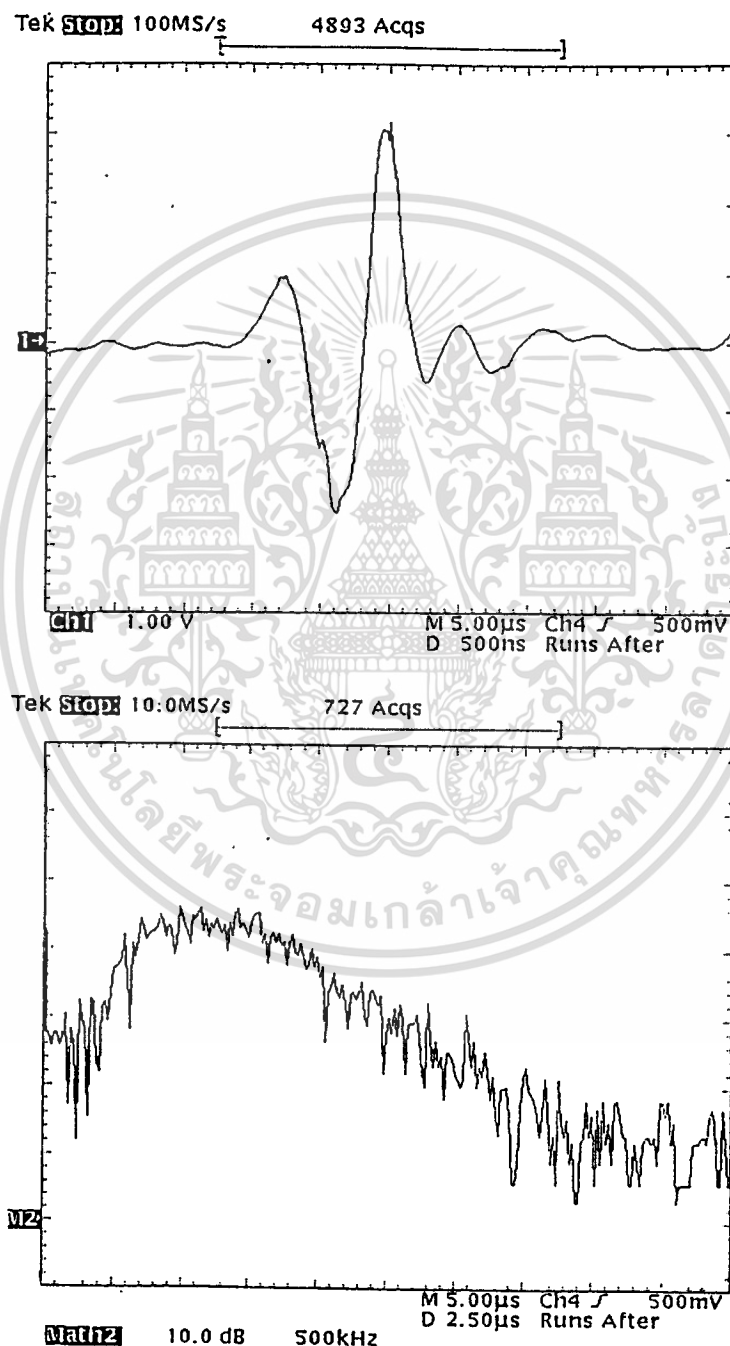


ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อหมายเลข 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

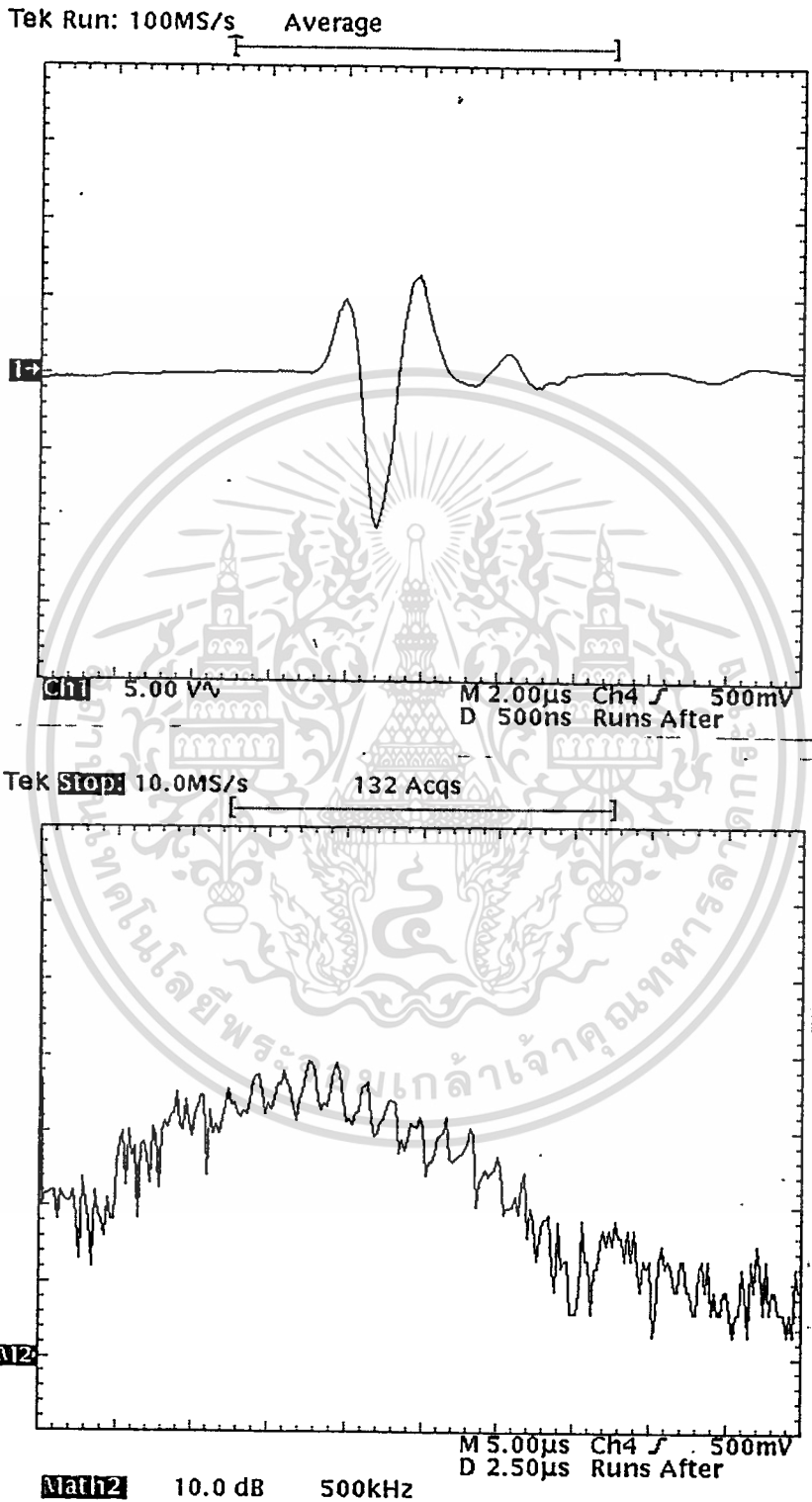
3.2 ผลการวัดสเปกตรัมและรูปร่างสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชั้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz

รูปที่ 79



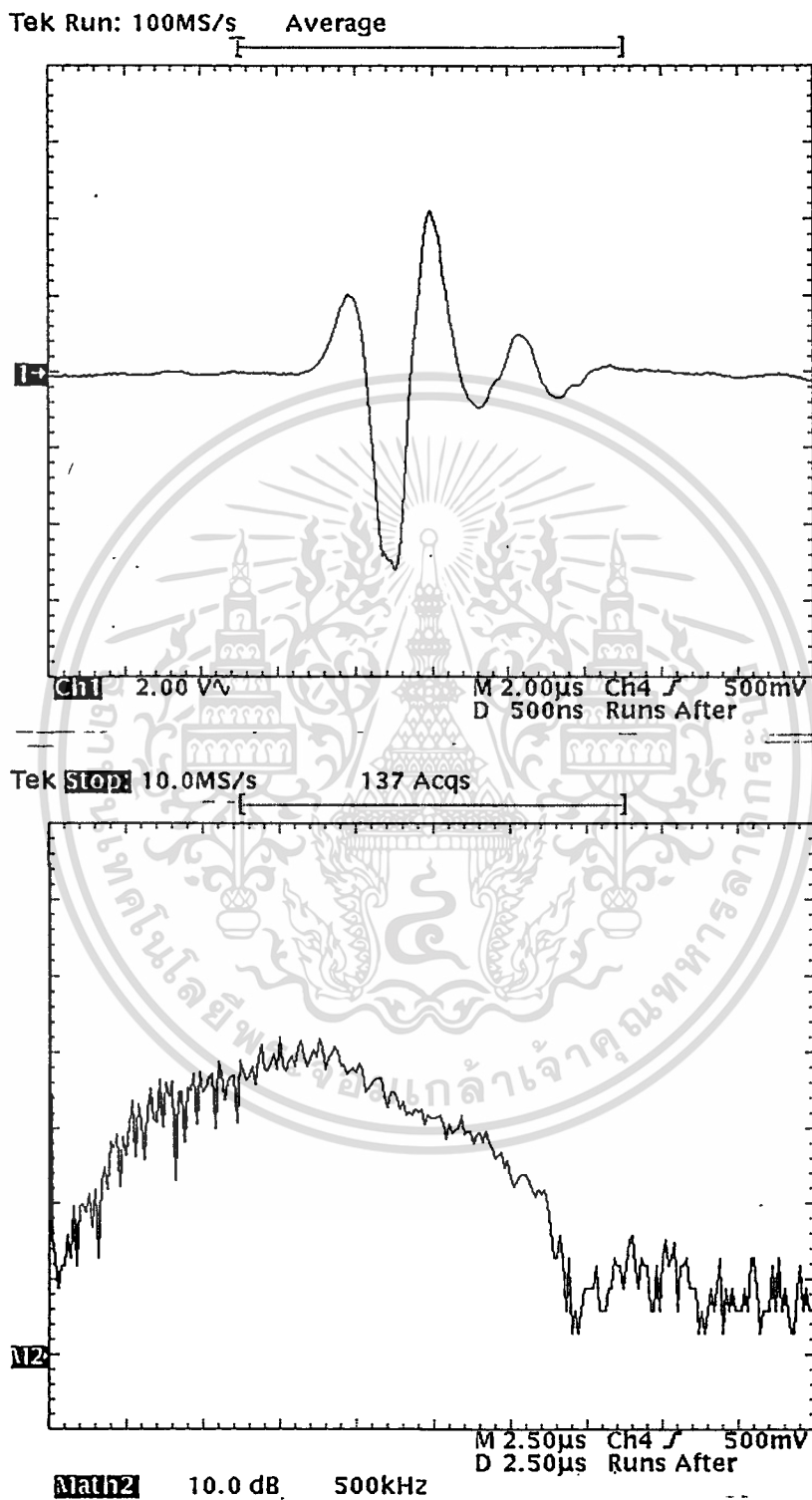
(เหล็กหล่อหมายเลข 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



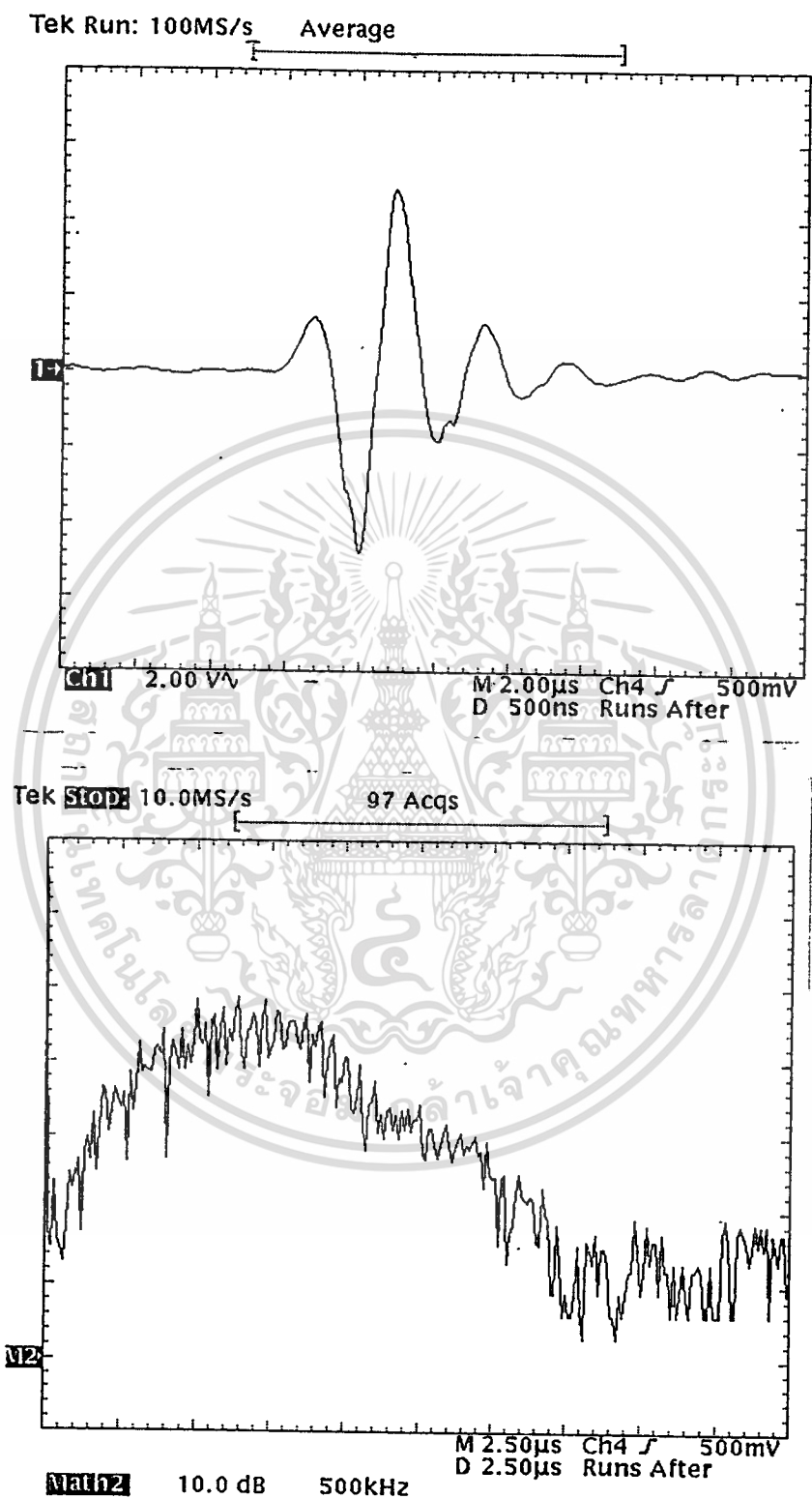
(เหล็กหล่อหมายเลข 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



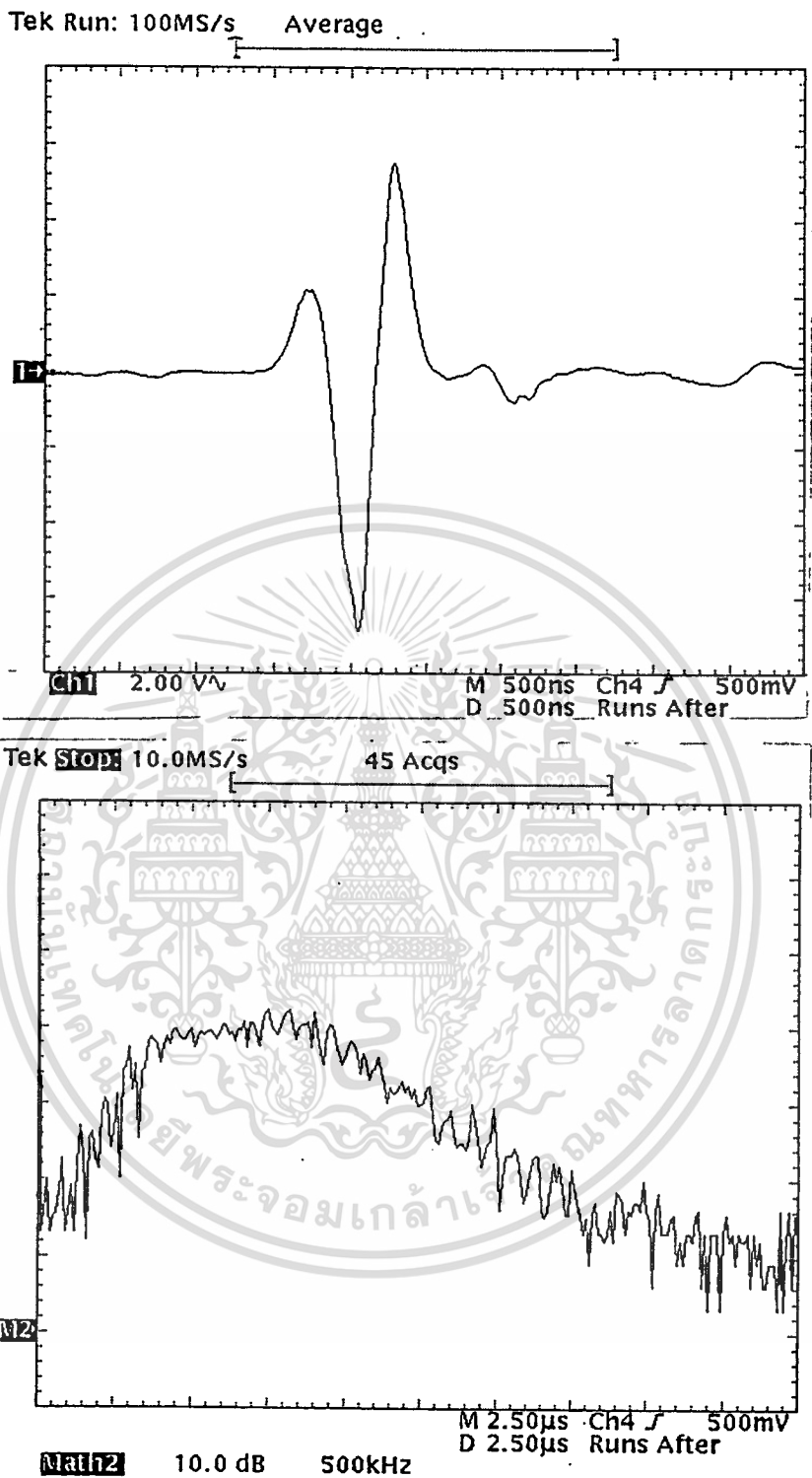
(เหล็กหล่อหมายเลข 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(เหล็กหล่อหมายเลข 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



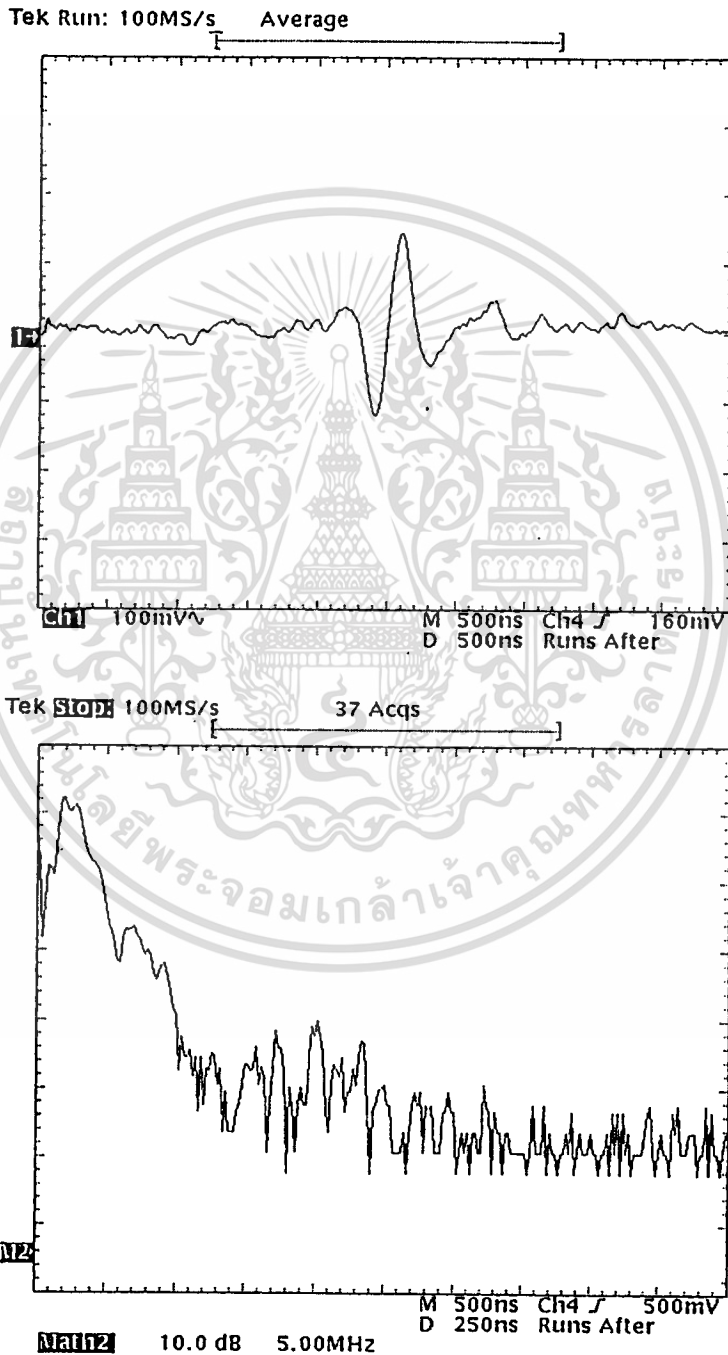
(เหล็กหล่อหมายเลข 5)

รูปที่ 79 แสดงสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้นโดยใช้โพรบขนาดความถี่ 2.25 MHz

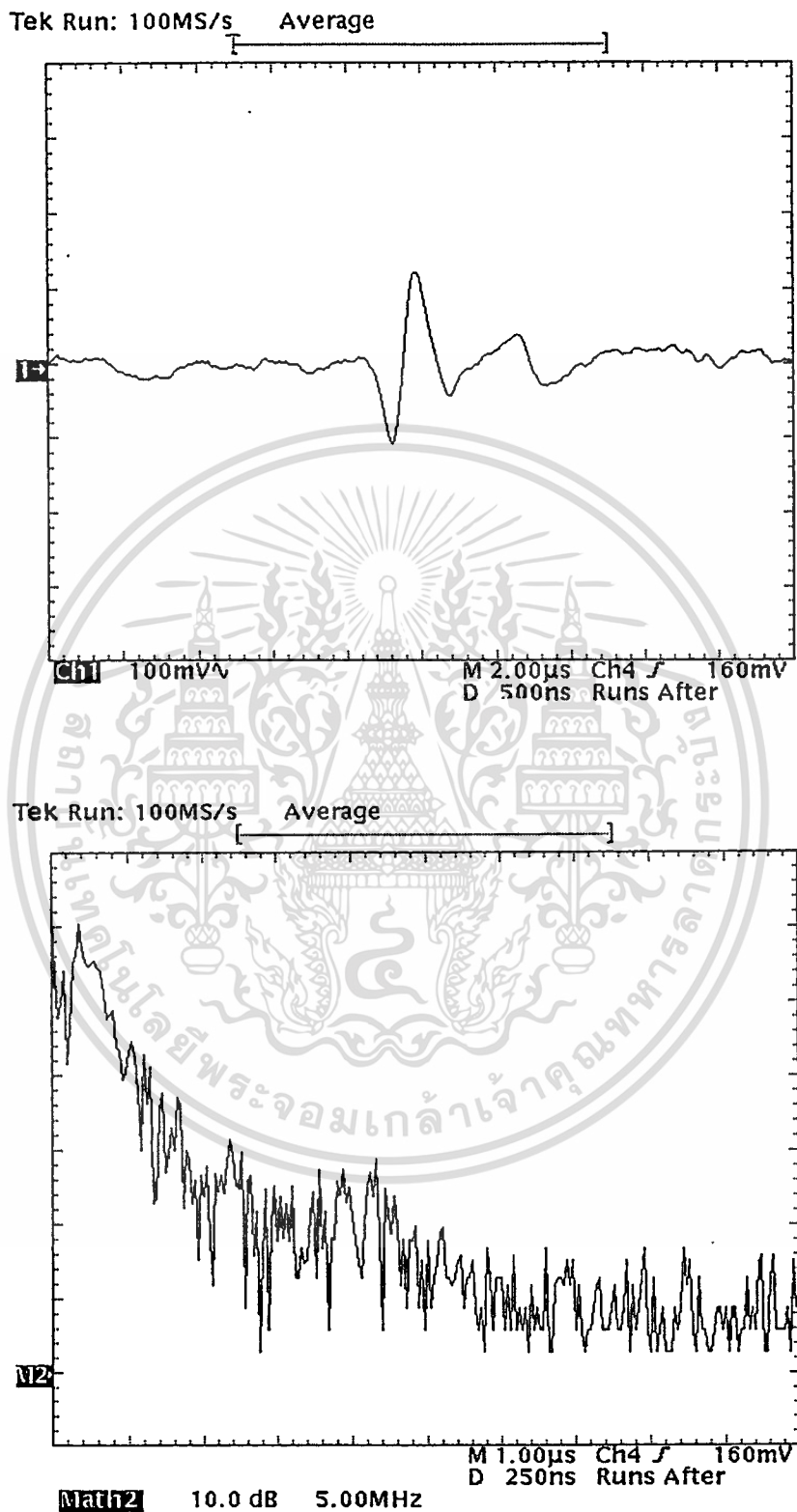
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ผลการวัดสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน
เหล็กหล่อแต่ละชั้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 5 MHz

รูปที่ 80

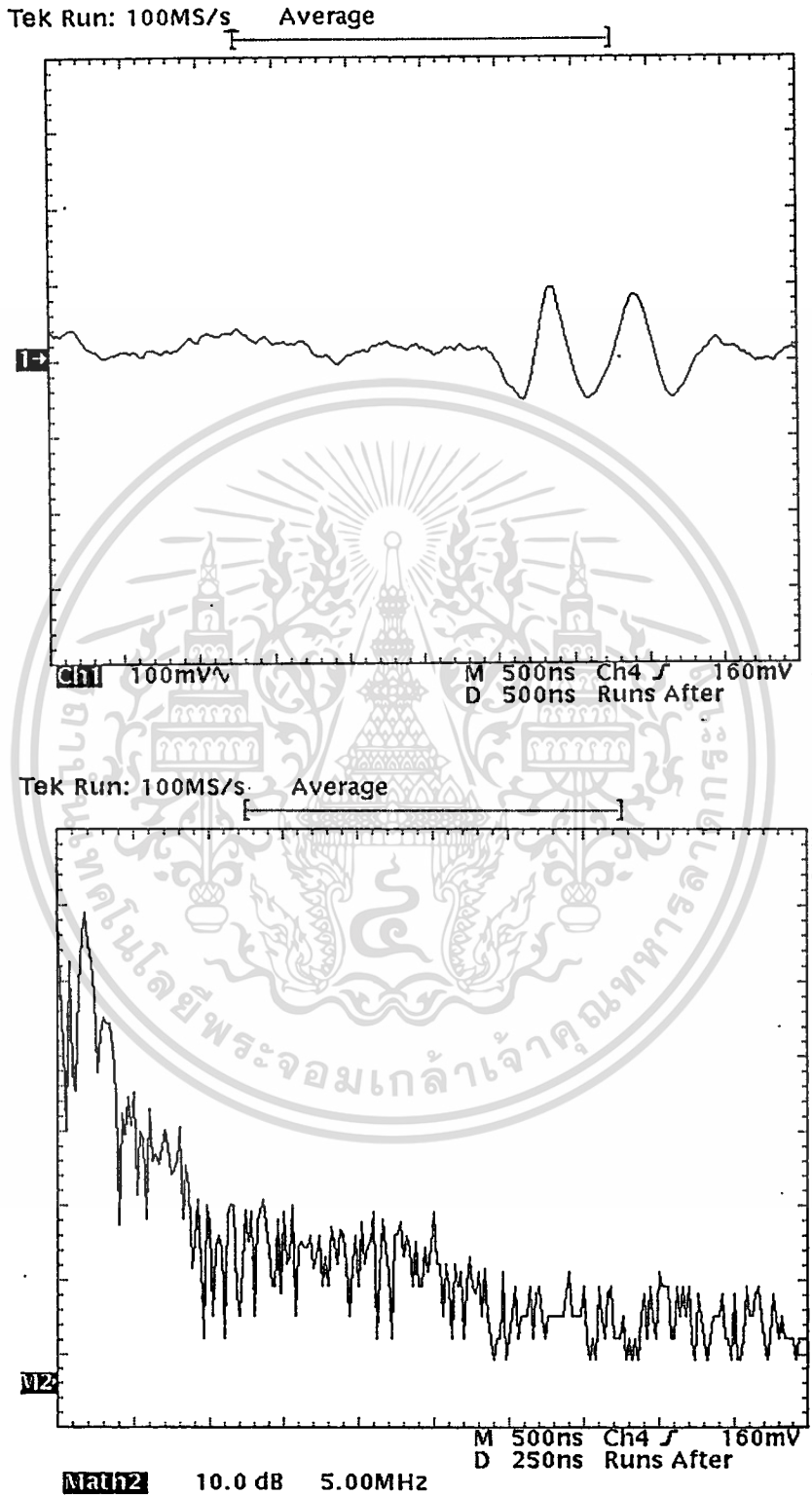


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



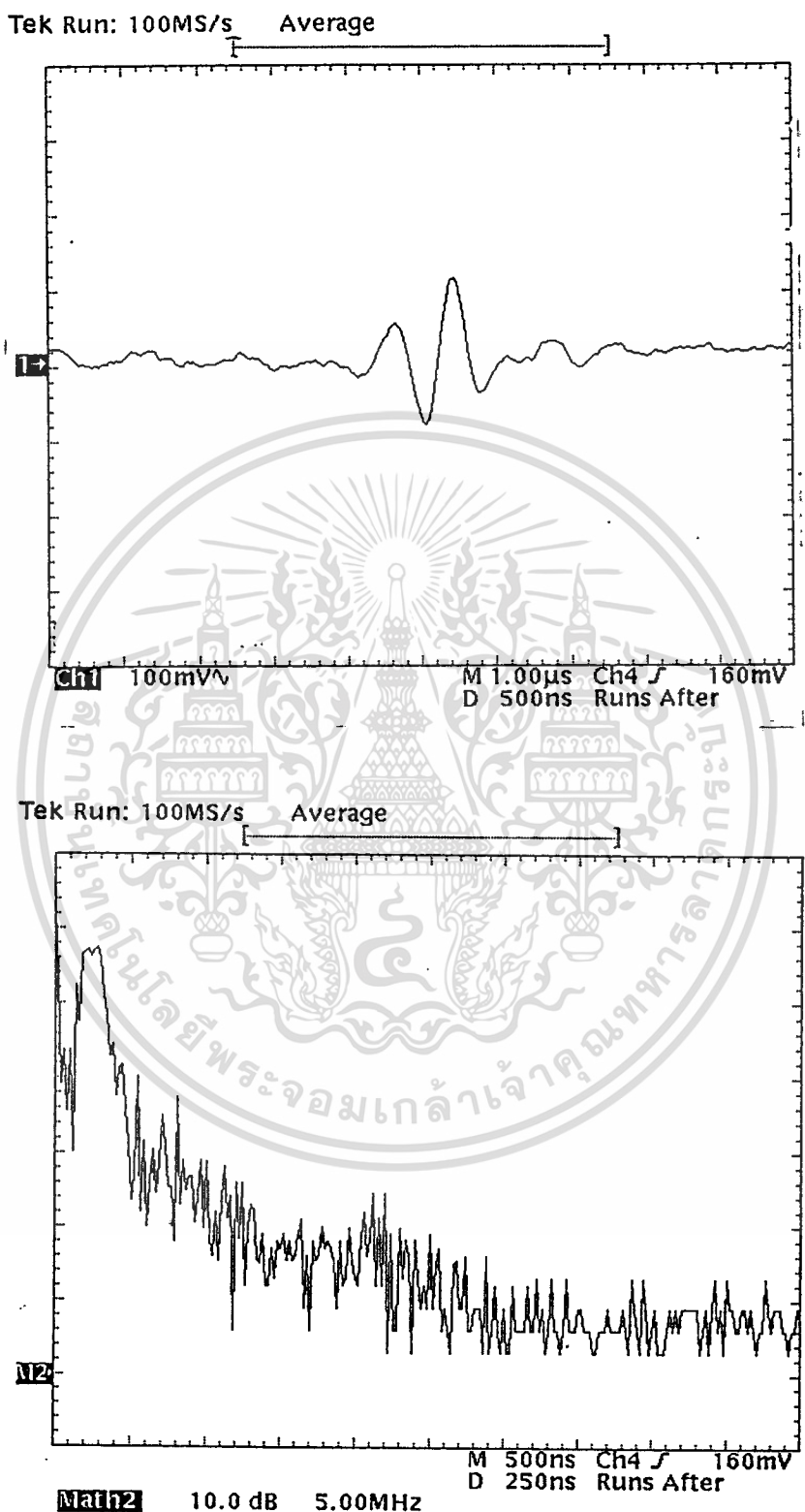
(เหล็กหล่อหมายเลข 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



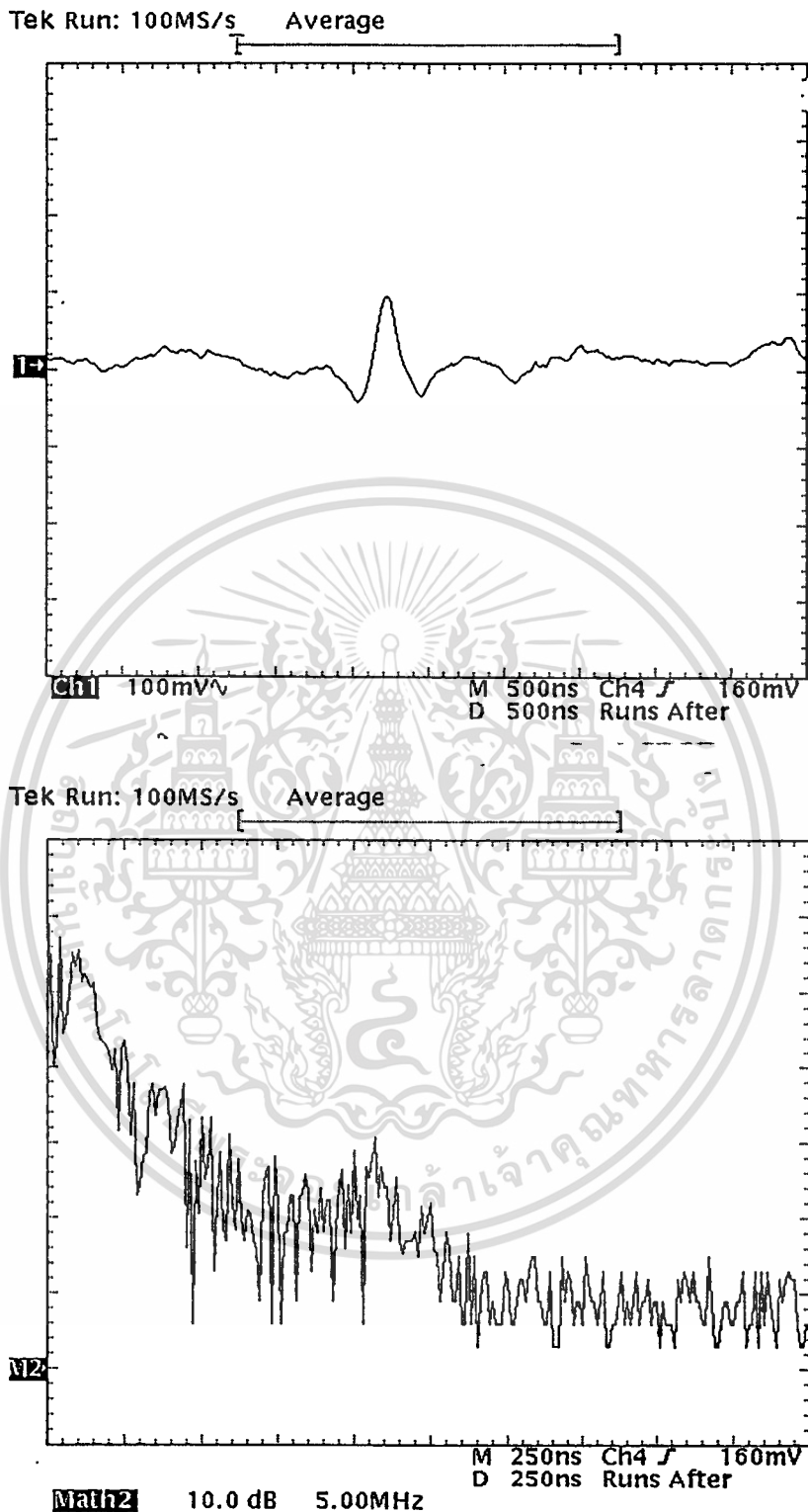
(เหล็กหล่อหมายเลข 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(เหล็กหล่อหมายเลข 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



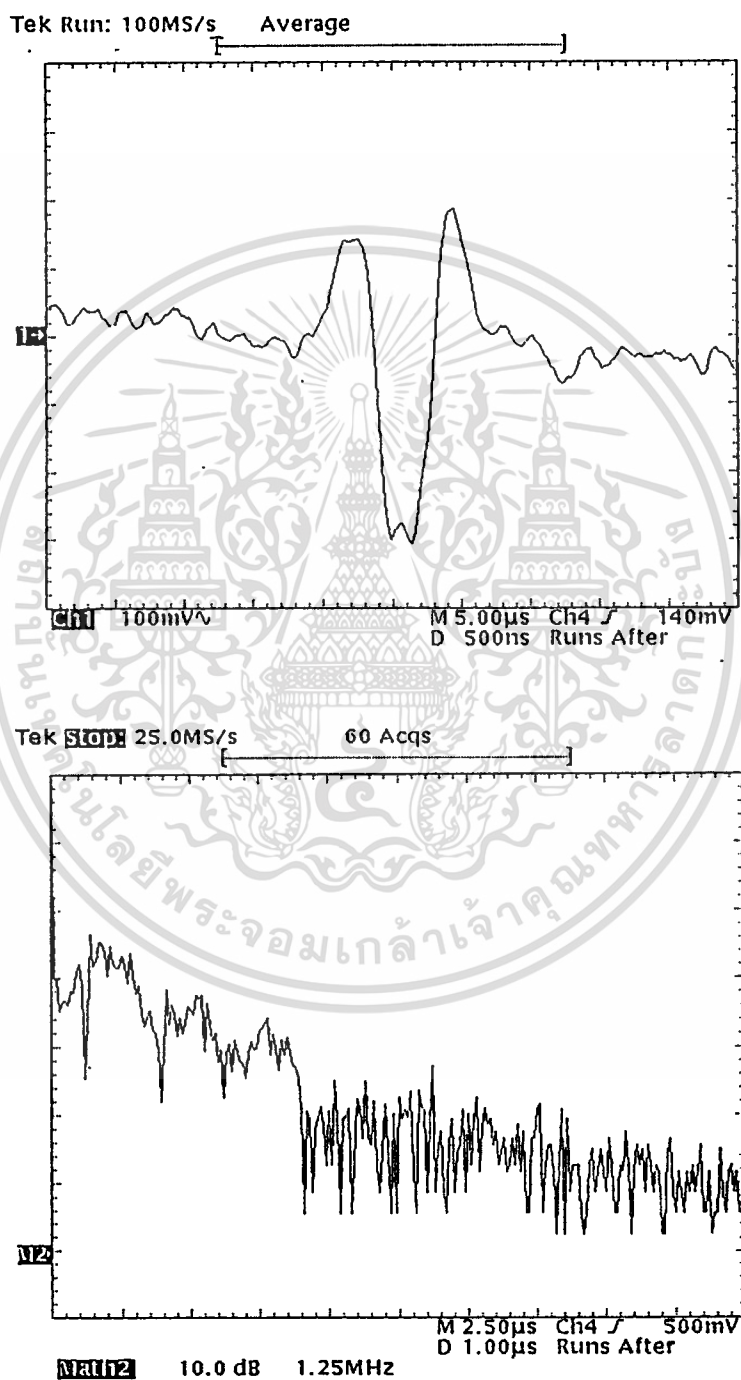
(เหล็กหล่อหมายเลข 5)

รูปที่ 80 แสดงสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชิ้นโดยใช้โพรบขนาดความถี่ 5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

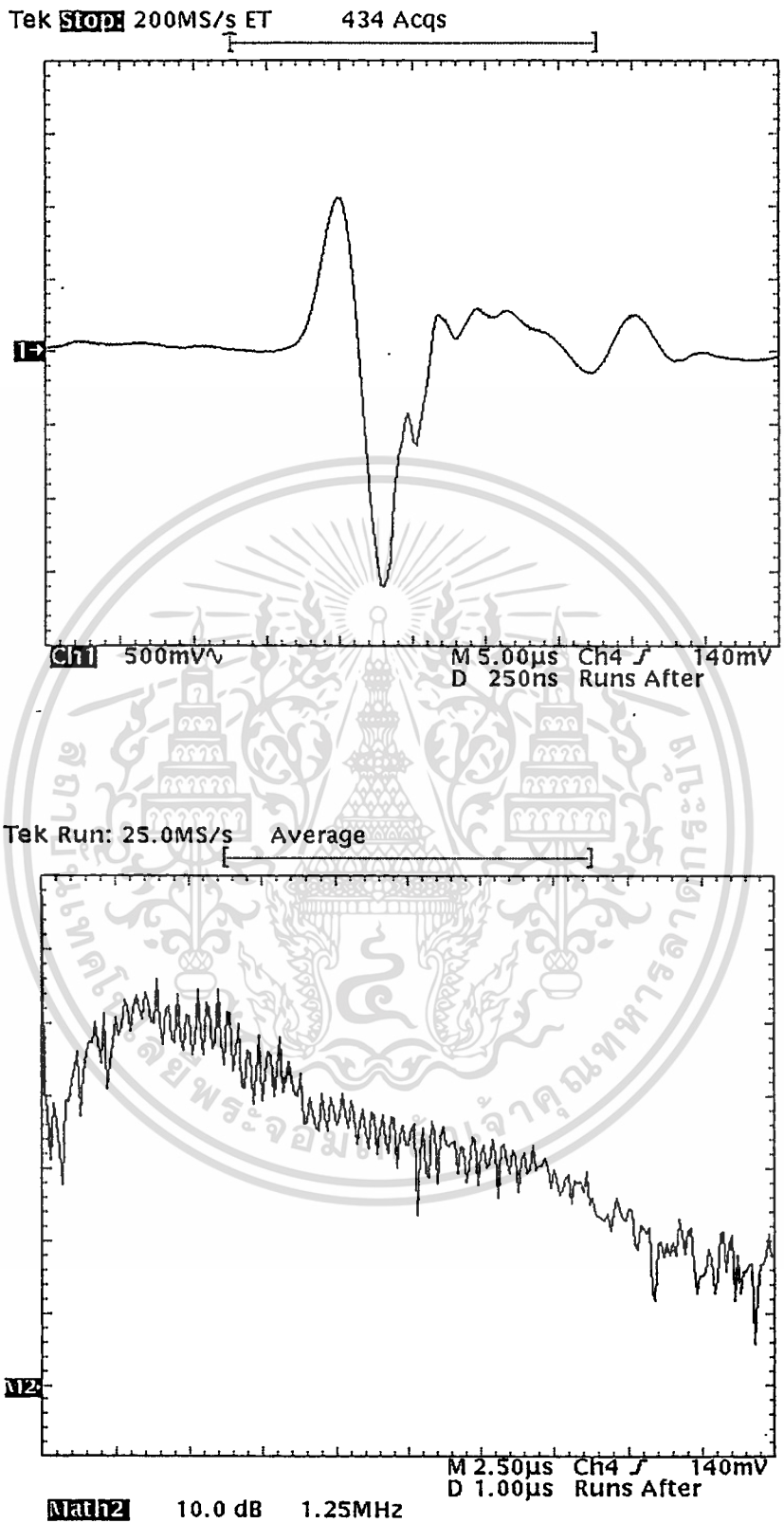
3.4 ผลการวัดสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน
เหล็กหล่อแต่ละชิ้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 7 MHz

รูปที่ 81



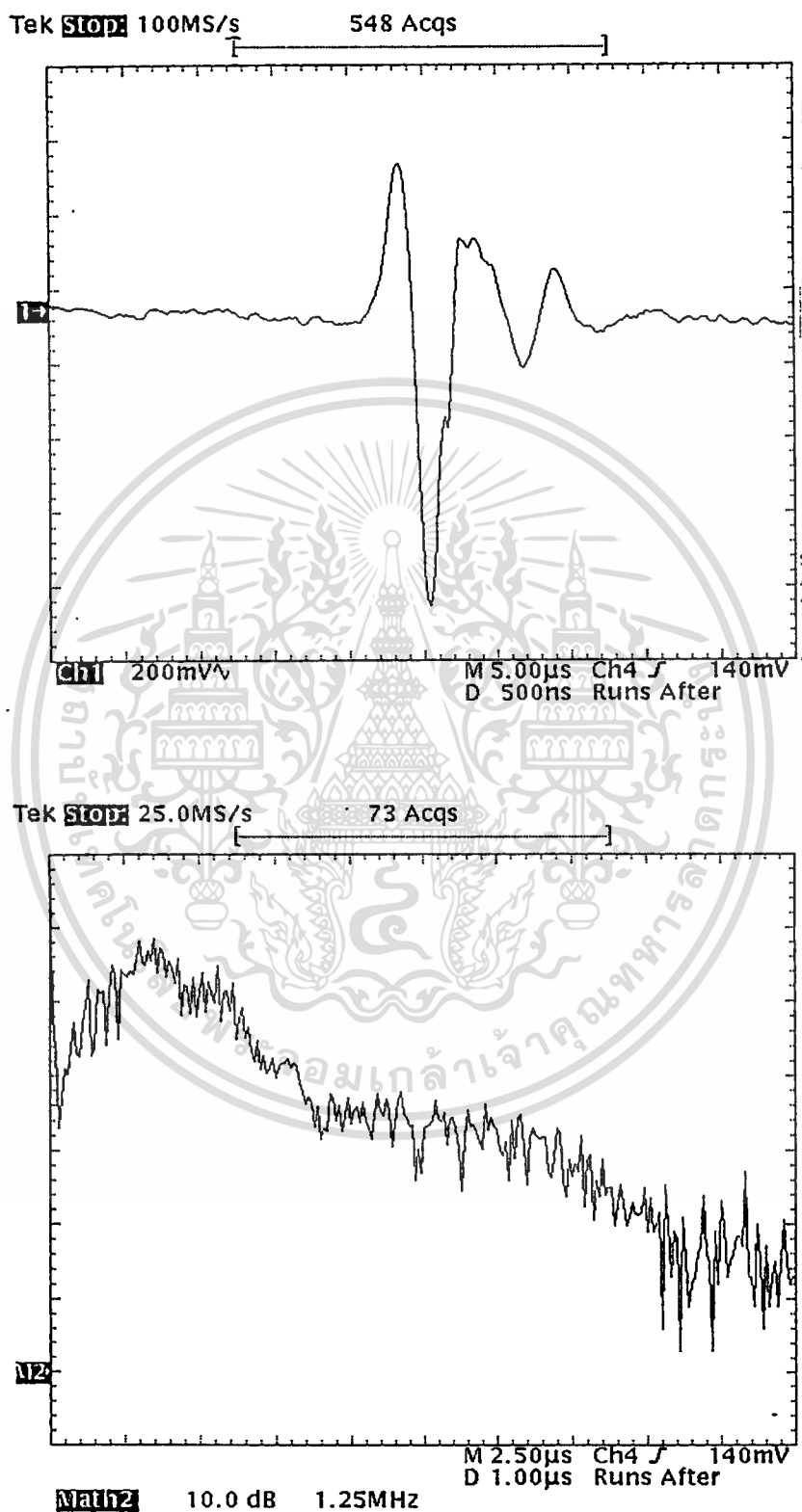
(เหล็กหล่อหมายเลข 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



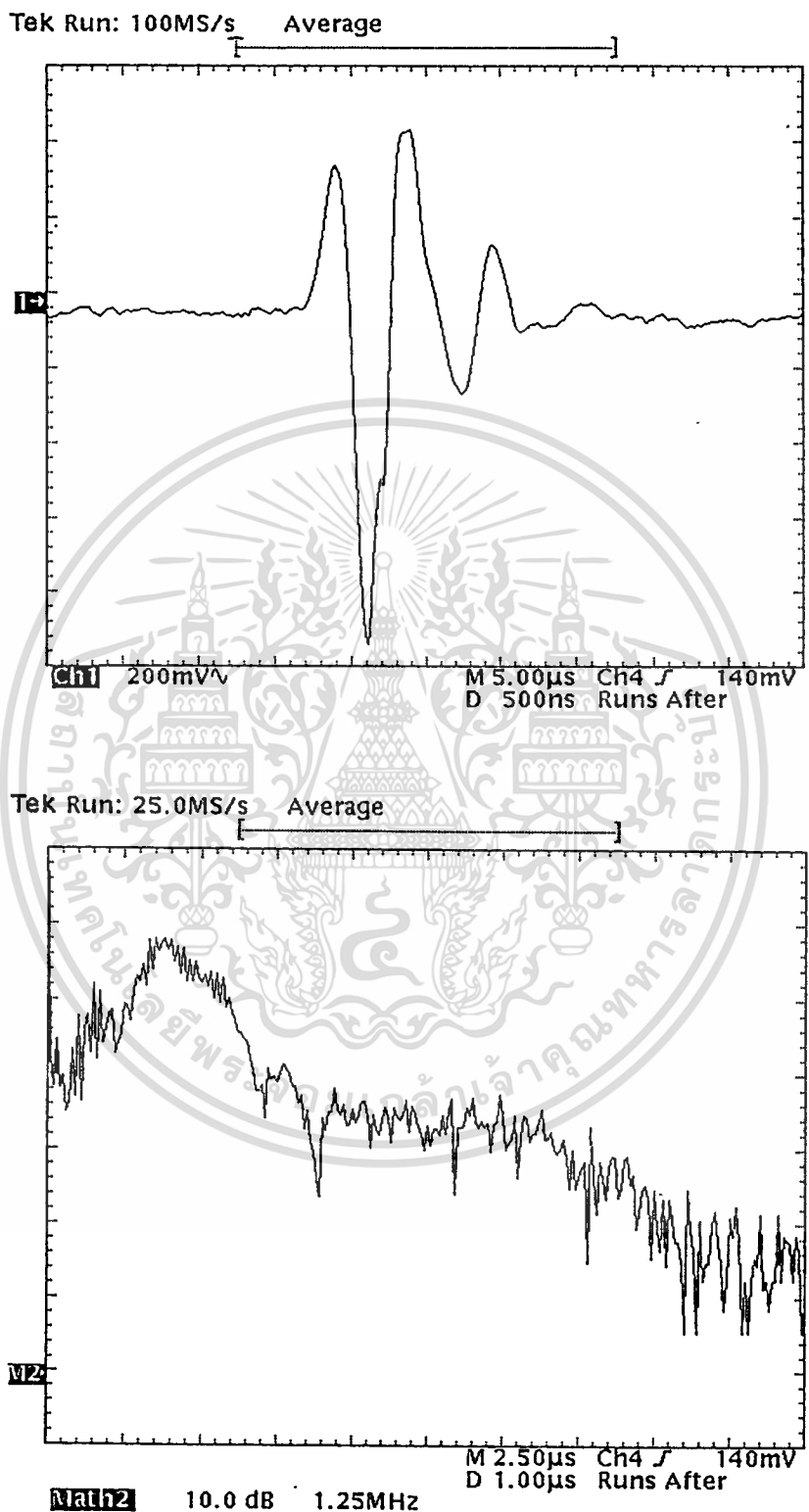
(เหล็กหล่อหมายเลข 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



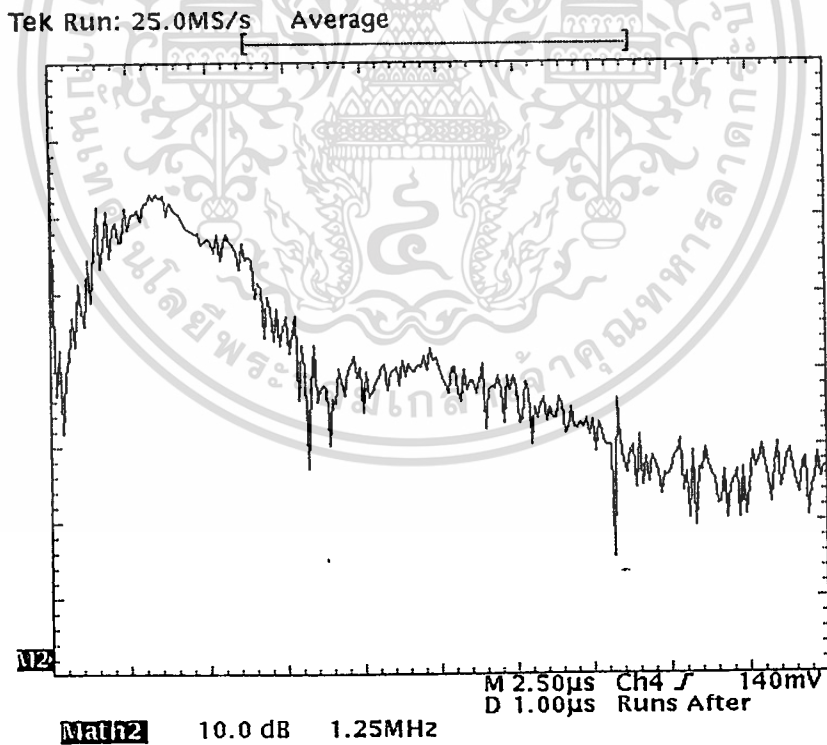
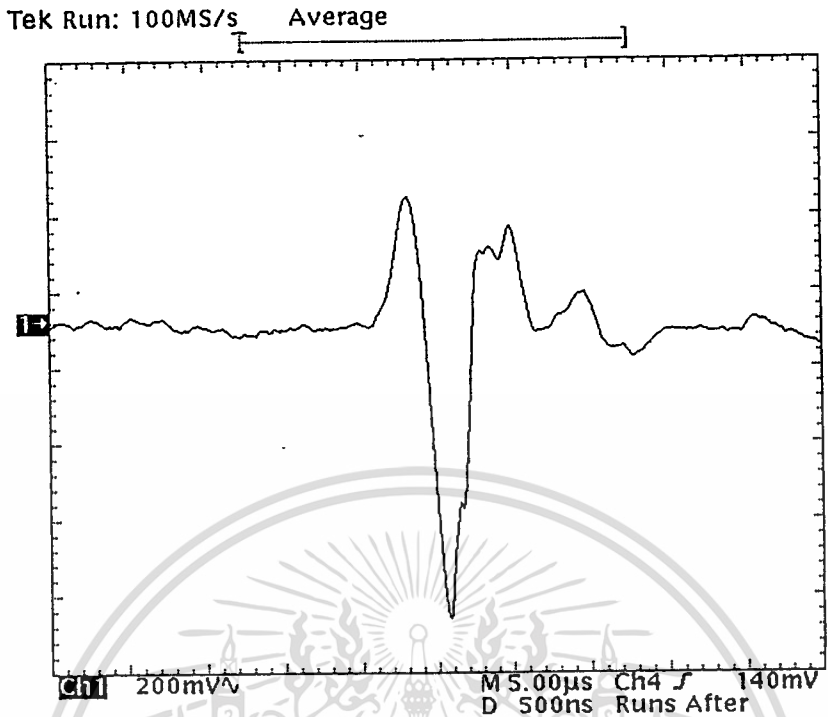
(เหล็กหล่อหมายเลข 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(เหล็กหล่อหมายเลข 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(เหล็กหล่อหมายเลข 5)

**รูปที่ 81 แสดงสเปกตรัมและสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับลูกแรกเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน
เหล็กหล่อแต่ละชั้นโดยใช้โพรบขนาดความถี่ 7 MHz**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

ในการทดลองวัดค่าสมบัติทางกลของวัสดุของแข็งโดยเป็นการทดลองวัดเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีอัลตราโซนิกกับผลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีทางกล ในขั้นต้นผู้วิจัยได้นำเหล็กหล่อมาใช้เป็นวัสดุสำหรับวัดทดลองเปรียบเทียบกับวิธีการวัดทั้งสองคือวิธีอัลตราโซนิกและวิธีทางกล โดยได้ทำการเตรียมเหล็กหล่อด้วยการนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ เพื่อให้เหล็กหล่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน และโดยสมมุติฐานแล้วเมื่อเหล็กหล่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในจะทำให้ค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นการเตรียมเหล็กหล่อด้วยการนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ สามารถเตรียมเหล็กหล่อที่มีค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ภายในเหล็กหล่อขนาดต่าง ๆ กันได้ และจากทฤษฎีทางฟิสิกส์ในบทที่ 2 จะเห็นว่าวัสดุที่มีค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในทั้งความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางต่างกันจะมีค่าสมบัติทางกลหรือค่าสมบัติยืดหยุ่นคือ Young's modulus (E) shear modulus (G) , Poisson's ratio (ν) และ ค่าความทนแรงดึง (σ_u) แตกต่างกัน โดยธรรมชาติของเหล็กหล่อแล้วจะเป็นเหล็กที่มีความแข็งแต่เปราะ ยิ่งเมื่อนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยใช้วิธีการชุบแข็งดังที่กล่าวมาในบทข้างต้นแล้ว เหล็กหล่อจะยิ่งมีความเปราะมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เมื่อนำเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นไปวัดค่าสมบัติทางกลด้วยวิธีทางกลซึ่งเป็นการวัดแบบทำลายชิ้นวัสดุจึงไม่สามารถจะหาค่าโมดูลัสต่าง ๆ E , G และ ν ได้ เนื่องจากเหล็กหล่อจะไม่ยืดหยุ่นเหมือนเหล็กชนิดอื่น ๆ เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ แต่จะเกิดการการแตกหักขึ้นเมื่อแรงที่มากกระทำมีขนาดจนถึงค่าหนึ่ง จึงทำให้ค่าสมบัติทางกลที่เป็นค่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้ที่สามารถวัดได้ด้วยวิธีทางกลจึงมีเพียงค่าความทนแรงดึง (σ_u) เพียงค่าเดียว ดังนั้นการทดลองเปรียบเทียบผลการวัดค่าสมบัติทางกลด้วยวิธีอัลตราโซนิกกับวิธีทางกล จึงได้เลือกวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเหล็กหล่อก็คือเหล็กเหนียวและเหล็กเส้น ซึ่งเหล็กทั้งสองชนิดเป็นเหล็กมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเป็นต้น และจากข้อมูลของ H.E Boyer และ T.L.. Gall .ในหนังสือ 1985 Metals Handbook (Desk Edition , American Society for Metals , Metals Park , Oh) วัสดุชนิด Iron ; mild steel จะมีค่า Young's modulus เท่ากับ 212 GPa และ Poisson's ratio เท่ากับ 0.293 ซึ่งจากการวัดค่าสมบัติทางกลของเหล็กเหนียวและเหล็กเส้นด้วยวิธีอัลตราโซนิก ข้อมูลที่วัดได้แสดงในตารางที่ 23 และ 24 จะได้ค่าเฉลี่ยของค่า Young's modulus ของเหล็กเหนียวทั้ง 5 ชิ้นเท่ากับ 207.3 GPa และค่าเฉลี่ยของค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Poisson's ratio ของเหล็กเส้นทั้ง 5 ชั้นเท่ากับ 0.286 สำหรับเหล็กเส้นทั้ง 5 ชั้นจะมีค่า Young's modulus เฉลี่ยเท่ากับ 191.5 GPa และค่า Poisson's ratio เฉลี่ยเท่ากับ 0.281 และเมื่อใช้วิธีการวัดค่าสมบัติทางกลด้วยวิธีทางกล ข้อมูลที่วัดได้แสดงในตารางที่ 25 และ 26 สำหรับเหล็กเหนียวทั้ง 5 ชั้นจะได้ค่า Young's modulus เฉลี่ยเท่ากับ 204.4 GPa และค่า Poisson's ratio เฉลี่ยเท่ากับ 0.25 สำหรับเหล็กเส้นทั้ง 5 ชั้นจะได้ค่า Young's modulus เฉลี่ยเท่ากับ 192.7 GPa และค่า Poisson's ratio เฉลี่ยเท่ากับ 0.25 ซึ่งจากค่าเฉลี่ยของค่า Young's modulus และ Poisson's ratio ที่วัดได้ด้วยวิธีอัลตราโซนิกและวิธีทางกล จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องและใกล้เคียงกัน ซึ่งทั้งวิธีการวัดด้วยวิธีอัลตราโซนิกและการวัดด้วยวิธีทางกลจะมีความผิดพลาดในการวัดเกิดขึ้นอยู่ภายในระบบวัดทั้งสองวิธี การวัดด้วยวิธีอัลตราโซนิกค่า Young's modulus และค่า Poisson's ratio สามารถคำนวณได้จากความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นตามขวางที่เคลื่อนที่ในวัสดุตรวจสอบโดยใช้ความสัมพันธ์คือ

$$\nu = [0.5 - (V_s/V_L)^2] / [1 - (V_s/V_L)^2]$$

$$\text{และ } E = [\rho V_L^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu)] / (1 - \nu)$$

จะเห็นว่าในกรณีของการวัดค่า ν ความผิดพลาดในการวัดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากค่า V_s และ V_L ที่วัดได้ที่มีความถูกต้องหรือมีค่าความผิดพลาดเท่าใด ดังนั้นเทคนิคในการวัดค่าความเร็วให้มีความแม่นยำจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ค่า ν ที่คำนวณได้จากค่าความเร็ว มีความถูกต้องสูง ซึ่งจะส่งผลไปถึงค่า E ที่เป็นฟังก์ชันของ ν โดยมีตัวแปรที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดอีกหนึ่งตัวก็คือค่าความหนาแน่น (ρ) ของวัสดุ ในการทดลองนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นจากการวัดค่าความหนาแน่นที่ผิดพลาด วัสดุที่จะนำมาใช้ในการวัดคือ เหล็กหล่อ เหล็กเหนียวและเหล็กเส้นจึงถูกเตรียมให้มีรูปเป็นทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่อยู่ในบทที่ 5 เพื่อสามารถจะวัดปริมาตรได้อย่างถูกต้องเท่าที่สามารถจะทำได้ โดยวัตถุประสงค์ในการจัดการทดลองนี้ขึ้นมาก็เพื่อต้องการวัดค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อด้วยเครื่องมือวัดความเร็วพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งเหล็กหล่อที่จะทำการวัดจะถูกเตรียมโดยนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่แต่ละขนาดอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 27 เมื่อได้เหล็กหล่อที่มีโครงสร้างภายในต่าง ๆ กันด้วยการนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิขนาดต่าง ๆ แล้วจึงนำมาวัดค่าความเร็วของคลื่นตามยาวและความเร็วของคลื่นตามขวางเพื่อวัดค่าสมบัติทางกลโดยผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปและวิจารณ์ได้ดังนี้

1 ผลของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก

ด้วยกระบวนการให้ความร้อนแก่เหล็กหล่อซึ่งทำให้เหล็กหลอมมีโครงสร้างภายในที่เปลี่ยนแปลง จากข้อมูลในกราฟรูปที่ 55 และ 56 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหลอมมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในเหล็กหลอมมีขนาดลดลงทั้งความเร็วของคลื่นตามยาวและความเร็วของคลื่นตามขวาง และจากรูปที่ 57 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_s/V_L กับขนาดอุณหภูมิที่ให้แก่เหล็กหล่อ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่เหล็กหลอมมีค่าสูงขึ้นจะทำให้อัตราส่วนของความเร็วคลื่นตามขวางต่อความเร็วคลื่นตามยาวจะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงว่าอัตราการลดลงของความเร็วคลื่นตามยาวจะมีค่าสูงกว่าอัตราการลดลงของความเร็วคลื่นตามขวางเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่เหล็กหลอมมีค่าสูงขึ้น

2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับค่าสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ

โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.60), (2.61) และ (2.62) ความเร็วคลื่นตามยาวและความเร็วคลื่นขวางที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วที่สร้างขึ้นสามารถคำนวณค่า E, G และ U ของเหล็กหล่อแต่ละชิ้นได้ สามารถสรุปได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่า E, G และ U ได้ดังกราฟรูปที่ 58, 59 และ 60 ซึ่งจากข้อมูลในกราฟแสดงว่าเมื่อเหล็กหล่อถูกนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยอุณหภูมิที่ให้แก่เหล็กหลอมมีค่าสูงขึ้นจะทำให้เหล็กหลอมมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นลดลงค่า E, G และ U จึงลดลงเมื่ออุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่เหล็กหลอมสูงขึ้น

3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดึงกับค่าความเร็วคลื่นตามยาว

ด้วยวิธีอัลตราโซนิกไม่สามารถจะหาค่าความทนแรงดึงได้โดยตรง ดังนั้นค่าความทนแรงดึงที่วัดได้จึงได้มาจากการนำเหล็กหล่อไปวัดด้วยวิธีทางกล ค่าที่ได้สามารถนำมาสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อแต่ละชิ้นได้โดยข้อมูลแสดงอยู่ในกราฟรูปที่ 61 และ 62 จากข้อมูลในกราฟจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่เหล็กหลอมมีขนาดสูงขึ้นขนาดค่าความทนแรงดึงของเหล็กหล่อจะลดลง โดยค่าความทนแรงดึงจะมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับค่าความเร็วคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อ ดังนั้นด้วยวิธีอัลตราโซนิกค่าความทนแรงดึงของเหล็กหล่อสามารถจะหาขนาดได้โดยใช้วิธีการวัดค่าความเร็วของคลื่นตามยาวที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับค่า ความทนแรงดึง ของเหล็กหล่อโดยความสัมพันธ์จะได้มาจากการนำเหล็กหล่อชิ้นเดียวกันไปวัดความเร็วด้วยวิธีอัลตราโซนิกและวัดค่าความทนแรงดึงด้วยวิธีทางกลแล้วจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนและค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

จากการเตรียมเหล็กหล่อที่มีค่าความเร็วขนาดต่าง ๆ กัน 5 ชั้นแล้วนำมาวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน (α) ของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อแต่ละชั้นสามารถสรุปได้เป็นข้อมูลแสดงดังตารางที่ 28 ในรูปที่ 70 จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นตามยาวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ และจากข้อมูลในรูปที่ 70 จะเห็นว่า เมื่อเหล็กหล่อถูกเตรียมโดยการนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ขนาดอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในเหล็กหล่อลดลงและมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นสูงขึ้น แสดงว่าที่ขนาดอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนที่ให้แก่เหล็กหล่อสูงขึ้นขนาดเกรนของเหล็กหล่อจะมีขนาดใหญ่ขึ้นพลังที่ถูกดูดกลืนกลายเป็นพลังงานความร้อนและพลังงานส่วนที่เกิดการกระเจิงไปจะมีขนาดสูงขึ้นทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นมีขนาดสูงขึ้น โดยที่ความเร็วคลื่นเคลื่อนที่ได้ในเหล็กหล่อจะมีค่าต่ำลง

5 ผลการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อ

ในงานวิจัยที่ได้ทำการทดลองศึกษาการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อที่ได้เตรียมขึ้นให้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของคลื่นขนาดต่าง ๆ กัน ซึ่งเทคนิคการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างภายในของวัสดุจัดเป็นเทคนิคที่ผู้ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมคลื่นอัลตราโซนิกจะต้องมีความรู้ในฟิสิกส์ของการเกิดการกระเจิงของคลื่นและการเกิดการดูดกลืนพลังงานของคลื่น เมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุตรวจสอบ โดยวัสดุที่จะนำมาวัดสเปกตรัมของคลื่นมักจะเป็นวัสดุที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันอยู่สูงหรือก็คือวัสดุที่โครงสร้างภายในมีตัวกระเจิงอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งตัวกระเจิงเหล่านี้อาจจะเป็นโพรงอากาศ (porosities) หรือรอยตำหนิภายในวัสดุเป็นต้น โดยเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ไปตกกระทบตัวกระเจิงจะทำให้คลื่นอัลตราโซนิกเกิดการกระเจิงขึ้น มีผลให้รูปร่างของคลื่นมีลักษณะเปลี่ยนไปจากรูปร่างของคลื่นจากแหล่งกำเนิด ด้วยการวัดสเปกตรัมของคลื่นหลังเกิดการกระเจิงของคลื่นสามารถจะนำมาใช้วิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุตัวกลางที่มีตัวกระเจิงอยู่ได้ สำหรับวัสดุตัวกลางที่ใช้เทคนิคการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกมาศึกษาโครงสร้างภายในอยู่บ่อยครั้งมักจะเป็นวัสดุชนิด fibre-reinforced composite material วัสดุนี้นี้เป็นวัสดุที่นำมาทำเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์หลายชนิดเช่น นำมาใช้ทำโครงตู้สำหรับคอมพิวเตอร์, โทรทัศน์, วิทยุ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่นๆ รวมทั้งยังนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของตัวถังเครื่องบิน, เรือ หรือแม้แต่รถยนต์ได้เป็นต้น ด้วยเหตุผลที่การผลิตวัสดุนี้นั้น fibre-reinforced composite material สามารถจะควบคุมปริมาณความหนาแน่นภายในวัสดุ รวมทั้งความแข็งแรงและค่าความ

หนาแน่นได้ ดังนั้นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุดังกล่าวว่ามีขนาดหรือปริมาณของโพรงอากาศภายในวัสดุเป็นอย่างไรจึงนิยมใช้เทคนิคการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ

สำหรับการทดลองวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ผ่านเหล็กหล่อในงานวิจัยได้ใช้อัลตราโซนิกโพรบกำเนิดความถี่ขนาด 2.25 MHz, 5 MHz และ 7 MHz เป็นโพรบที่จะนำมาใช้วัดสเปกตรัมและจากข้อจำกัดในการเตรียมเหล็กหล่อที่ไม่สามารถจะรู้ลักษณะโครงสร้างภายในได้ การทดลองนี้จึงเป็นการเสนอการประยุกต์ใช้งานเครื่องมือวัดความเร็วด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มาใช้ในการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกโดยใช้งานร่วมกันกับดิจิตอลออสซิลโลสโคป (Tektronix TDS420) ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองจะเป็นแนวทางในการศึกษาการวัดสเปกตรัมของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุชนิดอื่นๆ ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Josef Krautkramer and Hebert Krautkramer, Ultrasonic Testing of Materials, 4th ed. Springer-Verlo, 1990.
- [2] H.F. Pollard, Sound Wave in Solid, Pion Limited, 1979.
- [3] Leszek Fillipczynski, Zdziskaw Pawlowski and Jerzy Wehr, Ultrasonic method of Testing Materials, Butterworth & Co.,Ltd.1966.
- [4] T.Abe, S.Zhung and K.Ikawa, Study on the Ultrasonic Sound Velocity in Cast Iron, Paper was presented to Beijing International Symposium on New Development of Cast Alloy Technology (Luoyang, April 1988).
- [5] Heinrich Kuttruff, Ultrasonics Fundamentals and Applications, Elsevier Science Publishers Ltd. 1991.
- [6] A.P. Craclencll, Ultrasonic, Wykeham Publications (London) Ltd. 1980.
- [7] J.Szilard, Ultrasonic Testing (Non - Conventional Testing Techniques), John Wiley & Sons, 1982.
- [8] Douglas A. Christensen, Ultrasonic Bioinstrumentation, John Wiley & Sons, 1988.
- [9] Charles Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7th ed. John Wiley & Sons, 1996.
- [10] Andrew Briggs, Acoustic Microscopy, Clarendon press, Oxford, 1992.
- [11] PANAMETRICS, NDT Application (Elastic Modulus Measurement), Number2 January 1986.
- [12] PANAMETRICS, NDT Application (Nodularity in Cast Iron), Number 8 Rev July 1996.
- [13] PANAMETRICS, NDT Application (Graphite Flakes in Cast Iron), Number 1 Rev.'90.
- [14] PANAMETRICS, Operation Manual Ultrasonic Time Intervalometer, Pulsing Model 5053A.
- [15] Wichit Sirichote, Investigation of the Glass Fiber Orientation in Glass Fiber Reinforced Plastic Through Shear Modulus Ultrasonic Measurements, Final report of JICA group training course Research and Delvelopment on Materials and Resources, Tohoku National Industrial Research Institute 4-2-1 Nigatake, Miyagino-ku, Sendai, 983, JAPAN.
- [16] Wichit Sirichote, Poisson's Ratio of Sintered Aluminum Measured by Ultrasonic Method, Final report of JICA group training course Research and Development on materials and Resources, Tohoku National Industrial Research Institute 4-2-1 Nigatake, Miyagino-ku, Sendai, 983, JAPAN.
- [17] Norman E.Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Prentice - Hall, Inc. 1993.
- [18] M.Ourak, B.nongaillard, J.M.Rouvaen and M.Ouaftouh, Ultrasonic Spectroscopy of Composite Materials, NDT International Volume 24 Number 1 February 1991.
- [19] J.Cech, Measuring the Mechanical Properties of Cast Irons by NDT Method, NDT International Volume 23 Number 2 April 1990.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] Geza Horvath-Szabo, Harald Hoiland, Einar Hogseth, An Automated Apparatus for Ultrasound Velocity Measurements Improving the Pulse-Echo-Overlap Method to a Precision Better Than 0.5 ppm in Liquids, *Rev. Sci. Instrum.* 65 (5), May 1994.
- [21] G.J.Posakony, Influence of the Pulser on the Ultrasonic Spectrum: The Result of and Experiment, American Society for Nondestructive Testing, Inc.1985.
- [22] Takashi Furukawa and Kazuhiro Date, Simple Modeling of Ultrasonic Testing, *Materials Evaluation* on September 1994.
- [23] K.A.Fowler (PANAMETRICS), Ultrasonic Transducer Characterization, Waltham, Massachussts.
- [24] A Sarras and H Kabelka, An Automated Ultrasonic Device to Measure Elastic Constants, *Meas. Sci. Technol.*5 (1994) 1382-1385.
- [25] J.Schuster, C.Bauer and K.Friedrich, Influences on Signal / Noise Ratio During Ultrasonic Inspection of Composites, *NDT & E International* Volume 26 Number 5 1993.
- [26] Kenji Uchino ,New Piezoelectric Devices for Smart Actuator / Sensor Systems, *MTEC* seminar in topic “ Introduction to Ceramic Actuators and Sol - gel Processing of Electroceramics”
- [27] Donald G.Whitehead and Stuart B.Palmer, A High-Speed Ultrasonic Sing - Around System, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-28, No. 3, September 1979.
- [28] Emmanuel P.Papadakis, Variability of Ultrasonic Shear - Wave Velocity in Vitreous Silica for Delay Lines, *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-16, N0.4, October 1969.
- [30] W.P.Leung, Demonstration of Shear Waves, Lamb Waves and Rayleigh Waves Conversion, *Am. J. Phys.* 48(8), Aug. 1980.
- [31] Walter G.Jung, IC OP-AMP Cookbook, Howard W.Sams & Co., Inc. 1974.
- [32] Yu Jen Wong, William E. Ott, Function Circuits (Design and Applications), McGraw - Hill Book Company 1976.
- [33] Henry W. Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, John Wiley & Sons, 2nd, 1989.
- [34] Ian Hickman, Electronic Circuits, Systems and Standard: the Best of EDN, Butterworth - Heinemann Ltd, 1991.
- [35] R.M. Marston, Timer / Generator Circuits Manual, Heinemann Newnes, 1990.
- [36] MOTOROLA, CMOS LOGIC DATA, MOTOROLA Inc., 1991.
- [37] MOTOROLA, POWER MOSFET TRANSISTER DATA, MOTOROLA Inc., 1992.
- [38] ANALOG DEVICES, AMPLIFIER REFERENCE MANUAL, ANALOG DEVICES Inc., 1992.
- [39] ANALOG DEVICES, AMPLIFIER APPLICATIONS GUIDE, ANALOG DEVICES Inc.1992.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Certificate of Conformance

The as built dimensions of the ultrasonic reference or calibration block meets the requirements of the applicable specification(s). Dimensions are certified by the original manufacturer using measuring equipment with calibration certified as being traceable to the N.I.S.T. Certificate(s) from the original manufacturer are attached.



PANAMETRICS

Waltham, Mass 02154

ASTM E164 IIIW TYPE CALIBRATION BLOCK

Type of Block

TB7541-5

ASTM E164-90

Panametrics Part Number

Applicable Specification(s)

304 STAINLESS STEEL

APPLIED TEST SYSTEMS

Material

Manufactured By

A10847

Serial Number

J. D. ...

Inspected By

6-15-90

Date



221 Crescent St Waltham MA 02154
 Tel: 800-225-8330, 617-899-2719
 PANAMETRICS Fax: 617-899-1552

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: V106
 SERIAL NO.: 204127
 DESIGNATION: CONTACT

FREQUENCY: 2.25 MHz
 ELEMENT SIZE: .5 in. DIA.

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052 UA #1
 DIGITAL OSCILLOSCOPE: LECROY 9400 - V 2.06FT 3E0322
 TEST PROGRAM: VER. 2.0 SETUP: DWG. #5979
 CABLE: RG-174/U LENGTH: 4 FT.

TEST CONDITIONS

PULSER ENERGY: 1
 PULSER DAMPING: 200 ohm
 RECEIVER SETTING: 40 dB GAIN / 44dB ATTENUATION
 TARGET: BACK WALL OF 1.5 in. STEEL

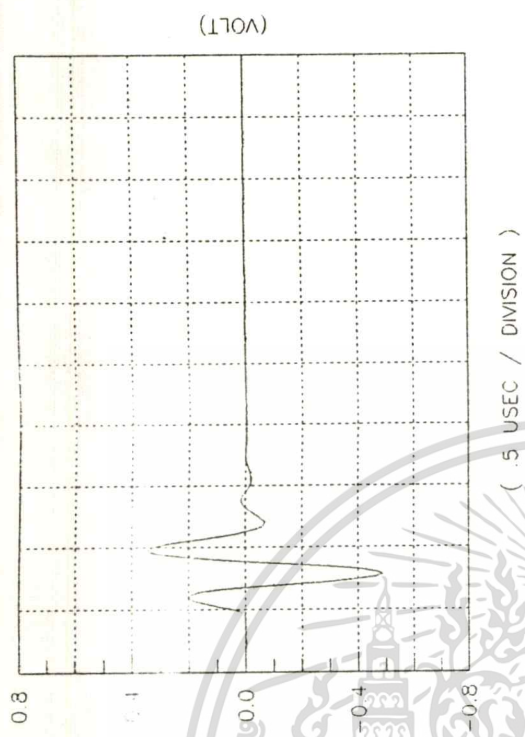
MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION: SPECTRUM PARAMETERS:
 -14DB LEVEL -- 556US CENTER FREQ. -- 2.27MHz
 -20DB LEVEL -- 732US PEAK FREQUENCY -- 2.35MHz
 -40DB LEVEL -- 928US -6DB BANDWIDTH -- 92.51%

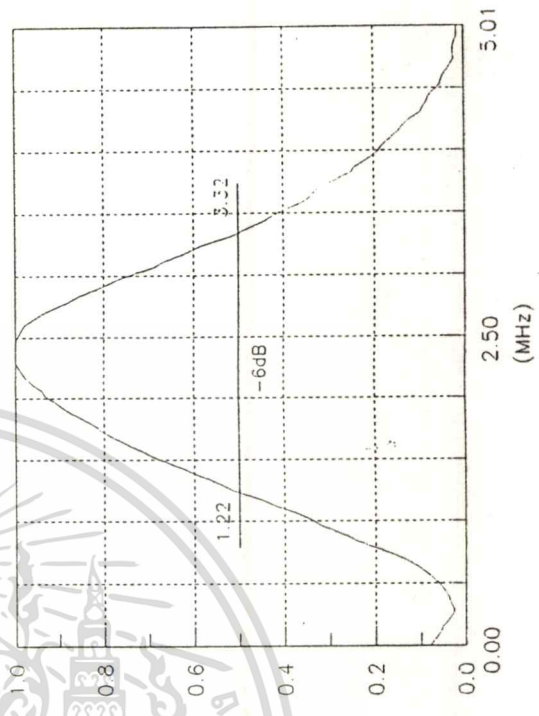
COMMENTS:

** ACCEPTED
 TECHNICIAN: (1) *Steve D. ...* DATE: 04-14-95

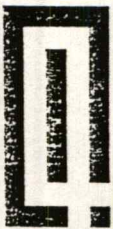
SIGNAL WAVEFORM



FREQUENCY SPECTRUM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



221 Crescent St Waltham MA 02154
Tel: 800-225-8330, 617-899-2719

PANAMETRICS Fax: 617-899-1552

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: V154
SERIAL NO.: 205872
DESIGNATION: CONTACT

FREQUENCY: 2.25 MHz
ELEMENT SIZE: .5 in. DIA

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052 UA #5
DIGITAL OSCILLOSCOPE: LECROY 9400 -- V 2.06FT 3E04H6
TEST PROGRAM: VER. 2.0 SETUP: DWG. #5979
CABLE: RG-174/U LENGTH: 4 FT.

TEST CONDITIONS

PULSER ENERGY: 1 50 ohm
PULSER DAMPING: 40 dB GAIN / 50dB ATTENUATION
RECEIVER SETTING: 40 dB GAIN / 50dB ATTENUATION
TARGET: BACK WALL OF 1.0 in. SILICA

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION: 5/60US
-10DB LEVEL --- 956US
-20DB LEVEL --- 956US
-10DB LEVEL --- 1.23US

SPECTRUM MEASUREMENTS:
CENTER FREQ. --- 2.19MHZ
PEAK FREQUENCY --- 2.27MHZ
-6DB BANDWIDTH --- 84.95 %

COMMENTS:

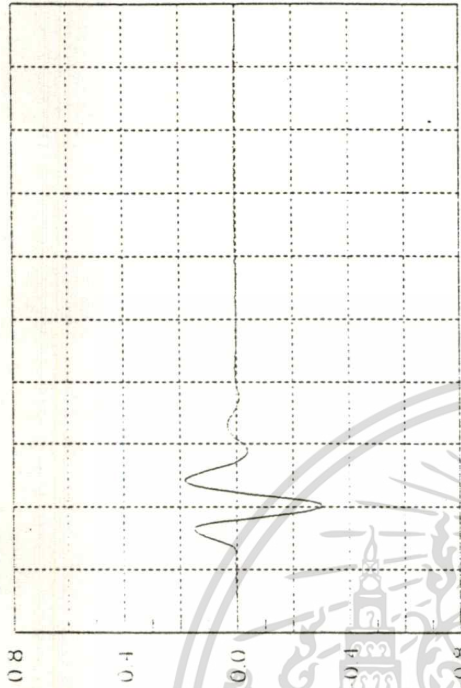
F 2.19

ACCEPTED

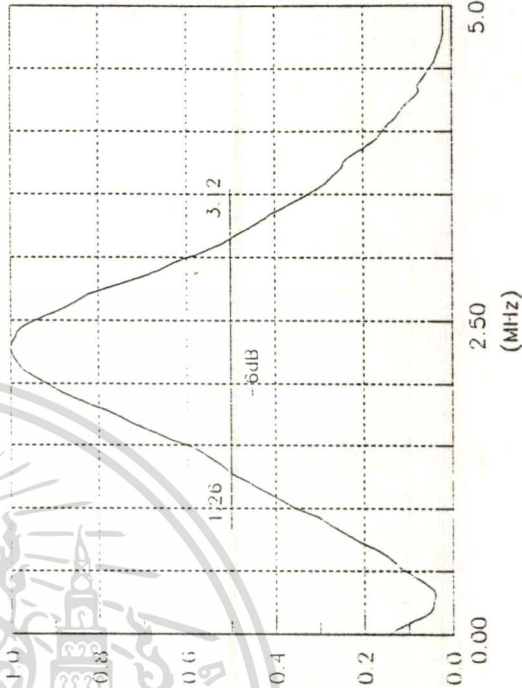
TECHNICIAN: (2) *[Signature]*

DATE: 09-26-95

SIGNAL WAVEFORM

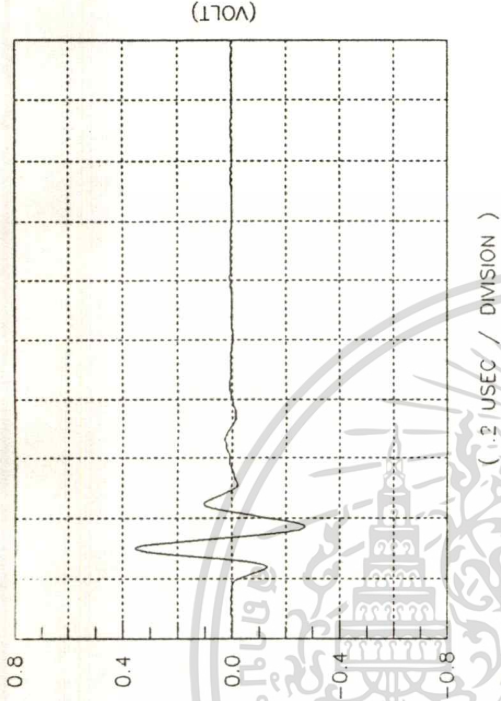


FREQUENCY SPECTRUM

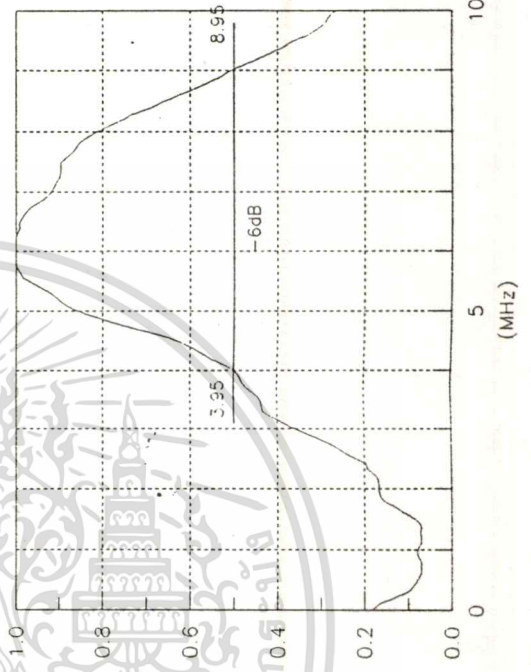


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIGNAL WAVEFORM



FREQUENCY SPECTRUM



221 Crescent St Waltham MA 02154
 Tel: 800-225-8330, 617-899-2719
PANAMETRICS Fax: 617-899-1552

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: V310 FREQUENCY: 5.00 MHz
 SERIAL NO.: 208653 ELEMENT SIZE: .25 in. DIA.
 DESIGNATION: .75 in PTF SPHERICAL FOCUS

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052 UA #4
 DIGITAL OSCILLOSCOPE: LECROY 9400 - V 2.06FT 3E0446
 TEST PROGRAM: VER. 2.0 SETUP: DWG. #5978
 CABLE: RG-58/U LENGTH: 4 FT.

TEST CONDITIONS

PULSER ENERGY: 1
 PULSER DAMPING: 50 ohm
 RECEIVER SETTING: 40 dB GAIN / 30dB ATTENUATION
 TARGET: .25 in. STEEL BALL; WATER PATH .8130 in.

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

FOCAL LENGTH ---- 0.813 in.
 WAVEFORM DURATION: SPECTRUM PARAMETERS:
 -14DB LEVEL -- 250US CENTER FREQ. -- 6.45MHZ
 -20DB LEVEL -- .272US PEAK FREQ. -- 5.78MHZ
 -40DB LEVEL -- .821US -6DB BANDWIDTH -- 77.52 kHz

COMMENTS:

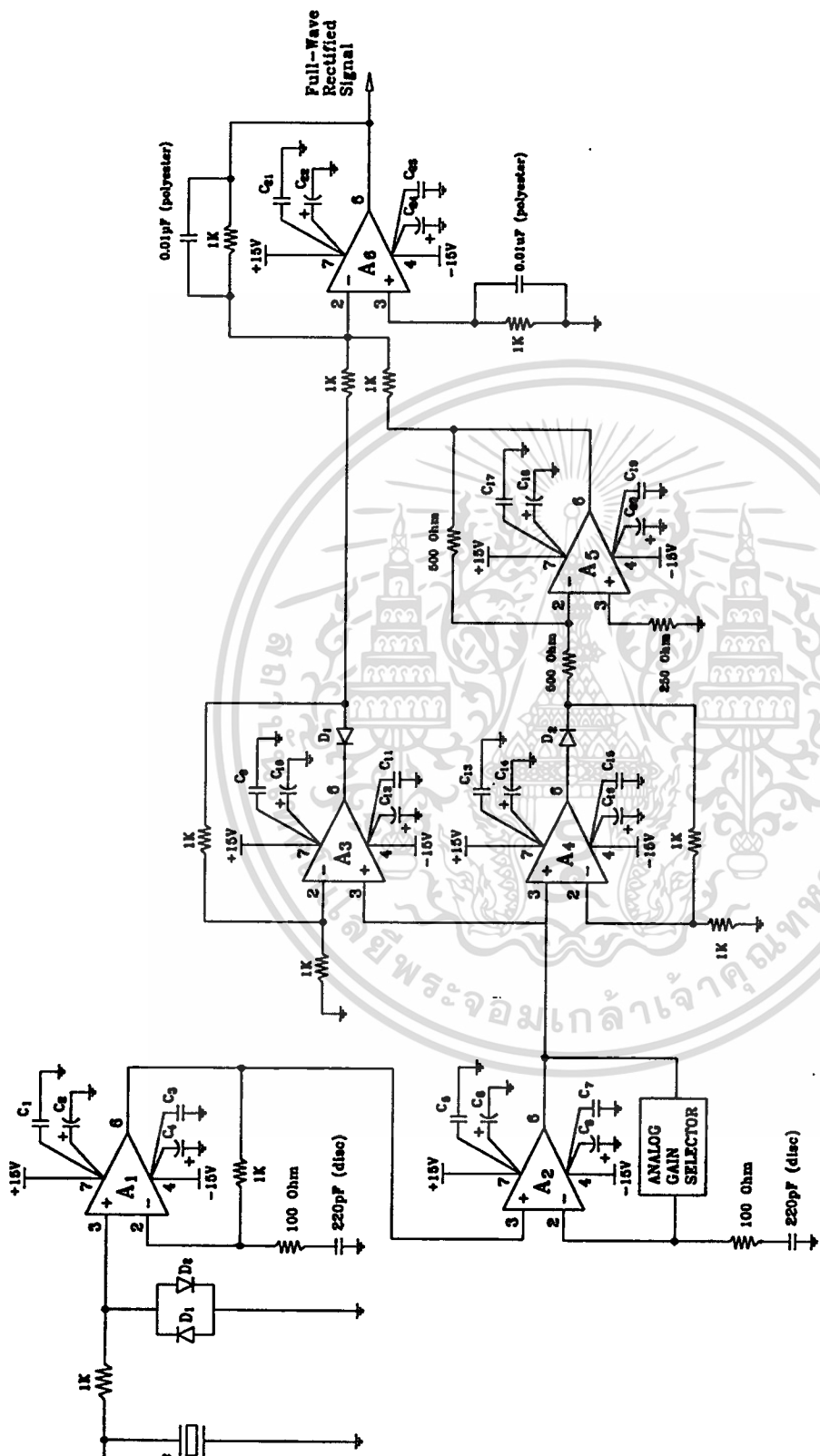
S 48.400 F 6.5

ACCEPTED, AUTHORIZED BY DATE:
 TECHNICIAN: (2) *[Signature]* DATE: 07-14-95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
วงจรเครื่องวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



D₁, D₂, D₃, D₄ → 1N914

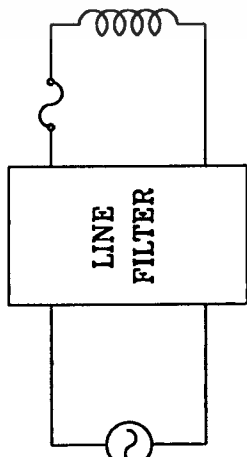
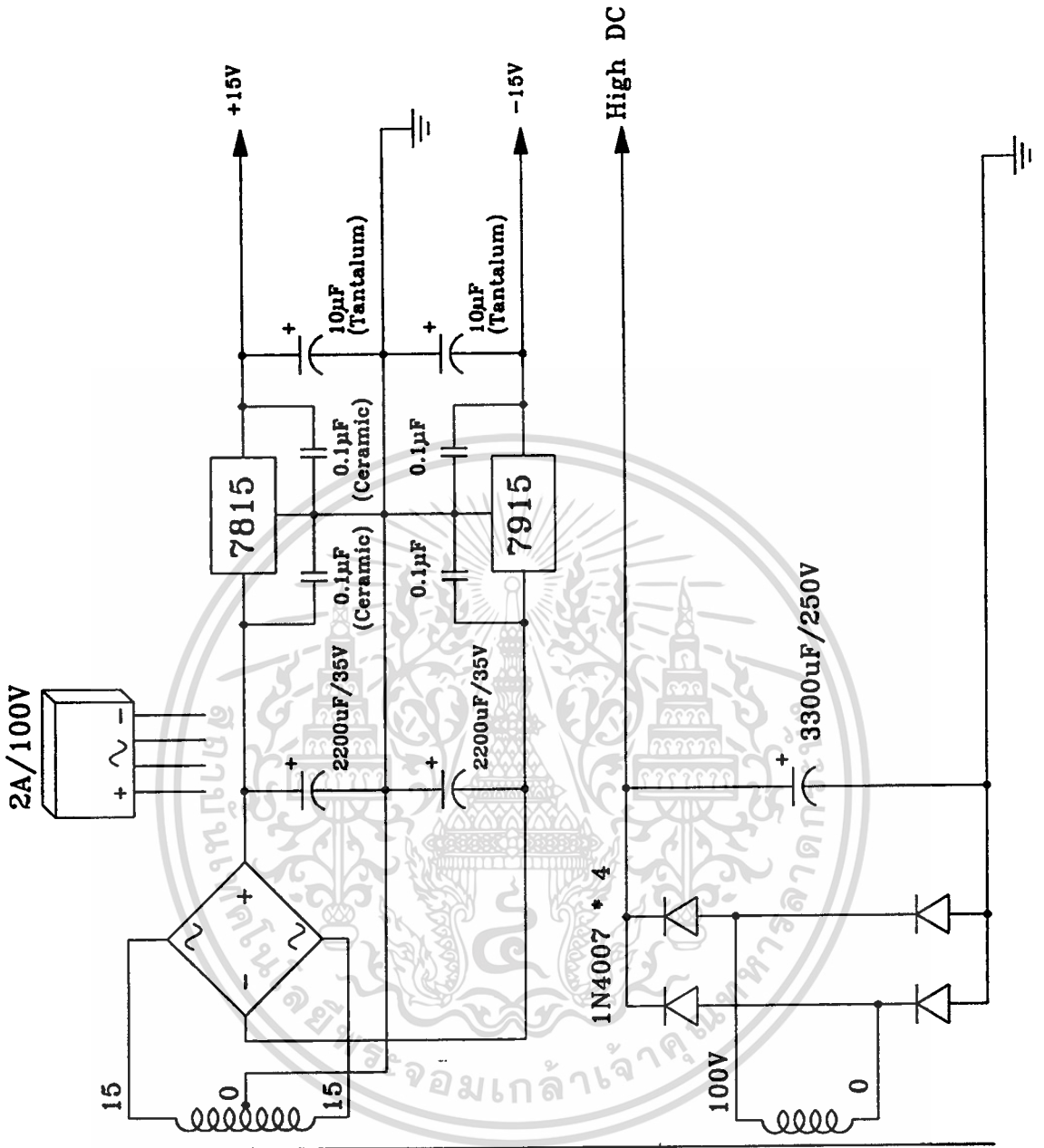
C₁, C₃, C₆, C₇, C₉, C₁₁, C₁₃, C₁₅, C₁₇, C₁₉, C₂₁, C₂₃ → 0.1μF (Ceramic disc)

C₂, C₄, C₅, C₈, C₁₀, C₁₂, C₁₄, C₁₆, C₁₈, C₂₀, C₂₂, C₂₄ → 2.2μF (Tantalum)

A₁, A₂, A₃, A₄, A₅ → AD844, A₆ → AD847

Receiver Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Power Supply Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสุรวุฒิ กิจสัมพันธ์ เกิดวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2514 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาโซลิตสเททฟิสิกส์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 และเข้าทำงานในตำแหน่ง Technical Staff ของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี ของกลุ่มบริษัทพีริเมียร์ จวบจนปัจจุบัน มีผลงานทางวิชาการที่ตีพิมพ์เผยแพร่ คือ

1. “การวัดสมบัติทางกลของวัสดุแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอัลตราโซนิก” ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
2. “เครื่องมือวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกด้วยเทคนิคพัลส์สะท้อนกลับซ้อนทับ” ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ครั้งที่ 6 โดยสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม