

ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกความถี่ต่ำแบบซี-สแกน

LOW-FREQUENCY ULTRASONIC C-SCAN IMAGING SYSTEM



บดีนทร์ ดำรงศักดิ์
BADIN DAMRONGSAKD

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2544

ISBN 974-648-394-3

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

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 40606
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2544

2544

สงวนลิขสิทธิ์... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

LOW-FREQUENCY ULTRASONIC C-SCAN IMAGING SYSTEM



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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ISBN 974-648-394-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2001

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกความถี่ต่ำแบบซี-สแกน
นักศึกษา	นายบัณฑิต คำรงค์ศักดิ์
รหัสประจำตัว	40065012
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชคิ

บทคัดย่อ

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบและพัฒนาาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่ำแบบซี-สแกนเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาการทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย ระบบที่สร้างขึ้นอาศัยหลักการวัดขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับเนื่องมาจากความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ของเสียงภายในเนื้อวัสดุที่แต่ละตำแหน่งตามแนวระนาบ XY ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณจะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัล 8 บิต และบันทึกลงเพิ่มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ หลังจากเสร็จสิ้นการสแกนแล้วข้อมูลทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นภาพถ่ายซี-สแกนโทนสีเทาด้วยโปรแกรมสร้างภาพ ความละเอียดในการสแกนของระบบเท่ากับ 143.6 ± 9.1 ไมโครเมตร ความคลาดเคลื่อนของระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับวัสดุทดสอบตามแนวแกน X และ Y มีค่าเท่ากับ 3.43 ± 0.32 และ 59.6 ± 0.3 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และภาพถ่ายซี-สแกนมีความละเอียดในการแยกแยะประมาณ 1 มิลลิเมตรในกรณีที่ใช้อัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่ 5 เมกกะเฮิรตซ์ นอกจากนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวมและสร้างภาพทิศทางการเรียงตัวของโมเลกุลภายในวัสดุพลาสติกที่ผลิตด้วยวิธีฉีดขึ้นรูป

Thesis Title	Low-Frequency Ultrasonic C-Scan Imaging System
Student	Mr. Badin Damrongsakđ
Student ID.	40065012
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2001
Thesis Advisor	Assistant Professor Wichit Sirichote

ABSTRACT

In this thesis, design and development of low-frequency ultrasonic C-scan imaging for studying nondestructive testing of materials were carried out. The principle of the established system is measuring the peak amplitude of reflected wave due to internal acoustic impedance difference at each location along XY plane. The peak amplitude was converted to 8-bit digital data and saved as computer filename. After completing the scan, the data were , then, transformed to gray-scale C-scan image by imaging software. The mechanical scanning resolution of the system is $143.6\pm 9.1\ \mu\text{m}$. The error of space between ultrasonic probe and tested sample along X-axis and Y-axis are $3.43\pm 0.32\ \mu\text{m/cm}$ and $59.6\pm 0.3\ \mu\text{m/cm}$ respectively. Using 5 MHz ultrasonic probe, the resolution of C-scan image was found to be around 1 mm. In addition, the feasibility studies of internal visualization of packaged integrated circuit (IC) and revealing the orientation pattern of injection-molded thermoplastic were performed in the thesis.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชิต ศิริโชค ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดจนเป็นตัวอย่างที่ดีในการทำงานตลอดมา รวมถึงอนุเคราะห์จัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุรพล รักวิชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา เทียนสมประสงค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาถัดคา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประยงค์ อยู่ดี ที่กรุณาให้คำชี้แนะและแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนค่าเล่าเรียนและค่าวัสดุสำหรับใช้ดำเนินการในวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ คุณณรงค์ แสงแก้ว ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ญาติผู้ใหญ่ เพื่อนๆ และบุคคลที่มีความปรารถนาดีมอบให้แก่ข้าพเจ้าทุกท่าน

บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 หลักการและเหตุผล	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	5
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	6
บทที่ 2 ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก	7
2.1 ฟิสิกส์ของคลื่นและคลื่นอัลตราโซนิก	7
2.2 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น	12
2.2.1 การเคลื่อนที่ของการสั่นแบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย	12
2.2.2 การเคลื่อนที่ของการสั่นที่มีผลของการลดทอนแอมพลิจูด	15
2.2.3 การเคลื่อนที่ของการสั่นเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ	18
2.2.4 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น	21
2.3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกและความสัมพันธ์กับวัสดุของแข็ง	24
2.4 พารามิเตอร์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่สำคัญ	30
2.4.1 ความเร็วคลื่น	30
2.4.2 อิมพีแดนซ์ของเสียง	31
2.4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน	33
2.4.4 สัมประสิทธิ์การดูดกลืน	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	43
3.1 ความเป็นมาของวิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	43
3.2 ความหมายของภาพถ่ายอัลตราโซนิก	51
3.3 อุปกรณ์และระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน	55
3.3.1 อัลตราโซนิกโพรบ	56
3.3.2 คุณสมบัติสำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ	61
3.3.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับ	68
3.3.4 เครื่องตรวจจับพิก	73
3.3.5 ออสซิลโลสโคป	75
บทที่ 4 การออกแบบและพัฒนาระบบสร้างภาพแบบซี-สแกน	77
4.1 หลักการของระบบสร้างภาพอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้น	77
4.2 การออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือ	80
4.2.1 ชุดสแกนทางกลและชุดควบคุมเครื่องสแกนในแนว xyz	80
4.2.2 โปรแกรมสร้างภาพจากแฟ้มข้อมูล	100
บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล	102
5.1 การทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิก แบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้น	102
5.1.1 ความลาดเอียงของระบบสแกนตามแนวแกน z	102
5.1.2 ขีดจำกัดในการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในวัสดุ	107
5.1.3 การเคลื่อนที่อัลตราโซนิกโพรบในแนวตั้งและระยะโฟกัส	109
5.1.4 ความละเอียดในการตรวจสอบวัสดุ	116
5.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบที่พัฒนาขึ้นประยุกต์สร้างภาพวัสดุ	123
5.2.1 การศึกษาการสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวม	123
5.2.2 การศึกษาการสร้างภาพโฟลว์แพทเทิร์นของพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป	130

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุป แนวทางในการพัฒนาและการประยุกต์	139
6.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบ	139
6.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและพัฒนาระบบต่อไป	142
6.3 สรุปผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ สร้างภาพตัวเก็บวงจรรวมและพลาสติกแบบฉีดยื่นรูป	143
6.4 แนวทางวิจัยและพัฒนาในอนาคต	144
เอกสารอ้างอิง	146
ประวัติผู้เขียน	148



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างวงจรมอดูล RLC กับกลศาสตร์ของมวลติดสปริง ..	20
2.2 คุณสมบัติและค่าคงที่ทางเสถียรของตัวกลาง	33
3.1 คุณสมบัติของอัลตราโซนิคโพรบที่ใช้ในระบบสร้างภาพ	68
3.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด	71
4.1 คุณลักษณะสมบัติเฉพาะของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบสแกน xyz	88
4.2 หลักการควบคุมมอเตอร์จากหลักการในรูปที่ 4.8	93
4.3 หลักการควบคุมมอเตอร์จากหลักการในรูปที่ 4.9	94
4.4 หลักการควบคุมมอเตอร์โดยผสมระหว่างหลักการในรูปที่ 4.8 และ 4.9	95
5.1 ผลต่างเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิคใช้ในการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งต่างๆ	104
5.2 ระยะทางกลาดเคลื่อนในแนวแกน z ของระบบสแกน ณ ตำแหน่งต่างๆ	105
5.3 ผลการทดลองวัดคาบเวลาโคจรกับผลของแกนและแอมป์เพคเตอร์ของพัลส์เซอร์	108
5.4 ผลการทดลองวัดความละเอียดของสตีปในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนตั้ง	112
5.5 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะห่างของโพรบกับขนาดของคลื่นสะท้อน	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โหมบคในการแสดงภาพที่สร้างขึ้นจากคลื่นอัลตราโซนิก	2
1.2 (ก) ระบบ HYSCAN และ (ข) ภาพซี-สแกนของการบีบอัดคเวเฟอร์ในไอซี	3
2.1 ความสัมพันธ์ของคลื่น คาบเวลา และ ความยาวคลื่น	8
2.2 ช่วงของความถี่ ชนิดของคลื่นเสียงและการใช้งาน	9
2.3 แบบจำลองของอะตอมของแข็งและการเกิดคลื่นภายในของแข็งเมื่อได้รับ แรงจากภายนอกมากระทำ	11
2.4 การสั่นแบบอย่างง่าย	12
2.5 แบบจำลองของการสั่นที่มีผลของการลดทอนความแรงเนื่องจากความร้อน	15
2.6 การสั่นแบบฮาร์มอนิกในกรณีที่วัสดุมีค่าคงที่ของการดัดคลื่น	18
2.7 แบบจำลองของการสั่นในของแข็งที่พิจารณาผลของการลดทอนแอมพลิจูด และแรงกระทำจากภายนอก	19
2.8 วงจรอนุกรม RLC	20
2.9 การไหลของมวลในวัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร	21
2.10 การเคลื่อนที่ของคลื่นเทียบกับเวลาและระยะขจัด	24
2.11 การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบ ทำมุมปกติกับบริเวณรอยต่อ	34
2.12 สัญญาณและเฟสของความดันเสียงของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านที่รอยต่อ	37
2.13 การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบ ไม่อยู่ในแนวเส้นปกติ กับบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงต่างกัน	41
2.14 การลดทอนของความแรงในการสั่นของคลื่นอัลตราโซนิก	42
3.1 การตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยวิธีของโซโคลอฟ	44
3.2 รอยเชื่อมจากกล้องโซโคลอฟ (ก) ไม่มีจุดบกพร่อง (ข) มีรูขนาดใหญ่	45
3.3 รีเฟลกโตสโคป	46
3.4 วิธีการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ก) แบบส่งผ่านและ (ข) แบบพัลส์-สะท้อนกลับ ..	47
3.5 วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และ ซี-สแกน	48
3.6 ภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และซี-สแกน	51
3.7 ลักษณะของข้อบกพร่องและภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 สัญญาณจากพัลส์-สะท้อนกลับด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่ม	53
3.9 การหาขนาดด้วยเทคนิคการลดทอนลง 6 dB	54
3.10 ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ	55
3.11 ปรัชญาการแผ่โซอิลเททริก (ก) แบบตรง (ข) แบบผันกลับ	57
3.12 โครงสร้างทั่วไปของหัวอัลตราโซนิกโพรบ	58
3.13 หัวอัลตราโซนิกโพรบ (ก) แบบสัมผัส และ (ข) แบบจุ่ม	59
3.14 หัวอัลตราโซนิกโพรบแบบจุ่มและมีคุณสมบัติโพกัสลาคัล	60
3.15 การเปลี่ยนแปลงระยะ โฟกัสในเนื้อวัสดุที่ต้องการทดสอบ	60
3.16 คุณสมบัติรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของอัลตราโซนิกโพรบ PANAMETRICS	63
3.17 คุณสมบัติของหัวอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (V310-N-SU)	64
3.18 ลักษณะลำคลื่นโพกัสอัลตราโซนิก	66
3.19 ความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเนื่องจาก S_F	67
3.20 วงจรพัลส์เซอร์	69
3.21 วงจรในภาครับสัญญาณ	70
3.22 พัลส์เซอร์และตัวรับของ PANAMETRICS	71
3.23 สัญญาณพัลส์กระตุ้นของพัลส์เซอร์ (ก),(ข) รุ่น 5072PR และ (ค),(ง) รุ่น 5073PR	72
3.24 การประยุกต์ใช้งานของพัลส์เซอร์แบบพัลส์-สะท้อนกลับ	73
3.25 การประยุกต์ใช้งานของเครื่องตรวจจับฟิค	74
3.26 ลักษณะสัญญาณของเครื่องตรวจจับฟิค	75
3.27 สัญญาณจากออสซิลโลสโคป โดย Ch1 เป็นสัญญาณ RF และ Ch2 เป็นสัญญาณเกต	75
3.28 ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS340A ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์	76
4.1 ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ	78
4.2 ระบบที่พัฒนาขึ้น (ก) ชุดสแกน xyz, (ข) เครื่องมือที่นำมาติดตั้ง และ (ค) อัลตราโซนิกโพรบ	79
4.3 ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวหมุนที่ใช้ในเครื่องสแกนทางกลที่พัฒนาขึ้น	80
4.4 ชุด Linear Motion System	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ระบบเบรคของแกนหมุนในแนวคิ่ง z	81
4.6 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมการเคลื่อนที่	82
4.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ก) เป็นแบบทั่วไป (ข) แบบบริชเลส	83
4.8ก วิธีการขับมอเตอร์บริชเลสแบบ 120 องศา ตามเข็มนาฬิกา	84
4.8ข วิธีการขับมอเตอร์บริชเลสแบบ 120 องศา ทวนเข็มนาฬิกา	85
4.9ก วิธีการขับมอเตอร์บริชเลสแบบ 180 องศา ตามเข็มนาฬิกา	86
4.9ข วิธีการขับมอเตอร์บริชเลสแบบ 180 องศา ทวนเข็มนาฬิกา	87
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดต่อความเร็วรอบในการหมุน	88
4.11 วงจรไคอะแกรมของมอเตอร์ NM23A-1.5-A-1000	90
4.12 วงจรขับมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	92
4.13 วงจรขับมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	92
4.14 วงจรสวิตช์เพื่อเลือกขับชุดมอเตอร์	96
4.15 วงจรบัฟเฟอร์ด้วยไอซี 74LS244	97
4.16 ส่วนควบคุมและประมวลผลกลาง	98
4.17 ไคอะแกรมการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกน xyz	99
4.18 ทิศทางการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบในโหมดอัตโนมัติ	100
4.19 โพลาร์ทิพย์ของโปรแกรมสร้างภาพซี-สแกน	101
5.1 การติดตั้งระบบเพื่อวัดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน z	103
5.2 สัญญาณจากจอภาพออสซิลโลสโคป	104
5.3 ระยะเวลาทางคลาดเคลื่อนของระบบสแกนตามแนว x และ y	106
5.4 สัญญาณเคค โซนที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการขยายของพัลส์เซอร์ 5072PR แตกต่างกัน	108
5.5 ผลการทดลองวัดขีดจำกัดของระยะห่างของโพรบกับชิ้นงาน	110
5.6 สัญญาณสะท้อนที่ระยะห่างของโพรบกับชิ้นงานต่างๆกัน	113
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างโพรบกับขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับ	116
5.8 แผ่นพีวีซีที่นำไปเจาะรูเพื่อใช้เป็นวัสดุทดสอบความละเอียดของระบบสร้างภาพ	117
5.9 ขนาดรูปบนแผ่นพลาสติกจากกล้องวีดีโอไมโครสโคป	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.10 ภาพอัลตราโซนิคซี-สแกนของรูบนแผ่นพลาสติกจากเครื่องที่พัฒนาขึ้น	119
5.11 ตัวอักษรบนบัตรทางคว้น	120
5.12 ภาพถ่ายซี-สแกนของตัวอักษรบนบัตรทางคว้น	121
5.13 ภาพถ่ายซี-สแกนของไม้บรรทัดเหล็กด้วยอัลตราโซนิคโพรบความถี่ 5 MHz	122
5.14 ภาพถ่ายซี-สแกนของไม้บรรทัดเหล็กด้วยอัลตราโซนิคโพรบความถี่ 15 MHz	122
5.15 ตัวเก็บวงจรรวม (ก) ขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร และ (ข) ขนาด 30 x 30 มิลลิเมตร	124
5.16 สัญญาณเอ-สแกนจากตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม.	125
5.17 สัญญาณเอ-สแกนจากตัวเก็บวงจรรวมขนาด 30 x 30 มม.	126
5.18 ภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งไม่ได้ระยะโฟกัสของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม.	127
5.19 ภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม.	128
5.20 ภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 30 x 30 มม.	129
5.21 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิคสะท้อนกลับจากเนื้อพลาสติกที่อัตราขยายต่างๆกัน	131
5.22 สัญญาณสะท้อนที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานพลาสติกที่ตำแหน่งต่างๆกัน	132
5.23 สัญญาณสะท้อนกลับจากชิ้นงานพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูปที่ความถี่ของหัว โพรบต่างๆ โดยมีอัตราขยายของภาครับคงที่เท่ากับ +50 dB	133
5.24 ชิ้นงานพลาสติกพีบีทีที่นำมาใช้ในการสร้างภาพซี-สแกน	134
5.25 ภาพถ่ายซี-สแกนของชิ้นงานในรูปที่ 5.24	136
5.26 ชิ้นงานพลาสติกพีอีทีที่นำมาใช้ในการสร้างภาพซี-สแกน	137
5.27 ภาพถ่ายซี-สแกนของชิ้นงานในรูปที่ 5.26	137

บทที่ 1

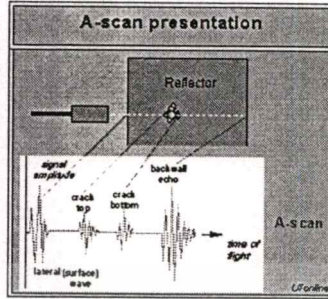
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

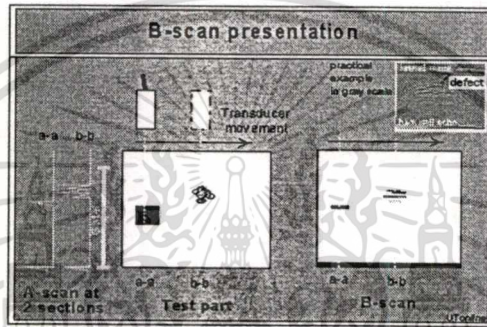
ปัจจุบันการทดสอบวัสดุด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ได้เข้ามามีบทบาทในแวดวงอุตสาหกรรมการผลิตโลหะและวัสดุ แทนที่การตรวจสอบแบบดั้งเดิมซึ่งต้องทำลายชิ้นงานก่อนจะทำการทดสอบ หรือเมื่อทดสอบเสร็จก็อาจทำให้วัสดุหรือชิ้นงานนั้นๆเกิดความเสียหาย นักวิทยาศาสตร์และนักเทคโนโลยีจึงได้พยายามคิดค้นและเสาะหาแนวทางในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำความรู้ทางฟิสิกส์ รวมถึงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เข้ามาใช้ เทคนิคที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่การทดสอบวัสดุด้วยเทคนิคสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นคลื่นกลที่มีความถี่สูงมากกว่าความถี่เสียงที่มนุษย์เราสามารถรับฟังได้ กล่าวคือมีความถี่สูงกว่า 20 kHz โดยระดับเสียงที่มนุษย์เราได้ยินจะอยู่ในช่วง 20 Hz – 20 kHz เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกลชนิดหนึ่ง ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกจึงสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับคลื่นเสียง การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าวัสดุมีอะตอมเรียงชิดติดกันมากคลื่นอัลตราโซนิกจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดี นอกจากนี้ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด การเลี้ยวเบน และการกระเจิง ก็เป็นเช่นเดียวกับพฤติกรรมของคลื่นเสียง ในการนำคลื่นกลชนิดนี้ไปใช้ตรวจสอบชิ้นงาน อาศัยการแปลงคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งเป็นคลื่นกลเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหัววัดเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric transducer) และเพื่อความสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์และประเมินผล จึงนำเอาสัญญาณทางไฟฟ้ามาสร้างเป็นภาพ

การสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกสามารถแบ่งตามวิธีการสแกนอัลตราโซนิกโพรบ ได้เป็น เทคนิคเอ-สแกน (A-Scan), บี-สแกน (B-Scan) และซี-สแกน (C-Scan) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เทคนิคเอ-สแกนเป็นการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้วนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้มาแสดงผลในรูปแอมพลิจูดของสัญญาณกับเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง (time of flight) ที่ตำแหน่งนั้นๆ เทคนิคบี-สแกนเป็นการสแกนอัลตราโซนิกโพรบเป็นแนวเส้นตรง โดยการนำสัญญาณที่ได้จากวิธีเอ-สแกน มาเปลี่ยนขนาดของแอมพลิจูดให้เป็นความสว่าง ณ ตำแหน่งต่างๆ ตลอดแนวเส้นที่สแกนหัวโพรบไป สุดท้ายเป็นเทคนิคที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ เทคนิคซี-สแกน ซึ่งเป็นการสร้างภาพภายในของวัสดุในแนวระนาบ 2 มิติ หรือในแนวระนาบ x-y ที่ระยะความลึก z หนึ่งๆ โดยวิธีการสแกนภาพด้วยวิธีนี้นั้น จะให้อัลตราโซนิกโพรบวางห่างจากวัสดุเป็นระยะทางคง

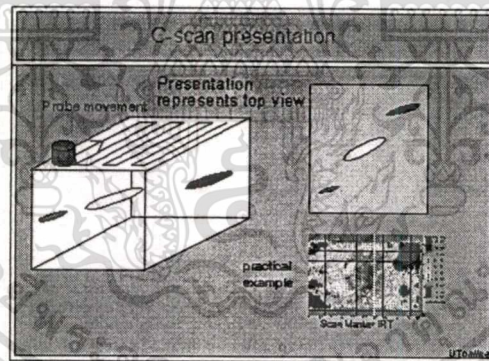
ที่ แล้วสแกนหัวโพรบตามแนวระนาบ x-y ภาพถ่ายที่ได้แสดงด้วยระดับความเข้มของสี โดยระดับความเข้มของสีในแต่ละจุดแทนขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับ



(ก) เอ-สแกน



(ข) บี-สแกน



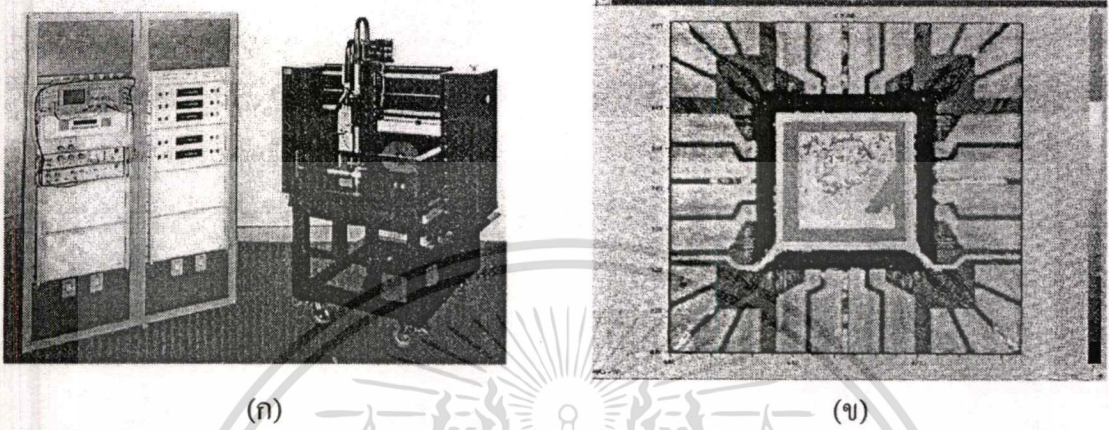
(ค) ซี-สแกน

รูปที่ 1.1¹ โหมดในการแสดงภาพที่สร้างขึ้นจากคลื่นอัลตราโซนิก

โดยทั่วไป เครื่องสร้างภาพด้วยคลื่นเสียงและคลื่นอัลตราโซนิกที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่อาศัยหลักพื้นฐานเดียวกันกับเครื่องที่ทำการสร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ Scanning Acoustic Microscope (SAM) หรือ High Resolution Ultrasonic Scanning System (HYSCAN) แต่ใช้หัววัดอัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่สูงตั้งแต่ 50 MHz ถึง 1 GHz การประยุกต์ใช้งานระบบที่มีความละเอียดในการตรวจสอบสูงนี้ ส่วนใหญ่จะใช้ตรวจสอบจุดบกพร่องที่บริเวณผิวของชิ้นงานหรือ

¹ นำมาจาก www.ndt.net เอกสารวิชาการที่เผยแพร่ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อชิ้นงานที่มีระยะไม่ลึกมากนัก เช่น ใช้ตรวจสอบการไม่ยึดเกาะของเวเฟอร์ (disbonding of Die attach) ในกระบวนการประกอบวงจรรวม (IC packaging) และการตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น รูปที่ 1.2 แสดงภาพตัวอย่างที่ได้จากระบบ HYSCAN โดยใช้ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก 50 MHz



รูปที่ 1.2² (ก) ระบบ HYSCAN และ (ข) ภาพซี-สแกน ของการยึดติดเวเฟอร์ในตัวเก็บวงจรรวม

ระบบที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่ต่ำ ขนาด 5 MHz ในการสร้างภาพ การนำไปประยุกต์ใช้งานจึงต่างกัน โดยมีเป้าหมายเน้นไปที่การทดสอบจุดบกพร่องและความไม่ต่อเนื่องในระดับมหภาค (macroscopic scale) ของวัสดุ การประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบหาจุดบกพร่องหรือรูพรุนในโลหะและส่วนประกอบของเครื่องบิน ที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ถ้าไม่ทำลายชิ้นงานเพื่อเปิดออกดู เป็นต้น การประยุกต์ที่น่าสนใจสำหรับการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่ำ อีกแนวทางหนึ่ง เป็นการสังเกตความไม่ต่อเนื่องหรือรูปแบบการไหล (flow pattern) ในเนื้อพลาสติกที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป (injection-molding process) ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการฉีดพลาสติก (injection-molded plastic) นั้น อาศัยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กราฟฟิก (computer graphic simulation) แสดงทิศทางการไหลภายในแม่พิมพ์ (mold) ของโพลีเมอร์ที่ถูกหลอมเหลว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยข้อมูลที่ได้เป็นลักษณะการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้ที่เวลาต่างๆ ซึ่งเป็นเพียงแบบจำลองไม่สามารถเห็นภาพโครงสร้างภายในแบบมหภาค (macroscopic scale) เช่น รูพรุน โพรง และความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพลาสติกจากกระบวนการผลิตจริงได้ วิธีทดสอบทำได้โดยวิธีสุ่มตรวจสอบด้วยวิธีการแบบทำลายชิ้นงาน อย่างไรก็ตามความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อพลาสติกนอกจากรูพรุนหรือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นแล้ว ยังรวมถึงความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันเนื่องจาก

² นำมาจาก product information ของ PANAMETRICS co., ltd.

ยื่นตัวไม่พร้อมกันในกระบวนการฉีดพลาสติกอีกด้วย เพื่อการศึกษาวิธีสร้างภาพภายในของชิ้นงานวัสดุเพื่อใช้ตรวจสอบชิ้นงานประเภทวัสดุของแข็ง โครงสร้างภายในของไอซี หรือรูปแบบการไหลของพลาสติกที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการสร้างภาพภายในของชิ้นงานวัสดุด้วยเทคนิคการสะท้อนกลับของพัลส์ และเนื่องจากวัสดุประเภทพลาสติกมีสัมประสิทธิ์การลดทอนสูง (กรณีของโพลีโพรพิลีนประมาณ 18.2 dB/cm ที่ความถี่ 5 MHz [1]) และสัมประสิทธิ์ของการลดทอนจะสูงขึ้นเมื่อความถี่ของคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้น [2],[3],[4] ระบบที่สร้างจึงใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบชนิดความถี่ต่ำในการดำเนินการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์

จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แก่

1. เพื่อริเริ่มนำเทคโนโลยีการสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกเข้ามาใช้ในประเทศ สำหรับตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลายและการวัดคุณสมบัติของวัสดุ
2. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจถึงวิธีการนำเอาความรู้ทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้สร้างเครื่องมือและระบบวัด
3. เพื่อศึกษาวิธีการวัดลักษณะสมบัติของระบบที่ได้สร้างขึ้นและสามารถสร้างภาพวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในเบื้องต้นและแปลผลจากรูปที่ถ่ายได้

1.3 หลักการและเหตุผล

การสร้างระบบถ่ายภาพของวัสดุเพื่อตรวจสอบข้อบกพร่องหรือคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกจำเป็นต้องอาศัยพื้นฐานความรู้สองทางด้วยกัน กล่าวคือ ความรู้ทางฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกและวิศวกรรมเครื่องมือ เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกคือคลื่นกล ดังนั้นคุณลักษณะต่างๆจึงเหมือนพฤติกรรมของคลื่นกล เมื่อพิจารณาจากสมการคลื่น คลื่นอัลตราโซนิกจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วที่แตกต่างกันไปในแต่ละวัสดุ โดยเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างวัสดุตัวกลางต่างชนิดกันจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่น และมีบางส่วนของคลื่นเคลื่อนที่ต่อไป ดังนั้นเมื่อภายในวัสดุมีข้อบกพร่องหรือโพรงอากาศเกิดขึ้น คลื่นอัลตราโซนิกที่กระทบก็จะสะท้อนกลับ สัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับจะอาศัยเทคโนโลยีทางวิศวกรรมนำไปสร้างเป็นภาพของข้อบกพร่องภายในเนื้อวัสดุชิ้นนั้นที่ตำแหน่งนั้นๆได้ การถ่ายภาพทั่วชิ้นงานจะทำโดยการเคลื่อนตัวส่งและตัวรับสัญญาณอัลตราโซนิกไปทั่วทั้งชิ้นงานในแนวระนาบ และอ่าน

สัญญาณของคลื่นที่สะท้อนกลับมาเพื่อนำไปสร้างภาพรวมของวัสดุ ภาพถ่ายที่สร้างขึ้นจะสามารถบอกถึงตำแหน่งและรายละเอียดของจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุได้ ในทำนองเดียวกันภาพที่ได้ก็จะสามารถบอกถึงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุในแต่ละตำแหน่งของวัสดุได้เช่นเดียวกัน จึงสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์และประเมินผลการทดลอง

เพื่อจะเปิดโอกาสให้มีการศึกษาและวิจัยในรายละเอียดต่อไป ไม่ว่าจะใช้ศึกษาฟิสิกส์ของวัสดุหรือหลักการทดสอบแบบไม่ทำลาย ก่อนอื่นจำเป็นต้องมีระบบสำหรับสร้างภาพด้วยวิธีดังกล่าวเสียก่อน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเน้นการศึกษาและสร้างระบบสร้างภาพวัสดุในแนวระนาบแบบซี-สแกน ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกชนิดความถี่ต่ำ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการสร้างภาพด้วยคลื่นเสียงในระดับจุลภาค (microscopic scale) อีกด้วย เนื่องจากระบบสร้างภาพขนาดจุลภาคด้วยคลื่นเสียงจะแตกต่างที่การใช้หัวโพรบอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงกว่าระบบที่ศึกษาอยู่มาก ในระดับ 100 MHz – 1 GHz [3]

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีเป้าหมายมุ่งเน้นการสร้างและพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกด้วยความถี่ต่ำแบบซี-สแกน เพื่อทำการศึกษาระบบในการสร้างภาพของวัสดุด้วยคลื่นเสียงสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัสดุ โดยสามารถแสดงภาพจุดบกพร่องภายในเนื้อวัสดุที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เครื่องมือและชุดทดลองที่ต้องทำการสร้างและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้แก่ เครื่องสแกนในแนว x-y-z วงจรสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องสแกน วงจรอ่านค่าดิจิทัลเอาต์พุตจากเครื่องตรวจจับ การติดตั้งชุดทดลอง และการพัฒนาโปรแกรมสำหรับอ่านและเก็บข้อมูลดิบ ก่อนนำไปสร้างภาพกราฟฟิคบนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ได้ทำการทดลองศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำระบบไปทดสอบและสร้างภาพของวัสดุต่างๆ เช่น ภาพโครงสร้างภายในของไอซีและวัสดุประเภทพลาสติก เป็นต้น โดยเน้นที่วัสดุประเภทพลาสติกจากกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูปเพื่อแสดงภาพลักษณะการไหลของเนื้อพลาสติกที่เกิดจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอรายละเอียดของระบบสร้างภาพแบบซี-สแกน ด้วยอัลตราโซนิก ความถี่ต่ำในระดับ 5 MHz ตั้งแต่หลักการเบื้องต้น แนวทางการออกแบบ จนถึงการนำระบบไปประยุกต์ใช้สร้างภาพวัสดุชนิดต่างๆ โดยแบ่งรายละเอียดในแต่ละส่วนออกเป็นบทย่อยๆ ดังนี้ ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่เกี่ยวข้อง สมการการเคลื่อนที่ของอัลตราโซนิก ความสัมพันธ์ของอัลตราโซนิกกับวัสดุ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ เพื่อสร้างความรู้ความเข้าใจถึงพื้นฐานและหลักการของคลื่นอัลตราโซนิก เมื่อเข้าใจในเนื้อหาและหลักการประยุกต์ใช้งานด้วยเทคนิคคลื่นอัลตราโซนิกเบื้องต้นแล้ว ต่อไปในบทที่ 3 จะกล่าวถึงรายละเอียดถึงเทคนิคการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่สำคัญ เพื่อให้เข้าใจและเรียนรู้พื้นฐานของระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่จำเป็น ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องสแกนทางกลในแนว xyz วงจรควบคุมมอเตอร์สำหรับชุดสแกน และโฟลชาร์ตไดอะแกรมของโปรแกรมสร้างภาพ เนื้อหาในบทที่ 5 เป็นผลการทดลองเพื่อศึกษาหลักการในการสร้างภาพจุดบกพร่องภายในเนื้อชิ้นงานและความเป็นไปได้ในการนำเอาคลื่นอัลตราโซนิกไปสร้างภาพวัสดุ สุดท้ายในบทที่ 6 เป็นสรุปผลการทดสอบเครื่องมือและการทดลองพร้อมแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต ข้อเสนอแนะ และวิจารณ์

บทที่ 2

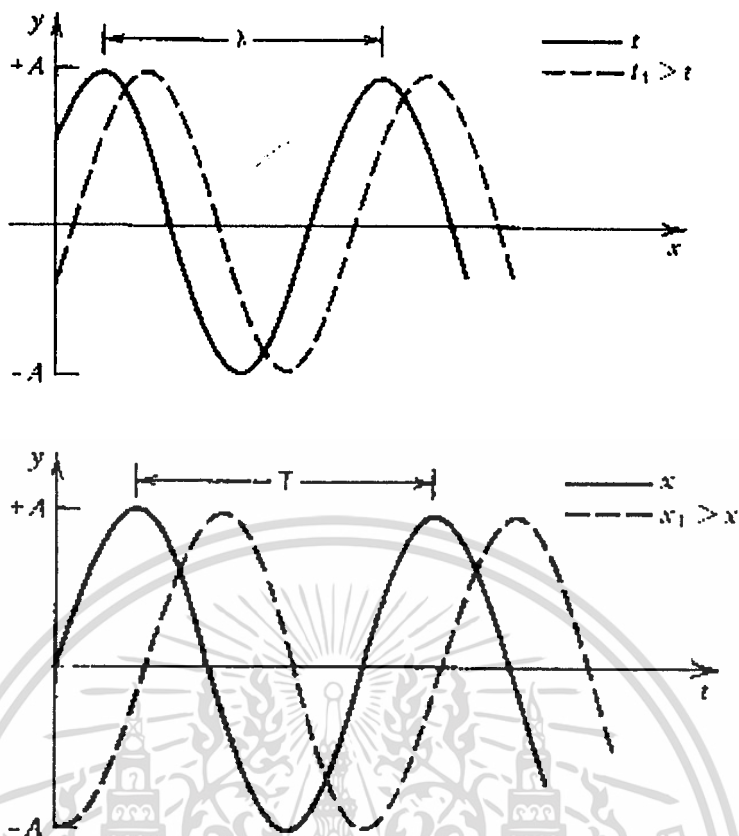
ฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิก

จากความรู้ฟิสิกส์พื้นฐานหรือฟิสิกส์ยุคดั้งเดิม เราสามารถแยกพิจารณาฟิสิกส์ของคลื่น ออกได้เป็นสองประเภทด้วยกัน ได้แก่ คลื่นที่เคลื่อนที่ได้โดยต้องอาศัยตัวกลาง เช่น คลื่นเสียงและ คลื่นกล และคลื่นที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องใช้ตัวกลาง เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นอัลตราโซนิกจัด เป็นคลื่นกล กล่าวคือจะเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยการสั่นของอนุภาคตัวกลาง ดังนั้นพฤติกรรมต่างๆของ คลื่นอัลตราโซนิกสามารถอธิบายได้โดยฟิสิกส์ของคลื่นกล ในบทนี้เราจะศึกษาฟิสิกส์ของคลื่น ก่อนในช่วงต้น เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิกต่อไป โดยมีเป้าหมายที่จะ ศึกษาและเข้าใจพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก และในส่วน ท้ายจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นอัลตราโซนิกและวัสดุในเชิงฟิสิกส์

2.1 ฟิสิกส์ของคลื่นและคลื่นอัลตราโซนิก

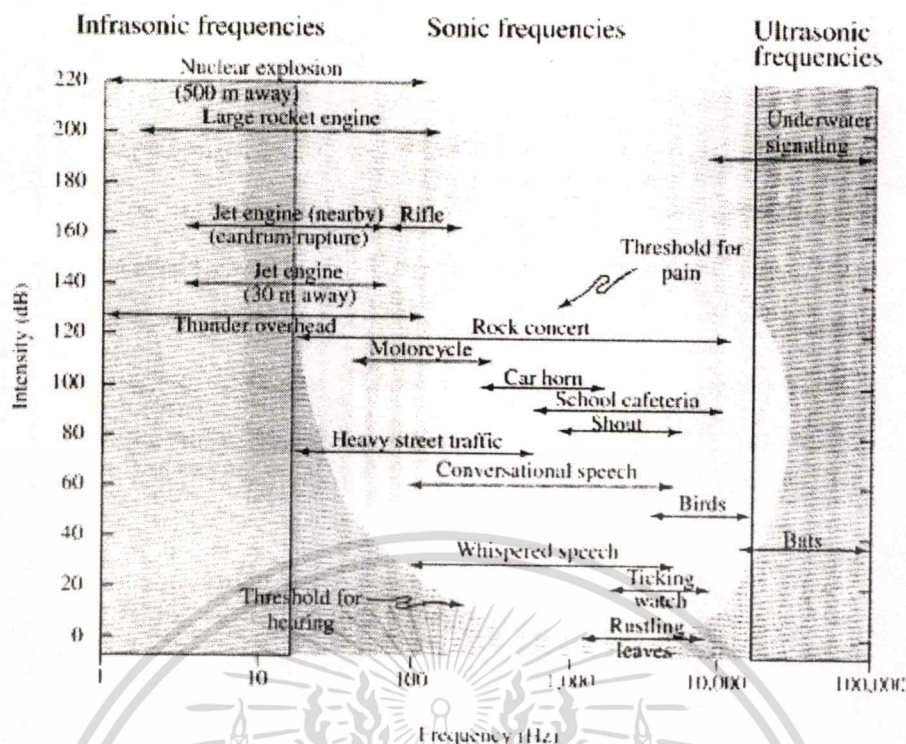
นักฟิสิกส์ให้นิยามของคลื่นว่าเป็น การสั่นของอนุภาคกลับไป-กลับมาในลักษณะเป็นคาบ ซึ่งมีพารามิเตอร์พื้นฐานคือ (1) คาบเวลา (periodic cycle, T) คือระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ หรือก็คือ ระยะเวลาที่อนุภาคสั่นไป แล้วกลับมายังตำแหน่งเดิม (2) ความยาวคลื่น (wavelength, λ) เป็นระยะทางที่อนุภาคสั่นไปแล้วกลับครบ 1 รอบ และ (3) ความถี่ (frequency, f) คือจำนวนรอบที่อนุภาคสั่นในเวลา 1 วินาที หรือ เป็นส่วนกลับของคาบเวลา ความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่ความเร็วของการเคลื่อนที่ของคลื่น ที่เงื่อนไขขอบเขตว่าอุดมสมบูรณ์และความ ดันคงที่ และเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางยืดหยุ่นสมบูรณ์ (perfectly elastic material) จะสัมพันธ์ กับ ความถี่ คาบเวลาในการเคลื่อนที่ และ ความยาวคลื่น ดังสมการที่ (2.1)

$$v = f\lambda = \lambda/T \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของคลื่น คาบเวลา และความยาวคลื่น

เรายังสามารถแยกคลื่นออกได้อีกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (1) คลื่นที่เคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น แสง คลื่นวิทยุ เป็นต้น ซึ่งเราเรียกรวมเป็น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ (2) คลื่นที่ต้องใช้ตัวกลางเป็นตัวถ่ายทอดพลังงานในการเคลื่อนที่ เช่น เสียง คลื่นน้ำ เป็นต้น โดยเราเรียกรวมว่าเป็น คลื่นกล (mechanical wave) โดยคลื่นอัลตราโซนิกจัดเป็นคลื่นเสียงหรือคลื่นกลแบบหนึ่ง ซึ่งต้องใช้ตัวกลางเป็นตัวถ่ายทอดพลังงาน และมีความถี่สูงกว่าความถี่ของเสียง หรือ มากกว่า 20kHz ขึ้นไป เราจึงเรียกคลื่นอัลตราโซนิกว่าเป็นคลื่นเหนือเสียง (ความหมาย ultra แปลว่า สูง หรือเหนือ และ sonic/sound แปลว่า เสียง) แสดงว่า ความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิกนั้น สั้นกว่าคลื่นเสียงทั่วไป ซึ่งจะสะท้อนกลับเมื่อคลื่นวิ่งชนกับสิ่งกีดขวางที่มีขนาดเล็กๆ คลื่นอัลตราโซนิกจึงสามารถใช้ตรวจสอบรอยร้าวหรือจุดบกพร่องขนาดเล็กภายในชิ้นงานวัสดุได้ดีกว่าคลื่นเสียงทั่วไป ช่วงของความถี่ ชนิดของคลื่นเสียงและย่านการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ช่วงของความถี่ ชนิดของคลื่นเสียงและการใช้งาน

โดยธรรมชาติแล้วการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในวัสดุตัวกลางใดๆ เปรียบเสมือนการใส่แรงกระทำจากภายนอกเข้าไปกระทำกับกลุ่มอนุภาคที่ยึดเกาะกันไว้ของวัสดุตัวกลาง กล่าวคืออนุภาคของวัสดุแต่ละชนิดยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของแต่ละอนุภาค แรงยึดเหนี่ยวจะแข็งแรงหรือไม่ ขึ้นอยู่กับจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (concentration) และระยะห่างระหว่างอะตอมของอนุภาค รวมถึงโครงสร้างอะตอมและโมเลกุลของวัสดุ ในกรณีของแก๊สเนื่องจากมีจำนวนอะตอมต่อปริมาตรน้อย ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวของแก๊สจึงแข็งแรงน้อยกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคของของแข็งที่มีความหนาแน่นของอะตอมสูง และเนื่องจากวัสดุตัวกลางต่างชนิดกันจะมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน อีกทั้งระยะห่างระหว่างอะตอมก็ไม่เท่ากัน ทำให้ในแต่ละตัวกลางมีแรงพันธะยึดเหนี่ยวที่ไม่เท่ากัน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมจึงได้แบ่งแยกสสารออกเป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวัสดุของแข็ง ซึ่งเป็นประเภทวัสดุที่เรากำลังศึกษาอยู่ อนุภาคหรืออะตอมที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นของแข็งนั้นจะยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะเพื่อยึดให้เกิดเป็นรูปร่างของวัสดุชนิดนั้นๆขึ้นมา โดยในสภาวะสมดุล ไม่มีแรงและพลังงานอื่นจากภายนอกเข้ามากระทำ อะตอมแต่ละตัวจะยึดติดกันด้วยแรงดูดและแรงผลักระหว่างอะตอมและหยุดนิ่ง เปรียบเสมือนกับอะตอมแต่ละตัวถูกผูกติดกันไว้ด้วยสปริง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นแบบจำลองโครงผลึกที่เกิดจากการยึดติดกันของอะตอมของแข็งใน 1 มิติ เมื่อใส่แรงจากภายนอกไปกระทำกับวัสดุ อะตอมจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุลตามพลังงานที่ได้รับเข้ามา และส่งถ่ายพลังงานต่อไปให้กับอะตอมตัวต่อไป และเมื่อพลังงานที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนให้กับอะตอมมีลักษณะเป็นรูปของฟังก์ชันคลื่น คือมีแรงไปผลักอะตอมให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและดึงอะตอมให้วิ่งกลับไปกลับมาเป็นคาบ (periodic) แรงดังกล่าวก็จะถ่ายเทพลังงานไปยังอะตอมตัวถัดๆ ไปด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ หรือในกรณีนี้ก็คือแรงของสปริงที่ผูกติดอยู่ระหว่างอะตอมแต่ละตัว เปรียบเสมือนการเกิดการสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายระหว่างมวลที่ผูกติดกับสปริงดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ถ้าแรงที่มากระทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากสภาวะสมดุลในแนวเส้นตรงเดียวกันกับการเรียงตัวของอะตอมก็จะเกิดคลื่นชนิดตามขวาง อีกทางหนึ่งถ้าอะตอมเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศการเรียงตัวของอะตอมเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ คลื่นที่เคลื่อนที่ไปจะเกิดเป็นคลื่นตามขวาง ดังรูปที่ 2.3



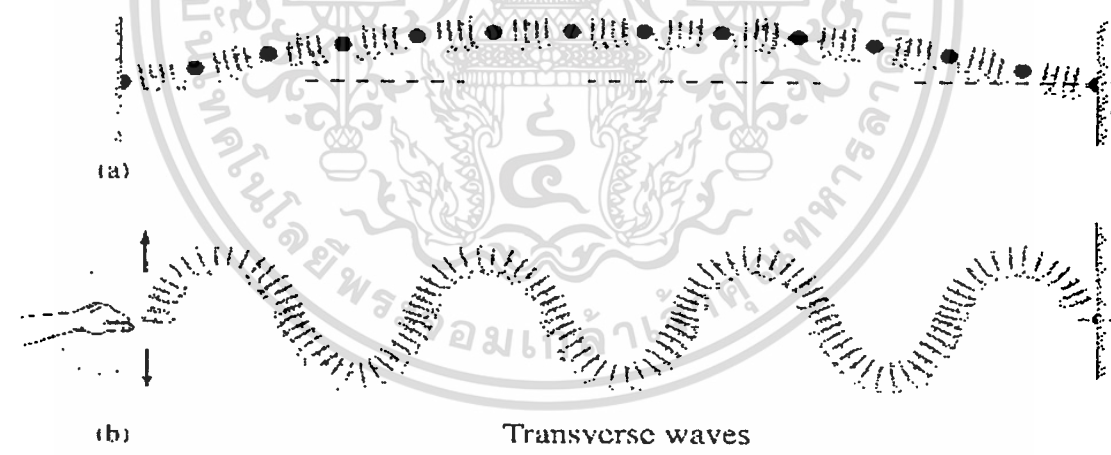
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบจำลองโครงผลึก



(ข) การเกิดคลื่นตามยาว



(ค) การเกิดคลื่นตามขวาง

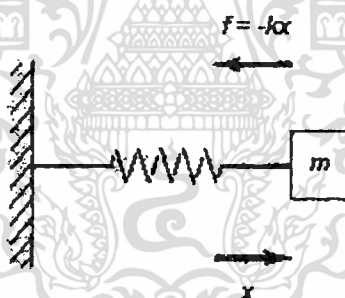
รูปที่ 2.3 แบบจำลองอะตอมของแข็งและการเกิดคลื่นภายในของแข็งเมื่อได้รับแรงภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น

2.2.1 การเคลื่อนที่ของการสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

จากหัวข้อที่แล้ว เราได้เปรียบเทียบการยืดหยุ่นของอะตอมในของแข็งเป็นเสมือนดั่งมวลที่ยึดติดเข้าด้วยกันด้วยสปริง เมื่อได้รับแรงภายนอกมากระตุ้น มวลก้อนที่หนึ่งจะส่งถ่ายพลังงานไปยังมวลที่ติดกันผ่านสปริง ซึ่งเมื่อมองกลับไปทีฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่ จะมีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนที่ของฮาร์มอนิกอย่างง่าย (simple harmonic motion) ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของมวลที่ผูกติดอยู่กับสปริงจะมีลักษณะเป็นแบบการสั่น (oscillation หรือ vibration) นั่นเอง ดังนั้นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิก ในขั้นต้นขอเริ่มจากการวิเคราะห์มวลที่ผูกติดอยู่กับสปริงในหนึ่งมิติก่อน เพื่อให้เข้าใจในฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่แบบอย่างง่าย เพื่อเป็นฐานในการไปพิจารณาในเงื่อนไขขอบเขตอื่นต่อไป รูปที่ 2.4 แสดงภาพของมวลยึดติดกับสปริง เพื่อใช้พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกแบบ อย่างง่าย



รูปที่ 2.4 การสั่นแบบอย่างง่าย

จากรูปที่ 2.4 เราสามารถวิเคราะห์เพื่อหาสมการการเคลื่อนที่ได้จากกฎของนิวตัน โดยเราสมมติให้แรงที่กระทำเป็นแรงที่ได้จากการสะสมพลังงาน (restoring force (f) หน่วยเป็น นิวตัน N) เนื่องจากการยืดหรือหดของสปริง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.2) เมื่อ x เป็นการขจัดหรือระยะทาง (displacement มีหน่วยเป็นเมตร m) ที่ห่างจากตำแหน่งสมดุลหรือที่สถานะนิ่ง ของมวล m (หน่วยเป็นกิโลกรัม kg)

$$f = -kx \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย k เป็นค่าคงที่ของสปริง (stiffness หรือ spring constant) มีหน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m) เครื่องหมาย "ลบ" บอกเราว่า แรงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางสวนกันกับทิศของระยะทาง x จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันที่ว่า แรง จะสัมพันธ์กันโดยตรงกับ มวล และ ความเร่งของการเคลื่อนที่ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการใหม่ในรูป ดิฟเฟอเรนเชียลฟอร์ม (differential form) ได้เป็น

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

เราสามารถจัดรูปใหม่เป็นสมการการเคลื่อนที่ของมวลติดสปริงได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (2.4)$$

ในทางคณิตศาสตร์ เราใช้วิธีหาคำตอบของสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้เป็นการแทนรูปคำตอบทั่วไปเข้าไปในสมการ เพื่อทดสอบว่าคำตอบที่สมมติเข้าไปในนั้นถูกต้องหรือไม่ เนื่องจากเราพอจะเดาได้จากรูปแบบของสมการที่ (2.4) ว่าคำตอบน่าจะเป็นฟังก์ชันคลื่น ดังนั้นจึงสมมติรูปแบบคำตอบทั่วไปดังต่อไปนี้ลงไปแทนในสมการที่ (2.4)

$$x = Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t} \quad (2.5)$$

โดย A และ B เป็นค่าคงที่ใดๆ (arbitrary constant)

$$\omega = \text{ความถี่เชิงมุม (radian/sec)} = 2\pi f$$

ซึ่งค่า A และ B จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งเราจะพิจารณาต่อไป ก่อนอื่นเรามาศึกษาค่าความถี่เชิงมุมก่อน ว่าสัมพันธ์กันกับสมการที่ (2.4) อย่างไร จาก

$$\begin{aligned} x &= Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t} \\ \frac{dx}{dt} &= i\omega Ae^{i\omega t} - i\omega Be^{-i\omega t} \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= i^2\omega^2 Ae^{i\omega t} + i^2\omega^2 Be^{-i\omega t} = -\omega^2 x \end{aligned}$$

จัดรูปใหม่เพื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.4) ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.6) ไปเทียบกับสมการที่ (2.4) จะเห็นว่า

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi f \quad (2.7)$$

ซึ่งหมายความว่า ความถี่ในการสั่นหรือการเคลื่อนที่ของคลื่นมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของสปริง (k) และมวล (m) เรียกความถี่นี้ว่าเป็น ความถี่ธรรมชาติของวัสดุที่มีลักษณะเป็นมวลผูกติดกับสปริง จากสมการที่ (2.5) เราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x = Ae^{i\sqrt{\frac{k}{m}}t} + Be^{-i\sqrt{\frac{k}{m}}t} \quad (2.8)$$

ค่าคงที่ใดๆของ A และ B ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ของแต่ละระบบที่เราต้องการจะพิจารณา

โดยสรุปแล้ว การพิจารณาถึงการสั่นโดยธรรมชาติของวัสดุของแข็ง โดยใช้แบบจำลองของมวลผูกติดกับสปริง เมื่อยังไม่มีแรงเข้ามากระทำจากภายนอก พบว่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติของวัสดุมีความสัมพันธ์กับมวลและค่าคงที่ของสปริงดังสมการที่ (2.7) และเป็นไปตามสมการการเคลื่อนที่ (2.6) ซึ่งในท้ายที่สุดมีผลเฉลยดังสมการที่ (2.8) โดยที่ยังไม่พิจารณาเงื่อนไขเริ่มต้น ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจในที่มาที่ไปของฟิสิกส์เป็นหลัก สมการที่ (2.8) จึงติดค่าคงที่ใดๆของ A และ B เอาไว้

2.2.2 การเคลื่อนที่ของการสั่นที่มีผลของการลดทอนแอมพลิจูด

อนุภาคของแข็งไม่สามารถสั่นอยู่ตลอดเวลาได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่ต้องการมีการสูญเสียพลังงานไปบางส่วน เกิดเป็นความร้อนในการเคลื่อนที่ เสมือนเป็นแรงต้านทานหรือแรงเสียดทาน ดังนั้นเมื่ออนุภาคเกิดการสั่น ความแรงของการสั่นหรือแอมพลิจูดของการสั่นจะค่อยๆ ลดลง ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นในของแข็งตามแบบจำลองของมวลยึดติดกับสปริง จึงเพิ่มแบบจำลองของแรงเสียดทานทางกล (Frictional/Dissipative force model) แสดงดังรูปที่ 2.5 แรงนี้ทำให้เห็นผลของการเกิดแอมป์ (damping effect) ของการสั่น หรือ การลดลงของความแรงของการสั่นต่อเวลา



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของการสั่นที่มีผลของการลดทอนความแรงเนื่องจากความร้อน

แรงเสียดทานทางกลนี้คือการลดลงของแอมพลิจูดของระยะทาง x ต่อเวลาที่เกิดการสั่นหรือเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไป โดยกำหนดให้ลดลงด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ความต้านทานเชิงกล (mechanical resistance) R_m ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานทางกลได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_r = -R_m \frac{dx}{dt} \quad (2.9)$$

โดยที่เครื่องหมาย "ลบ" แสดงถึงทิศทางที่ตรงกันข้ามระหว่างแรงที่เกิดขึ้นกับความเร็วในการเคลื่อนที่ (dx/dt) จากรูปที่ 2.5 เมื่อเพิ่มแบบจำลองของตัวดูดกลืนทางกล (absorber) หรือแรงเสียดทานทางกลเข้าไป เราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของการสั่นได้ใหม่ว่า

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ เมื่อหารด้วย m ตลอด และจากสมการที่ (2.7) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของการสั่น ที่คิดผลของการลดทอนลงของความแรงหรือแอมพลิจูดเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น เพราะแรงเสียดทานดังสมการที่ (2.10)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{R_m}{m} \frac{dx}{dt} + \omega^2 x = 0 \quad (2.10)$$

เพื่อหาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่นี้ จึงสมมติคำตอบในรูปทั่วไปแล้วนำไปทดสอบลงในสมการที่ (2.10) เพื่อหาผลเฉลยสำหรับเงื่อนไขขอบเขตในการคิดผลกระทบของการลดทอนอันเนื่องมาจากความร้อนและแรงเสียดทาน โดยมีรูปฟอร์มต่อไปนี้

$$x = Ae^{\gamma t}$$

แทนลงในสมการที่ (2.10) ได้

$$\left(\gamma^2 + \frac{R_m}{m} \gamma + \omega^2 \right) Ae^{\gamma t} = 0$$

เนื่องจากผลเฉลยของ x จะต้องเป็นจริงเสมอ ดังนั้น จึงไม่คิดกรณีที่เทอม x เป็นศูนย์ เทอมที่เท่ากับศูนย์จึงเป็นเทอมข้างหน้า

$$\gamma^2 + \frac{R_m}{m} \gamma + \omega^2 = 0$$

ซึ่งจะเท่ากับ

$$\gamma = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega^2}$$

เมื่อ $\beta = R_m/2m$

ในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับเสียง (acoustics) ค่าของความต้านทานเชิงกล R_m มีค่าต่ำมากๆ ดังนั้น $\omega > \beta$ และ γ จะกลายเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งถ้าคิดกรณีการสั่นที่ไม่มีความต้านทานเชิงกล (undamped oscillators) แล้ว จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma = \pm\sqrt{-\omega^2} = \pm i\omega$$

เพื่อความง่ายเราจึงนิยามค่าคงที่ใหม่ ω_d (เป็นความถี่ธรรมชาติของ damped oscillation) ขึ้นมา

$$\omega_d = \sqrt{\omega^2 - \beta^2}$$

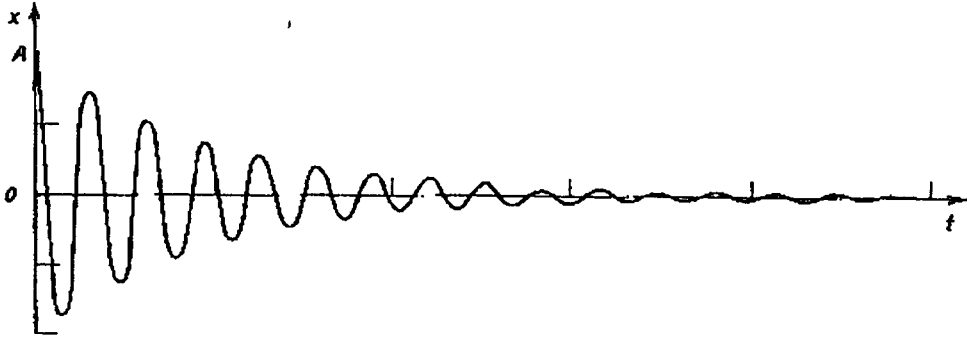
ซึ่ง γ จะสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\gamma = -\beta \pm i\omega_d$$

จะสังเกตเห็นว่า ค่าของ ω_d มีค่าน้อยกว่าความถี่เชิงมุมธรรมชาติ ω เสมอ ดังนั้นสามารถเขียนผลเฉลยใหม่สำหรับสมการ (2.10) ได้เป็น

$$x = e^{-\beta t} \times A e^{\pm i\omega_d t} \quad (2.11)$$

โดยสังเกตว่า เทอมเอ็กโปเนนเชียล (exponential) ด้านหน้า เป็นเทอมของการลดทอนความแรงหรือแอมพลิจูดของสัญญาณ ต่อเวลา ด้วยแฟกเตอร์ β ในทางฟิสิกส์เรียกเทอม β นี้ว่าเป็น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) ซึ่งจะทำให้การสั่นแบบฮาร์โมนิกอิสระ (free harmonic oscillation) มีสัญญาณแอมพลิจูดลดลงกับเวลา ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสั่นแบบฮาโมนิกในกรณีที่มีค่าคงที่ของการดุดกลืน

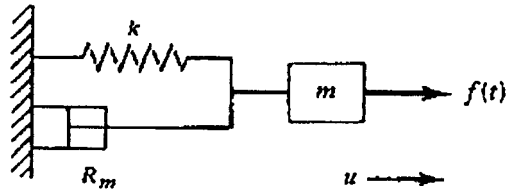
สรุปแล้ว การคิดผลของการลดทอนความแรงของการสั่นเนื่องจากความร้อนหรือการเสียดทานในการเคลื่อนที่ของการสั่นของวัสดุของแข็ง จากเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดพบว่า การลดทอนของแอมพลิจูดของการสั่น จะลดลงเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลฟังก์ชันต่อเวลา ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์การดุดกลืนของวัสดุแต่ละชนิด โดยในกรณีของแบบจำลองของมวลที่ยึดติดกันด้วยสปริงและตัวดุดกลืนดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 ค่าคงที่การดุดกลืนจะสัมพันธ์กับมวลและความต้านทานเชิงกล

2.2.3 การเคลื่อนที่ของการสั่นเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ

จากหัวข้อที่แล้วเห็นว่า ปกติวัสดุของแข็งจะไม่เกิดการสั่นด้วยตัวเอง หรือถึงแม้จะเกิดการสั่นขึ้นมาบ้างก็จะลดทอนหายไปในที่สุด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วนั้น จะเกิดการสั่นหรือคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางได้ จำเป็นต้องมีแรงจากภายนอกมาป้อนให้กับอะตอมของแข็ง อะตอมของของแข็งจึงจะเกิดการสั่นและเป็นคลื่นเคลื่อนที่ส่งถ่ายพลังงานไปยังอะตอมตัวอื่นๆได้ จากแบบจำลองในหัวข้อ 2.2 ซึ่งเราคิดในสถานะสมดุล (equilibrium) โดยคำนึงถึงผลของการลดทอนความแรงในการสั่น อันเนื่องมาจากความร้อนและการเสียดสีเสียดทาน จากแบบจำลองในรูปที่ 2.5 เราเพิ่มแรงจากภายนอก $f(t)$ เข้าไปกระทำ สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ใหม่ได้ดังสมการ (2.12) และวาดรูปของแบบจำลองใหม่ได้ดังรูปที่ 2.7

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการสั่นในของแข็งที่พิจารณาผลของการลดทอนแอมพลิจูดและแรงจากภายนอก

การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อตรวจสอบวัสดุของแข็ง ใช้วิธีสร้างคลื่นอัลตราโซนิกด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า โดยคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกสร้างขึ้น จะมีอยู่สองแบบด้วยกัน คือ แบบคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave, cw) และ แบบปล่อยคลื่นเป็นพัลส์ (pulse wave) โดยคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นแรงอินพุทหรือ $f(t)$ ให้กับวัสดุของแข็ง เพื่อพิจารณาให้เกิดความเข้าใจในฟิสิกส์ถึงที่มาที่ไปในเบื้องต้น จึงคิดเฉพาะกรณีแรงอินพุทเป็นคลื่นแบบต่อเนื่อง และ คิดเฉพาะในกรณีสภาวะคงตัว (steady state) ดังนั้นสามารถแทนแรงที่กระทำจากภายนอก $f(t)$ เป็นฟังก์ชันคลื่นในรูปทั่วไปได้เป็น $f(t) = F \exp(i\omega t)$ โดย F แทนแอมพลิจูดสูงสุดของแรงที่ป้อนให้กับของแข็ง ซึ่งสามารถเขียนสมการที่ (2.12) ใหม่ได้เป็น

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R_m \frac{dx}{dt} + kx = F e^{i\omega t} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) และ (2.13) ด้วยมุมมองของผู้เขียนซึ่งถนัดฟิสิกส์ทางไฟฟ้า เราอาจนำงานทางกลศาสตร์ไปเปรียบเทียบกับงานทางไฟฟ้าได้ โดยสมการที่ (2.13) เปรียบเทียบได้กับวงจรอนุกรม RLC ของไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 และสมการที่ (2.14)

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = V e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

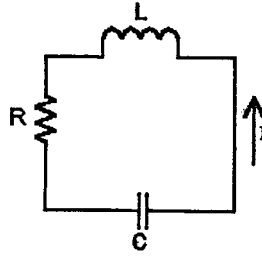
โดยที่ q แทน ประจุไฟฟ้า (charge)

R แทน ความต้านทานไฟฟ้า (resistance)

L แทน ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance)

C แทน ความเก็บประจุไฟฟ้า (capacitance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรอนุกรม RLC

จะเห็นว่าเราสามารถที่นำเอาพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า RLC ไปคิดพิจารณาในกรณีของการสั่นของมวลติดสปริงในกลศาสตร์ได้ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างวงจรอนุกรม RLC กับ กลศาสตร์ของมวลติดสปริง

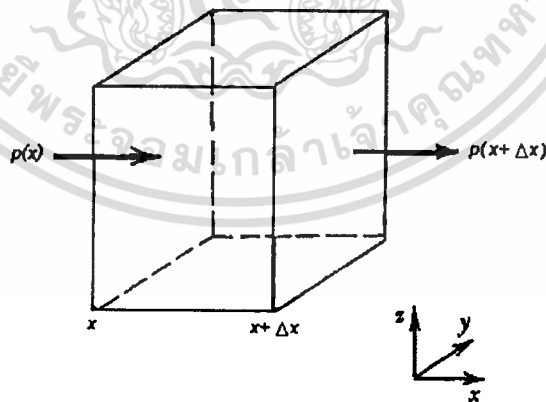
	วงจรไฟฟ้า	กลศาสตร์
ตัวแปร (variable)	ประจุ q	ตำแหน่ง x
สัมประสิทธิ์ของตัวแปร	$1/C$	k
สัมประสิทธิ์ของ $d(\text{ตัวแปร})/dt$	R	R_m
สัมประสิทธิ์ของ $d^2(\text{ตัวแปร})/dt^2$	L	m
เทอมของแรงกระทำจากภายนอก (driving force)	$V \exp(i\omega t)$	$F \exp(i\omega t)$
$d(\text{ตัวแปร})/dt$	กระแสไฟฟ้า I	ความเร็ว u
ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\sqrt{\frac{k}{m}}$
อิมพีแดนซ์ (impedance)	$Z = \frac{V}{I}$ $Z \equiv \sqrt{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + R^2}$	$Z = \frac{F}{u}$ $Z \equiv \sqrt{\left(\omega m - \frac{k}{\omega}\right)^2 + R_m^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางช่วยให้เข้าใจคลื่นกลหรือคลื่นอัลตราโซนิคที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวกลางของแข็งที่ ถูกป้อนคลื่นเข้ามากระทำจากภายนอกได้เป็นอย่างดี โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญและน่าสนใจคือ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง หรือ อิมพีแดนซ์ของเสียง ซึ่งแปรผันตรงกับแรงภายนอกที่ ป้อนให้กับวัสดุตัวกลางและแปรผกผันกับความเร็วที่อนุภาคในตัวกลางสามารถเคลื่อนที่ได้

2.2.4 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น

จากหัวข้อทั้งหมดที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงพื้นฐานทางฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่ของการสั่น หรือคลื่นที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวกลางของแข็ง โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่ง x เทียบกับเวลาที่ เกิดการสั่นหรือเวลาที่คลื่นเดินทางไป ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงสมการการเคลื่อนที่ของอัลตราโซ นิค ซึ่งพิจารณาการเคลื่อนที่ของการสั่นหรือคลื่นกล ทั้งในกรณีเทียบกับเวลา และเทียบกับตำแหน่ง แต่การพิจารณาระบบในความเป็นจริงไม่ได้พิจารณาเพียงแค่อะตอมหนึ่งอะตอมที่ยึดติดกับแรง สปริง สิ่งที่พิจารณาเป็นอะตอมที่มีอยู่มากกว่าหลายล้านล้านตัวภายในหนึ่งหน่วยปริมาตร ดังนั้น ลองจินตนาการถึง คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางในทิศทาง x เนื่องจากคลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว ดังนั้น โมเลกุลหรืออะตอมภายในตัวกลางก็จะการอัดและขยายตัวเกิดความแตกต่างของความหนา แน่นภายในวัสดุตัวกลาง และเคลื่อนที่แบบอัดและขยายไปในทิศทางเดียวกับแรงที่มากระทำ หรือก็ คือเคลื่อนที่ไปในทิศทาง x



รูปที่ 2.9 การไหลของมวลในวัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร

จากรูปที่ 2.9 สมมติเงื่อนไขขอบเขตในการพิจารณาเสียก่อนว่า วัสดุตัวกลางเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทุกด้าน และเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous) เมื่อได้รับแรงจากคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่มาจากทิศทาง x ส่งผลให้เกิดการสั่นภายในปริมาตรของวัสดุ ทำให้การขจัดของการสั่นของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลงไป Δx แรงจากคลื่นที่เข้ามากระทำกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวกลาง นิยามว่าเป็น ความแตกต่างของความดันในแต่ละระยะขจัด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$F = [p(x) - p(x + \Delta x)]A \quad (2.15)$$

เมื่อ F เป็นแรงจากคลื่นเสียงที่มากระทำกับวัสดุ

A เป็นพื้นที่หน้าตัดที่ถูกแรงมากระทำ

p เป็นความดันหรือแรงดัน

พิจารณาเงื่อนไขใน 1 มิติ จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า

$$F = ma = m \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.16)$$

เมื่อ m เป็นมวลของวัสดุตัวกลาง เท่ากับ $\rho A \Delta x$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.15) สามารถเขียนสมการที่ (2.16) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{p(x) - p(x + \Delta x)}{\Delta x} = -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) เมื่อ u เป็นความเร็ว และ d เป็นระยะขจัด สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

เมื่อพิจารณาความดัน p ใน 1 มิติ สามารถเขียนความดันในรูปกฎของฮุก (Hooke's law) ได้ว่า

$$p = -\text{elastic modulus} \times \frac{\partial d}{\partial x} \quad (2.19)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.18) และ (2.19) มารวมกัน จะได้เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\text{elastic modulus}} \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

เรียกสมการ (2.20) ว่าเป็น สมการการเคลื่อนที่ของคลื่น (wave equation) และจากที่ทราบแล้วว่า ความเร็วคลื่น v จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น และ โมดูลัสของความยืดหยุ่น ดังสมการ

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastic modulus}}{\text{density}}} \quad (2.20a)$$

เราจึงเขียนสมการคลื่นใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \quad (2.21)$$

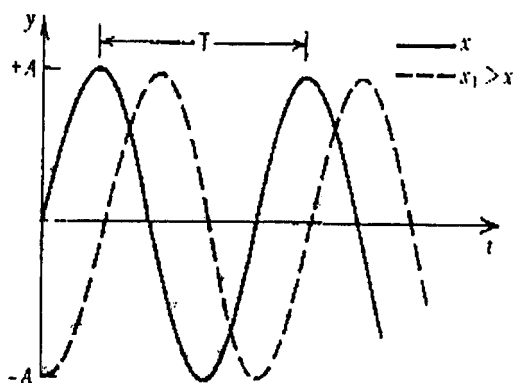
โดยสมการนี้บอกให้ทราบถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นว่า ระยะขจัดหรือความดันของคลื่นเสียงจะเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่อเวลาและต่อระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป โดยคุณสมบัติที่ทำให้คลื่นเดินทางได้ยากหรือง่ายขึ้น ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ ความเร็วคลื่น โดยขึ้นอยู่กับความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์เฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด รูปคำตอบของผลเฉลยทั่วไปเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$d = Ae^{i(\omega t \pm kx)}$$

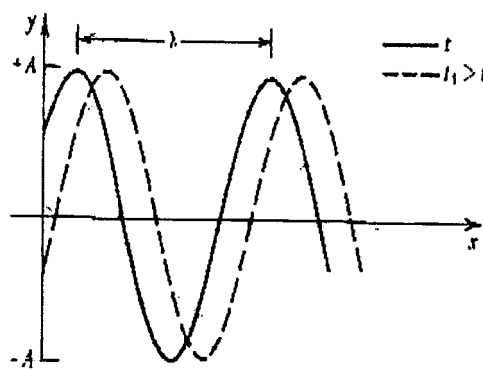
หรือเขียนในรูปของ sine-cosine เฉพาะจำนวนจริง จะได้เป็นฟังก์ชันของ cosine ดังสมการที่ (2.22)

$$d = A \cos(\omega t \pm kt) \quad (2.22)$$

กราฟคำตอบของผลเฉลยของสมการที่ (2.2) แสดงดังรูปที่ 2.10



(ก) เทียบกับเวลา



(ข) เทียบกับระยะขจัด

รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของคลื่นเทียบกับเวลาและระยะขจัด

2.3 สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกและความสัมพันธ์กับวัสดุของแข็ง

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้นิยามความเร็วคลื่นว่ามีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นและความยืดหยุ่นของวัสดุตัวกลาง ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาที่ไปที่มาของความสัมพันธ์นั้น ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็ง โดยก่อนอื่น พิจารณาวัสดุตัวกลางที่สภาวะสมดุล เราทราบว่าอะตอมที่ยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันไว้จะหยุดนิ่ง หรือกล่าวคือความเค้น (stress) ภายในวัสดุจะถูกปรับให้อยู่ในสถานะที่มีพลังงานค่าที่ต่ำสุด ดังนั้นแรงทั้งหมดที่กระทำกับวัสดุ F ต้องเท่ากับศูนย์ที่สภาวะสมดุล นั่นหมายความว่าแรงที่เกิดภายในวัตถุ (F_{int}) จะต้องเท่ากับแรงกระทำภายนอกวัตถุ (F_{ext}) นั้น ดังนั้นที่ตำแหน่งสมดุลจะได้ว่า

$$F_{int} = F_{ext}$$

โดยตัวอย่างของแรงภายนอกที่มากกระทำกับวัตถุ ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (gravity) เมื่อพิจารณาวัตถุแยกออกเป็นชิ้นๆ ที่มีปริมาตรต่างกัน แรงภายนอกที่มากกระทำนั้นจะสร้างแรงกระทำต่อปริมาตร (f_{ext}) ของชิ้นวัตถุในแต่ละชิ้นขึ้น ผลรวมของแรงที่มากกระทำจากภายนอกทั้งหมดจึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็นผลรวมของแรงต่อปริมาตรที่กระทำกับวัสดุจากภายนอก หรือก็คือการอินทิเกรต f_{ext} ต่อปริมาตรของชิ้นงานแสดงดังสมการที่ (2.23)

$$F_{ext} = \int f_{ext} dV \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวัตถุไม่อยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว กล่าวคือวัตถุกำลังเคลื่อนที่ จากกฎข้อที่สองของนิวตันทราบว่าผลรวมของแรงที่กระทำกับวัตถุ ทั้งแรงกระทำจากภายในและภายนอกเท่ากับผลคูณของมวลกับความเร่ง ดังนั้นสมการที่ (2.23) จะสามารถเขียนเป็นสมการได้ใหม่ว่า

$$F = F_{\text{int}} + F_{\text{ext}} = \int \rho \ddot{r} dV \quad (2.24)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของวัสดุ และ

\ddot{r} เป็นความเร่งของวัตถุ

แทนสมการที่ (2.23) ลงในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$F_{\text{int}} = \int (-f_{\text{ext}} + \rho \ddot{r}) dV \quad (2.25)$$

เพื่อลดรูปให้สามารถเข้าใจได้ง่ายขึ้น กำหนดให้

$$f = -f_{\text{ext}} + \rho \ddot{r} \quad (2.26)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.25) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$F_{\text{int}} = \int f dV \quad (2.27)$$

จากฟิสิกส์เบื้องต้นแรงที่กระทำกันภายในเนื้อวัสดุ F_{int} แปรผันกับความเค้นภายในเนื้อวัสดุ (stress, S) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$dF = S \cdot da \quad (2.28)$$

เมื่อ a คือ พื้นที่ที่ถูกแรงมากระทำให้เกิดความเค้น เมื่อพิจารณาวัสดุในสภาพความเป็นจริง คุณสมบัติของวัสดุจะแตกต่างกันไปในแต่ละทิศทาง (anisotropic material) ซึ่งสามารถเขียนฟังก์ชันของความเค้นใหม่ ในรูปของเทนเซอร์เมตริกซ์ (tensor) ได้ดังนี้

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x สมการที่ (2.28) เขียนได้เป็น

$$dF_x = (s_{xx}n_x + s_{xy}n_y + s_{xz}n_z) \cdot da \quad (2.30)$$

โดย n เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (normal vector) ทำหน้าที่แสดงทิศทางของความเค้น ลองเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่เหมือนกับสมการที่ (2.27) โดยการอินทิเกรตสมการที่ (2.30) จะได้เป็น

$$\int dF_x = \int (s_{xx}n_x + s_{xy}n_y + s_{xz}n_z) \cdot da = \int f_x dV \quad (2.31)$$

เห็นว่ารูปฟอร์มของสมการ (2.31) ตรงกลางมีลักษณะเหมือนกับทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's theorem)

$$\int \vec{A} \cdot \vec{n} da = \int \nabla \cdot \vec{A} dV$$

ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนรูปสมการ (2.31) ใหม่ได้เป็น

$$\int \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{xz}}{\partial z} \right) dV = \int f_x dV \quad (2.32)$$

เมื่อเอาอินทิเกรตโดยปริมาตรออก จะสามารถเขียนรูปสมการอนุพันธ์ (differential equation) ในรูปของ f ทั่วไปได้ว่า

$$f_i = \sum_j \frac{\partial s_{ij}}{\partial x_j}$$

ซึ่งบอกให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อปริมาตรหรือความหนาแน่นของแรง (force density) กับความเค้น โดยเมื่อทราบว่าแรงที่กระทำเป็นไปตามสมการที่ (2.26) ซึ่งบอกถึงความเร่ง \ddot{x} ของวัสดุตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงการขจัดหรือระยะทางต่อเวลา และทราบอีกว่าความเค้น (stress) มีความสัมพันธ์กับความเครียด (strain) ดังสมการ

$$s_{ij} = C_{ijkl} e_{kl}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของสมการคูลุง์ยากซับซ้อน เนื่องจากความเค้นและความเครียดต่างเป็นเมตริกส์ในแนว $x y z$ หรือเป็นเมตริกส์แบบ 3×3 ดังนั้นค่า C หรือ ค่าความยืดหยุ่น (elasticity) จะเป็นสัมประสิทธิ์ที่มีขนาดของเมตริกส์ถึง 9×9 หรือมีสัมประสิทธิ์ 81 สัมประสิทธิ์ด้วยกัน การพิจารณาเป็นเรื่องยุ่งยากและมุ่งเน้นงานทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเหมาะสมแก่ผู้สนใจและนักฟิสิกส์ทฤษฎีที่ต้องการศึกษาลงลึกในรายละเอียดต่อไป แต่เนื่องจากจุดประสงค์ เพื่อเพิ่มเติมความเข้าใจในความสัมพันธ์ของฟิสิกส์ระหว่างวัสดุของแข็งกับคลื่นอัลตราโซนิก จึงขอพิจารณาผลลัพธ์สุดท้ายในกรณีของวัสดุที่มีความเค้นและความเครียดเหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic material) เราสามารถเขียนรูปทั่วไปของสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดดังสมการที่ (2.33) และ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะขจัด สำหรับวัสดุประเภทไอโซโทรปิก ได้ดังนี้

$$s_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \left(\sum_k e_{kk} \right) \delta_{ij} \quad (2.33)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial d_i}{\partial x_j} + \frac{\partial d_j}{\partial x_i} \quad (2.34)$$

เมื่อ μ เป็นโมดูลัสในแนวเฉือน (shear modulus) λ เป็นค่าคงที่ที่ยืดหยุ่นของเลม (Lame elastic constants) δ เป็นเทนเซอร์หนึ่งหน่วย (unit tensor) และ d เป็นเวกเตอร์ของการขจัด ดังนั้นสามารถเขียนสมการของแรงต่อปริมาตร f ใหม่ได้เป็น

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

สังเกตว่าสมการที่ (2.35) มีลักษณะคล้ายกับสมการการเคลื่อนที่ของคลื่น

สนามเวกเตอร์เป็นผลรวมของเวกเตอร์สองเวกเตอร์ โดยเวกเตอร์หนึ่งมีไดเวอร์เจนซ์ (divergence) เท่ากับศูนย์ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ (เป็นการเคลื่อนที่ตามขวาง) และอีกเวกเตอร์หนึ่งมีเคอร์ล (curl) เป็นศูนย์ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งฉาก (เป็นการเคลื่อนที่ตามยาว) สามารถเขียนเป็นสมการของเวกเตอร์การขจัดได้สองตัวดังนี้

$$d = d_1 + d_2$$

$$\nabla \cdot d_1 = 0$$

$$\nabla \times d_2 = 0$$

แทนสมการ d ลงใน สมการที่ (2.35) จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\rho \frac{\partial^2 (d_1 + d_2)}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla \cdot (\nabla \cdot d_2) + \mu \nabla^2 (d_1 + d_2) \quad (2.36)$$

เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของการขจัดหรือสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ "การเคลื่อนที่แบบตามยาว" จึงต้องกำจัดเทอมของ d_1 ออกไป โดยการใส่ไดเวอร์เจนซ์กับสมการที่ (2.36) ได้เป็น

$$\rho \frac{\partial^2 (\nabla d_2)}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla^2 \cdot (\nabla \cdot d_2) + \mu \nabla (\nabla^2 d_2) \quad (2.37)$$

เนื่องจากตัวปฏิบัติการ (operator) (∇^2) และ (∇) สามารถสลับตำแหน่งกันได้ เราจึงสามารถที่จะดึงเอาเทอมของไดเวอร์เจนซ์ออกมาแสดงได้เป็น

$$\nabla \cdot \left\{ \rho \frac{\partial^2 (d_2)}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) (\nabla^2 d_2) \right\} = 0 \quad (2.38)$$

และตามที่เราได้กำหนดเอาไว้ว่า $\nabla \times d_2$ เป็นศูนย์ ดังนั้นเคอร์ลของกลุ่มฟังก์ชันที่อยู่ในวงเล็บปีกกา { } จะเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นแสดงว่าเทอมของวงเล็บปีกกา { } นั้นเป็นศูนย์ เนื่องจากมีค่าเป็นศูนย์ทั้งกรณีไดเวอร์เจนซ์และเคอร์ล จะได้สมการออกมาเป็น

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

ซึ่งแสดงความเป็นฟังก์ชันคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็ง จากการเคอร์ลสมการนี้ แล้วได้เป็นศูนย์ แสดงว่า ไม่มีผลของแรงเฉือนเข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นคลื่นอัด (compression wave) โดยความเร็วที่คลื่นจะเคลื่อนที่ไปจะเป็นความเร็วของคลื่นตามยาวในเนื้อวัสดุของแข็งเท่านั้น ซึ่งแสดงดังสมการข้างล่าง

$$v_{long} = \frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho} \quad (2.39a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน เพื่อที่จะหาการเปลี่ยนแปลงของการขจัดหรือสมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ "การเคลื่อนที่แบบตามขวาง" จึงต้องกำจัดเทอมของ d_2 ออกไป โดยการเคอร์ลสมการที่ (2.36) ซึ่งในท้ายที่สุดพบว่า การขจัด d_1 เป็นไปตามสมการ

$$\rho \frac{\partial^2 d_1}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 d_1 \quad (2.40)$$

ซึ่งแสดงความเป็นฟังก์ชันคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวกลางของแข็ง จากการไดเวอร์เจนซ์สมการนี้แล้วเป็นศูนย์ และจากข้อกำหนดในตอนต้นที่ว่า $\nabla \cdot d_1$ เป็นศูนย์ แสดงว่าไม่มีผลของแรงอัดเข้ามาเกี่ยวข้อง เป็นคลื่นตามขวาง (transverse wave หรือ shear wave) โดยความเร็วที่คลื่นเคลื่อนที่ไปจะเป็นความเร็วของคลื่นตามขวางในเนื้อวัสดุของแข็งเท่านั้น ซึ่งแสดงดังสมการข้างล่าง

$$v_{shear} = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.40a)$$

ในท้ายที่สุด จากการพิสูจน์เชิงฟิสิกส์และคณิตศาสตร์ เราจะเริ่มเห็นที่มาที่ไปของฟิสิกส์และความสัมพันธ์ระหว่างคลื่น ความเร็วของคลื่น กับคุณสมบัติทางเสียงและทางกลของวัสดุตัวกลางของแข็ง เพื่อนำเอาฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิคและความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่างๆของวัสดุตัวกลางเหล่านี้ ไปใช้ในการทดสอบและศึกษาเทคนิคการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิค โดยคุณสมบัติที่น่าสนใจ เป็นความสัมพันธ์ของความเร็วเสียงของคลื่นกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุตัวกลาง ซึ่งแปรผันกับค่าคงที่ของการยืดหยุ่นและความหนาแน่น อีกทั้งยังทราบอีกว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางใดๆ มีอยู่สองส่วนด้วยกัน ส่วนแรก คือ ความเร็วของคลื่นในแนวตามยาว และส่วนที่สอง คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นในแนวตามขวาง

2.4 พารามิเตอร์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่สำคัญ

จากที่ได้ศึกษาและเรียนรู้ถึงที่ไปที่มาของสมการคลื่นกับแบบจำลองโครงสร้างอะตอมในหนึ่งมิติ ซึ่งแสดงให้เห็นผลของการสั่น โดยเริ่มตั้งแต่การสั่นที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ จนถึงการสั่นที่เกิดจากแรงมากระทำ พบว่าคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของการกระตุ้นด้วยแรงจากภายนอก คือ ค่าความต้านทานหรืออิมพีแดนซ์ของคลื่น และได้ศึกษาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางที่เป็นของแข็งเมื่อพิจารณาในสามมิติ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยคณิตศาสตร์ของเทนเซอร์และเมตริกซ์เข้ามาประกอบการศึกษา หัวข้อต่อไปถือเป็นหัวข้อสำคัญที่สุด โดยจะแสดงให้เห็นถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิก เพื่อไปใช้ในการตรวจสอบวัสดุและใช้ในการสร้างภาพ

2.4.1 ความเร็วคลื่น

หัวข้อนี้เป็นการทบทวนความรู้ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3 จากที่ทราบแล้วว่า ความเร็วคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติเฉพาะของวัสดุ อันได้แก่ โมดูลัสของความยืดหยุ่นและความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง และทราบอีกว่าในกรณีของของแข็งความเร็วคลื่นแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ ความเร็วคลื่นตามยาว และ ความเร็วคลื่นตามขวาง ส่วนกรณีของแก๊สและของเหลวที่มีความหนืดไม่มาก คลื่นกลที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดได้เฉพาะในแนวการเคลื่อนที่แบบอัดหรือเป็นคลื่นตามยาวเท่านั้น ดังนั้นคลื่นตามขวางจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในวัสดุประเภทแก๊สและของเหลว โดยสรุปแล้วความเร็วของคลื่นเสียงและคลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นไปดังสมการที่ (2.20a) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastic modulus}}{\text{density}}}$$

เมื่อพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวและตามขวางจากรูปที่ 2.3 และสมการที่ (2.39a) และ (2.40a) พบว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง พลังงานที่ใช้ถ่ายทอดไปยังอนุภาคข้างเคียงจะมีค่าต่ำกว่าของคลื่นตามยาว ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวจึงสูงกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง สำหรับในวัสดุตัวกลางชนิดเดียวกันความเร็วของคลื่นตามยาวจะมากกว่าของความเร็วคลื่นตามขวาง อย่างน้อยประมาณสองเท่า

2.4.2 อิมพีแดนซ์ของเสียง

ในหัวข้อที่ 2.2.3 ได้กล่าวถึงความต้านทานการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระตุ้น ซึ่งแสดงให้เห็นแล้วว่าลักษณะและความสัมพันธ์ของคลื่นเสียงกับคลื่นไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายกัน โดยแรงจากภายนอกที่มากระทำ กรณีของคลื่นกลก็คือความดัน เพื่อใช้ในการอัดหรือเร่งให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ไวและเร็ว ส่วนในกรณีคลื่นทางไฟฟ้า แรงภายนอกที่เข้าไปกระตุ้นเป็นแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอก ในตารางที่ 2.1 ได้แสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงเป็น เวกเตอร์ของแรงต่อเวกเตอร์ของความเร็วอนุภาค ซึ่งเมื่อพิจารณาในรูปแบบของอนุภาคกลุ่มใหญ่ๆ หรือมีจำนวนอนุภาคมากๆ แรงที่กระทำต่อกลุ่มอนุภาคในปริมาตรนั้น นิยามว่าเป็นแรงต่อพื้นที่หน้าตัด ซึ่งก็คือความดัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนได้ว่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงหรือคลื่นอัลตราโซนิคเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความเร็วของอนุภาคก็ได้ ดังแสดงในสมการที่ (2.41)

$$Z \equiv \frac{V}{I} = \frac{V}{\dot{q}} \equiv \frac{p}{u} \quad (2.41)$$

และจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อระยะทาง x ดังสมการที่ (2.19) และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อเวลา (ความเร็วของอนุภาค) เมื่อพิจารณาการขจัดเฉพาะส่วนของจำนวนจริง รูปผลเฉลยทั่วไปของสมการคลื่นสามารถเขียนแทนได้ด้วยฟังก์ชันของโคไซน์ (cosine) และสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อระยะทาง x และ อัตราการเปลี่ยนแปลงของการขจัดต่อเวลา ได้ดังชุดสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} d &= A \cos(\omega t - kt) \\ \frac{\partial d}{\partial x} &= kA \sin(\omega t - kt) \\ \frac{\partial d}{\partial t} &= -\omega A \sin(\omega t - kt) \end{aligned}$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.19) และชุดสมการข้างต้นลงในสมการที่ (2.41) จะได้ว่า

$$Z = \rho v^2 \frac{k}{\omega}$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f$ และ $\lambda = 2\pi/k$ และ $v = f\lambda$ ค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่นเสียงจะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น
 ดังสมการที่ (2.42)

$$Z = \rho v \quad (2.42)$$

โดยสมการที่ (2.42) นี้บอกให้ทราบว่า คุณสมบัติการต้านทานทางเสียง (acoustic impedance) แปร
 ผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงในวัสดุและความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง โดยค่าอิมพีแดนซ์ของ
 เสียงในแต่ละตัวกลางมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงผ่านจากวัสดุตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัว
 กลางหนึ่ง ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป ค่าอิมพีแดนซ์ทางเสียงของแต่ละวัสดุตัวกลาง นำมา
 แสดงไว้ในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติและค่าคงที่ทางเสียงของตัวกลาง [4]

วัสดุตัวกลาง	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็วเสียง (m/s)	อิมพีแดนซ์ (x10 ⁶ kg/m ² s)
อากาศ ที่อุณหภูมิ 20 °C	1.21	344	0.0004
น้ำ ที่อุณหภูมิ 20 °C	1000	1483	1.483
พีซีที (PZT – lead zirconate titanate)	4445	7750	34.45
ควอartz แบบเอ็กซ์คัท (quartz x-cut)	2650	5750	15.30
แก้วควอartz (quartz)	2200	5500	12.00
เหล็ก	7700	5900	45.43
ทองเหลือง	8640	4700	40.60
โพลีโพรไพลีน (Polypropylene, PP)	890	2660	2.37
โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE)	900	1950	1.76

2.4.3 สัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน

ในหัวข้อนี้จะศึกษาในรายละเอียดของคลื่นอัลตราโซนิกที่เดินทางผ่านวัสดุตัวกลางสองชนิด หรือมีการเปลี่ยนวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เนื่องจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงหรือคลื่นกลชนิดหนึ่ง จึงมีพฤติกรรมต่างๆเช่นเดียวกับฟิสิกส์ของคลื่น ดังนั้นเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปกระทบกับผนังกั้นขอบเขต (boundary) ของอีกตัวกลางหนึ่ง จะเกิดคลื่นอัลตราโซนิกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับและอีกส่วนหนึ่งเกิดเป็นคลื่นที่เดินทางทะลุเข้าไปในเนื้อวัสดุ จากปรากฏการณ์ดังกล่าว จึงได้นำเอาคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและสร้างภาพความไม่ต่อเนื่องของเนื้อวัสดุได้ โดยในหัวข้อนี้จะศึกษาลงลึกในรายละเอียดว่า การเกิดคลื่นแยกออกเป็นสองส่วนคือ (1) สะท้อนกลับ และ (2) ทะลุผ่าน มีปัจจัยและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะใดของวัสดุตัวกลาง (material properties)

กรณีคลื่นอัลตราโซนิคตกกระทบในมุมปกติ (normal incidence)

พิจารณารูปที่ 2.11 ที่บริเวณรอยต่อ (boundary) ระหว่างวัสดุตัวกลางหนึ่งและวัสดุตัวกลางที่สองมีระนาบ $x = 0$ โดยวัสดุตัวกลางที่หนึ่งมีอิมพีแดนซ์เป็น Z_1 และตัวกลางที่สองมีอิมพีแดนซ์เป็น Z_2



รูปที่ 2.11 การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบทำมุมปกติกับบริเวณรอยต่อ
ให้คลื่นตกกระทบเคลื่อนที่ไปทางขวาหรือไปทางทิศทางบวก x และมีความดันเท่ากับ

$$p_i = P_i \exp j(\omega t - k_1 x) \quad (2.43)$$

เมื่อเคลื่อนที่ชนกับบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างสองตัวกลาง เกิดเป็นคลื่นสะท้อนกลับดังสมการ

$$p_r = P_r \exp j(\omega t + k_1 x) \quad (2.44)$$

และคลื่นทะลุผ่าน ถึงแม้คลื่นทะลุผ่านจะมีความถี่เดียวกันกับคลื่นตกกระทบ แต่เนื่องจาก ความแตกต่างของความเร็วเสียงในสองตัวกลาง ดังนั้นคลื่นทั้งสองจึงมีเลขคลื่น (wave number, k) ต่างกัน ดังสมการที่ (2.45)

$$p_i = P_i \exp j(\omega t - k_2 x) \quad (2.45)$$

โดย $k_1 = \omega/v_1$ สำหรับตัวกลางที่หนึ่ง และ เลขคลื่นในตัวกลางที่สอง จะเท่ากับ $k_2 = \omega/v_2$

ในการพิจารณาที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสอง จะมีเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ตามหลักทางฟิสิกส์อยู่ 2 เงื่อนไขด้วยกัน ได้แก่ (1) ความดันเสียงที่ด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องเท่ากัน เรียกว่า "กฎความต่อเนื่องของความดัน" (continuity of pressure) หมายความว่า แรงลัพธ์สุทธิ (net force) ที่กระทำมีผลรวมเท่ากับศูนย์ ตามกฎของนิวตัน และ (2) ความเร็วของอนุภาคที่ตั้งฉากกับรอยต่อทั้งสองข้างจะต้องเท่ากัน ตามกฎอนุรักษ์โมเมนตัม เรียกว่า "กฎความต่อเนื่องของความเร็วในแนวปกติ" (continuity of normal velocity) โดยเงื่อนไขขอบเขตทั้งสองสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$p_i + p_r = p_t \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (2.46a)$$

$$u_i + u_r = u_t \quad \text{ที่ } x = 0 \quad (2.46b)$$

ผลลัพธ์จากการหาร (2.46a) ด้วย (2.46b) ที่ $x = 0$ จะได้เป็น

$$\frac{p_i + p_r}{u_i + u_r} = \frac{p_t}{u_t} \quad (2.47)$$

และทราบอีกว่า อัตราส่วนของความดันเสียงต่อความเร็วของอนุภาค คือ อิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุ ดังนั้นสมการที่ (2.47) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{p_i + p_r}{p_i/Z_1 - p_r/Z_1} = Z_1 \frac{p_i + p_r}{p_i - p_r} = Z_2$$

เมื่อกำหนดให้ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (reflection coefficient, R) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความดันเสียงของคลื่นตกกระทบต่อความดันเสียงของคลื่นที่สะท้อนกลับ ดังนั้นจากสมการข้างต้น เราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกำหนดให้ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (transmission coefficient, T) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความดันเสียงของคลื่นตกกระทบต่อความดันเสียงของคลื่นที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านเข้าไปในอีกตัวกลางหนึ่ง จากสมการ (2.46a) หากด้วย ความดันเสียงตกกระทบ p_i ตลอด เราจะเขียนใหม่ได้ว่า

$$1 + R = T \quad (2.49)$$

ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.50)$$

จาก (2.48) ถึง (2.50) แสดงให้เห็นว่า การเกิดการสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นที่บริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด อัน ได้แก่ อิมพีแดนซ์ ความหนาแน่น ความเร็วเสียง และ ความยืดหยุ่นของวัสดุ เนื่องจากเราเห็นแล้วว่า ความสัมพันธ์ของการสะท้อนของคลื่น และการทะลุผ่านของคลื่นขึ้นอยู่กับ ความแตกต่างกันระหว่างอิมพีแดนซ์ทางเสียงของทั้งสองวัสดุตัวกลาง เพื่อความสะดวกในการพิจารณาความสัมพันธ์นี้ จึงกำหนดให้ r เป็นอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ทางเสียงจากตัวกลางที่หนึ่ง (คลื่นตกกระทบ และ คลื่นสะท้อน) ต่ออิมพีแดนซ์ทางเสียงจากตัวกลางที่สอง (คลื่นทะลุผ่าน) เท่ากับ $r = Z_1/Z_2$ ดังนั้นสามารถเขียนสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่านใหม่ได้เป็น

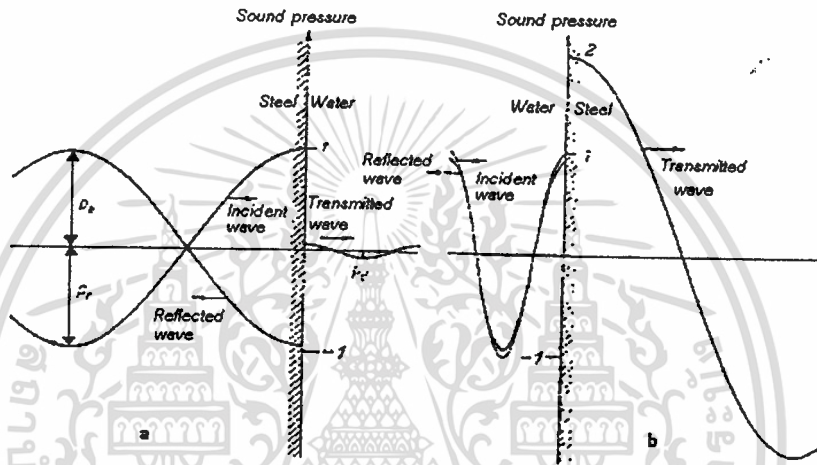
$$R = \frac{1-r}{1+r}$$

$$T = \frac{2}{1+r}$$

จากสมการ (2.48) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R จะเป็นจำนวนจริงเสมอ โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นบวกเมื่อ $Z_1 < Z_2$ หรือ $r = Z_1/Z_2 \rightarrow 0$ ซึ่งมีความหมายว่า เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางจากตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าไปยังวัสดุตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่า คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีเฟสของคลื่นเช่นเดียวกับเฟสของคลื่นตกกระทบหรือ เรียกว่า "in-phase" และเมื่อ $Z_1 > Z_2$ หรือ $r = Z_1/Z_2 \rightarrow \infty$ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่าเป็นลบ หมายความว่า เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเดินทางจากตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์สูงกว่าไปยังวัสดุตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำกว่า คลื่นที่สะท้อนกลับจะมีเฟสของคลื่นต่างกับเฟสของคลื่นตกกระทบ 180 องศา หรือเรียกว่า "out-of-phase" และในกรณีเมื่ออิมพีแดนซ์ของทั้งสองวัสดุเท่ากัน $Z_1 = Z_2$ แล้ว $R = 0$ หมายถึง ไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณรอยต่อ หรือกล่าวได้ว่า มีการส่งถ่ายพลังงานที่สมบูรณ์ และจากสมการที่ (2.50) ยังสังเกตเห็นอีกว่า สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน T เป็นจำนวนจริงและมีค่าเป็นบวกเสมอ นั่นหมายความว่า คลื่นที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างสองวัสดุตัวกลาง จะเป็นคลื่นที่มีเฟสของคลื่นเหมือนกับเฟสของคลื่นตกกระทบเสมอ ซึ่งจากหลักการตรงสัทอนกลับและทะลุผ่านของคลื่นที่บริเวณรอยต่อของวัสดุที่ต่างชนิดกันนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาและสร้างระบบตรวจสอบและสร้างภาพของวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกได้ ในรูปที่ 2.12 แสดงความดันเสียงของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านที่บริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิด



รูปที่ 2.12 สัญญาณและเฟสของความดันเสียงของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านที่รอยต่อ

เนื่องจากการสะท้อนกลับและทะลุผ่านของคลื่นในโมเมนต์ของความดันเสียง ที่กล่าวไว้ว่า $1 + R = T$ อาจทำให้สงสัยว่าไม่เป็นไปตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) พลังงานขาเข้าจะต้องเท่ากับพลังงานขาออก หรือ เขียนเป็นสมการ ได้เป็น $1 = R + T$ สาเหตุมาจากว่า ความดันเสียงเปรียบเสมือนรูปหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว การจะพิจารณาการสะท้อนกลับและการทะลุผ่านของคลื่นในรูปพลังงาน จะใช้พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งคือ ความเข้มเสียง (intensity) ซึ่งเท่ากับ อัตราเฉลี่ยของพลังงานที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางเคลื่อนที่ หรือก็คือเป็นงานที่ทำต่อพื้นที่ (work done by unit area, W/m^2) ในกรอบแนวคิดเรื่องคลื่นกลและคลื่นอัลตราโซนิกนั้น เราพิจารณาพารามิเตอร์หลักๆ อยู่ 2 ตัว คือ ความดันเสียง (p) และ ความเร็วของอนุภาค (u) โดยผลคูณของ p และ u จะมีหน่วยแสดงได้ดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเข้มเสียงจึงเท่ากับ อัตราเฉลี่ยของผลคูณระหว่างความดันเสียงกับความเร็วของอนุภาค

$$I = \langle pu \rangle_t = \frac{1}{T} \int_0^T pudt$$

และจาก $Z = p/u$ ตามสมการที่ (2.41) สามารถเขียนสมการของความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{Z} dt \quad (2.51)$$

เนื่องจากความดันเสียง p เป็นสมการคลื่น (คิดเฉพาะส่วนของจำนวนจริง) จะได้

$$p = p_0 \cos \omega t$$

โดยคิดตั้งแต่คลื่นเริ่มเคลื่อนที่ที่ $t = 0$ จนคลื่นเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ $t = T$ หรือเดินทางมาครบ 1 คาบ สามารถเขียนสมการที่ (2.51) ใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{1}{T} \frac{p_0^2}{Z} \int_0^T \cos^2 \omega t dt$$

จากคณิตศาสตร์ทางตรีโกณมิติ

$$\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$$

เมื่อเราทำการอินทิเกรตแล้วจะได้ผลลัพธ์ของความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกเป็น

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{Z} \quad (2.52)$$

จากผลลัพธ์ของสมการพบว่าค่าความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกหรือก็คือพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิก จะแปรผันตรงกับกำลังสองของความดัน และแปรผกผันกับอิมพีแดนซ์ทางเสียงของวัสดุ เมื่อพิจารณาคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่แตกต่างกันในรูปแบบของความเข้มเสียง จากกฎอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation) ความเข้มหรือพลังงานของคลื่นตกกระทบ ต้องเท่ากับ ผลรวมของพลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับและพลังงานของคลื่นที่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านรอยต่อ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_i = I_r + I_t$$

และสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่านเป็นดังสมการ

$$1 = R + T$$

ใช้หลักคิดเดียวกันกับกรณีพิจารณาการสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นในโหมคความดันเสียง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านจะเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.53)$$

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (2.54)$$

พบว่าค่าของทั้งสัมประสิทธิ์การสะท้อน R และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน T จะเป็นจำนวนจริง และมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งไม่สามารถพิจารณาความแตกต่างของเฟสของคลื่นสะท้อนและคลื่นทะลุผ่านได้

กรณีคลื่นอัตราโชนิกตกกระทบบ่ามุมใด ๆ กับวัสดุ

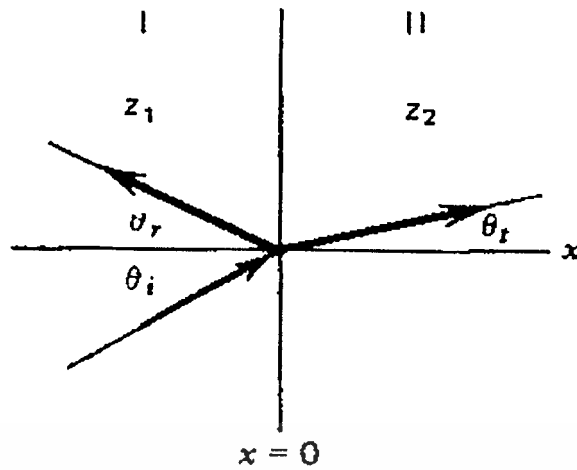
ในกรณีทีคลื่นเคลื่อนที่ตกกระทบบริเวณรอยต่อมีทิศทางไม่ทำมุมปกติกับพื้นที่ตกกระทบบ ดังรูปที่ 2.13 การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่าน จะมีลักษณะคล้ายกับการพิจารณาในกรณีทีคลื่นตกกระทบบในแนวเส้นปกติ แต่คิดผลของมุมตกกระทบบ มุมสะท้อน และ มุมหักเหด้วย และเนื่องจากการพิสูจน์เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์มาก ในที่นี้จึงไม่แสดงถึงวิธีพิสูจน์ แต่ได้ให้ความเข้าใจทางความหมายเชิงฟิสิกส์ (physical meaning) ในกรณีคลื่นตกกระทบบอยู่ในแนวเส้นปกติ ดังนั้นจึงขอสรุปผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน R และ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน T ของคลื่นทีเคลื่อนที่ตกกระทบบที่ไม่อยู่ในแนวเส้นปกติทีรอยต่อของวัสดุตัวกลางสองชนิด ดังสมการที่ (2.55) และ (2.56) ตามลำดับ

$$R = \frac{(Z_2/Z_1) - (\cos\theta_i/\cos\theta_r)}{(Z_2/Z_1) + (\cos\theta_i/\cos\theta_r)} \quad (2.55)$$

$$T = 1 + R \quad (2.56)$$

โดยใช้กฎของเซนลล์ (snell's law) แสดงให้เห็นว่า

$$\cos\theta_r = \sqrt{1 - \sin^2\theta_i} = \sqrt{1 - (v_2/v_1)^2 \sin^2\theta_i}$$



รูปที่ 2.13 การสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นระนาบเมื่อคลื่นตกกระทบไม่อยู่ในแนวเส้นปกติกับบริเวณรอยต่อของวัสดุสองชนิดที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงต่างกัน

2.4.4 สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

จากหัวข้อ 2.2.2 เมื่อพิจารณาในความเป็นจริงพบว่าอนุภาคของแข็งไม่สามารถสั่นอยู่ได้ตลอดเวลา เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่ต้องการสูญเสียพลังงานหรือเปลี่ยนพลังงานไปในรูปของความร้อนในระหว่างการเคลื่อนที่ โดยจากสมการเคลื่อนที่ (2.10) จะได้การกระจัดของอนุภาคของแข็ง ดังสมการที่ (2.11) โดยนำมาแสดงใหม่ดังสมการต่อไปนี้

$$x = e^{-\beta t} \times A e^{\pm i\omega t}$$

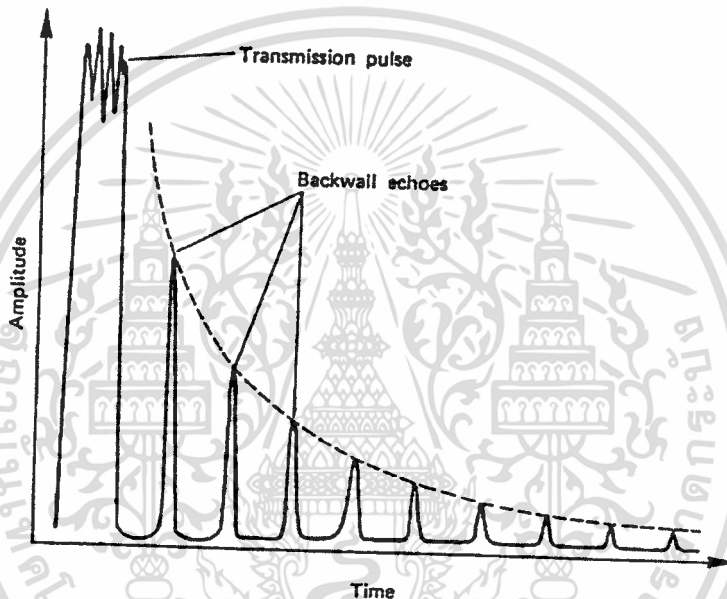
จะพบเทอมของการดูดกลืนหรือการลดทอนของแอมพลิจูดของการสั่น ต่อเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิคใช้ในการเคลื่อนที่ แสดงในรูปของ exponential term $e^{-\beta t}$ โดย β เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนหรือ เป็นค่าคงที่ซึ่งบอกถึงการลดทอนลงของแอมพลิจูดของการสั่นในคาบเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปสามารถเขียนในรูปของสมการที่ดูง่ายขึ้นได้เป็น

$$A = A_0 \exp(-\beta t) \quad (2.57)$$

และทำนองเดียวกัน เนื่องจากเวลาในการเคลื่อนที่แปรผันกับ ระยะทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนการลดทอนของแอมพลิจูดของการสั่นต่อระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้เป็น

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\nu\beta t}{j}\right) = A_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.58)$$

โดยที่ตำแหน่ง $x = 0$ ความแรงของสัญญาณ (A) จะเท่ากับ A_0 และ α เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืน หรือ เป็นค่าคงที่ซึ่งบอกถึงการลดทอนลงของแอมพลิจูดของการสั่นต่อระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ไป โดยมีหน่วยเป็น neper หรือ m^{-1} (เมตร⁻¹) ความหมายของ exponential ดิคลบ หมายถึง แอมพลิจูดของการสั่นจะลดลง เมื่อคลื่นอัลตราโซนิก ยิงเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุตัวกลางยิ่งลึก รูปที่ 2.14 แสดงการลดทอนของแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิก



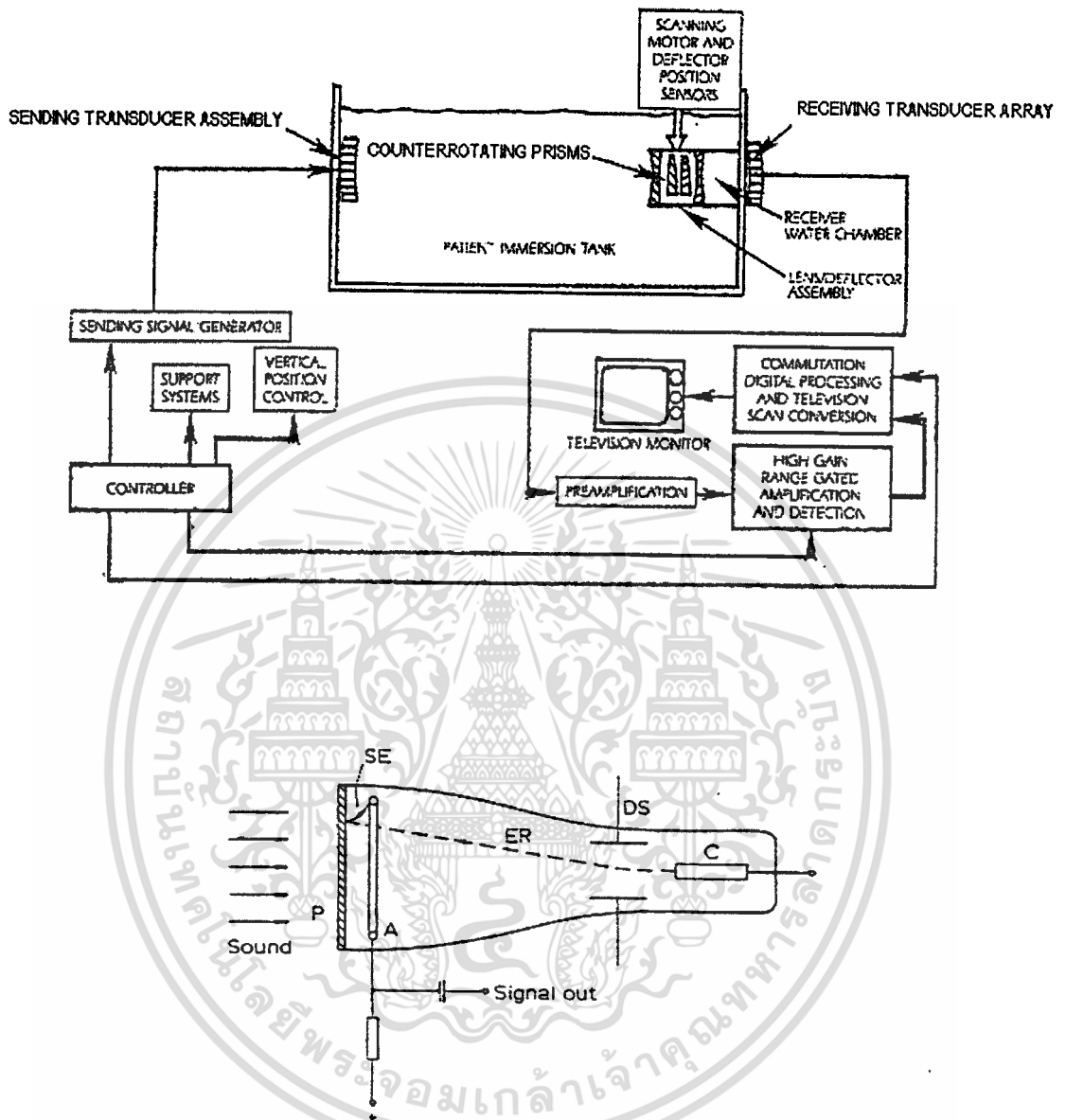
รูปที่ 2.14 การลดทอนของความแรงในการสั่นของคลื่นอัลตราโซนิก

บทที่ 3

วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

3.1 ความเป็นมาของวิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

การนำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบวัสดุเริ่มต้นจากการพยายามพัฒนาระบบตรวจจับภูเขาไฟน้ำแข็งหรือสิ่งกีดขวางใต้น้ำหลังจากการจมลงของเรือไทเทนิคที่วิงชนภูเขาไฟน้ำแข็งใต้น้ำในปีค.ศ. 1912 และความพยายามตรวจจับเรือดำน้ำในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 จนปีค.ศ. 1915 ซิลโลฟสกี (Constantin Chilowsky) ได้เสนอแนวความคิดในการตรวจจับเรือดำน้ำด้วยวิธีการสร้างภาพจากคลื่นสะท้อนกลับ และต่อมา พอล แลงเกอวิน (Paul Langevin) ได้ศึกษาวิธีการสร้างภาพอัลตราโซนิกตามแนวความคิดของซิลโลฟสกีด้วยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric effect) ซึ่งในสมัยนั้นสามารถสร้างคลื่นอัลตราโซนิกได้ด้วยผลึกควอตซ์ที่มีความถี่ธรรมชาติ 150 kHz แต่ระยะในการตรวจจับยังไม่สูงมากนัก หลังจากนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก็ขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนในปีค.ศ. 1929 โซโคลอฟ (Sergei Y. Sokolov) ได้ริเริ่มการนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการสร้างภาพเพื่อทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งเป็นรากฐานของการใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อการทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลายในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 3.1

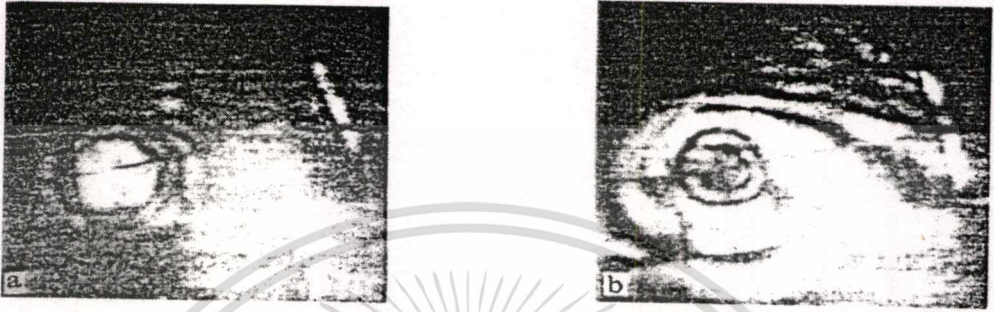


รูปที่ 3.1 การตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยวิธีของโซโคลอฟ

วิธีการทดสอบวัสดุของโซโคลอฟอาศัยการปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในเนื้อวัสดุที่ต้องการทดสอบอย่างต่อเนื่อง คลื่นอัลตราโซนิกจะเคลื่อนที่ไปจนกระทบกับหลอดภาพโซโคลอฟ (Sokolov tube) ที่สร้างขึ้นจากหลักการของหลอดภาพรังสีคาโทด (Cathode Ray Tube, CRT) โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแทนที่ส่วนของจอแสดงผล บริเวณพื้นผิวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีคลื่นตกกระทบ จะเกิดประจุ (charge) ขึ้นมาเก็บสะสมไว้ ส่วนบริเวณที่มีโพรงอากาศหรือจุดบกพร่องคลื่นที่เคลื่อนที่มากระทบจะมีความแรงน้อย จึงสร้างประจุได้น้อย หรือสร้างไม่ได้เลย ดังนั้นบริเวณพื้นผิวหน้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกิดความแตกต่างของประจุทั่วพื้นผิว หลอดภาพจะปลดปล่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และผู้ดูแลระบบขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำอิเล็กตรอน (electron beam) ยิงสแกนไปทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุเพียงโซอิเล็กทริก ประจุที่ผิวหน้าเมื่อถูกลำอิเล็กตรอนยิง จะหลุดออกมาไว้ที่ส่วนเก็บประจุ (collector) ซึ่งต่อเข้ากับหลอดภาพรังสีคาโทดเพื่อประจุที่เก็บสะสมไว้ในแต่ละตำแหน่งไปแสดงผลต่อไป ตัวอย่างภาพอัลตราโซนิกที่สร้างขึ้นจากหลอดโซโคลอฟแสดงดังรูปที่ 3.2

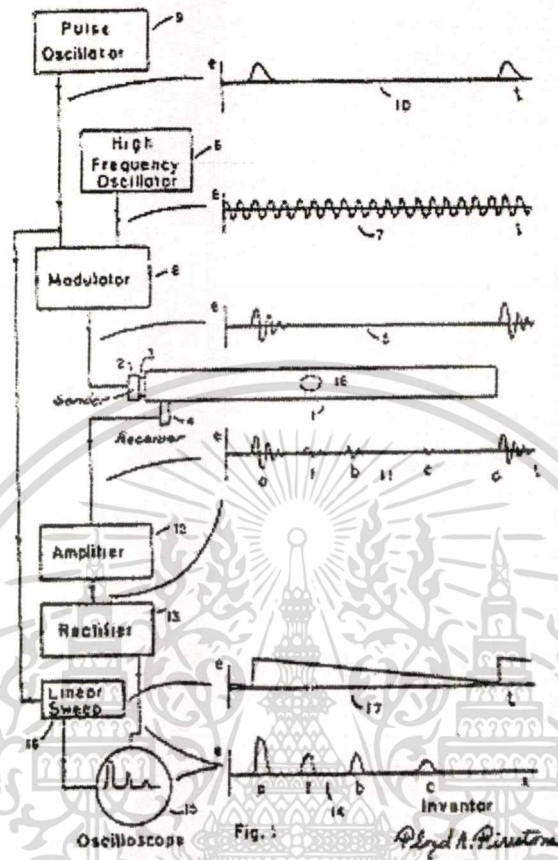


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 รอยเชื่อมจากกล้องโซโคลอฟ (ก) ไม่มีจุดบัพพร้อม (ข) มีรูขนาดใหญ่

ต่อมาในปี ค.ศ. 1940 หลักการและอุปกรณ์ทดสอบวัสดุด้วยวิธีการแบบพัลส์-สะท้อนกลับได้ถูกคิดค้นขึ้นโดย ฟลอยด์ ไฟร์สโตน (Floyd Firestone) ซึ่งเป็นรากฐานของการตรวจสอบและสร้างภาพวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกในปัจจุบัน เครื่องมือตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับที่ไฟร์สโตนสร้างขึ้นเรียกว่า รีเฟล็กโตสโคป (Reflectoscope) แสดงดังรูปที่ 3.3

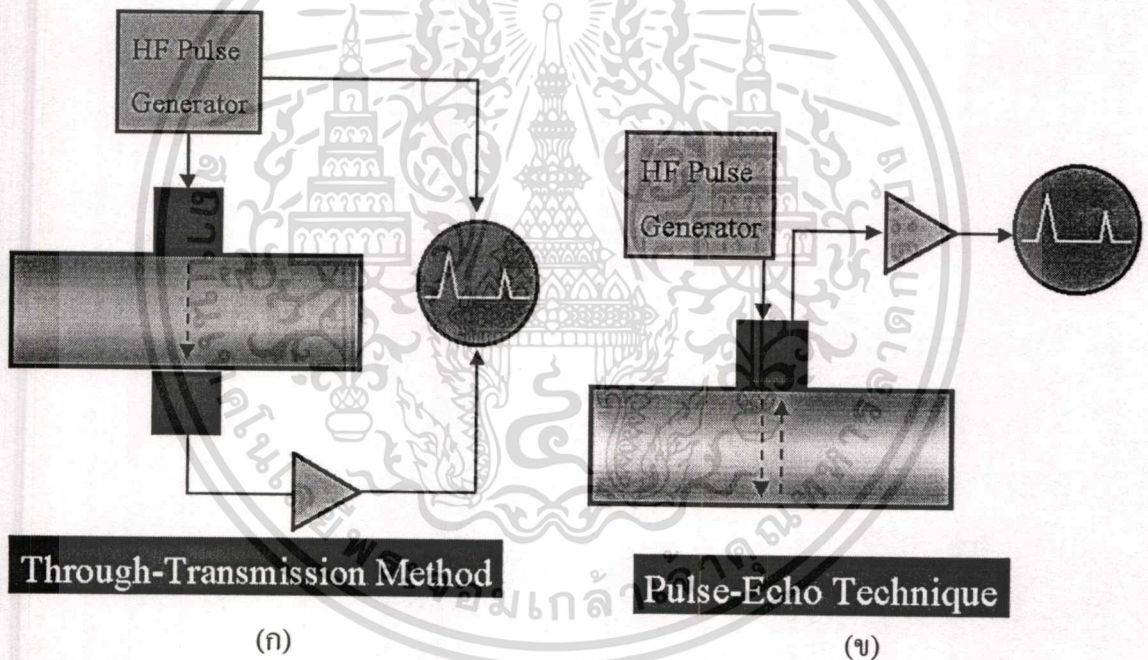


รูปที่ 3.3 รีเฟลกโตสโคป

หลักการของรีเฟลกโตสโคปอาศัยการส่งคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการมอดูเลตคลื่นสองตัว โดยแหล่งกำเนิดคลื่นตัวหนึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่สูงของคลื่นอัลตราโซนิก อีกแหล่งกำเนิดหนึ่งสร้างสัญญาณพัลส์ คลื่นที่ถูกมอดูเลตแล้วจะส่งไปยังตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกที่ทำจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อสร้างพัลส์ของคลื่นกลให้เคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อคลื่นวิ่งไปกระทบกับจุดบกพร่องจะสะท้อนกลับมา และจะถูกตรวจจับสัญญาณโดยตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นกลเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะนำไปขยายสัญญาณ และผ่านวงจรเรกติไฟเออร์ (rectifier) ก่อนจะส่งไปแสดงภาพทางจอออกสซิลโลสโคป (oscilloscope) ดังแสดงดังรูปที่ 3.3 หลักการดังกล่าวมานี้ ได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

จากที่ได้กล่าวมาทั้งสองวิธี พบว่าวิธีการตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิก แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ ด้วยกัน คือ (ก) การตรวจสอบแบบส่งผ่าน (through - transmission testing) โดยตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิกจะอยู่ด้านตรงข้ามกัน ตัวรับจะรับและขยายสัญญาณของคลื่นอัลตราโซนิกที่วิ่งผ่านเข้าไปเนื้อวัสดุ ดังตัวอย่างของหลอดภาพโซโคตอฟ และ (ข) การตรวจสอบแบบพัลส์-สะท้อนกลับ (pulse – echo testing) วิธีการนี้สามารถใช้หัวโพรบอัลตราโซนิกเพียงหัวเดียว (ตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิกเป็นตัวเดียวกัน) หรือสองหัว (ตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิกแยกจากกัน) โดยตัวรับจะตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาเนื่องจากความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ในเนื้อวัสดุที่ทำการทดสอบ ดังตัวอย่างในหลักการของเครื่องรีเฟลกโตสโคป วิธีการตรวจสอบแบบส่งผ่านและแบบพัลส์-สะท้อนกลับแสดงดังรูปที่ 3.4 จากรูปในขั้นตอนการทดสอบวัสดุ ใช้หัวโพรบอัลตราโซนิกสัมผัสกับชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ โดยผ่านการคลีปปลิง (coupling) สัญญาณด้วยน้ำหรือของเหลวที่มีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับของวัสดุที่ใช้ทำหัวโพรบ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของสัญญาณ ดังที่ได้กล่าวถึงเหตุผลไว้แล้วในบทที่ 2 เราเรียกวิธีการตรวจสอบชิ้นงานที่นำหัวอัลตราโซนิกโพรบไปสัมผัสกับชิ้นงานทดสอบว่า "วิธีการตรวจสอบแบบสัมผัส (contact method)"

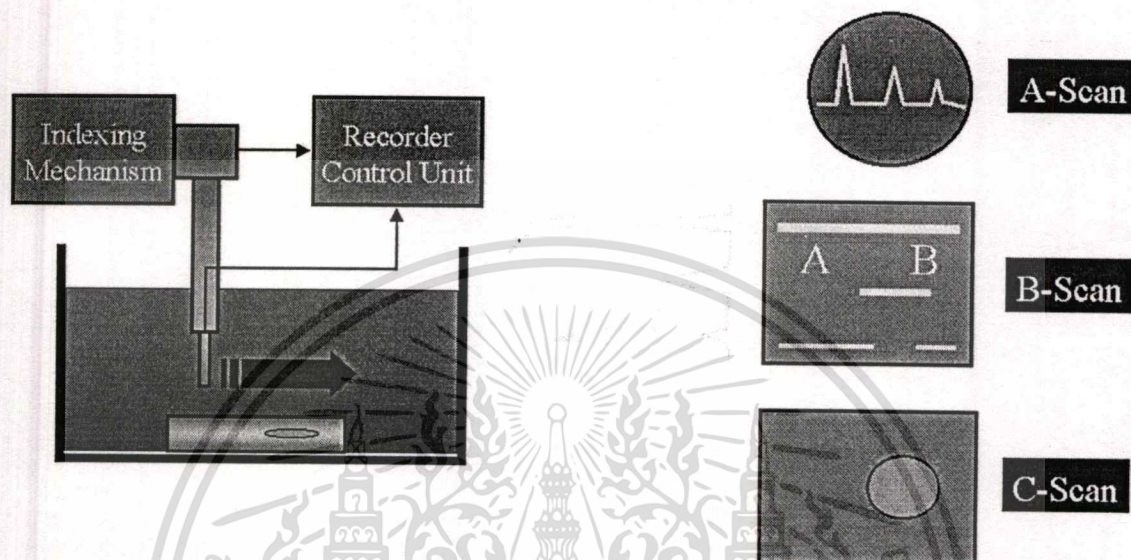


รูปที่ 3.4 วิธีการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ก) แบบส่งผ่าน และ (ข) แบบพัลส์-สะท้อนกลับ

จากความเป็นมาในการตรวจสอบวัสดุด้วยหลักการของคลื่นอัลตราโซนิกดังที่กล่าวมาแล้วนั้น เห็นว่าวิธีการตรวจสอบข้อบกพร่องในวัสดุใดๆด้วยคลื่นอัลตราโซนิก เป็นวิธีการสร้างภาพของข้อบกพร่องขึ้นมาเพื่อนำไปวิเคราะห์หาจุดบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งพบว่าวิธีการตรวจสอบและประเมินผลวัสดุด้วยวิธีการทางคลื่นอัลตราโซนิก จะใช้เป็นวิธีการสร้างภาพขึ้นมา ซึ่งปัจจุบัน เราสามารถแบ่งหรือจัดประเภทของภาพถ่ายของวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกได้ตามวิธีการสร้างภาพและวิธีการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบ โดยทั่วไปมีอยู่ 3 เทคนิคด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน ได้แก่ (ก) การแสดงภาพถ่ายแบบไม่มีมิติ (zero dimension, 0D) นิยมเรียกกันว่า "เอ-สแกน" (A-scan) (ข) การแสดงภาพถ่ายอัลตราโซนิกตลอดแนวเส้น หรือแสดงภาพถ่ายใน หนึ่งมิติ (one dimension, 1D) โดยทั่วไปนิยมเรียกว่า "เทคนิคบี-สแกน" (B-scan) และ (ค) การแสดงภาพถ่ายตลอดแนวระนาบสองมิติ (two dimension, 2D) ซึ่งเรียกว่า "ซี-สแกน" (C-scan) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และ ซี-สแกน

เทคนิคเอ-สแกน เป็นการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งแล้วแสดงผลในรูปแอมพลิจูดของสัญญาณกับเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงที่ตำแหน่งนั้นๆ เทคนิคบี-สแกน ใช้การสแกนหัววัดอัลตราโซนิกตามแนวเส้น แล้วนำสัญญาณที่ได้จากวิธีเอ-สแกน มาเปลี่ยนขนาดของแอมพลิจูดให้เป็นความสว่าง ณ ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดตลอดแนวเส้นที่สแกนหัวโพรบไป ภาพที่ได้จะแสดงตำแหน่งของจุดบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องของวัสดุตลอดแนวเส้นนั้น สุดท้ายคือ เทคนิคซี-สแกน ซึ่งเป็นการสร้างภาพภายในของวัสดุในแนวระนาบ 2 มิติ หรือในแนวระนาบ x-y ที่ระยะความลึก z ใดๆ โดยระดับสีของภาพในแต่ละจุดแทนขนาดแอมพลิจูด (magnitude) ของสัญญาณที่สะท้อนกลับมา เพื่อความสะดวกในการสแกนหัวอัลตราโซนิก โพรบแบบอัตโนมัติ โดยทั่วไปนิยมนำเอาชิ้นงานที่ต้องการทดสอบจุ่มในอ่างน้ำโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางป้อน ดังนั้นหัวอัลตราโซนิกโพรบจึงไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับชิ้นงานที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 วิธีการนี้เรียกว่า "การตรวจสอบแบบจุ่ม (immersion testing technique)"

จึงสรุปได้ว่าการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในเนื้อวัสดุ จำเป็นต้องมีตัวกลางมาใช้ในการส่งถ่ายพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกจากตัวส่งหรือหัวอัลตราโซนิกโพรบไปยังวัสดุตัวกลางที่ต้องการทดสอบ โดยตัวกลางนั้นจะต้องมีอิมพีแดนซ์ของเสียงเข้ากัน (matching) กับตัวส่งเพื่อลดอัตราการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิกบริเวณรอยต่อระหว่างหัวโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับตัวกลาง โดยอัตราการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจะสูงมากเมื่อตัวกลางนั้นเป็นอากาศ เพื่อลดอัตราการสูญเสียพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกบริเวณรอยต่อ จึงจำเป็นต้องมีตัวกลางหรือตัวคลัปปลิง (couplant) มาอยู่ระหว่างหัวโพรบกับวัสดุ โดยวิธีการคลัปปลิงแบ่งได้เป็น 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการคลัปปลิงแบบสัมผัส และวิธีการคลัปปลิงแบบจุ่ม

การคลัปปลิงแบบสัมผัส (contact coupling) หัวโพรบอัลตราโซนิกจะแตะแนบกับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ โดยมีตัวคลัปปลิงกั้นอยู่ตรงกลาง หัวโพรบจะถูกกดเพื่อลดความหนาของตัวคลัปปลิงให้บางที่สุด โดยความหนาของตัวคลัปปลิงจะต้องน้อยกว่า

$$d \ll \frac{2V}{f_{\max}} \quad (3.1ก)$$

เมื่อ d เป็นความหนาของตัวคลัปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 V เป็นความเร็วเสียงของตัวคลัปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตร ต่อ วินาที
 และ f_{\max} เป็นความถี่สูงสุดของหัวโพรบอัลตราโซนิก หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (hertz)

ข้อดีของวิธีการตรวจสอบโดยใช้การคลัปปลิงแบบสัมผัส คือ

- ระบบไม่ซับซ้อน ราคาถูกกว่า
- สามารถนำไปใช้ในงานภาคสนามหรือนอกสถานที่ได้สะดวก เนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าข้อเสียหรือข้อจำกัด ได้แก่
- ไม่สะดวกในการทำงานแบบอัตโนมัติ เนื่องจากต้องยกหัวโพรบก่อนจะเลื่อนไปวัดยังตำแหน่งอื่นๆ
- อาจมีรูหรือโพรงอากาศเกิดขึ้นบริเวณตัวคลัปปลิง
- การควบคุมความสม่ำเสมอของตัวคลัปปลิงทำได้ยาก

การคลัปปลิงแบบจุ่ม (immersion coupling) ใช้ของเหลวเป็นตัวคลัปปลิง ระยะทางระหว่างหัวอัลตราโซนิก โพรบกับวัสดุที่ต้องการทดสอบต้องยาวเพียงพอที่จะแยกคลื่นสะท้อนของพื้นผิวหน้าของวัสดุออกจากสัญญาณกระตุ้น (excitation signal) ของหัวโพรบ ความสัมพันธ์แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$d_c > \frac{V_c}{V_{im}} Nd_{im} \quad (3.1ข)$$

- เมื่อ d_c เป็นระยะทางของตัวคลีปปลิง หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d_m เป็นความหนาของวัสดุตัวอย่าง หน่วยเป็น มิลลิเมตร
 V_c เป็นความเร็วเสียงในตัวคลีปปลิง หน่วยเป็น เมตร ต่อ วินาที
 V_m เป็นความเร็วเสียงในวัสดุตัวกลาง หน่วยเป็น เมตร ต่อ วินาที และ
 N คือ จำนวนของการสะท้อนที่เกิดขึ้น (repetitive reflection) ในเนื้อวัสดุตัวอย่าง

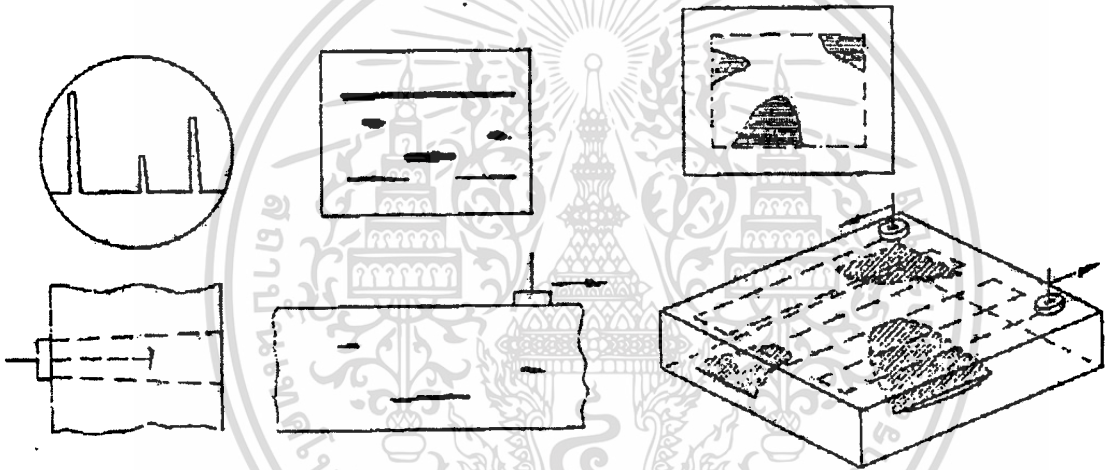
ข้อจำกัดของการตรวจสอบแบบจุ่ม คือ

- ไม่เหมาะกับงานภาคสนาม ระบบเคลื่อนย้ายยาก เพราะมีน้ำหนักและต้องมีอ่างน้ำในการทดสอบ
 - ไม่สามารถทดสอบกับวัสดุที่มีความบางน้อยกว่าข้อจำกัดในสมการที่ (3.1ข)
 - เครื่องมือยุ่งยากซับซ้อนกว่า จึงมีราคาแพง
- อย่างไรก็ตาม ข้อดีของวิธีการตรวจสอบแบบนี้ ได้แก่
- สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของหัวโพรบได้ง่าย เหมาะต่อการทดสอบแบบอัตโนมัติ
 - ทดสอบได้เร็วกว่า
 - มีการคลีปปลิงที่สม่ำเสมอ

จากข้อดีของวิธีการตรวจสอบโดยใช้การคลีปปลิงแบบจุ่ม ในวิทยานิพนธ์จึงเลือกใช้วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน โดยให้ชิ้นงานจุ่มอยู่ในน้ำ ด้วยวิธีตรวจสอบแบบพัลส์-สะท้อนกลับ เพื่อศึกษาวิธีการสร้างภาพและการนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์หาจุดบกพร่อง (defects) หรือความไม่ต่อเนื่อง (discontinuities) และตำแหน่งของจุดบกพร่องนั้นต่อไป

3.2 ความหมายของภาพถ่ายอัลตราโซนิก

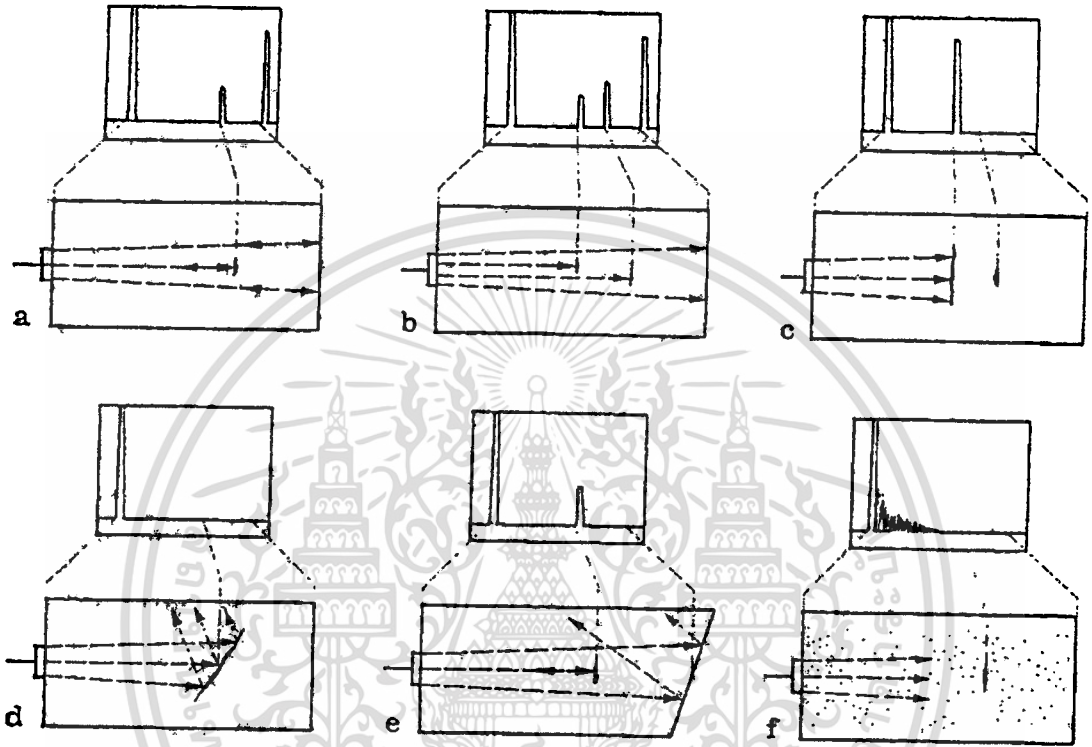
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อต้นว่าภาพถ่ายของอัลตราโซนิกแบ่งออกเป็น 3 แบบหลักๆ ขึ้นอยู่กับวิธีการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบ ได้แก่ การสแกนแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และซี-สแกน แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยพื้นฐานการตีความหรือแปลความหมายของภาพถ่าย เราจะศึกษาในกรณีของ เอ-สแกน เป็นหลัก ซึ่งภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน แสดงสัญญาณที่ตำแหน่งเพียงจุดเดียวจะช่วยสร้างความเข้าใจและให้ความหมายในการตีความภาพถ่ายของวัสดุที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ส่วนหลักการตีความภาพถ่ายจากเทคนิคตรวจสอบแบบ บี-สแกน และซี-สแกน เป็นการนำสัญญาณจาก เอ-สแกน มาวิเคราะห์เพิ่มเติมในแนว 1 มิติและ 2 มิติ ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน บี-สแกน และซี-สแกน

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการตีความหมายของสัญญาณที่ได้จากการตรวจสอบวัสดุด้วยเทคนิค เอ-สแกน ที่ได้จากการวัดด้วยอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับ รูปที่ 3.7 เป็นลักษณะของข้อบกพร่องในเนื้อชิ้นงานแบบต่างๆ พิจารณาจากรูปที่ 3.7a สัญญาณแบบพัลส์-สะท้อนกลับพื้นฐานจะประกอบไปด้วย (1) การสะท้อนที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงาน (2) การสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ชนกับผนังของชิ้นงาน และ (3) เกิดการสะท้อนเนื่องจากมีข้อบกพร่องอยู่ภายใน ในกรณีที่มีจุดบกพร่องมากกว่าหนึ่งจุด ลักษณะของสัญญาณอัลตราโซนิกแบบ เอ-สแกน แสดงดังรูปที่ 3.7b และในกรณีที่มีรอยร้าวหรือความไม่ต่อเนื่องที่มีขนาดใหญ่กว่าลำคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งดูดกลืนพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิกไปมาก คลื่นอัลตราโซนิกที่ยังคงวิ่งต่อด้วยพลังงานที่เหลืออาจมีความเข้มไม่พอที่จะวิ่งสะท้อนกลับมายังหัวอัลตราโซนิกโพรบ ลักษณะของกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 3.7c ในการตรวจสอบวัสดุชิ้นงานจริง ข้อบกพร่องหรือรอยร้าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ รวมถึงผนังของชิ้นงาน อาจไม่มีรูปร่างตั้งฉากกับลำคลื่นเสมอไป สัญญาณที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.7d และ 3.7e ตามลำดับ และกรณีสุดท้ายเมื่อวัสดุชิ้นงานมีข้อบกพร่องที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของการเกิดการกระเจิง (scattering) ของลำคลื่นอัลตราโซนิก ลักษณะของภาพถ่ายแสดงไว้ในรูปที่ 3.7f



รูปที่ 3.7 ลักษณะของข้อบกพร่องและภาพถ่ายแบบ เอ-สแกน

จากภาพถ่ายในรูปที่ 3.7 พบว่าสัญญาณหรือภาพถ่ายที่สร้างขึ้น สามารถตีความได้สองประเด็นด้วยกัน ได้แก่ (ก) การตีความจากผลของแอมพลิจูดของสัญญาณที่สะท้อนกลับ ซึ่งแสดงถึงการมีหรือไม่มีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุ ขนาดของแอมพลิจูดบอถึงขนาดของจุดบกพร่องและอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างจากอิมพีแดนซ์ของเนื้อวัสดุ และ (ข) คาบเวลาเป็นการแสดงระยะทางหรือตำแหน่งที่มีจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุชิ้นงานทดสอบ สามารถคำนวณได้จากสมการพีสิกส์พื้นฐาน

$$2d = vt \Leftrightarrow d = \frac{vt}{2} \quad (3.2)$$

เมื่อ d เป็นระยะทางหรือตำแหน่งของจุดบกพร่อง หน่วยเป็น เมตร

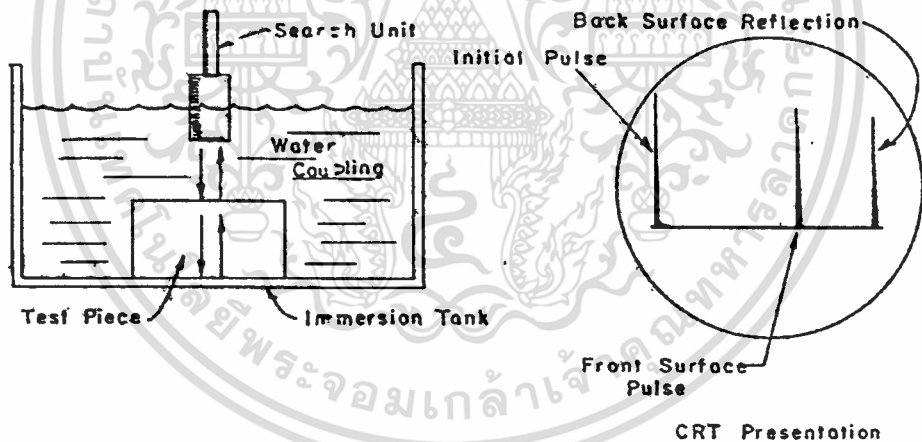
v เป็นความเร็วเสียงของวัสดุชิ้นงาน หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นคาบเวลาที่วัดจากตำแหน่งสะท้อนที่ผิวหน้าถึงตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่อง (round-trip transit time) หน่วยเป็น วินาที

เนื่องจากการเคลื่อนที่ไปและกลับคั้งนั้นระยะทางที่ได้จึงเป็นสองเท่าของระยะทางจริง ดังนั้นในสมการที่ (3.2) จึงต้องหารผลคูณระหว่างความเร็วเสียงและเวลาในการเคลื่อนที่ด้วยสอง

ภาพถ่ายแบบซี-สแกน อาศัยพื้นฐานทั้งสองหลักการดังกล่าวในการสร้างภาพ โดยคาบเวลาหรือเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่ไปจนกระทบกับรอยต่อหรือจุดบกพร่องถือเป็นระยะความลึกที่ใช้ในการสร้างภาพ โดยการตรวจสอบแบบซี-สแกน จะพิจารณาเฉพาะจุดบกพร่องที่ความลึกเพียงระยะเดียว ว่าที่ความลึกจุดหนึ่งๆมีจุดบกพร่องเป็นอย่างไร และใช้แอมพลิจูดและขนาดของแอมพลิจูดเป็นพารามิเตอร์ที่ชี้ตำแหน่งของจุดบกพร่องและขนาดของจุดบกพร่องนั้น โดยในการทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เป็นการสร้างภาพด้วยวิธีการจุ่ม (immersion technique) คั้งนั้นสัญญาณที่ได้จะต่างจากแบบสัมผัสเล็กน้อย รูปที่ 3.8 สัญญาณสะท้อนสัญญาณแรกจะเป็นสัญญาณที่เกิดจากอัลตราโซนิกโพรบกับน้ำหรือของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลับปลิง หลังจากสัญญาณแรกจึงจะเป็นสัญญาณที่ได้จากการสะท้อนวัสดุจริง

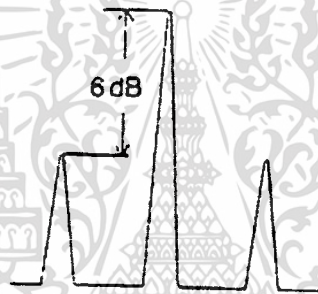
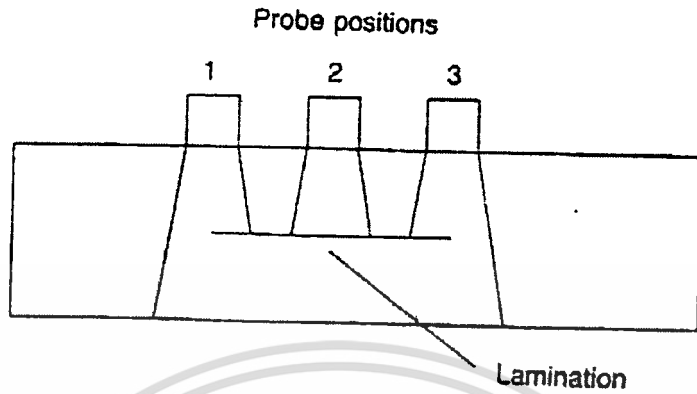


รูปที่ 3.8 สัญญาณจากพัลส์-สะท้อนกลับด้วยวิธีอัลตราโซนิกแบบจุ่ม

ในการหาขนาดของวัตถุหรือข้อบกพร่องในชิ้นงานจากค่าคลื่นอัลตราโซนิกกระทำได้ด้วยวิธีการที่เรียกว่า "เทคนิคการหาขนาดด้วยตำแหน่งที่ความเข้มเสียงลดลงครึ่งหนึ่ง (6 dB drop technique)" แสดงดังรูปที่ 3.9 เนื่องจากลำอัลตราโซนิกเป็นลำคลื่นที่บานออก คั้งนั้นการจะหาขนาดให้ได้แม่นยำ ต้องใช้ลำคลื่นอัลตราโซนิกที่มีขนาดเล็ก และเนื่องจากความเป็นลำคลื่นของอัลตราโซนิกนี้เอง เมื่ออัลตราโซนิกโพรบเคลื่อนที่ออกนอกขนาดของจุดบกพร่อง จะยังคงมีบางส่วนของลำคลื่นกระทบกับจุดบกพร่องและสะท้อนกลับ คั้งนั้นวิธีการที่นำมาใช้จึงเป็นลักษณะประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ที่ตำแหน่ง -6 dB หรือตำแหน่งที่ความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกลดลงเป็นครึ่งหนึ่ง เป็นตำแหน่งขอบของจุดบัพพร้อม

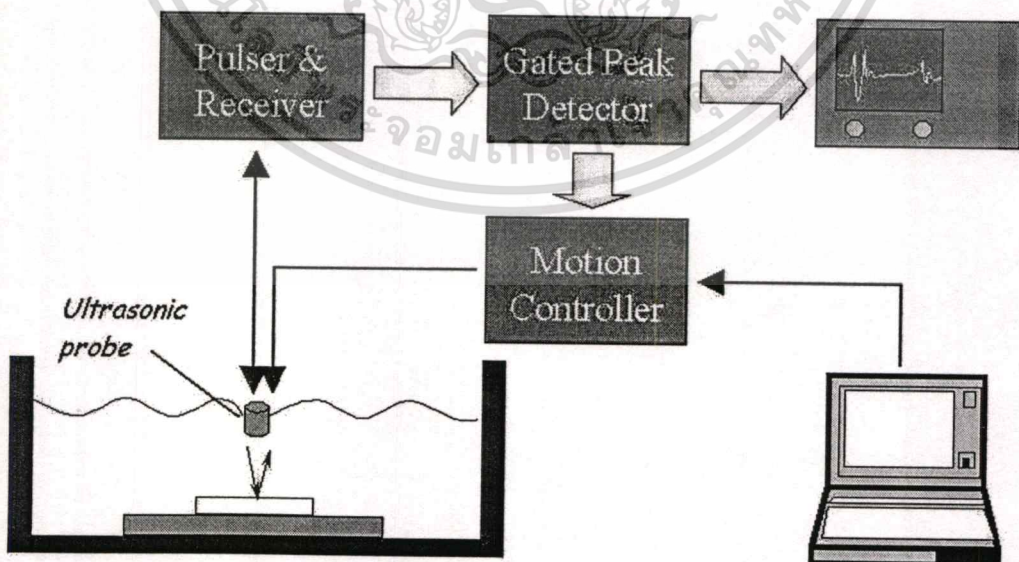


รูปที่ 3.9 การหาขนาดด้วยเทคนิคการลดทอนลง 6 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์และระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน

จากที่กล่าวไว้แล้วในตอนต้นว่า การตรวจสอบวัสดุด้วยคลื่นอัลตราโซนิกคือการสร้างภาพของรอยตำหนิและจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุตัวกลางที่ทำการทดสอบ วิธีการสร้างภาพที่ให้รายละเอียดและง่ายต่อการพิจารณา เป็นการสร้างภาพของจุดบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุทั้งชิ้น กล่าวคือ แสดงทั้งภาพ ขนาด ลักษณะ และตำแหน่งของจุดบกพร่อง โดยเราเรียกว่า การสร้างภาพแบบซี-สแกน วิธีการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกด้วยวิธีซี-สแกน อาศัยหลักการของความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ภายในเนื้อวัสดุ พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการสร้างภาพได้แก่ ความแรงของสัญญาณ หรือ แอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่า เมื่อวัสดุเดินทางไปกระทบกับรอยต่อหรือขอบเขตที่มีความหนาแน่นและความเร็วเสียงที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดคลื่นแยกออกเป็นสองส่วนด้วยกัน คือ คลื่นส่วนที่วิ่งต่อเข้าไปในเนื้อวัสดุที่สอง และคลื่นที่สะท้อนและเคลื่อนที่กลับ จากหลักอนุรักษ์พลังงานหรือหลักการที่ว่าความดันเสียงในตัวกลางที่หนึ่งจะต้องเท่ากับความดันเสียงในตัวกลางที่สอง ทำให้เข้าใจว่าแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อกระทบกับรอยต่อระหว่างสองวัสดุตัวกลางในเนื้อชิ้นงานที่ทำการทดสอบ จากหลักการดังกล่าว เราสามารถนำเอาขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนกลับมาประยุกต์สร้างภาพเพื่อตรวจสอบจุดบกพร่องหรือความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานวัสดุและสามารถนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์ หาปัญหาและสาเหตุ เพื่อแก้ไขและประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไปได้



รูปที่ 3.10 ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบสำหรับใช้สร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วย

- แทงค้ำน้ำหรืออ่างน้ำ – สำหรับใส่น้ำหรือของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางป้อนพลังงานอัลตราโซนิก
- หัวอัลตราโซนิกโพรบ – เป็นตัวแปลงสัญญาณจากไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิก และแปลงจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- ตัวกระตุ้นพัลส์และตัวรับ – เป็นตัวส่งพัลส์ไฟฟ้าไปกระตุ้นหัวโพรบ และขยายสัญญาณไฟฟ้าของคลื่นที่รับได้
- เครื่องสแกนเชิงกลในแนว xyz และชุดควบคุม – สำหรับควบคุมหัวโพรบในแนว xyz
- เครื่องตรวจจับพิก – เป็นตัวอ่านแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณในหน้าต่าง (window)
- ออสซิลโลสโคป – สำหรับเฝ้าดู (monitor) สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกในขณะที่เตรียมการทดลอง
- คอมพิวเตอร์ – ใช้ประมวลผลสัญญาณและสร้างภาพ

รายละเอียดของเครื่องมือหลักที่สำคัญ ได้แก่ หัวอัลตราโซนิกโพรบ เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ กระตุ้น เครื่องรับและขยายสัญญาณอัลตราโซนิก และเครื่องตรวจจับสัญญาณพิก แสดงรายละเอียดในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

3.3.1 อัลตราโซนิกโพรบ

อัลตราโซนิกโพรบเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก โดยทั่วไปสร้างขึ้นจากวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) เช่นพวกแบเรียมไทตาเนต (barium titanate) และพีซีที (PZT - lead zirconate titanate) เมื่อได้รับแรงหรือความดันเสียง วัสดุประเภทนี้จะเกิดการเปลี่ยนรูปและสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมา โดยจำนวนประจุที่ถูกสร้างจะแปรผันตรงกับความเค้นหรือแรงดันที่ป้อนให้ แสดงดังสมการที่ (3.3) เรียกกระบวนการนี้ว่า "ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกตรง (direct piezoelectric effect)"

$$P = \frac{Q}{A} = \text{constant} \times \sigma \quad (3.3)$$

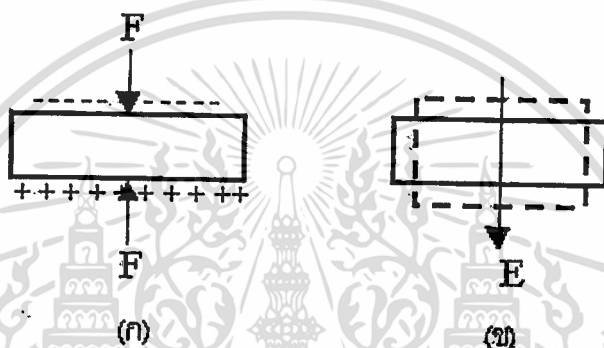
เมื่อ P เป็นประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือเรียกว่า โพลาไรเซชัน (polarization) หน่วยเป็น คูอมปี้ ต่อตารางเมตร และ σ เป็นความเค้น หรือ แรงที่กระทำต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็น ปาสกาล (pascal, Pa) หรือ นิวตันต่อตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองกลับกัน "ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกผกผัน (indirect piezoelectric effect)" เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสร้างคลื่นหรือความดันเสียงออกมาเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้า (electric field, E) ความสัมพันธ์แสดงดังสมการ

$$S = \text{strain} = \text{constant} \times E \quad (3.4)$$

โดยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทั้งสองนี้ แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (ก) แบบตรง (ข) แบบผกผัน

ความถี่ในการสั่นของผลึกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเท่ากับความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่กำทอนหรือความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของวัสดุ โดยความถี่กำทอนมีขนาดขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นผลึกเพียโซอิเล็กทริก โดยความถี่ที่มีความแรงของสัญญาณสูงสุด คือ ความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) ในกรณีของแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แผ่นวัสดุเปรียบได้เหมือนท่อแก้วปลายปิดทั้งสองด้าน จากความรู้ฟิสิกส์เบื้องต้น ทราบว่าความถี่มูลฐานมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ดังนั้นความหนาของวัสดุจึงแปรผันกับความถี่ดังสมการ

$$t = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} \quad (3.5)$$

เมื่อ t คือความหนาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

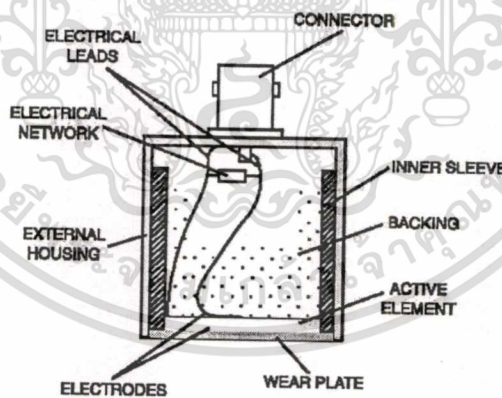
v คือความเร็วเสียงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f คือความถี่มูลฐาน หรือความถี่ที่สร้างขึ้นจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และ λ เป็นความยาวคลื่น

โครงสร้างพื้นฐานของหัวอัลตราโซนิกโพรบแสดงดังรูปที่ 3.12 โดยประกอบไปด้วย

- วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (active element) ทำหน้าที่ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น
- ขั้วไฟฟ้า (electrode) ทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าไปยังคอนเนคเตอร์ (connector)
- ส่วนลดทอนสัญญาณแคมป์ (backing) เป็นส่วนที่มีหน้าที่ลดแอมพลิจูดของสัญญาณ (quality factor, Q) ทำให้จำนวนไซเคิลในการสั่นลดลง รายละเอียดจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 3.3.2
- ส่วนป้องกันผิวหน้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (wear plate) ส่วนนี้จำเป็นต้องทำจากวัสดุที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงที่เหมาะสมกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อให้คลื่นที่สร้างขึ้นมาเคลื่อนที่ออกไปได้มากที่สุด โดยความหนาของ wear plate มีความสำคัญมาก ต้องเลือกให้คลื่นที่วิ่งออกไปเป็นเฟสเดียวกัน (in-phase) ไม่ให้เกิดการหักล้างกัน ดังนั้นในกรณีที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีความหนาเท่ากับ $\lambda/2$ แล้ว ความหนาของ wear plate ควรจะเท่ากับ $\lambda/4$ จึงจะทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับมาจากส่วน backing มีเฟสเดียวกันหรือตรงกันกับคลื่นที่สร้างออกมาจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
- อิมพีแดนซ์แมทชิ่ง (matching impedance หรือ electrical network) ทำหน้าที่เป็นโหนดที่ทำให้มีการส่งถ่ายพลังงานสูงที่สุด (maximum power transfer)



รูปที่ 3.12 โครงสร้างทั่วไปของหัวอัลตราโซนิกโพรบ

ลักษณะโครงสร้างที่กล่าวมาเป็นหัวอัลตราโซนิกแบบสัมผัส ในกรณีที่ต้องการใช้งานในแบบจุ่ม หัวอัลตราโซนิกโพรบจะเพิ่มความยาวของส่วนปลอกหุ้ม (external housing) เพื่อให้มีส่วนที่จุ่มลงในน้ำได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 หัวอัลตราโซนิกโพรบ (ก) แบบสัมผัส และ (ข) แบบจุ่ม

ข้อดีของอัลตราโซนิกโพรบแบบจุ่มที่เหนือกว่าอัลตราโซนิกโพรบแบบสัมผัสมีอยู่สามปัจจัยหลักด้วยกัน คือ

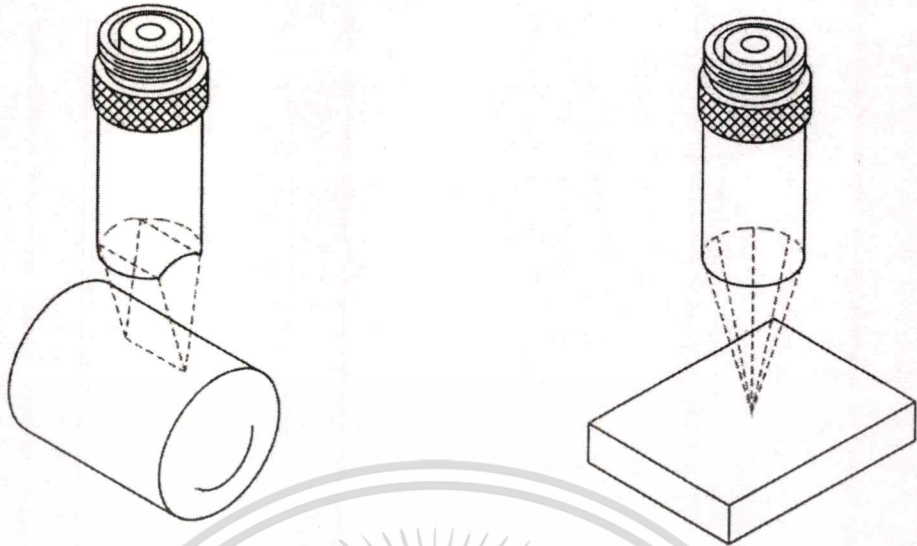
- มีการคลี่ปลิงที่สม่ำเสมอ ทำให้ลดความไว (sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลง
- ลดเวลาในการสแกนหัวโพรบในระบบสแกนแบบอัตโนมัติ และ
- คุณสมบัติพิเศษนอกเหนือจากโพรบแบบสัมผัส คือมีระบบโฟกัส ช่วยเพิ่มความไวในการตรวจจับจุดบกพร่องขนาดเล็กๆ ได้

โดยหัวอัลตราโซนิกโพรบแบบจุ่มมี 3 คุณลักษณะ (configuration) ที่แตกต่างกัน แบ่งออกตามคุณสมบัติการโฟกัสลำของคลื่นอัลตราโซนิกที่สร้างขึ้น (แสดงดังรูปที่ 3.14) ได้แก่

- แบบไม่โฟกัส (unfocused, "flat")
- มีโฟกัสแบบเป็นเส้น (cylindrically focused, "line")
- มีโฟกัสแบบเป็นจุด (spherically focused, "spot")

อัลตราโซนิกโพรบแบบไม่โฟกัสลำคลื่น ปกตินิยมประยุกต์ใช้กับการทดสอบทั่วไปหรือสำหรับทดสอบวัสดุที่มีความหนา หัวโพรบแบบโฟกัสลำคลื่นเป็นเส้นนิยมนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบวัสดุประเภทท่อ และหัวโพรบแบบโฟกัสลำคลื่นเป็นจุด โดยทั่วไปแล้วนิยมมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการความไวในการตรวจสอบจุดบกพร่องขนาดเล็ก ความยาวโฟกัส (focal length) ของอัลตราโซนิกโพรบ จะนิยามว่าเป็นระยะห่างจากตำแหน่งของหน้าหัวโพรบไปจนถึงจุดที่มีความแรงหรือแอมพลิจูดของสัญญาณสูงที่สุด ไม่ว่าในตัวอย่างใดๆ ค่าความยาวโฟกัสจะเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากหัวโพรบได้ถูกออกแบบให้คลื่นที่วิ่งออกจากหน้าหัวโพรบอยู่ในแนวเส้นปกติ ดังนั้นลำคลื่นจึงไม่เกิดการหักเห

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

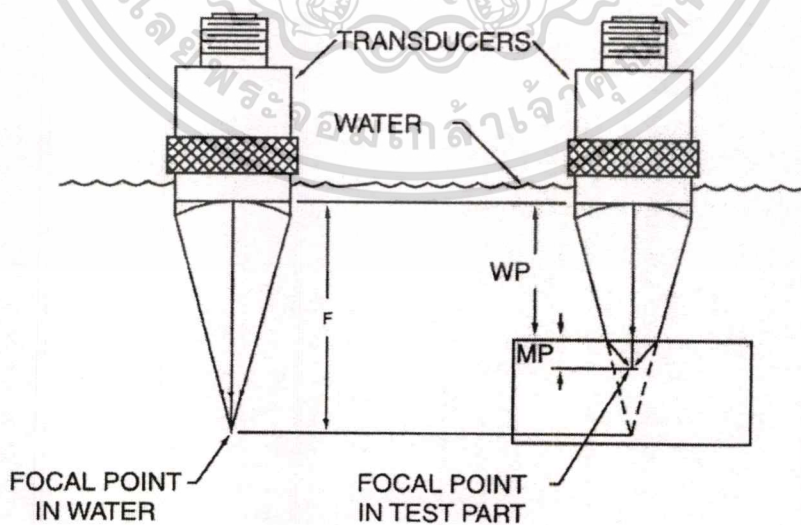


(ก) หัวโพรบแบบโฟกัสเป็นแนวเส้น

(ข) หัวโพรบแบบโฟกัสเป็นจุด

รูปที่ 3.14 หัวอัลตราโซนิก โพรบแบบจุ่มและมีคุณสมบัติโฟกัสลำคลื่น

ในการตรวจสอบวัสดุด้วยหัวอัลตราโซนิกโพรบแบบโฟกัสลำคลื่น เนื่องจากลำคลื่นไม่ได้ขนานไปกับวัสดุที่ต้องการทดสอบ เมื่อลำคลื่นตกกระทบกับวัสดุที่มีความเร็วคลื่นแตกต่างจากความเร็วของตัวคลื่นปดิ่ง (ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราใช้น้ำเป็นตัวคลื่นปดิ่ง) ลำคลื่นจะเกิดการหักเห ดังนั้นระยะโฟกัสในเนื้อวัสดุที่ต้องการทดสอบจึงแตกต่างไปจากระยะโฟกัสปกติ พิจารณาจากรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การเปลี่ยนแปลงระยะโฟกัสในเนื้อวัสดุที่ต้องการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้ F เป็นความยาวโฟกัสของอัลตราโซนิกโพรบ WP เป็นระยะทางจากผิวหน้าของอัลตราโซนิกโพรบถึงชิ้นงานที่ทำการทดสอบ และ MP เป็นระยะโฟกัสในเนื้อชิ้นงาน หรือก็คือความลึกของลำโฟกัสของคลื่นในเนื้อชิ้นงานที่ทำการทดสอบ จากพื้นฐานตรีโกณมิติและกฎการหักเห (Snell's law)

$$\frac{\sin \theta_1}{v_w} = \frac{\sin \theta_2}{v_{im}} \quad (3.6)$$

เมื่อ v_w เป็นความเร็วเสียงในน้ำ และ v_{im} เป็นความเร็วเสียงในชิ้นงานทดสอบ สามารถหาระยะทาง MP ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$MP = \frac{v_w}{v_{im}} (F - WP) \quad (3.7)$$

ในทางปฏิบัติแล้ว เราต้องการสร้างภาพตามความลึกที่ต้องการศึกษา ดังนั้นจึงต้องแปลงสมการที่ (3.7) เพื่อให้หาระยะห่างของหัวโพรบกับชิ้นงาน ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.8)

$$WP = F - MP \left(\frac{v_{im}}{v_w} \right) \quad (3.8)$$

3.3.2 คุณสมบัติสำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ

ในหัวข้อที่แล้วได้กล่าวถึงภาพกว้างๆและพื้นฐานของอัลตราโซนิกโพรบ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติที่สำคัญของอัลตราโซนิกโพรบ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้อัลตราโซนิกโพรบของบริษัท PANAMETRICS ดังนั้นคุณสมบัติที่กล่าวถึงในที่นี้ จึงอ้างอิงกับคุณสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบที่ผลิตโดยบริษัท PANAMETRICS เป็นหลัก

การเลือกอัลตราโซนิกโพรบซึ่งเป็นส่วนสำคัญมากในระบบการวัดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก นอกจากจะเลือกตามการประยุกต์ใช้งานว่าต้องการใช้เป็นแบบสัมผัสหรือแบบจุ่มแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติอื่นๆประกอบด้วย คุณสมบัติหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกอัลตราโซนิกโพรบ ได้แก่ รูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของความถี่ ซึ่งใช้การวัดตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 3.16 โดยรูปคลื่นสัญญาณเป็นคุณสมบัติที่บอกถึงอัตราการลดทอนของอัลตราโซนิกโพรบหรือค่าแดมป์ (damping) ของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

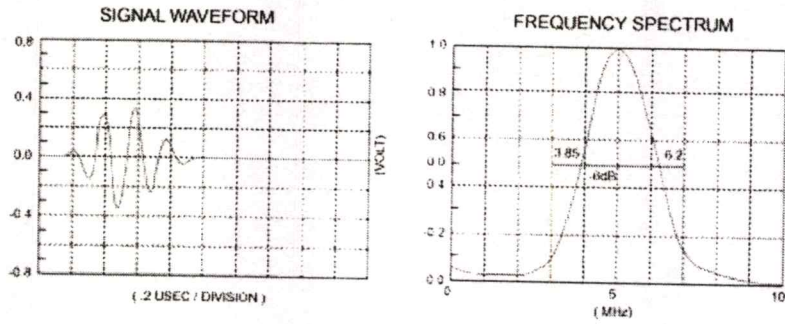
พัลส์อัลตราโซนิก ในกรณีของอัลตราโซนิกที่มีอัตราการลดทอนสูง พัลส์ที่สร้างออกมาจะหยุดในเวลาที่จะเร็วกว่าหัวอัลตราโซนิกโพรบที่มีอัตราการลดทอนต่ำ หรือก็คือมีคาบเวลาของรูปคลื่น (waveform duration) น้อยกว่า คาบเวลาของรูปคลื่นเป็นเวลาหัวอัลตราโซนิกโพรบสั้นหรือใช้ในการส่งคลื่นออกมา ในช่วงเวลานี้หัวอัลตราโซนิกโพรบจะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาได้ เราเรียกช่วงนี้ว่า "dead zone" ลองพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นของอัลตราโซนิกโพรบโมเดล VIDEOSCAN และโมเดล ACCUSCAN "S" กรณี VIDEOSCAN มีอัตราการลดทอนหรือสูญเสียสูงกว่า ซึ่งส่งผลดีต่อความละเอียด (resolution) ในการตรวจสอบจะสูงกว่ากรณีของ ACCUSCAN แต่ความไว (sensitivity) ในการตรวจสอบต่ำกว่า คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่สำคัญได้แก่ สเปกตรัมของความถี่ เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงการตอบสนองของความถี่ต่อการสั่นของอัลตราโซนิกโพรบ หรือก็คือกราฟที่แสดงให้ทราบถึงความเข้มเสียงที่ผลิตออกมาจากอัลตราโซนิกโพรบที่มีความถี่ต่างๆ โดยมีพารามิเตอร์ที่น่าสนใจคือ แฟกเตอร์ชี้คุณภาพ (quality factor, Q) ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นดังสมการ

$$Q = \frac{f_c}{\Delta f} \quad (3.9)$$

เมื่อ f_c เป็นความถี่กลางหรือความถี่เรโซแนนซ์ (center frequency หรือ resonant frequency)

Δf เป็นช่องกว้างของความถี่ที่มีความเข้มเสียงลดลงเป็นสองเท่า หรือ -6 dB (bandwidth)

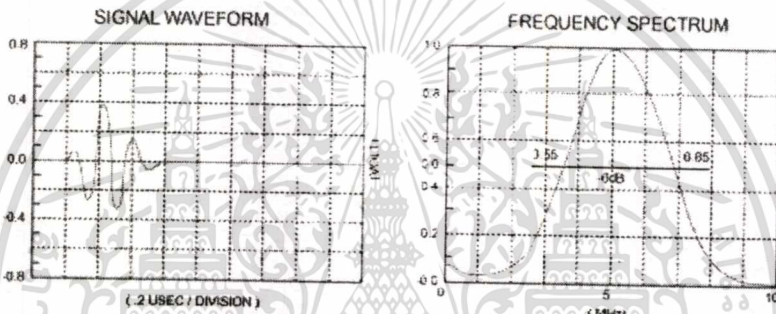
ในกรณีที่ค่า Q มีค่าน้อยแสดงว่าอัลตราโซนิกโพรบมีช่องกว้างความถี่ที่กว้าง (board-band) และถ้าค่า Q มีค่ามากแสดงว่าอัลตราโซนิกโพรบมีช่องกว้างความถี่แคบ (narrow-band)



MEASUREMENTS PER ASTM E1065

WAVEFORM DURATION:	SPECTRUM MEASURANDS:
-14DB LEVEL -- 546US	CENTER FREQ. ---- 5.03MHz
-20DB LEVEL -- 650US	PEAK FREQUENCY -- 4.95MHz
-40DB LEVEL -- 1.24US	-6DB BANDWIDTH -- 46.77 %

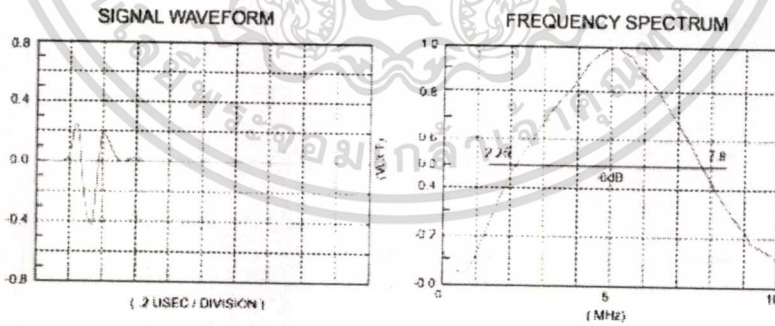
(ก) ACCUSCAN "S"



MEASUREMENTS PER ASTM E1065

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

(ข) ACCUSCAN "R"



MEASUREMENTS PER ASTM E1065

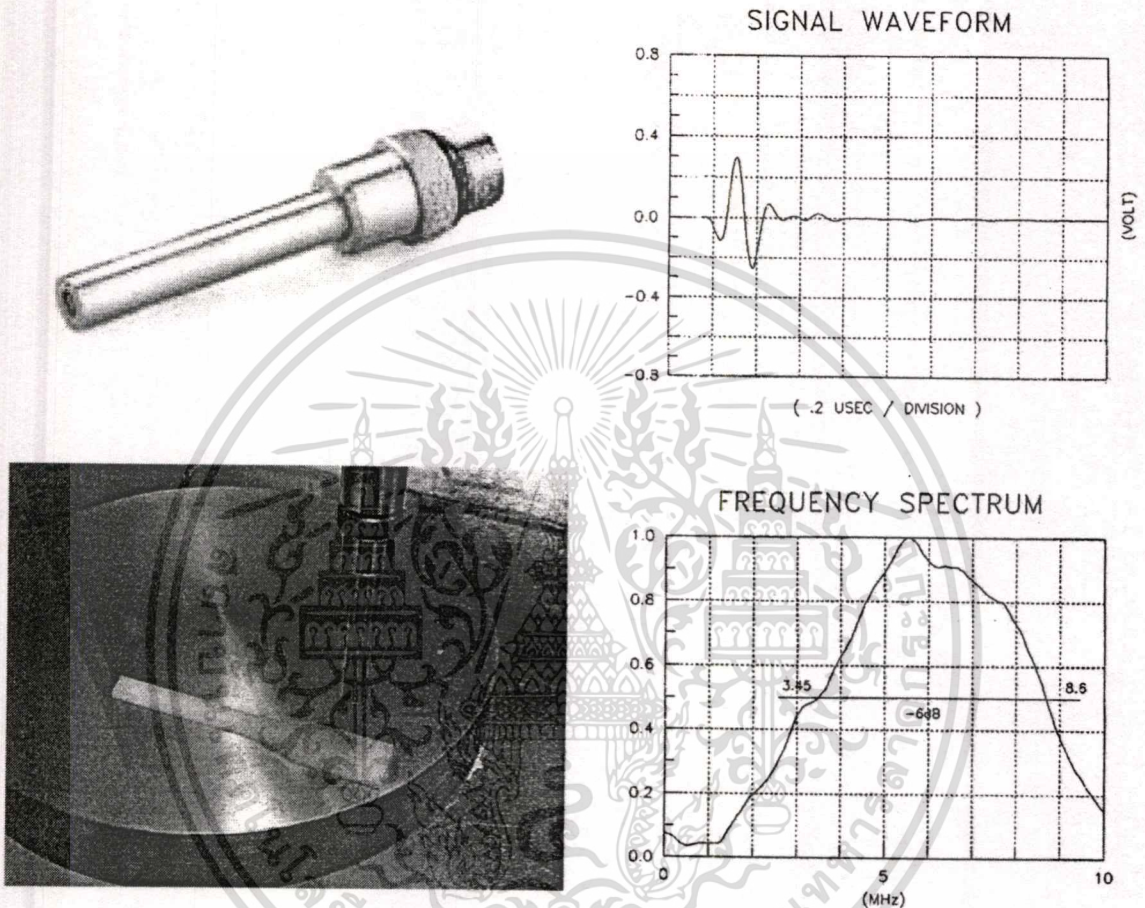
WAVEFORM DURATION:	SPECTRUM MEASURANDS:
-14DB LEVEL -- 238US	CENTER FREQ. ---- 5.03MHz
-20DB LEVEL -- 262US	PEAK FREQUENCY -- 5.28MHz
-40DB LEVEL -- 758US	-6DB BANDWIDTH -- 110.4 %

(ค) VIDEOCAN

รูปที่ 3.16 คุณสมบัติรูปคลื่นสัญญาณและสเปกตรัมของอัลตราโซนิกโพรบ PANAMETRICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากคุณสมบัติของความละเอียดในอัลตราโซนิกโพรบโมเดล VIDEOSCAN มีค่าสูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบแบบ VIDEOSCAN รุ่น V310-N-SU มีความถี่กลาง (center frequency) ประมาณ 5 MHz เป็นแบบจุ่มที่มีระยะโฟกัส 0.75 นิ้ว แสดงคุณสมบัติดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 คุณสมบัติของหัวอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ (V310-N-SU)

ลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ปล่อยออกจากหัวอัลตราโซนิกโพรบจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงที่อยู่ห่างจากหัวโพรบไปจนถึงตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดสูงที่สุดสุดสุดท้ายและเป็นตำแหน่งที่ลำคลื่นเสียงเริ่มกระจายออกไม่เป็นลำขนาน เราเรียกช่วงนี้ว่า เฟรสเนลโซน (Fresnel zone หรือ near field) ช่วงนี้แอมพลิจูดของลำคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสูงไปต่ำและจากต่ำไปสูงสลับกันไป ถัดจากช่วงนี้ไป แอมพลิจูดของคลื่นจะค่อยๆ ลดลงตามระยะทางและลำคลื่นเสียงเริ่มบานออก เรียกช่วงนี้ว่า ฟรอนโฮเฟอร์โซน (Fraunhofer zone หรือ far field) ตำแหน่งของเฟรสเนลโซน (near field N) มีค่าเป็นดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (3.10)$$

ในกรณีที่เส้นผ่าศูนย์กลาง D มากกว่าความยาวคลื่นมากๆ แล้ว สามารถประมาณได้ว่า

$$N \approx \frac{D^2 f}{4v} \quad (3.11)$$

เมื่อ f เป็นความถี่ หน่วยเป็น MHz

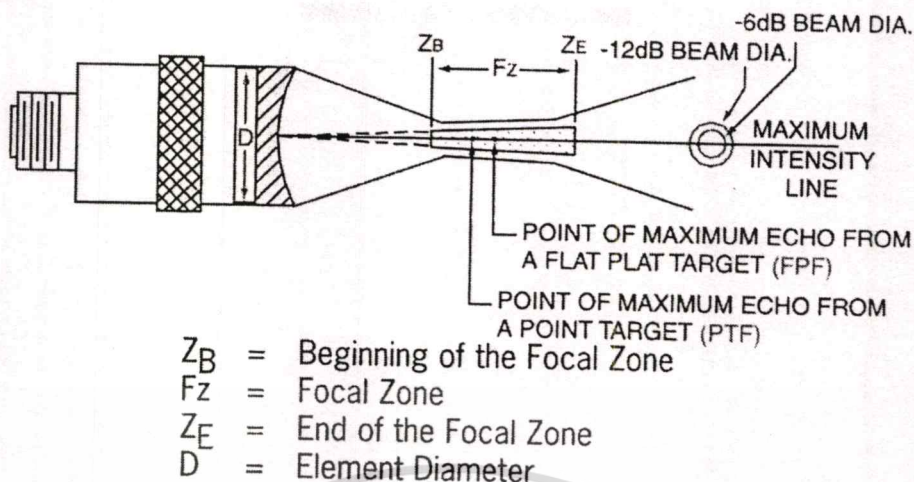
v เป็นความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางใดๆ หน่วยเป็น นิ้วต่อวินาที

D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวโพรบ หน่วยเป็น นิ้ว

นอกจากเฟรสเนลโซนแล้ว คุณสมบัติสำคัญอื่นๆของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ควรรู้ ได้แก่ ความกว้างของลำคลื่นอัลตราโซนิกและโฟกัสโซน โดยความกว้างของลำคลื่น (beam diameter, BD) เป็นคุณสมบัติที่มีผลต่อความไวและความละเอียดในการตรวจสอบ ยิ่งความกว้างของลำคลื่นแคบมากเท่าไร ความละเอียดในการตรวจจับจุดบกพร่องขนาดเล็กจะยิ่งสูง และเนื่องจากลำคลื่นทั้งหมดมารวมกันที่บริเวณนี้จึงมีพลังงานสูง จึงทำให้เกิดการสะท้อนกลับของจุดบกพร่องสูงอีกด้วย เรียกว่ามีความไวในการตรวจสอบสูงขึ้นด้วย โดยความกว้างของลำคลื่นเสียงคิดที่ตำแหน่งที่แอมพลิจูดลดทอนลงเพียงครึ่งเดียว หรือ -6dB เป็นดังสมการ

$$BD_{(-6\text{dB})} = \frac{1.02 F v}{fD} \quad (3.12)$$

เมื่อ F เป็นความยาวโฟกัส หน่วยเป็น นิ้ว



รูปที่ 3.18 ลักษณะลำคลื่นโฟกัสอัลตราโซนิก

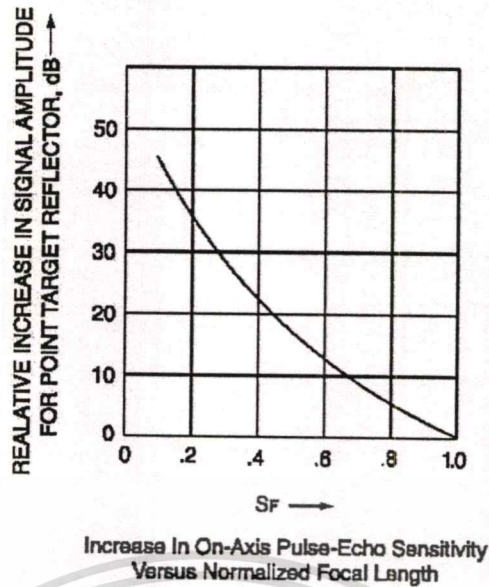
รูปที่ 3.18 แสดงลักษณะของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกโฟกัส โดยโฟกัสโซน(F_Z) หรือช่วงที่แอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนกลับลดทอนลงไม่เกิน -6dB จากตำแหน่งโฟกัส สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$F_Z = NS_F^2 \left[\frac{2}{1 + (0.5 \times S_F)} \right] \quad (3.13)$$

เมื่อ S_F เป็นโฟกัสซิงเกน (Focussing gain) เป็นดังสมการ

$$S_F = \frac{F}{N} \quad (3.14)$$

โดยโฟกัสซิงเกนแสดงถึงอัตราการขยายของความเร็วในการตรวจสอบ เมื่อเทียบกับอัลตราโซนิกโพรบที่ไม่มีการโฟกัส โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของโฟกัสซิงเกนกับการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดของสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเนื่องจาก S_f

จากที่กล่าวไปแล้วข้างต้น อัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในระบบสร้างภาพอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ที่พัฒนาขึ้นมา เป็นหัวทรานสดิวเซอร์แบบที่ใช้จุ่มในของเหลว ของบริษัท PANAMETRICS โมเดล V310-N-SU แสดงดังรูปที่ 3.17 โดยมีความถี่กลางอยู่ที่ประมาณ 5.6 MHz และเป็นหัวโพรบแบบมีการโฟกัสเป็นจุด (spherical focus) โดยมีระยะโฟกัสที่ 0.75 นิ้ว (หรือประมาณ 19 มิลลิเมตร) มีเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก 0.25 นิ้ว (ประมาณ 6 มิลลิเมตร) โดยมีคุณสมบัติของลำคลื่นคำนวณจากสมการที่ (3.11) ถึง (3.14) เป็นดังตารางที่ 3.1

จากข้อมูลในการคำนวณแสดงดังตารางที่ 3.1 ทำให้เราเห็นตัวเลขหลายๆ ของข้อจำกัดในการวัดและสร้างภาพอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้น โดยความกว้างของลำคลื่นเป็นแฟกเตอร์ที่จำกัดความละเอียดในการสแกนหรือตรวจวัดความบกพร่องของชิ้นงาน กล่าวคือจุดบกพร่องหรือรูพรุนในเนื้อชิ้นงานที่เล็กที่สุดที่อัลตราโซนิกโพรบมองเห็นจะประมาณ 0.0356 นิ้ว หรือประมาณ 900 ไมครอน และโฟคัลโซน (focal zone) บอกว่าลำคลื่นจะมีขนาดเล็กประมาณ 900 ไมครอนในช่วงระยะประมาณ 0.654 นิ้ว หรือกล่าวคือเป็นระยะห่างจากจุดโฟกัสประมาณ $0.654/2 = 0.327$ นิ้ว ดังนั้นในการวัดและการสร้างภาพ ตำแหน่งในแนวแกน z จะคาดเคลื่อนได้ในช่วงไม่เกิน 0.327 นิ้ว หรือประมาณ 8.3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในระบบสร้างภาพ

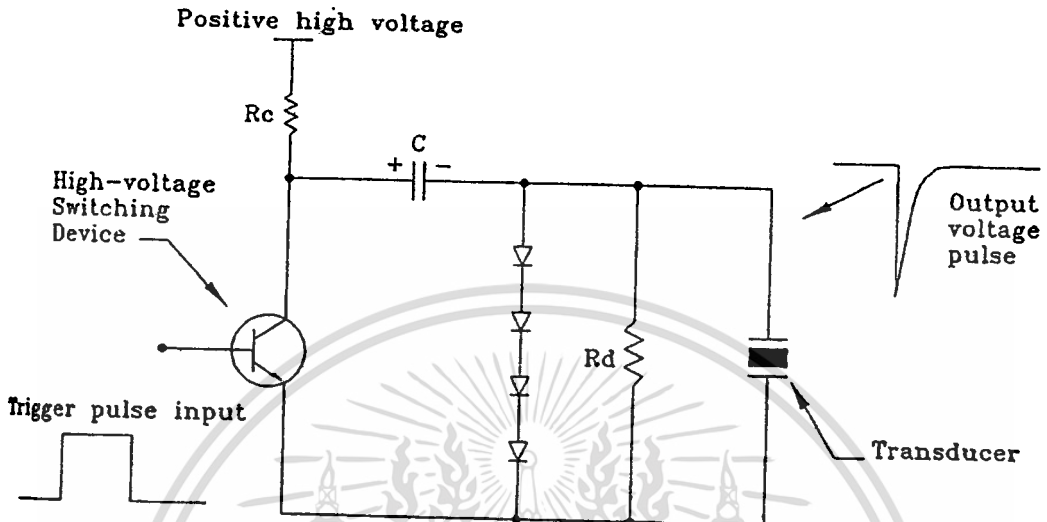
	หน่วยเป็นนิ้ว	หน่วยเป็นเมตร
ความถี่กลาง	5.6 MHz	
แบนด์วิธ	5.35 MHz	
ลักษณะของการโฟกัส	Spherical Focus	
ระยะโฟกัส	0.75"	19 mm
ระยะเฟรสนเนล N	1.347"	34.2 mm
ความกว้างของลำคลื่น BD	0.0355"	0.902 mm
โฟกัสโซน Fz	0.654"	16.6 mm
โฟกัสเชิงแกน S_f	0.557	

3.3.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นและตัวรับ (Pulser-Receiver)

เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เพื่อไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบให้สร้างความดันคลื่นกล โดยทั่วไปนิยมเรียกว่า พัลส์เซอร์ (pulser) ซึ่งเปรียบเสมือนไม้ตีระฆัง โดยอัลตราโซนิกโพรบเปรียบเสมือนเป็นระฆัง ซึ่งจะสั่นด้วยความถี่เรโซแนนซ์ตามคุณสมบัติของระฆังแต่ละชนิด เมื่อพัลส์เซอร์ส่งแรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ ก็เปรียบได้กับการออกแรงตีระฆัง ให้ระฆังสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของระฆังเอง ถ้าออกแรงตีมาก ระฆังก็จะมีเสียงดังมาก และเสียงก็จะค่อยๆ ลดลงไปเรื่อยๆ จนเงียบไป เนื่องจากเกิดการสูญเสีย เมื่อต้องการให้ระฆังสั่นอีกครั้งก็จำเป็นต้องออกแรงตีระฆังอีกครั้งหนึ่ง ในทำนองเดียวกัน พัลส์เซอร์จะผลิตพัลส์ของแรงดันไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ โดยยิ่งพัลส์ของแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูง ก็จะผลิตคลื่นกลที่มีแอมพลิจูดสูงด้วย ซึ่งจะทำให้มีความไวในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีจุดบกพร่องขนาดเล็กๆ ได้ดี แต่การใส่พัลส์กระตุ้นที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง จะทำให้อัลตราโซนิกโพรบเกิดความร้อนภายในสูงด้วย ดังนั้นพัลส์เซอร์จึงจำเป็นต้องออกแบบให้สร้างพัลส์ของแรงดันที่มีคาบเวลาสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อลดผลของความร้อนและเพิ่มความไวในการตรวจสอบ

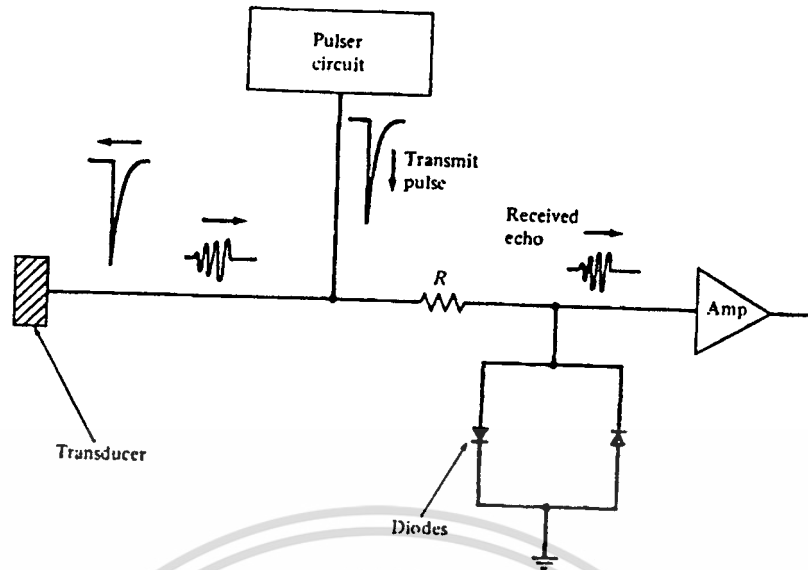
รูปที่ 3.20 แสดงตัวอย่างของวงจรไฟฟ้าที่ใช้สร้างพัลส์แรงดันสูงที่มีคาบเวลาสั้น (high voltage sharp pulse) ซีกลบ เมื่อป้อนพัลส์แรงดันต่ำซีกบวกให้กับวงจร โดยวงจรจะใช้ทรานซิสเตอร์ (transistor) หรือวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์ (switching semiconductor device) เป็นตัวขับแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง ต่อเป็นแบบวงจรอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter) ที่ขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะสร้างพัลส์ซีกลบแรงดันสูงขึ้น เพื่อสร้างเป็นพัลส์ปลายแหลม (sharp

pulse) จึงต้องนำพัลส์ที่ได้ไปผ่านวงจรดิฟเฟอเรนเชียล (differentiated circuit) เพื่อสร้างเป็นพัลส์ปลายแหลมแรงดันไฟสูงไปกระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ



รูปที่ 3.20 วงจรพัลส์เซอร์

ในวิทยานิพนธ์ใช้อัลตราโซนิกโพรบเพียงตัวเดียวทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นจึงเลือกใช้เครื่องพัลส์เซอร์ที่มีภาครับอยู่ด้วย โดยภาครับในเครื่องพัลส์เซอร์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสองส่วน ได้แก่ ส่วนป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินและส่วนขยายสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 3.21



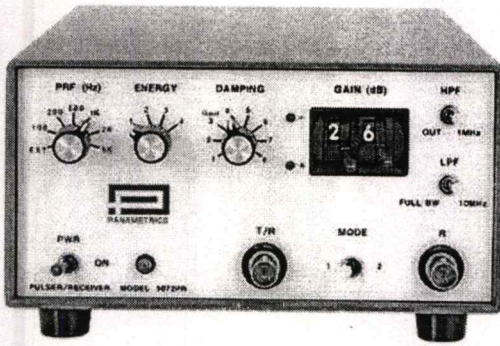
รูปที่ 3.21 วงจรในภาครับสัญญาณ

เครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท PANAMETRICS รุ่น 5072PR และ 5073PR แสดงดังรูปที่ 3.22 พารามิเตอร์ของเครื่องพัลส์เซอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ พารามิเตอร์ภาคส่งและพารามิเตอร์ภาครับ ในภาครับพารามิเตอร์ที่สำคัญมีอยู่เพียงพารามิเตอร์เดียว ซึ่งก็คืออัตราขยาย/อัตราการลดทอนสัญญาณ (gain) ซึ่งนิยมใช้หน่วยของเดซิเบล (dB) เมื่อค่าเป็นบวก (+) หมายถึงเพิ่มอัตราขยาย ทำนองกลับกันเมื่อค่าเป็น (-) หมายถึงอัตราการลดทอน โดยในรุ่น 5072PR มีอัตราขยายเป็น ± 59 dB และรุ่น 5073PR มีอัตราขยาย -49 dB ถึง $+39$ dB ความหมายของหน่วยเดซิเบล (dB) คืออัตราการเปรียบเทียบแอมพลิจูดของสัญญาณที่ 1 (หรือสัญญาณขาเข้า) กับสัญญาณที่ 2 (หรือสัญญาณขาออก) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3.15) โดยในตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ที่สำคัญ

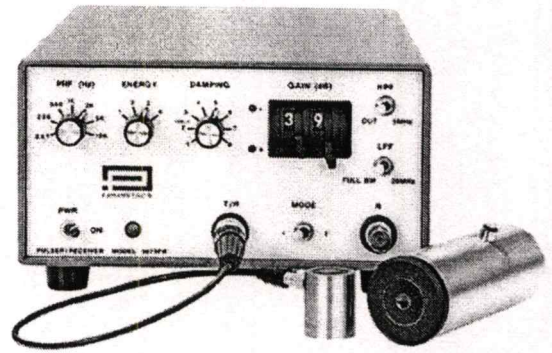
$$dB = 20 \log_{10} (A_1/A_2) \quad (3.15)$$

เมื่อ A_1 เป็นสัญญาณที่ 1 หรือ สัญญาณขาเข้า

A_2 เป็นสัญญาณที่ 2 หรือ สัญญาณขาออก



5072PR



5073PR

รูปที่ 3.22 พัลส์เซอร์และตัวรับของ PANAMETRICS

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของ dB กับอัตราส่วนของแอมพลิจูด

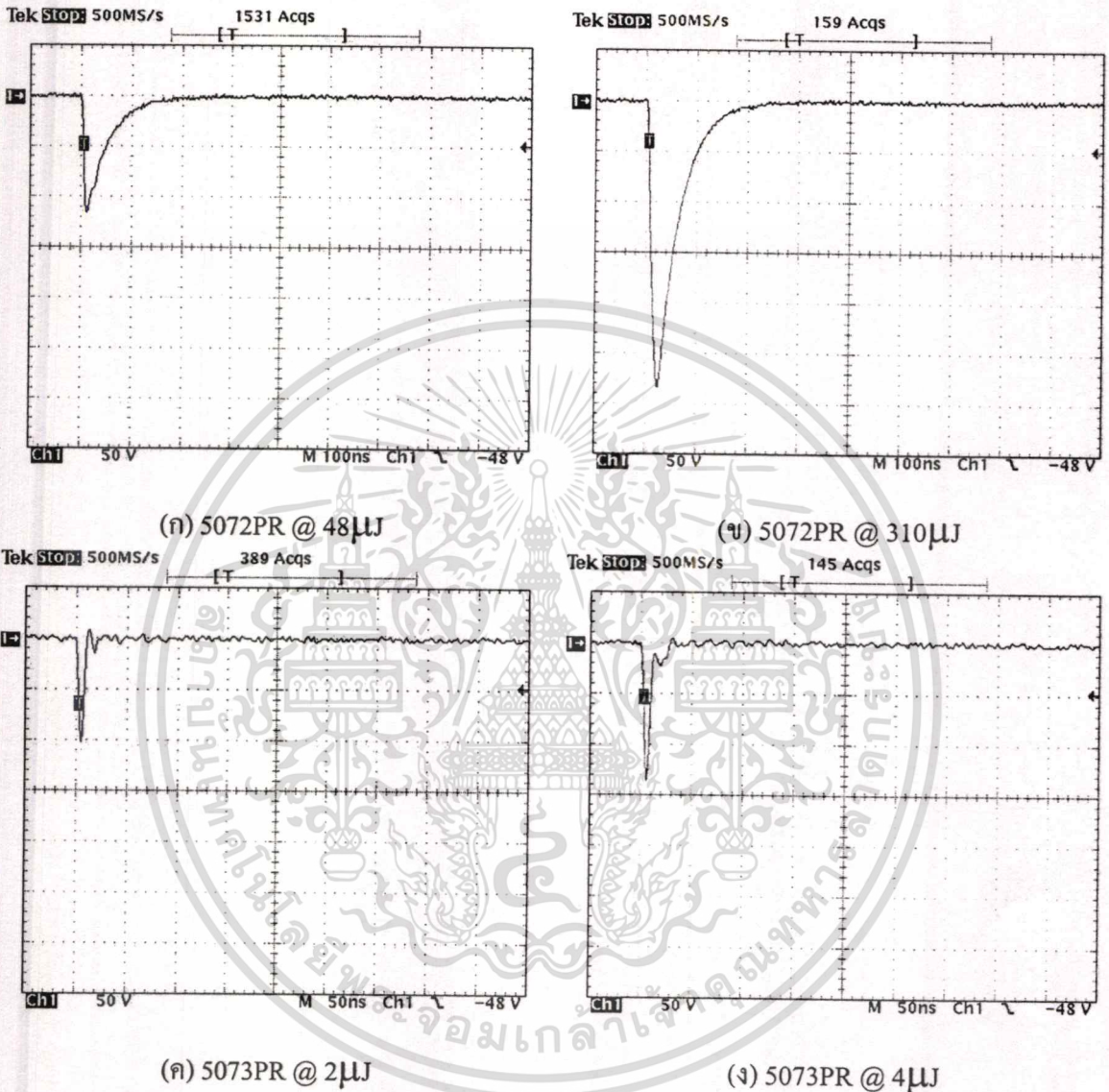
$\frac{A_1}{A_2}$	อัตราส่วน	dB
$\frac{100\%}{70.71\%}$	1.4142	3
$\frac{100\%}{50\%}$	2	6
$\frac{100\%}{25\%}$	4	12
$\frac{100\%}{10\%}$	10	20
$\frac{100\%}{1\%}$	100	40
$\frac{100\%}{0.1\%}$	1000	60

จากตารางที่ 3.2 จะสังเกตเห็นว่า เครื่องพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR มีอัตราการขยาย 100 เท่า ในขณะที่รุ่น 5072PR มีอัตราการขยายถึง 1000 เท่า ซึ่งจะช่วยให้ความสามารถในการตรวจสอบข้อบกพร่องจุดเล็กๆ ในเนื้อวัสดุหรือเพิ่มความสามารถในการตรวจจับสัญญาณสะท้อนน้อยๆ ได้

พารามิเตอร์ของภาคส่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ พลังงาน (energy) การลดทอนสัญญาณกระเพื่อม (damping) และความถี่ในการกระตุ้น (pulse repetition frequency, PRF) พลังงานของพัลส์กระตุ้นเป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายออกไปสู่อัลตราโซนิกโพรบ โดยระดับพลังงานที่จ่ายให้กับอัลตราโซนิกโพรบของทั้งสองรุ่นอยู่ในระดับ "ไมโครจูล (μJ)" โดยการปรับเพิ่มพารามิเตอร์พลังงานเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัวอัลตราโซนิกโพรบนั่นเอง ยิ่งพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นสูงขึ้นเพียงใด อัลตราโซนิกโพรบก็จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกคลื่นกลที่มีขนาดของแอมพลิจูดสูงมากขึ้นตามไปด้วย ลักษณะของพัลส์ที่สร้างจากเครื่องพัลส์เซอร์รูน 5072PR และ 5073PR แสดงดังรูปที่ 3.23 ซึ่งเป็นการต่อเอาที่พุทของพัลส์เซอร์รูนกับความต้านทานขนาด 50 โอห์ม



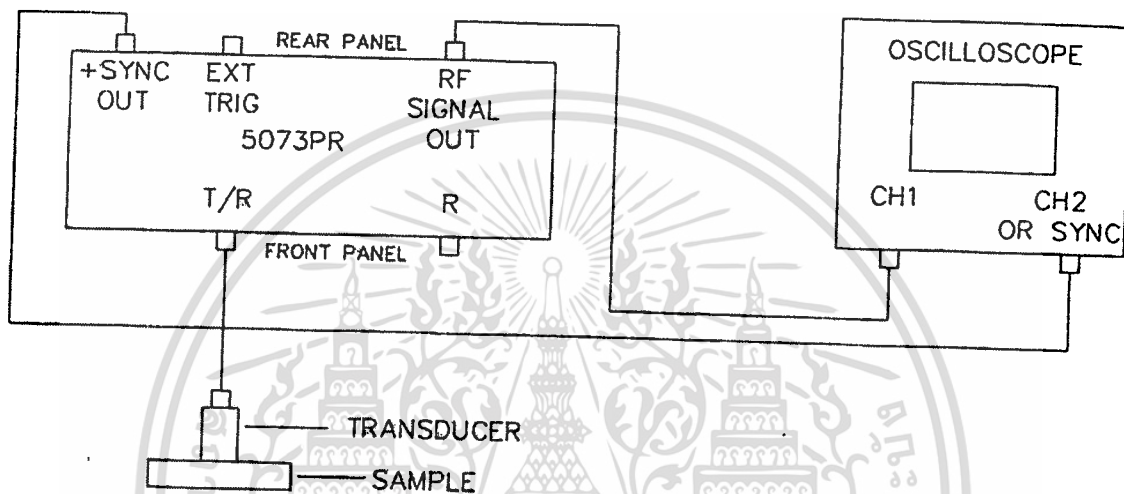
รูปที่ 3.23 สัญญาณพัลส์กระตุ้นของพัลส์เซอร์ (ก),(ข) รุ่น 5072PR และ (ค),(ง) รุ่น 5073PR

พารามิเตอร์การลดทอนสัญญาณกระเพื่อม (damping) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมไม่ให้เกิดสัญญาณกระเพื่อม (ringing effect) โดยลดแรงดันไฟฟ้าและความกว้างของแรงดันไฟฟ้าพัลส์กระตุ้นลง ส่วนพารามิเตอร์สุดท้ายเป็นค่าความถี่ในการสร้างพัลส์กระตุ้น กล่าวคือ เมื่อเราปล่อยพัลส์แรงดันไปกระตุ้น อัลตราโซนิกโพรบจะสร้างคลื่นกลออกไปหนึ่งลูก และสะท้อนกลับมาแสดงผลบนจอภาพของออสซิลโลสโคป แต่เนื่องจากถ้าสร้างขึ้นมาเพียงลูกเดียว บนจอออสซิลโลสโคปจะแสดงรูปคลื่นของพัลส์เดียวแล้วก็หายไป เป็นเหตุให้วัดและประมวลผลข้อมูลหรือรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ทำการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นที่ได้ไม่ทัน ดังนั้นเพื่อที่จะสร้างรูปคลื่นให้คงอยู่ จึงต้องผลิตพัลส์กระตุ้นเป็นจังหวะๆ โดยปกติค่าความถี่ในการปล่อยพัลส์กระตุ้นจะอยู่ที่ประมาณ 100 Hz – 20 kHz

หลังจากที่เข้าใจพื้นฐานของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อพัลส์เซอร์และตัวรับแล้ว สิ่งที่จะต้องพิจารณาคือลักษณะการนำเอาพัลส์เซอร์และตัวรับมาประยุกต์ต่อใช้งาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.24 เป็นการนำพัลส์เซอร์มาต่อในการวัดแบบพัลส์-สะท้อนกลับ โดยสัญญาณขาออกหลังจากที่ผ่านการขยายสัญญาณจากภาครับแล้ว จะส่งไปแสดงผลที่จอภาพของออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.24 การประยุกต์ใช้งานของพัลส์เซอร์แบบพัลส์-สะท้อนกลับ

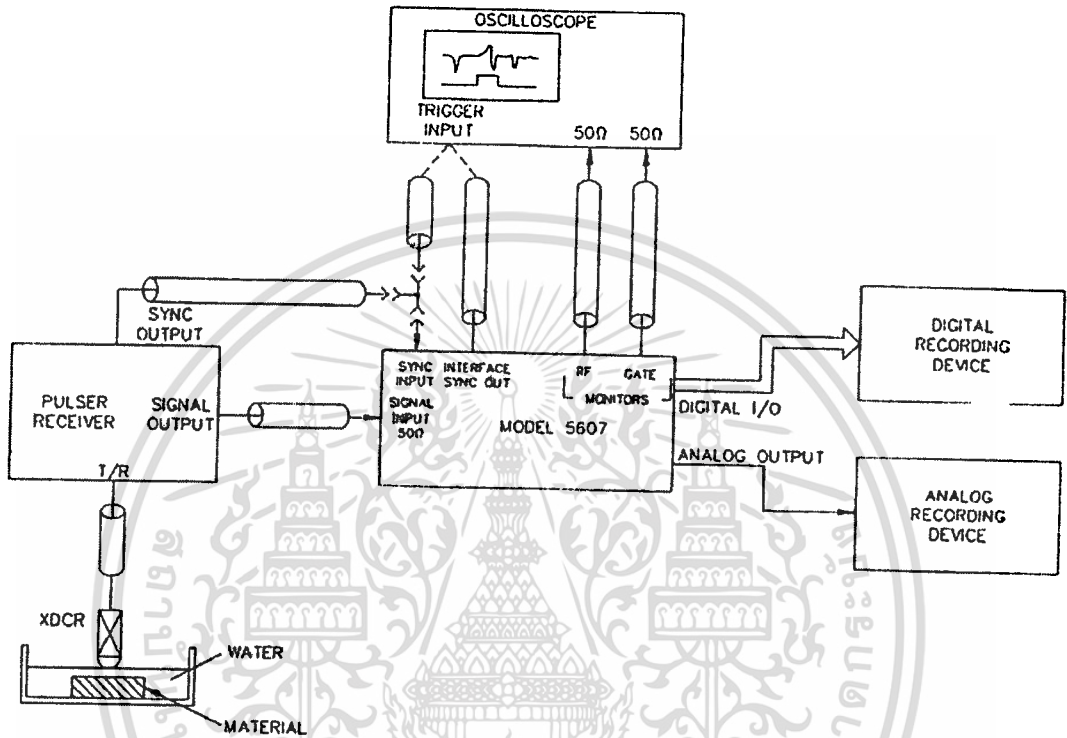
3.3.4 เครื่องตรวจจับพีก (Gated Peak Detector)

เครื่องตรวจจับพีกหรือพีกดีเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าสัญญาณแอมพลิจูดสูงที่สุดหรือแรงดันไฟฟ้าพีก (peak voltage) ของคลื่นอัลตราโซนิกในช่วงที่เปิดหน้าต่างเอาไว้ (gated window) ต้องใช้งานคู่กับเครื่องพัลส์เซอร์และตัวรับ โดยนำสัญญาณขาออกที่ผ่านการขยายแล้วมาวิเคราะห์ข้อมูลต่อ ด้วยวิธีเลือกเปิดหน้าต่างบริเวณที่ต้องการอ่านค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ (ในกรณีของเครื่องที่ใช้อยู่เป็นเครื่องตรวจจับพีกของ PANAMETRICS รุ่น 5607 สามารถเปิดหน้าต่างได้แคบที่สุด 30 ns และกว้างที่สุด 20 μ s) สัญญาณพีกจะถูกแปลงสัญญาณเป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ดังนั้นความละเอียดของการแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิทัลจะเป็นดังสมการ

$$resolution = \frac{V_{FS}}{2^8 - 1} \quad (3.16)$$

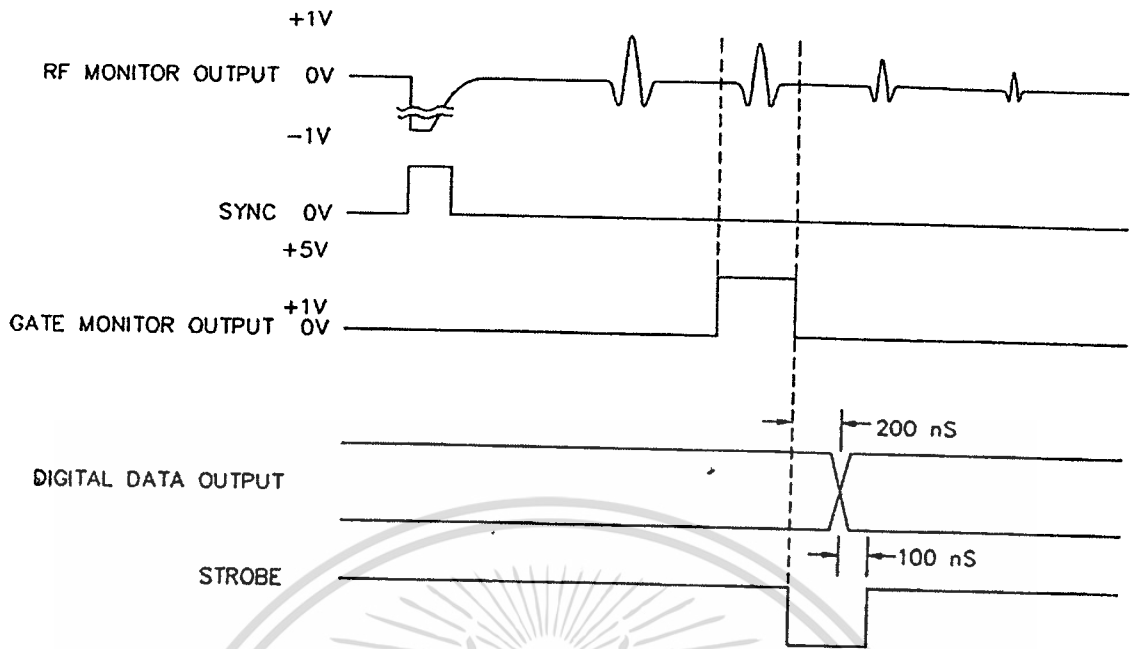
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าแรงดันเต็มสเกล V_{FS} เท่ากับ 1 โวลต์ (ในกรณีของ 5607) ดังนั้น ค่าความละเอียดในการแปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิทัล 1 บิต หรือเปลี่ยนจาก 0000000b เป็น 0000001b เท่ากับ 3.92 mV หรือประมาณ 4 mV นั่นเอง ลักษณะการนำเครื่องตรวจจับฟีดไปประยุกต์ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.25 และลักษณะของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 การประยุกต์ใช้งานของเครื่องตรวจจับฟีด

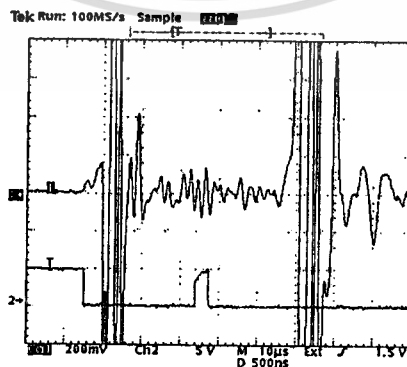
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 ลักษณะสัญญาณของเครื่องตรวจจับฟิค

3.3.5 ออสซิลโลสโคป

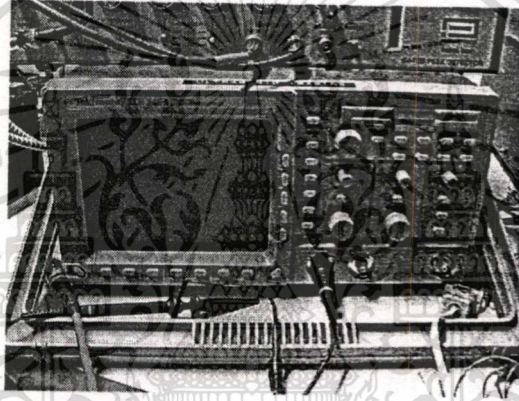
ออสซิลโลสโคปทำหน้าที่แสดงรูปคลื่นสัญญาณ RF (รูปคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกที่ได้จากพัลส์เซอร์และตัวรับ) และแสดงรูปคลื่นของสัญญาณเกต (gate signal) ที่ได้จากเครื่องตรวจจับฟิค เนื่องจากเครื่องตรวจจับฟิคจะอ่านสัญญาณแอมพลิจูดของลูกคลื่นที่อยู่ในช่วงเวลาเดียวกันกับสัญญาณเกต ดังนั้นในการทดลองจึงจำเป็นต้องมีออสซิลโลสโคปสำหรับเฝ้าตรวจ (monitor) สัญญาณในขณะที่ทำการทดลอง เพื่อเลื่อนปรับสัญญาณเกตไปยังตำแหน่งหรือลูกคลื่นที่ต้องการอ่านค่าสัญญาณฟิคแอมพลิจูด ลักษณะของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 สัญญาณจากออสซิลโลสโคป โดย Ch1 เป็นสัญญาณ RF และ Ch2 เป็นสัญญาณเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยออสซิลโลสโคปที่ใช้เป็นแบบดิจิทัลออสซิลโลสโคปแบบบันทึกรูปสัญญาณได้ (Digital Storage Oscilloscope, DSO) ของ Tektronix รุ่น TDS340A มีช่วงกว้างความถี่ (bandwidth) เท่ากับ 100 MHz และมีอัตราการสุ่มวัดสัญญาณ (sampling rate) 10 จุด/วินาที ถึง 500 ล้านจุด/วินาที ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานกับอัลตราโซนิกโพรบที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยมีความละเอียดของฐานเวลา (time base) ในระดับ 5 ns/ช่อง ตัวเลขนี้บอกให้ทราบถึงขีดจำกัดในการวัดความละเอียด (resolution) ของระยะทางหรือความเร็วเสียงที่คำนวณตามสมการที่ (3.2) ว่า $d = vt/2$ ดังตัวอย่างในกรณีตรวจวัดระยะทางในน้ำ เราทราบว่าน้ำมีความเร็วเสียงประมาณ 1,500 เมตร/วินาที และจากข้อจำกัดของ time base ของ TDS340A เท่ากับ 5 ns ดังนั้นความละเอียด (resolution) ของระยะทางที่คำนวณได้อยู่ในระดับ (order) ประมาณ 3 ไมโครเมตรหรือไมครอน รูปที่ 3.28 แสดงภาพถ่ายของออสซิลโลสโคปที่ใช้ในวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.28 ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS340A

บทที่ 4

การออกแบบและพัฒนาระบบสร้างภาพแบบซี-สแกน

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ในวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่หลักการ รายละเอียด การออกแบบ และการสร้างชุดเครื่องมือ เพื่อประกอบขึ้นเป็นระบบสร้างภาพอัลตราโซนิก

4.1 หลักการของระบบสร้างภาพอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้น

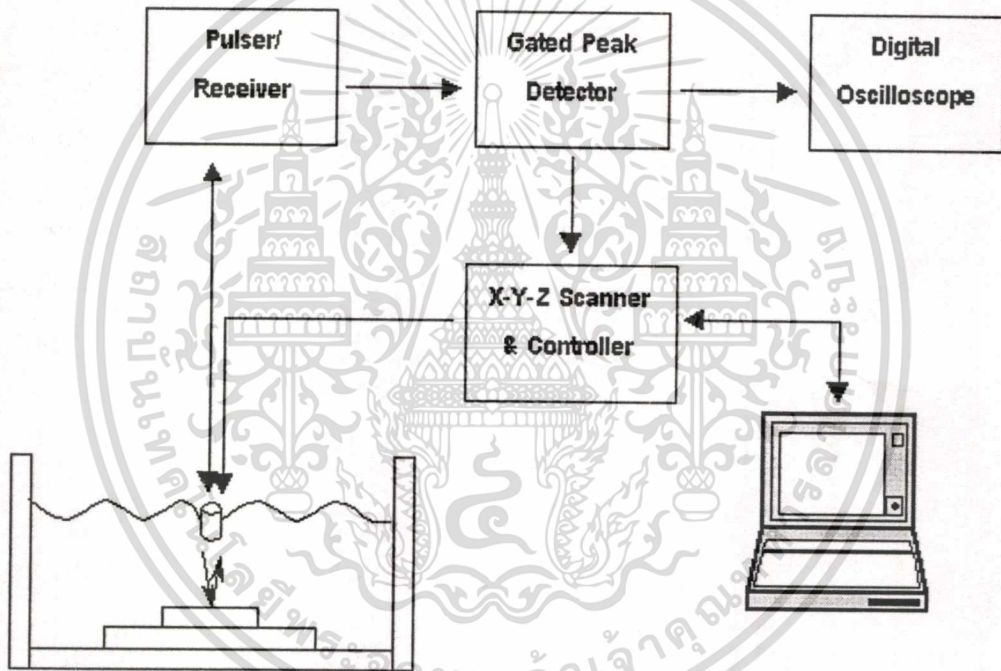
ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้นใช้เทคนิคการสร้างภาพแบบซี-สแกน ด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ แสดงดังรูปที่ 4.1 และในรูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของระบบที่พัฒนาขึ้น อุปกรณ์และชุดเครื่องมือทั้งหมดของระบบประกอบไปด้วย

- แทงก์น้ำหรืออ่างน้ำ – สำหรับใส่น้ำหรือของเหลวที่ใช้เป็นตัวคลัมปลิงพลังงานอัลตราโซนิก
- หัวอัลตราโซนิกโพรบ – เป็นตัวแปลงสัญญาณจากไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิก และแปลงจากคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า
- พัลส์เชอร์และตัวรับ – เป็นตัวสร้างพัลส์ไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นหัวอัลตราโซนิกโพรบ และทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าจากคลื่นที่รับได้
- เครื่องสแกนเชิงกลในแนว xyz และชุดควบคุม – สำหรับควบคุมหัวโพรบในแนว xyz
- เครื่องตรวจจับพิกัด – เป็นตัวอ่านแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณที่อยู่ในหน้าต่าง (window)
- ออสซิลโลสโคป – สำหรับเฝ้าดู (monitor) สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก
- คอมพิวเตอร์ – ใช้ประมวลผลสัญญาณและสร้างภาพ

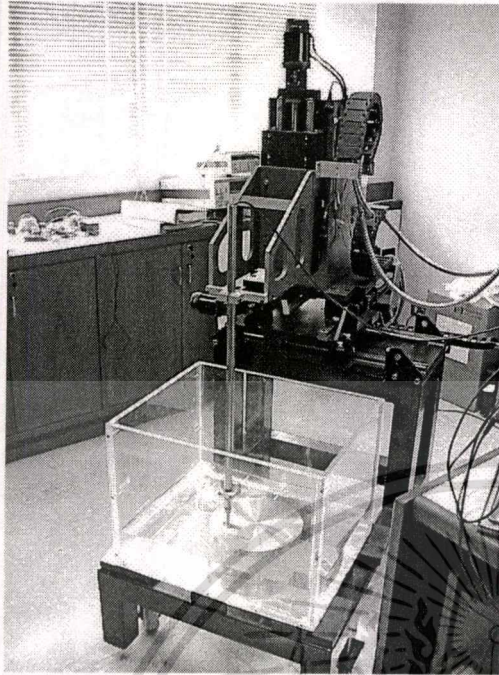
ระบบที่พัฒนาขึ้นอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ของคลื่นเสียงที่ว่า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางและกระทบกับวัสดุตัวกลางที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียง (acoustic impedance) แตกต่างกัน พลังงานของคลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับ และมีบางส่วนเคลื่อนที่ทะลุผ่าน ดังกล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 และ 3 โดยสัมพันธ์กับการสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นอัลตราโซนิกเป็นดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{และ} \quad T = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

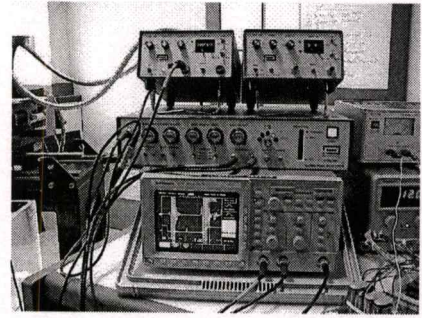
ความแรงหรือขนาดของแอมพลิจูดของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังอัลตราโซนิกโพรบที่ตำแหน่งความลึก z หนึ่งๆ จะนำมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิตด้วยเครื่องตรวจจับพีก โดยข้อมูลดิจิทัลที่ได้จะนำมาเก็บรวบรวมเป็นแฟ้มข้อมูล จนกระทั่งระบบทำการกวาดหรือสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบตามแนวระนาบ xy เสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำเอาแฟ้มข้อมูลไปประมวลผล ด้วยโปรแกรมสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นจาก MATLAB โดยใช้โทนสีหรือสเกลสี (color scale) ในแต่ละจุดของภาพแทนขนาดแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกที่ตำแหน่งนั้นๆ



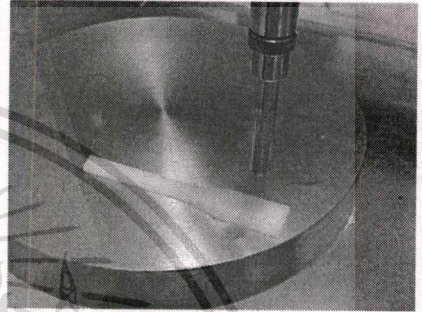
รูปที่ 4.1 ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบจุ่มด้วยเทคนิคพัลส์-สะท้อนกลับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.2 ระบบที่พัฒนาขึ้น (ก) ชุดสแกน xyz, (ข) เครื่องมือที่นำมาติดตั้ง และ (ค) อัลตราโซนิกโพรบ

อุปกรณ์ที่จำเป็นและมีอยู่แล้ว ซึ่งกล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 3 ได้แก่

- หัวอัลตราโซนิกโพรบ 5 MHz ระยะโฟกัส 0.75 นิ้ว สำหรับใช้ทดสอบแบบจุ่ม (5MHz immersion focusing ultrasonic transducer)
- พัลส์เซอร์และตัวรับ (pulser/receiver)
- เครื่องตรวจจับพีค (gated peak detector, GPD)
- ดิจิตอลออสซิลโลสโคปแบบบันทึกสัญญาณได้ (digital storage oscilloscope, DSO)
- คอมพิวเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไป

โดยในบทนี้ จะกล่าวรายละเอียดของอุปกรณ์และชุดเครื่องมือที่ทำการพัฒนาขึ้นมาใช้เอง ได้แก่

- ชุดสแกนทางกล xyz (XYZ mechanical scanner) พร้อมแท่งน้ำหรืออ่างน้ำ
- ชุดควบคุมเครื่องสแกนเชิงกล xyz (motion controller)
- ชุดอ่านและแปลงข้อมูลจากเครื่องตรวจจับพีค (GPD reader)
- โปรแกรมสำหรับแปลงข้อมูลที่ได้เป็นภาพ (imaging software)

4.2 การออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือ

4.2.1 ชุดสแกนทางกลและชุดควบคุมเครื่องสแกนในแนว xyz

เครื่องสแกนทางกล

ชุดสแกนทางกลที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.2 (ก) โดยพัฒนาและปรับปรุงมาจากระบบสแกนของโรงงานอุตสาหกรรมที่ยกเลิกการใช้งานเนื่องจากเปลี่ยนไลน์ผลิตใหม่ มีระยะการสแกนในแนวแกน x y และ z เท่ากัน ซึ่งเท่ากับ 310 มิลลิเมตร แกนเกลียวหมุนมีระยะห่างระหว่างเกลียว (ทั่วไปนิยมเรียกว่า ระยะพิท (pitch)) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.3 ระยะห่างระหว่างเกลียวของแกนเกลียวหมุนนี้เป็นแฟกเตอร์ที่บอกถึงระยะทางในการเคลื่อนที่ไปของเครื่องสแกนในแนว x หรือ y หรือ z ต่อการหมุน 1 รอบของแกนเกลียว



รูปที่ 4.3 ระยะห่างระหว่างเกลียวของเกลียวหมุนที่ใช้ในเครื่องสแกนทางกลที่พัฒนาขึ้น

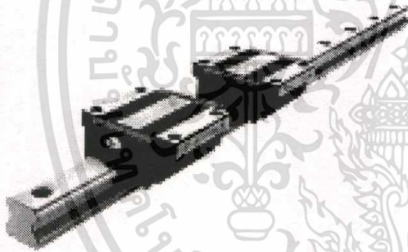
การออกแบบชุดสแกนทางกลสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ (ก) การสแกนวัสดุที่ต้องการสร้างภาพ โดยให้หัวอัลตราโซนิกโพรบอยู่นิ่ง และ (ข) การสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบ โดยให้วัสดุที่ต้องการสร้างภาพอยู่นิ่ง ระบบที่พัฒนาขึ้นเลือกใช้วิธีการสแกนแบบ (ข) โดยการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบในแนว x y และ z ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ต้องการสร้างภาพต้องจุ่มไว้ในน้ำหรือของเหลวที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งถ่ายพลังงานคลื่นอัลตราโซนิก ดังนั้นเครื่องสแกนจะต้องรับน้ำหนักหรือโหลดค่อนข้างมาก ของอ่างน้ำ (ขนาด กว้าง x ยาว x ลึก เท่ากับ 450 มม. x 550 มม. x 400 มม.) ที่มีน้ำบรรจุอยู่ โดยบรรจุด้วยแผ่นฐานรองและวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบซึ่งมีน้ำหนักมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้งานให้แจ้งแก่ผู้จัดทำเอกสาร

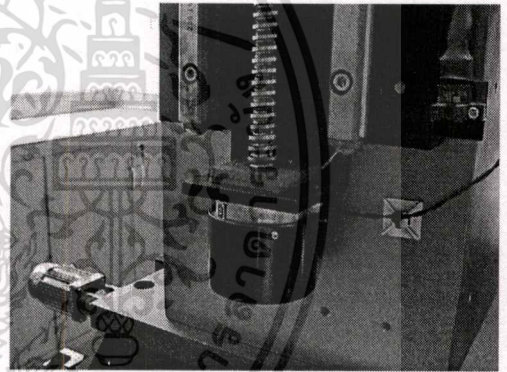
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสแกนหรือขับเคลื่อนโหลดที่มีน้ำหนักมากานั้น จะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการสแกนได้ง่าย เช่น การเกิดปรากฏการณ์แล็ก (lag) ของแกนเกลียว หรือก็คือ แกนเกลียวไม่เคลื่อนที่ในขณะที่มอเตอร์หมุน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการอ่านสัญญาณซึ่งสัมพันธ์กับระยะทางที่อัลตราโซนิกโพรบเคลื่อนที่

ระบบสแกนที่พัฒนาขึ้นใช้ชุดการเคลื่อนที่ทางกล ที่เรียกว่า "Linear Motion System" แสดงดังรูปที่ 4.4 ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ช่วยลดภาระงานในการเคลื่อนที่ให้แก่แกนเกลียวหมุน เพื่อลดปัญหาที่จะส่งผลต่อความผิดพลาดในการสแกน และลดภาระงานหรือโหลดของมอเตอร์ที่จะขับเคลื่อนสแกน อย่างไรก็ตาม ระบบมีปัญหาในการเคลื่อนที่หรือสแกนหัวโพรบในแนวแกน z หรือแนวตั้งฉากกับพื้นผิวโลก (vertical plane) ซึ่งมีโหลดของอัลตราโซนิกโพรบและแผ่นฐานยึดกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นในแนวแกน z จึงได้ออกแบบให้มีชุดระบบเบรก (brake) เพื่อยึดให้แกนเกลียวหมุนอยู่นิ่งกับที่ แสดงดังรูปที่ 4.5 การทำงานของเบรกใช้แรงแม่เหล็กยึดแกนเกลียวไม่ให้หมุน เมื่อต้องการปล่อยแกนเกลียวหมุนให้เคลื่อนที่ ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับเบรก



รูปที่ 4.4 ชุด Linear Motion System



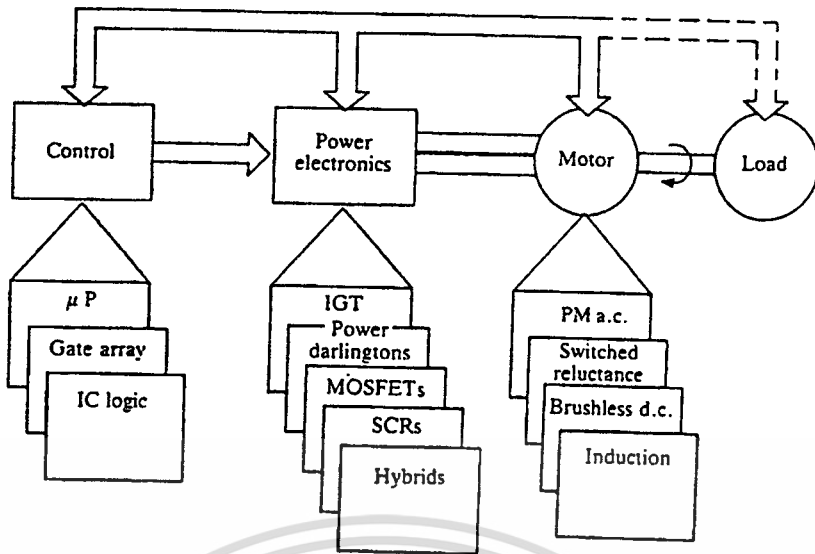
รูปที่ 4.5 ระบบเบรกของแกนหมุนในแนวตั้ง z

มอเตอร์ขับเคลื่อนชุดสแกนทางกล

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องสแกนทั่วไป ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ส่วนต่างๆของระบบประกอบไปด้วย

- โหลด (load) สำหรับระบบที่สร้างขึ้นก็คือ ชุดเครื่องสแกนแนว xyz
- มอเตอร์ (motor)
- ชุดขับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (power electronics)
- ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ (control)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



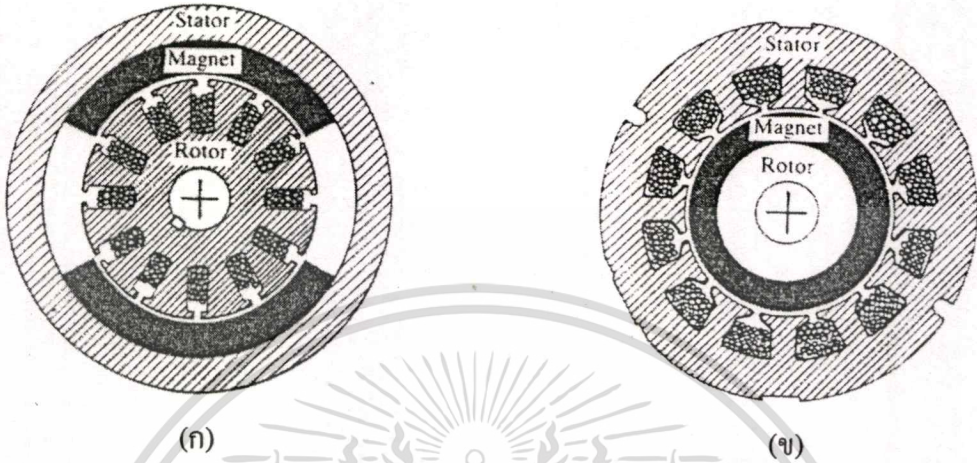
รูปที่ 4.6 โครงสร้างทั่วไปของระบบควบคุมการเคลื่อนที่

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของมอเตอร์ที่นำมาใช้กับระบบสแกนภาพอัลตราโซนิก โดยเป็นที่ทราบดีว่ามอเตอร์มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ที่รู้จักทั่วไป ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และสตีปมอเตอร์ โดยแต่ละแบบมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป ระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดบรชเลส (brushless dc motor) รายละเอียดจะกล่าวในส่วนต่อไปของบทนี้ การเลือกใช้มอเตอร์แบบบรชเลสมีเหตุผลดังต่อไปนี้ พิจารณารูปที่ 4.7 ประกอบ

- (1) สังเกตว่า มอเตอร์ชนิดบรชเลส นั้น ใช้แม่เหล็กเป็นโรเตอร์ (rotor) และใช้ขดลวดเป็นสเตเตอร์ (stator) ซึ่งตรงกันข้ามกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป ซึ่งช่วยลดอุปกรณ์ที่เรียกว่าคอมมิวเตเตอร์ (commutator) ทำให้เกิดการส่งถ่ายพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า อีกทั้งยังช่วยลดขนาดของมอเตอร์อีกด้วย
- (2) เนื่องจากส่วนสเตเตอร์อยู่ด้านนอก จึงสัมผัสกับเฟรมได้โดยตรง ช่วยถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดีขึ้น
- (3) ประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงทั่วไป เมื่อเทียบกันตามขนาดของมอเตอร์ หมายความว่า ด้วยกำลังไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ มอเตอร์บรชเลสจะใช้กระแสไฟฟ้าน้อยกว่าในการขับโหลดที่มีขนาดเท่าๆกัน
- (4) และเมื่อเทียบกับสตีปมอเตอร์ ความเร็วรอบการหมุนของระบบที่ขับด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดบรชเลสจะสูงกว่าการขับระบบที่มีโหลดเท่าๆกันด้วยสตีปมอเตอร์ กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า การจะขับโหลดที่มีน้ำหนักมากก็นั้นจำเป็นต้องใช้สตีปมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือไม่ก็ขับด้วยความเร็วต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (5) มอเตอร์Brushlessจะมีเซ็นเซอร์ฮอลล์ (Hall sensor) ทั้งหมด 3 ตัวอยู่ในมอเตอร์ เพื่อเป็นเซ็นเซอร์การหมุนของมอเตอร์ช่วยให้การเคลื่อนที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าแบบอื่น



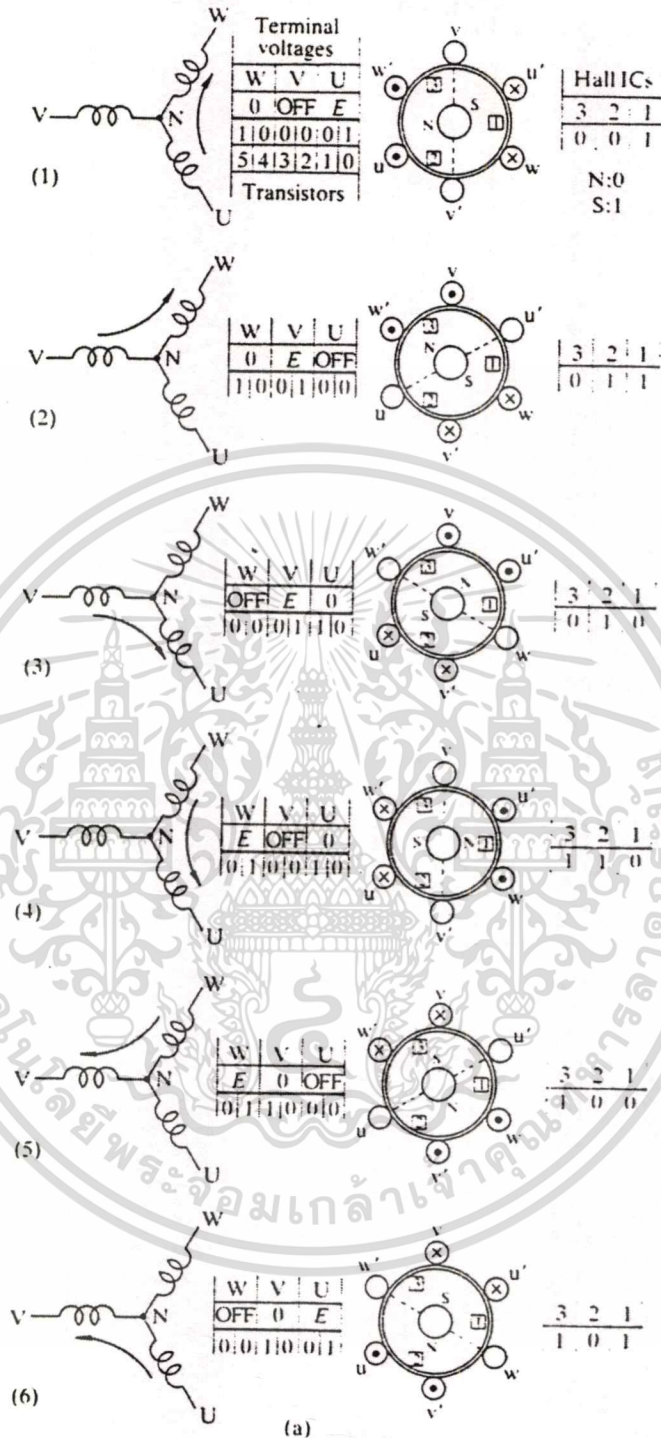
รูปที่ 4.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ก) เป็นแบบทั่วไป (ข) แบบBrushless

แต่อย่างไรก็ตาม ระบบที่ใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดBrushlessก็มีข้อดีบางประการ ได้แก่

- (1) ความละเอียดในการสแกนน้อยกว่าสเต็ปมอเตอร์
- (2) วงจรที่ใช้การขับมอเตอร์ประเภทนี้ ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า

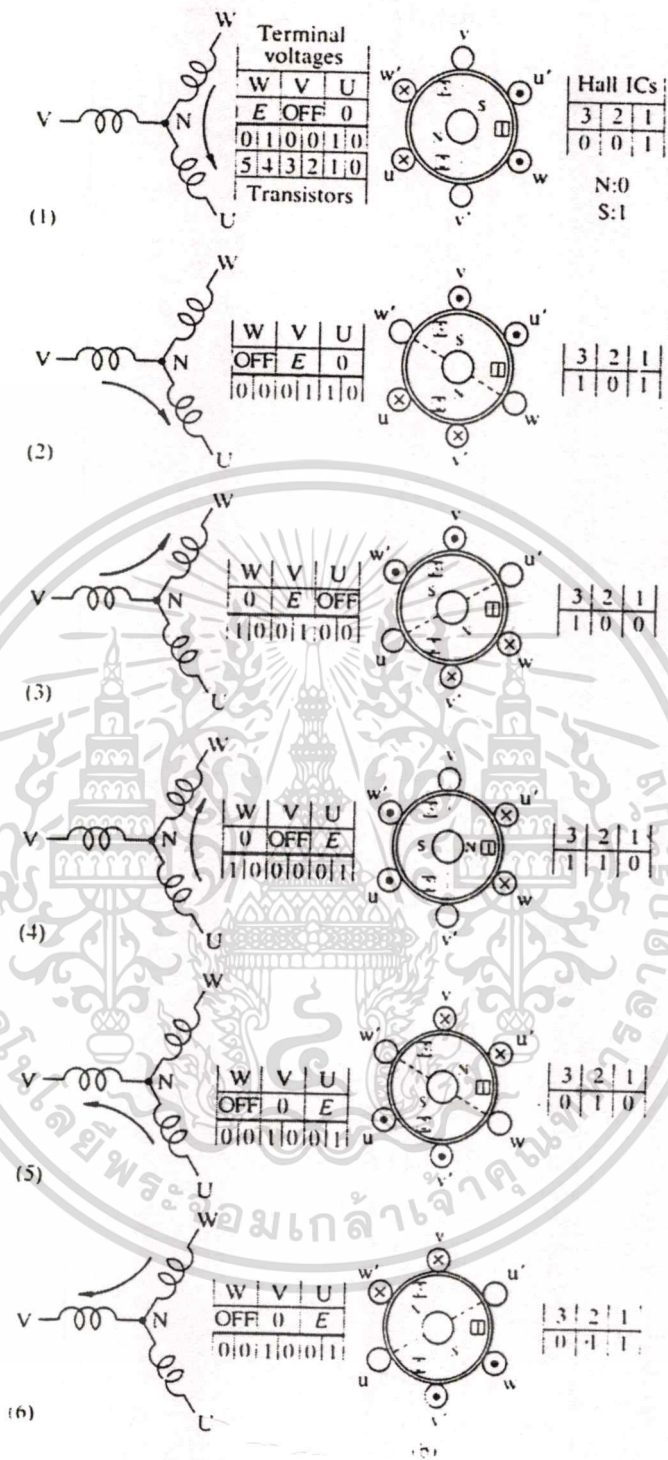
หลักการทำงานของมอเตอร์

วิธีการขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดBrushlessสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางฮอลล์เซ็นเซอร์ในโครงสร้างของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ โดย 4.8 (ก) และ 4.9 (ก) เป็นวิธีการขับแบบตามเข็มนาฬิกา และ 4.8 (ข) และ 4.9 (ข) เป็นวิธีการขับแบบไม่ตามเข็มนาฬิกา



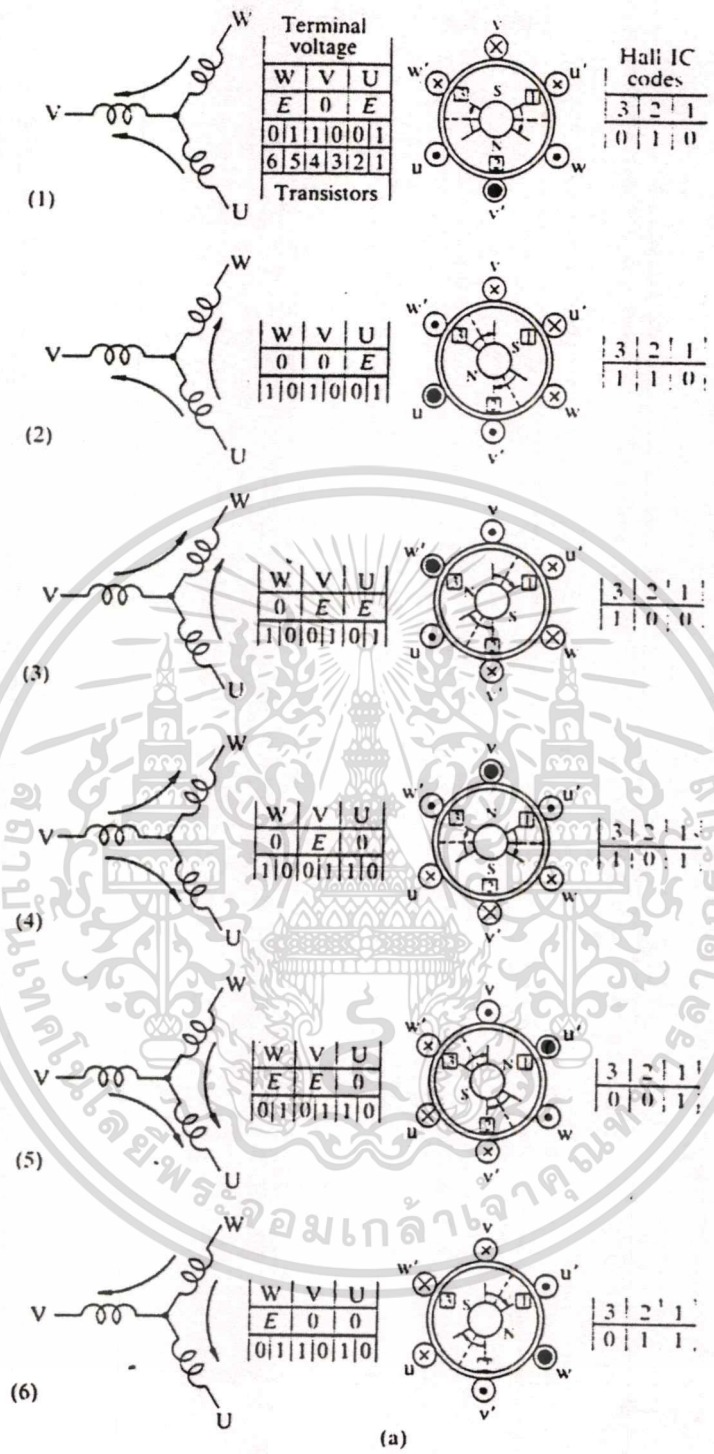
รูปที่ 4.8 (ก) วิธีการขั้วมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบ 120 องศา ตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



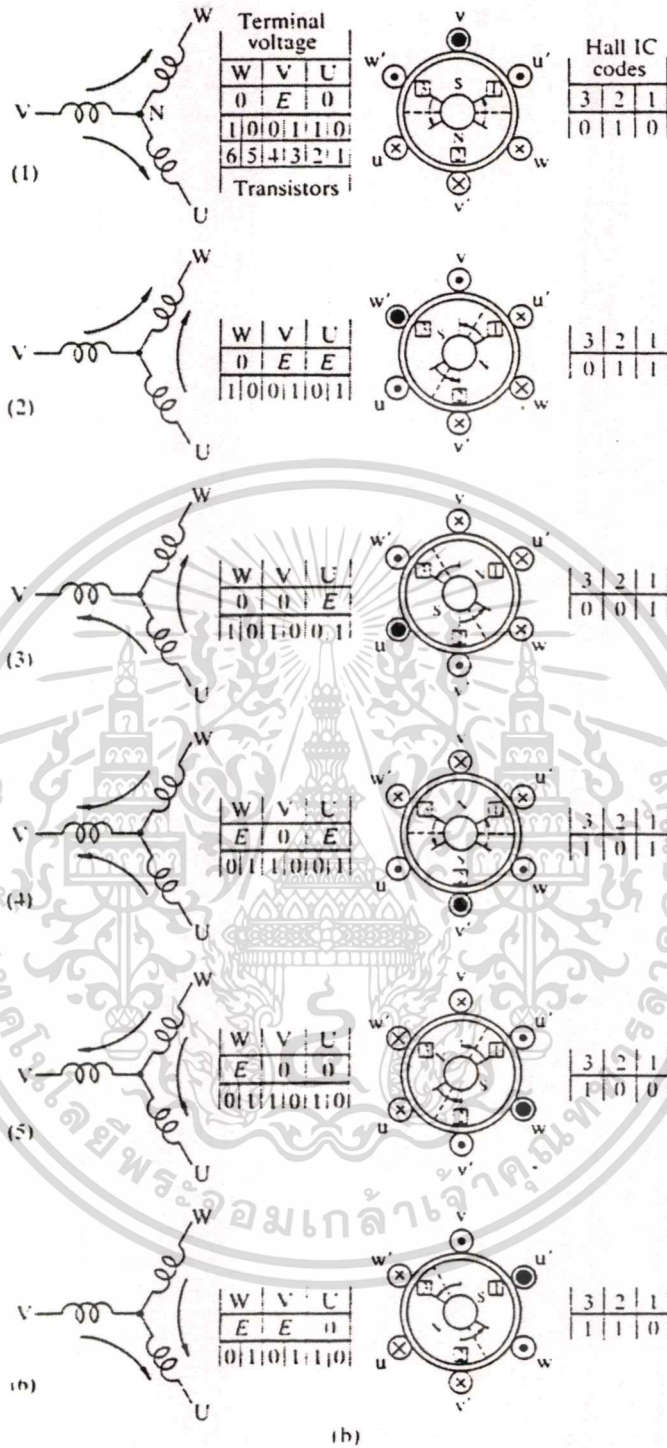
รูปที่ 4.8 (ต่อ) (ข) วิธีการขั้วมอเตอร์รับแรงแบบ 120 องศา ทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 (ก) วิธีการขั้วมอเตอร์รีซเลตแบบ 180 องศา ตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 (ต่อ) (ข) วิธีการขั้วมอเตอร์รีซเลสแบบ 180 องศา ทวนเข็มนาฬิกา

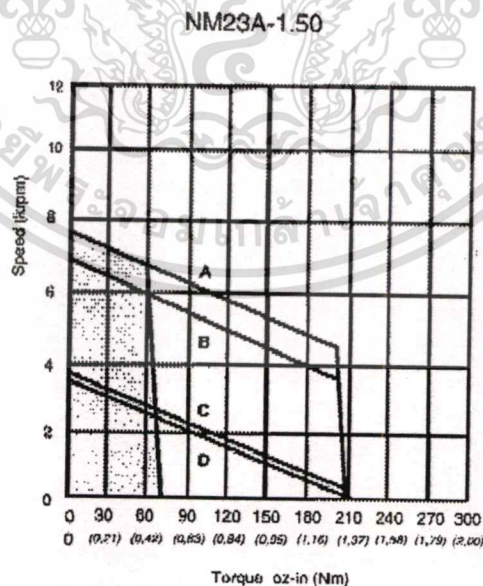
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของมอเตอร์

มอเตอร์แบบบรัชเลสที่นำมาใช้เป็นของ MFM Technology รุ่น NM23A-1.5-A-1000 ซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณลักษณะสมบัติเฉพาะของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบสแกน xyz

	American Unit	SI Unit
Torque Constant (Torque/Current)	50.5 oz-in/A	0.36 Nm/A
Voltage Constant (Voltage/Revolution)	37.4 V/krpm	0.36 V/rad/s
Continuous Stall Torque	69.1 oz-in	0.49 Nm
Peak Torque	207 oz-in	1.46 Nm
Maximum Voltage (V)	300	
Continuous Stall Current (A)	1.4	
Peak Current (A)	4.7	
Resistance (Ohm)	20	
Number of Poles	6	
Encoder Pulse (PPR)	1000	



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดต่อความเร็วรอบในการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่น่าสนใจได้แก่ ค่าคงที่ของแรงบิด (torque constant) ซึ่งมาจากฟิสิกส์ของความสัมพันธ์ของแรงลัพท์ (F) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า (I) ภายใต้สนามแม่เหล็ก (B) เป็นดังสมการ

$$F = I \times B \quad (4.1)$$

และแรงบิดหรือทอร์ก (τ) เป็นดังสมการ

$$\tau = F \cdot r \quad (4.2)$$

ดังนั้นจะเห็นว่าแรงบิดของมอเตอร์แปรผันโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวด เมื่อให้สนามแม่เหล็กและพารามิเตอร์อื่น ๆ มีค่าคงที่

$$\tau \propto I$$

ซึ่งจากตารางที่ 4.1 ทอร์กของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.36 นิวตัน-เมตร (Nm) ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ (A) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกได้ว่า ถ้าโหลดของเรามีทอร์กหรือแรงบิดเท่ากับ 0.36 นิวตัน-เมตร มอเตอร์จะกินกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ถ้าโหลดมีน้ำหนักมากกว่านี้จะต้องใส่กระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์เพิ่ม ดังนั้นจึงต้องไปพิจารณาพารามิเตอร์ตัวอื่นๆที่สัมพันธ์กันด้วย เช่น ค่ากระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์สามารถรับได้ โดยไม่เกิดความเสียหายหรือไหม้เสียก่อน พารามิเตอร์ที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่งได้แก่ ค่าคงที่แรงดันหรือค่าคงที่ความเร็วรอบ เท่ากับ 0.36 หมายความว่า ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 1000 รอบต่อนาที ต้องป้อนแรงดันให้กับมอเตอร์เท่ากับ 0.36 โวลต์ ถ้าต้องการความเร็วรอบสูงขึ้น ก็ต้องใส่แรงดันให้กับมอเตอร์มากขึ้นด้วย

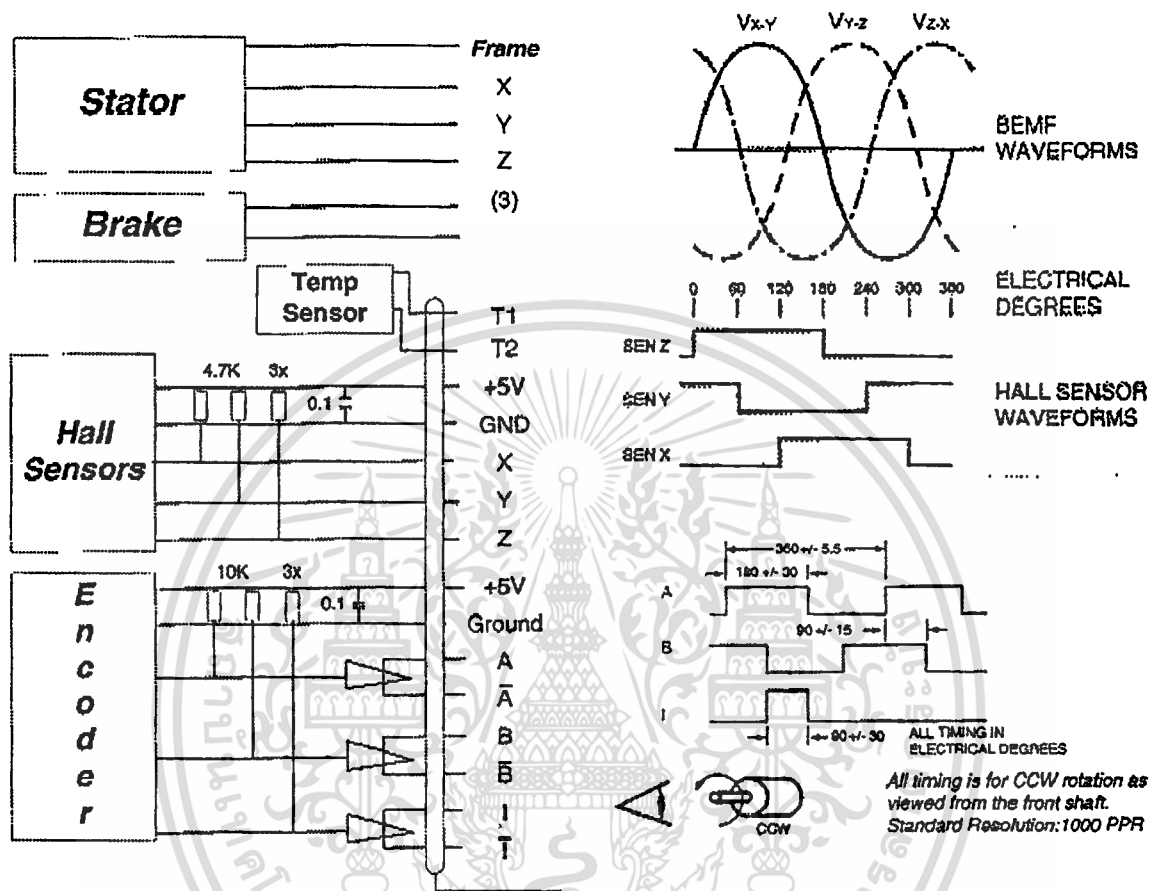
สัญญาณพัลส์ที่ได้จากชุดเข้ารหัสสัญญาณ (encoder) เท่ากับ 1000 พัลส์ต่อรอบ (pulse per revolution, PPR) ซึ่งหมายความว่า มอเตอร์หมุนไป 1 รอบ ชุดเข้ารหัสสัญญาณจะสร้างพัลส์ออกมาทั้งสิ้น 1000 ลูก จากหัวข้อที่แล้ว ทราบว่าการหมุนของแกนเกลียว 1 รอบ คิดเป็นระยะทาง 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งตีความต่อไปได้ว่า 1 ลูกของพัลส์ที่สร้างจากชุดเข้ารหัสสัญญาณ คิดเป็นระยะทาง 5.5 ไมโครเมตร ซึ่งหมายถึงความละเอียดสูงสุด (resolution) ของชุดสแกนและมอเตอร์ที่นำมา

กราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.10 เป็นความสัมพันธ์ที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้มอเตอร์ โดยแสดงให้เห็นถึงแรงบิดของมอเตอร์สูงสุดที่ทำได้ และความเร็วของมอเตอร์สูงสุดที่มอเตอร์สามารถหมุนได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าแรงบิดของมอเตอร์ (torque) จะสูงขึ้นเมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบต่างๆของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบสแกน xyz ซึ่งประกอบด้วย ไดอะแกรม วงจรไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าจากเซนเซอร์ และ ไทม์มิงไดอะแกรม (timing diagram) ของชุดเข้ารหัส สัญญาณ แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 วงจรไดอะแกรมของมอเตอร์ NM23A-1.5-A-1000

ชุดควบคุมเครื่องสแกน

ส่วนขับมอเตอร์และหลักการ

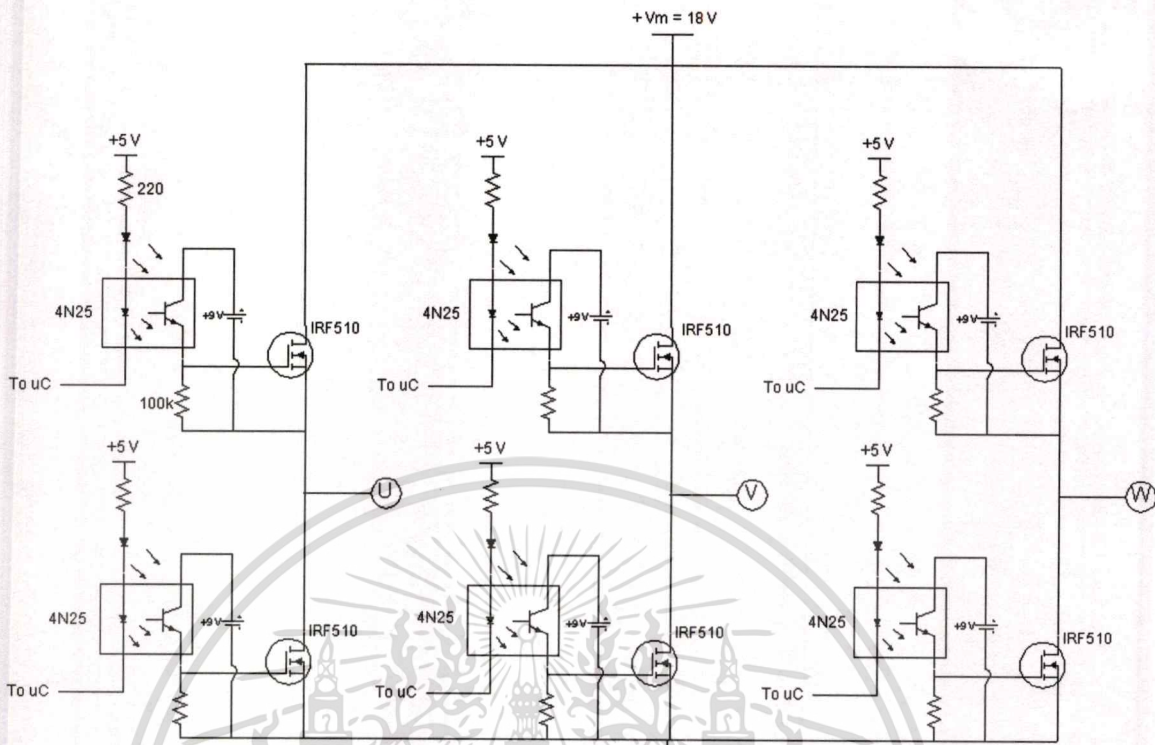
จากหลักการของมอเตอร์และจากลักษณะสมบัติของมอเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้เขียนได้ออกแบบวงจรสำหรับขับมอเตอร์ (แสดงดังรูปที่ 4.12) ซึ่งเป็นวงจร "บริดจ์ อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส (three-phase bridge inverter)" โดยในรูปที่ 4.13 เป็นภาพถ่ายของวงจรที่ได้พัฒนาขึ้นมา ภาคเพาเวอร์ซึ่งเป็นหัวใจหลักของการขับมอเตอร์ ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสวิตซ์ซิง (switching semiconductor device) เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) หรือ มอสเฟต (MOSFET) จำนวน 6 ตัวด้วยกัน โดยในวงจรที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับควบคุมชุดสแกน xyz เลือกใช้มอสเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

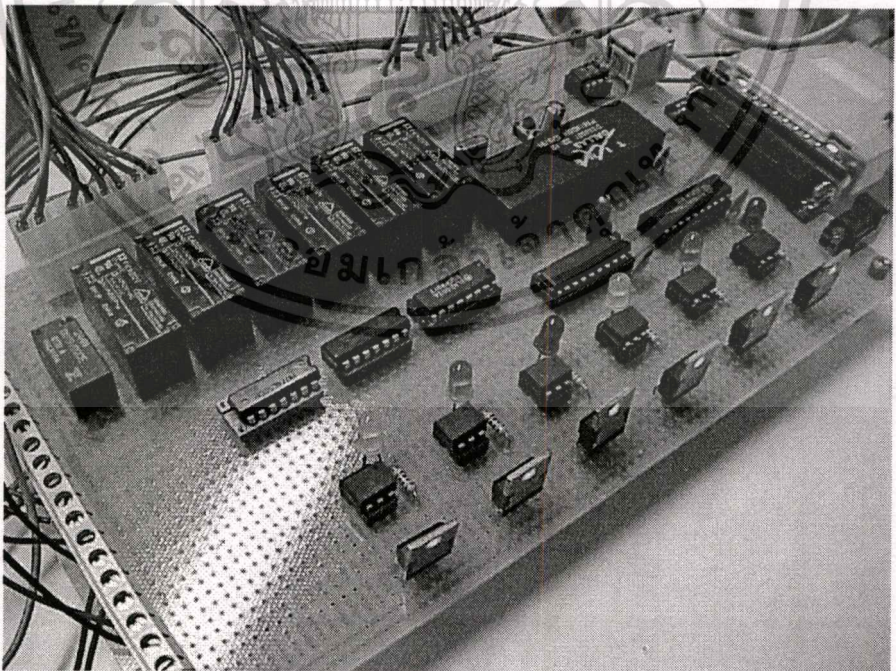
IRF510 ซึ่งทนแรงดันตกคร่อมสูงสุดได้ประมาณ 100 โวลต์ และทนกระแสสูงสุดได้ 5.6 แอมป์ แปร โดยมื่ออปโตคัปเปิลเลอร์ (optocoupler) 4N25 ทำหน้าที่เป็นตัวแยกกราวด์ (ground) ระหว่าง ภาควิวเวอร์กับภาคไมโครคอนโทรลเลอร์ จากหลักการในรูปที่ 4.8 และ 4.9 วิธีการขั้วมอเตอร์ ด้วยวงจรที่พัฒนาขึ้นมา แสดงดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 วงจรขับมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายวงจรขับมอเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 หลักการควบคุมมอเตอร์จากหลักการในรูปที่ 4.8

HALL SENSOR OUTPUT			SWITCHING STATE					
H3	H2	H1	Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1
หมุนตามเข็มนาฬิกา								
0	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0
1	1	0	0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	0	1
หมุนทวนเข็มนาฬิกา								
0	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	1	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 หลักการควบคุมมอเตอร์จากหลักการในรูปที่ 4.9

HALL SENSOR OUTPUT			SWITCHING STATE					
H3	H2	H1	Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1
หมุนตามเข็มนาฬิกา								
0	1	0	0	1	1	0	0	1
1	1	0	1	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	1
1	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	1	1	0	1	0
หมุนทวนเข็มนาฬิกา								
0	1	0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	0	1
1	0	1	0	1	1	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	1	0

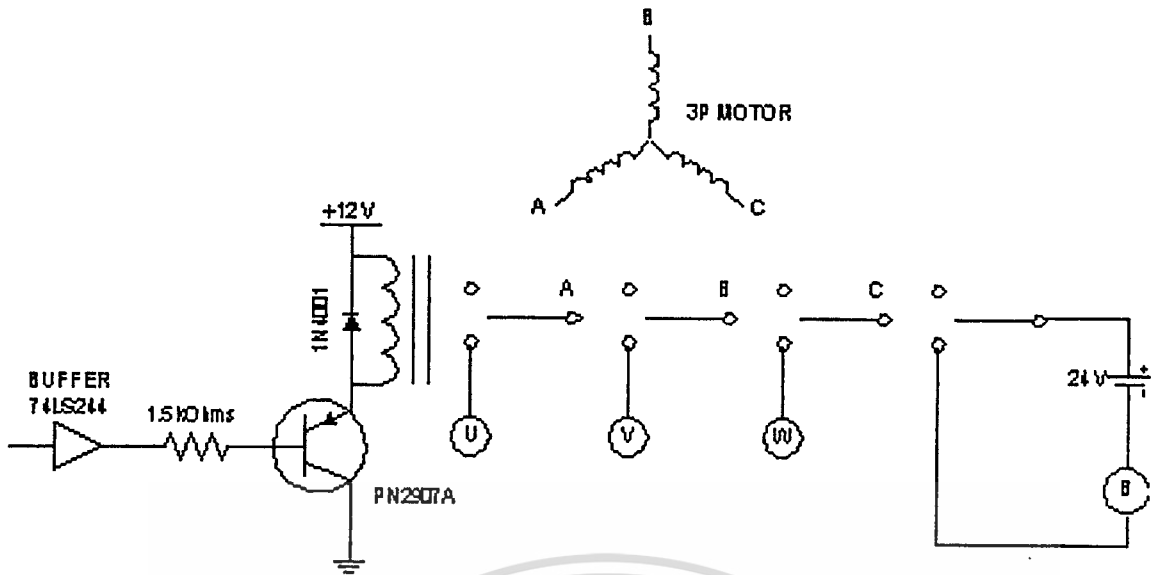
จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบบรชเลสแต่ละวิธีมีทั้งหมด 6 สเต็ป (steps) และจากการทดลองพบอีกว่า การทำให้มอเตอร์ NM23A-1.5-A-1000 หมุนไปครบ 1 รอบ ทั้ง 2 วิธีใช้สเต็ปทั้งหมด 18 สเต็ป ซึ่งหมายความว่า 1 สเต็ปของการหมุนมอเตอร์ คิดเป็นระยะทางเท่ากับ 5 มิลลิเมตร/18 สเต็ป = ประมาณ 0.278 มิลลิเมตร หรือ 278 ไมครอน เป็นความละเอียดของระยะทางในการสแกนที่สามารถทำได้สูงสุดเมื่อพิจารณาพร้อมกับชุดควบคุมมอเตอร์ เพื่อจะสร้างระบบสแกนให้มีความละเอียดสูงขึ้น จึงได้ออกแบบวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์โดยไม่ใช่เอาท์พุทจากฮอลล์เซ็นเซอร์ (sensor-less motion control technique) โดยการผสมวิธีการขับเคลื่อนทั้งสองวิธีเข้าด้วยกัน แสดงดังตารางที่ 4.4 ทำให้ได้ความละเอียดในการสแกนภาพเพิ่มขึ้นอีก 2 เท่า เป็น 139 ไมครอนต่อสเต็ป

ตารางที่ 4.4 หลักการควบคุมมอเตอร์โดยผสมระหว่างหลักการในรูปที่ 4.8 และ 4.9
(เฉพาะกรณีเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา)

SWITCHING STATE					
Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1
หมุนตามเข็มนาฬิกา					
1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	1
1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0
0	0	0	1	1	0
0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0
0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1

ส่วนเลือกชุดมอเตอร์

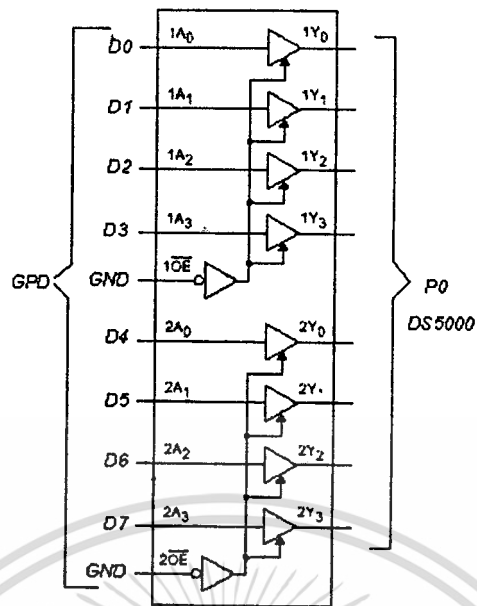
ในการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ เพื่อลดต้นทุนและประหยัดอุปกรณ์ จึงออกแบบใช้วิธีการขับมอเตอร์ด้วยชุดขับเพียงชุดเดียว โดยใช้รีเลย์ (relay) เป็นสวิตช์ในการเลือกชุดมอเตอร์สำหรับขับในแกน x y หรือ z วงจรที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.14 ใช้ พีเอ็นพีทรานซิสเตอร์ PN2907A เป็นสวิตช์ควบคุมรีเลย์ โดยในสภาวะปกติทรานซิสเตอร์ไม่ทำงาน ขดลวดของมอเตอร์แต่ละชุดจะอยู่ในสถานะเปิด ไม่ต่ออยู่กับวงจรใดเลย และเมื่อต้องการขับมอเตอร์ชุดไหน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมรีเลย์ทำงาน โดยการส่งสัญญาณดิจิทัลลอจิก "0" ขดลวดของมอเตอร์ก็จะต่อเข้ากับตำแหน่ง U V W ของวงจรในรูปที่ 4.12 สำหรับมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่แนวตั้ง z เนื่องจากมีชุดเบรกเพื่อล็อกให้แกนเกลียวนิ่งอยู่กับที่ รีเลย์ของชุดมอเตอร์ z จึงมีหน้าที่ไปปลดชุดเบรกให้คายล็อกด้วย โดยการใส่แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ให้กับชุดเบรก



รูปที่ 4.14 วงจรสวิตช์รีเลย์เพื่อเลือกขับชุดมอเตอร์

ส่วนอ่านค่าดิจิตอลเอาต์พุตจากเครื่องตรวจจับผิด

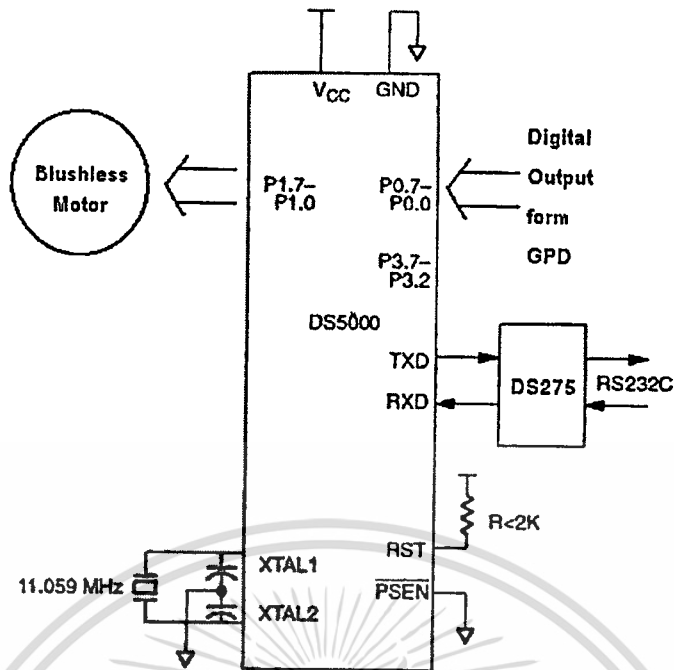
ชุดควบคุมเครื่องสแกนสำหรับสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ได้ออกแบบให้มีส่วนอ่านข้อมูลดิจิตอลขนาด 8 บิต ที่ได้จากเครื่องตรวจจับผิด ซึ่งเป็นข้อมูลที่แปลงมาจากขนาดพิกแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกสะท้อนกลับ ณ ตำแหน่งที่ต้องการพิจารณา เพื่อเป็นการป้องกันเครื่องมือและส่วนประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงออกแบบให้มีวงจรบัฟเฟอร์ (buffer circuit) เป็นตัวเชื่อมข้อมูลระหว่างเครื่องตรวจจับผิดและไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ไอซี 74LS244 ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรบัฟเฟอร์ด้วยไอซี 74LS244

ส่วนควบคุมและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

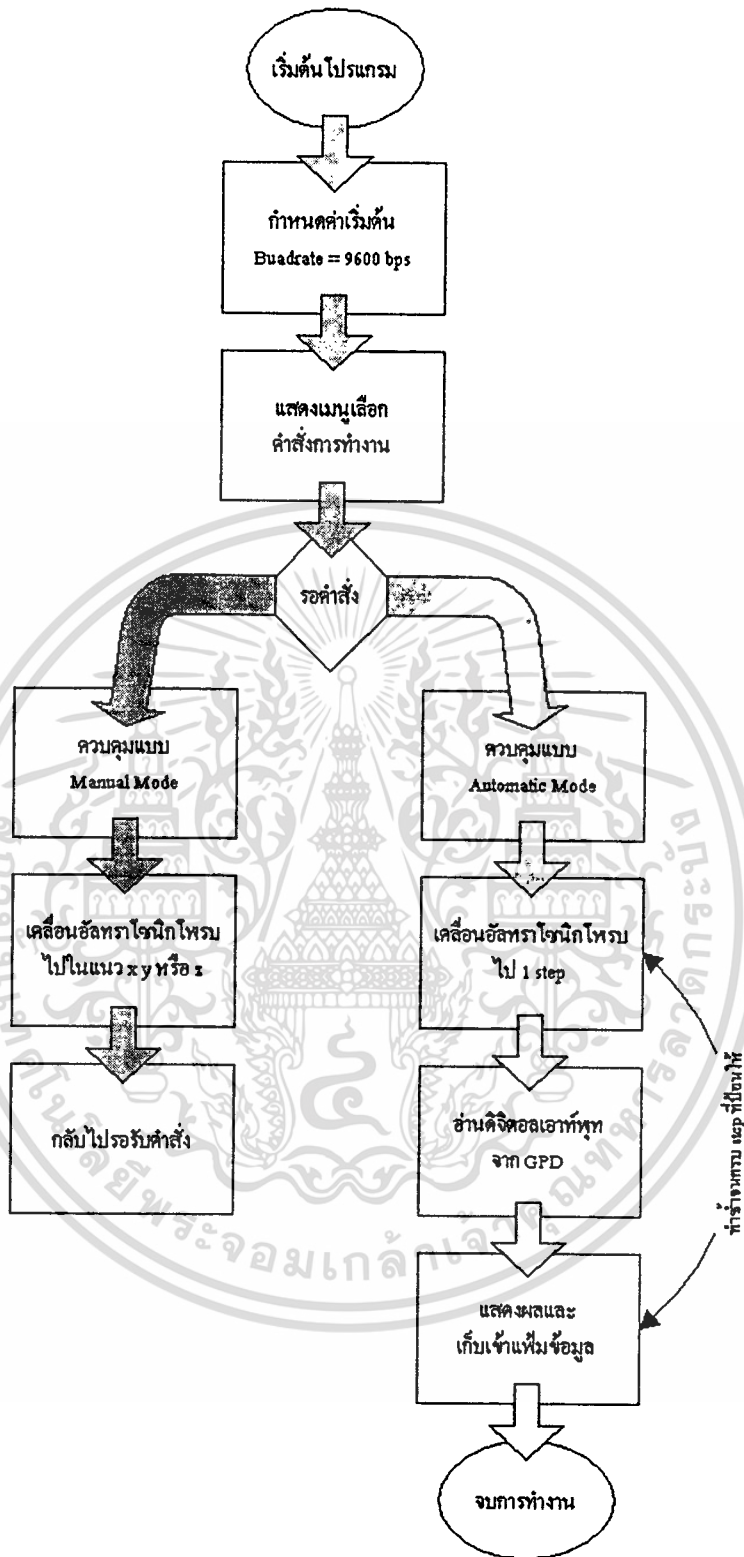
ส่วนควบคุมการขั้มอเตอร์ การเลือกขั้มอเตอร์ การอ่านข้อมูลดิจิทัลเอาต์พุตจากเครื่องตรวจจับพิก และการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ออกแบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ของ Dallas รุ่น DS5000T ซึ่งทำงานที่ความถี่นาฬิกา 11.0592 MHz เป็นหน่วยประมวลผลกลาง โดยมีอินพุต-เอาต์พุตที่เชื่อมต่ออยู่กับส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.16 การควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ทางพอร์ทอาร์เอส-232 (RS-232) เนื่องจากสัญญาณลอจิกของการส่งข้อมูลแบบอาร์เอส-232 ใช้แรงดันไฟฟ้าต่างจากลอจิกของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นแบบทีทีแอล (TTL) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงข้อมูลสัญญาณ ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้ไอซีของ Dallas DS275 เป็นไดรเวอร์ (driver) สำหรับเชื่อมต่อชุดควบคุมการสแกนกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ทอนุกรมอาร์เอส-232 โดยมีความเร็วในการส่งข้อมูล (baud rate) เท่ากับ 9600 บิตต่อวินาที (bits per second, bps)



รูปที่ 4.16 ส่วนควบคุมและประมวลผลกลาง

โปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์และการเก็บข้อมูล

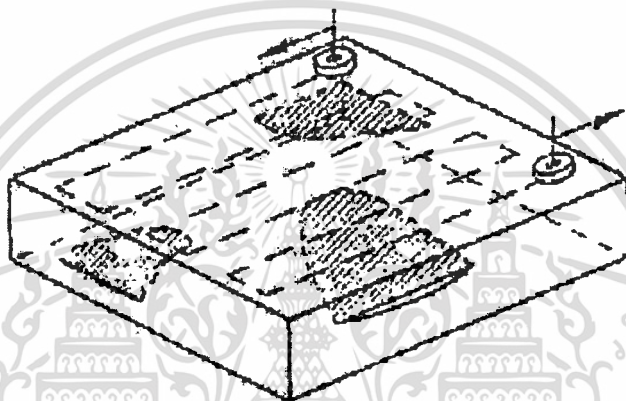
การควบคุมการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกนนั้น วงจรภาคเพาเวอร์และอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเสมือนเป็นแขน-ขาของมนุษย์เรา ส่วนสมองหรือส่วนสั่งการให้วงจรต่างๆทำงานได้ตั้งใจขึ้นอยู่กับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์เลือกใช้ภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 (Micro-C Compiler) ในการพัฒนา ซึ่งเป็นภาษาชั้นสูงจึงสามารถโปรแกรมการทำงานที่สลับซับซ้อนได้ดี ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมควบคุมแสดงดังโฟลว์ชาร์ท (flowchart) ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ไคอะแกรมการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกน xyz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

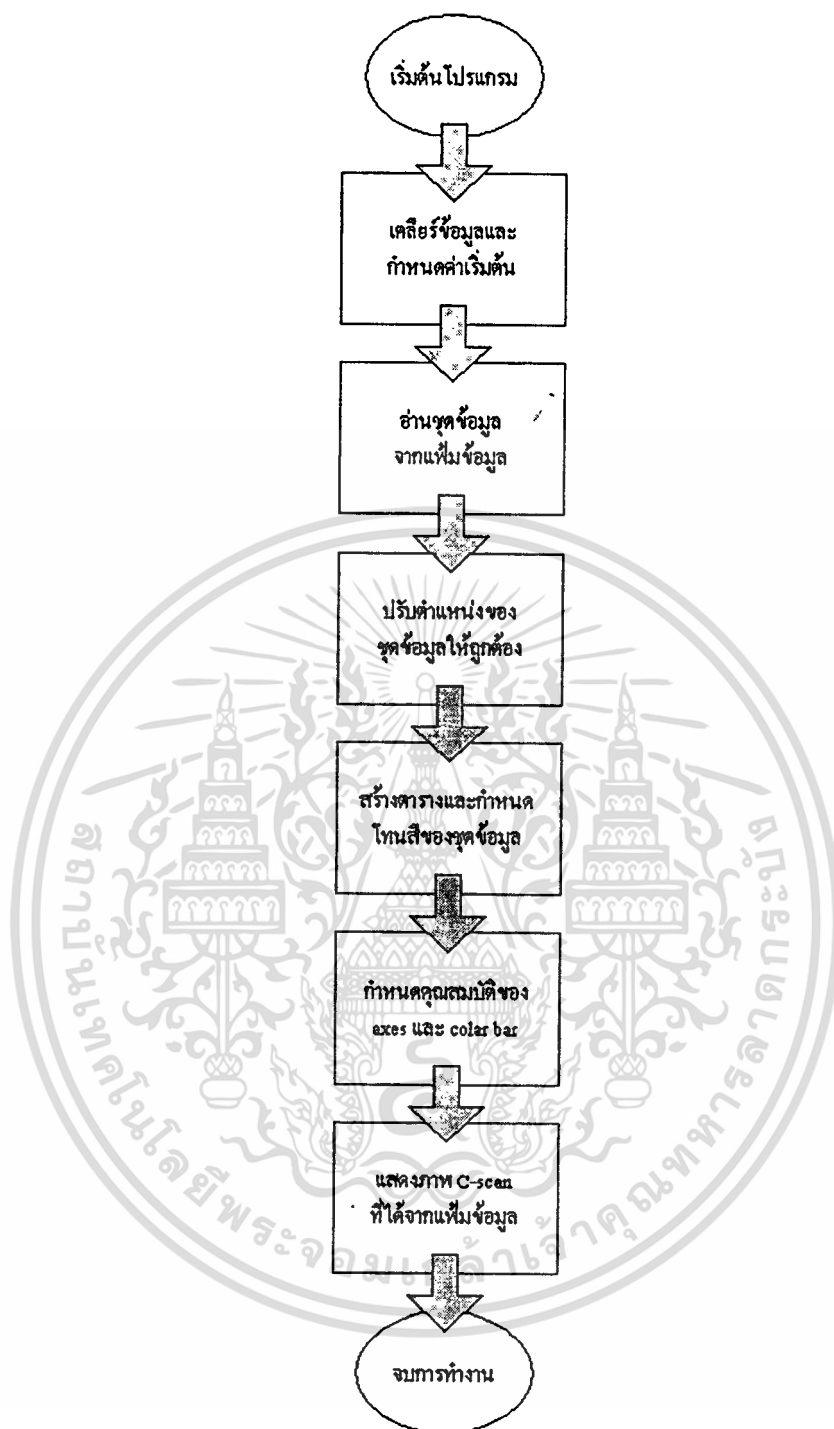
โหมดการทำงานของชุดควบคุมเครื่องสแกน xyz แบ่งออกได้เป็น 2 การทำงานหลักๆ (ก) การทำงานในโหมดแมนนวล (manual mode) เป็นการควบคุมมอเตอร์แต่ละตัวอิสระจากกัน โดยผู้ใช้เป็นผู้ควบคุมทิศทางและตำแหน่ง ใช้สำหรับการสแกนเพื่อตรวจสอบดูอย่างหยาบๆก่อนจะเริ่มเก็บข้อมูลจริง และ (ข) การทำงานในโหมดอัตโนมัติ (automatic mode) เป็นการควบคุมมอเตอร์ในแนว xy โดยการกำหนดจำนวนจุดที่ต้องการจะอ่านสัญญาณทั้งสองแนวแกน เมื่อกำหนดเรียบร้อยแล้วมอเตอร์จะเคลื่อนที่อัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.18 และทำการเก็บสัญญาณดิจิทัลที่อ่านได้จากเครื่องตรวจจับพิคทุกๆตำแหน่งที่หัวอัลตราโซนิกโพรบเคลื่อนที่ไป ข้อมูลที่ได้จะถูกเก็บเข้าแฟ้มข้อมูลก่อนนำไปประมวลผลข้อมูลเพื่อสร้างเป็นภาพถ่ายอัลตราโซนิก



รูปที่ 4.18 ทิศทางการสแกนหัวอัลตราโซนิกโพรบในโหมดอัตโนมัติ

4.2.2 โปรแกรมสร้างภาพจากแฟ้มข้อมูล

การนำข้อมูลที่ได้นำประมวลผล ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ของ MATHWORKS ที่รู้จักกันว่า MATLAB โดยขั้นแรกจะทำการอ่านข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลที่เก็บมาได้ จากชุดควบคุมเครื่องสแกน หลังจากนั้นจะนำข้อมูลมาแปลงและจัดการข้อมูลให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องเนื่องจากการเก็บข้อมูลดังรูปที่ 4.18 จะเก็บข้อมูลจากซ้ายไปขวา และจากขวาไปซ้าย สลับกันไปมา เมื่อเรียงข้อมูลใหม่เสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะนำข้อมูลที่ได้นำไปสร้างภาพ ในรูปที่ 4.19 แสดงหลักการและโฟลว์ชาร์ทสรุปขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมสร้างภาพ



รูปที่ 4.19 โฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมสร้างภาพซี-สแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการทดลอง ผลการทดลอง และบทวิเคราะห์ผล ในการศึกษาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน โดยพิจารณาการทดลองออกเป็นสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นว่ามีประสิทธิภาพระดับใดและมีข้อจำกัดในด้านใดบ้าง และส่วนที่สองเป็นการศึกษาแนวทางการประยุกต์ระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นไปใช้ทดสอบและสร้างภาพโครงสร้างของความไม่ต่อเนื่องภายในวัสดุ

5.1 การทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้น

ในการทดลองแรก ได้ทำการทดสอบและศึกษาลักษณะสมบัติ รวมถึงข้อจำกัด (limitation) ในการสร้างภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยเลือกศึกษาพารามิเตอร์และแฟกเตอร์ที่มีผลต่อการสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ชุดสแกน xyz ที่สร้างและพัฒนาขึ้นมาเอง โดยมีแฟกเตอร์ของชุดสแกนทางกลที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อระบบการวัดและสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกได้แก่ ความลาดเอียงของระบบสแกน นอกจากลักษณะสมบัติของชุดสแกนแล้วคุณสมบัติของระบบสร้างภาพแบบซี-สแกนที่สนใจอื่น ได้แก่ ข้อจำกัดและลักษณะสมบัติของอัลตราโซนิกโพรบในเรื่องของความละเอียดในการตรวจวัดวัสดุ ระยะ โฟกัส และ โฟคัล โซน

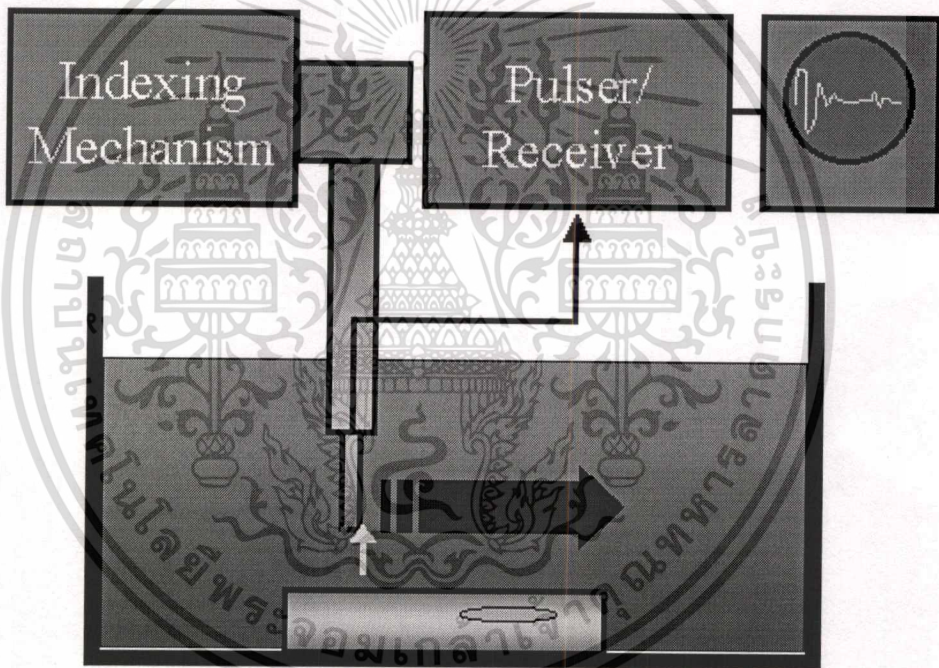
5.1.1 ความลาดเอียงของระบบสแกนตามแนวแกน z

เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของระยะโฟกัสในแนวแกน z จึงได้ออกแบบการทดลองวัดหาความลาดเอียงของระบบสแกน โดยเลือกใช้วิธีวัดหาระยะทางด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกจากฟิสิกส์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในสมการที่ (3.2) ของบทที่ 3 ว่า $2d = vt \Leftrightarrow d = \frac{vt}{2}$ โดยความคลาดเคลื่อนของระยะทางลาดเอียงของระบบสแกนหาได้จากความแตกต่างของเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อทราบความเร็วเสียงของตัวกลางที่คลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนผ่าน โดยทำการติดตั้งระบบการทดลองดังรูปที่ 5.1 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนของเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่เทียบกับตำแหน่งอ้างอิง ($t_{xy} - t_{ref}$) ซึ่งกำหนดไว้ที่มุมขวาล่างของแผ่นฐานรอง กระทำโดยการเคลื่อนหัวอัลตราโซนิกโพรบไปในแนวแกน x ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะทาง 3 เซนติเมตร และเคลื่อนหัวโพรบตามแนวแกน y ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 3 เซนติเมตรเช่นกัน ในการทดลองสิ่งที่ต้องคำนึงคือ "ต้องทำการวัดในขณะที่อุณหภูมิของน้ำไม่เปลี่ยนแปลง" เนื่องจากความเร็วเสียงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เป็นไปตามสมการที่ (5.1)

$$v = 1410 + 4.21T - 0.037T^2 \quad (5.1)$$

โดย v เป็นความเร็วเสียงในน้ำ หน่วยเป็น เมตรต่อวินาที และ T เป็นอุณหภูมิเซลเซียส

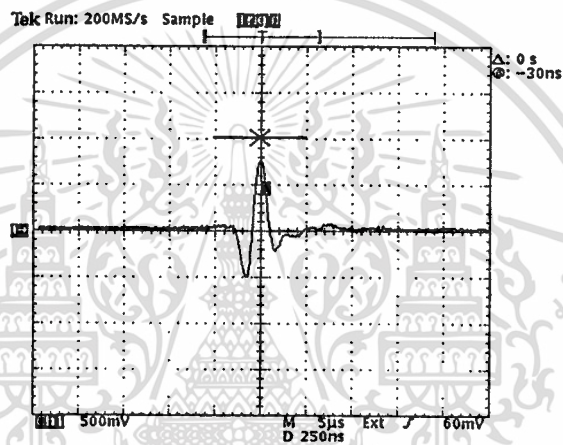


รูปที่ 5.1 การติดตั้งระบบเพื่อวัดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน z

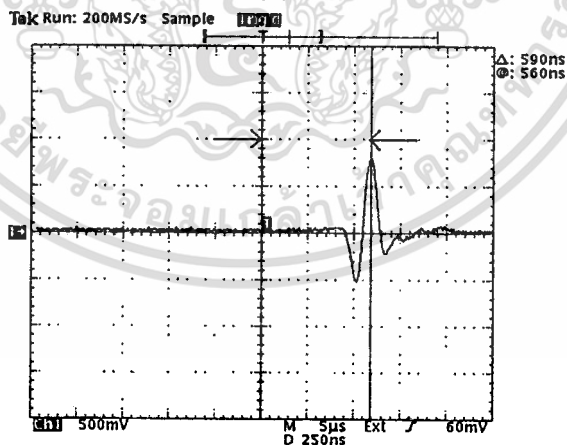
ผลการทดลองวัดความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกนำมาแสดงในตารางที่ 5.1 โดยตำแหน่ง x ที่ 26 ซม. และ y ที่ 33 ซม. เป็นตำแหน่งจุดอ้างอิง จากการทดลองสังเกตเห็นว่าทุกตำแหน่งมีผลต่างเป็นบวกทั้งหมด หมายความว่า ที่แต่ละตำแหน่งมีระยะทางห่างจากหัวอัลตราโซนิกโพรบมากกว่าตำแหน่งอ้างอิง โดยในรูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณที่ตรวจสอบได้บนจอของออสซิลโลสโคป

ตารางที่ 5.1 ผลต่างเวลาที่คลื่นอัลตราโซนิกใช้ในการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในหน่วยนาโนวินาที

ตำแหน่ง (ซม.)	14	17	20	23	26
18	1285	1250	1235	1220	1205
21	1040	1010	995	980	980
24	810	785	765	755	755
27	590	565	550	540	540
30	335	315	300	295	290
33	45	30	15	5	0



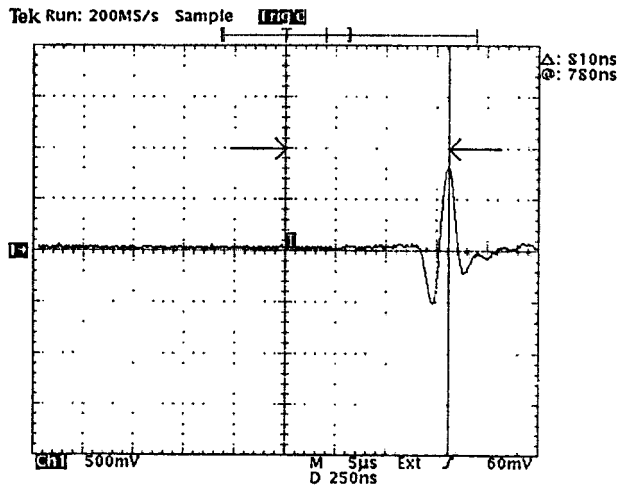
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 สัญญาณจากจอภาพออสซิลโลสโคป (ก) ตำแหน่งอ้างอิง และ (ข) $x = 14$ ซม. $y = 27$ ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



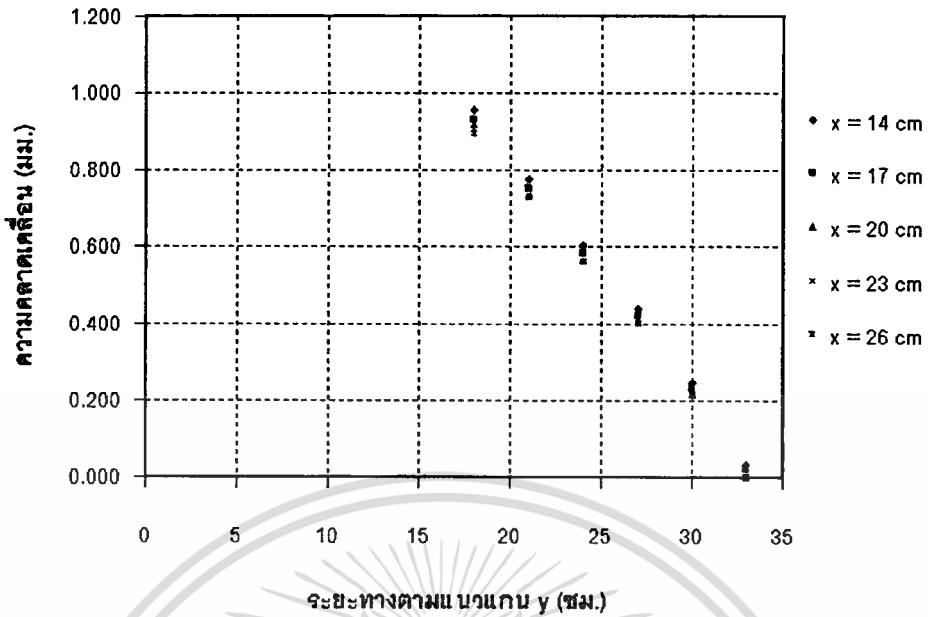
(ค)

รูปที่ 5.2 (ต่อ) สัญญาณจากจอภาพออสซิลโลสโคป (ค) $x = 14$ ซม. $y = 24$ ซม.

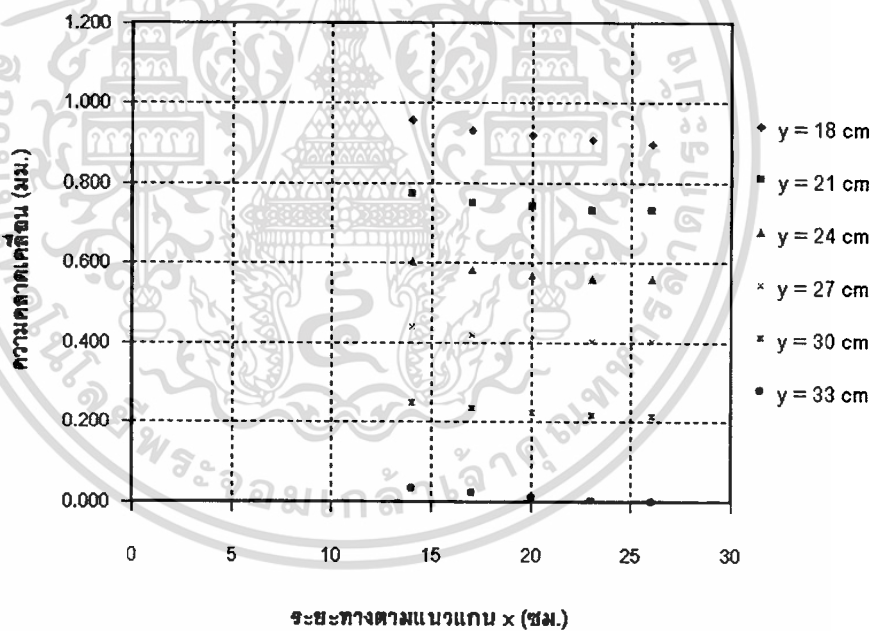
จากผลต่างของเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตารางที่ 5.1 เราสามารถกำหนดหาระยะทางที่คลาดเคลื่อนแต่ละตำแหน่งตามแนว x และ y ได้ดังตารางที่ 5.2 โดยในการทดลองเราวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนและหลังการทดลองด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ Fluke 51 ได้เท่ากับ 24.1 องศาเซลเซียส ดังนั้นความเร็วเสียงในน้ำจะเท่ากับ 1,489.7 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 5.2 ระยะทางคลาดเคลื่อน ในแนวแกน z ของระบบสแกน ณ ตำแหน่งต่างๆ หน่วยมิลลิเมตร

ตำแหน่ง (ซม.)	14	17	20	23	26
18	0.957	0.931	0.920	0.909	0.898
21	0.775	0.752	0.741	0.730	0.730
24	0.603	0.585	0.570	0.562	0.562
27	0.439	0.421	0.410	0.402	0.402
30	0.250	0.235	0.223	0.220	0.216
33	0.034	0.022	0.011	0.004	0.000



(ก) ความคลาดเคลื่อนตามแนวแกน y ที่ตำแหน่ง x ใดๆ



(ข) ความคลาดเคลื่อนตามแนวแกน x ที่ตำแหน่ง y ใดๆ

รูปที่ 5.3 ระยะทางคลาดเคลื่อนของระบบสแกนตามแนว x และ y

จากตารางที่ 5.2 ข้อมูลในตำแหน่งแกน $x = 14$ เซนติเมตรและที่แกน $y = 18$ เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 0.957 มิลลิเมตร หมายความว่า ณ ตำแหน่ง x - y นี้ หัวอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงานวางห่างกันเป็นระยะทางมากกว่าที่ตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.957 มิลลิเมตร เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 5.2 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางคลาดเคลื่อนของระบบสแกน แสดงดังรูปที่ 5.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

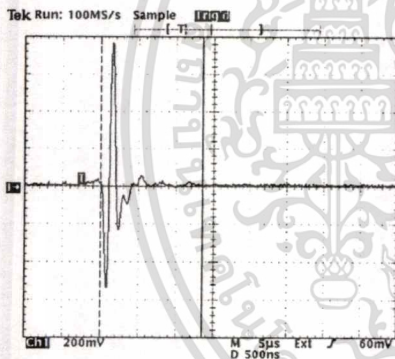
โดยจากกราฟแสดงระยะทางคลาดเคลื่อนของระบบสแกนในรูปที่ 5.3 ความชันของกราฟแสดงระยะทางคลาดเคลื่อนของการโฟกัสในแนวแกน z ของระบบสแกนต่อระยะทาง โดยระยะโฟกัสคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน x เท่ากับ 3.43 ± 0.32 ไมโครเมตรต่อระยะทาง 1 เซนติเมตร และระยะโฟกัสคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน y เท่ากับ 59.6 ± 0.3 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

5.1.2 ขีดจำกัดในการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในวัสดุ

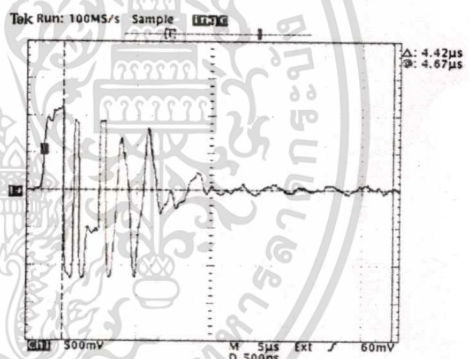
เพื่อหาข้อจำกัดในการตรวจสอบชิ้นงานวัสดุด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับอันเนื่องมาจากอุปกรณ์และชุดเครื่องมือที่นำมาใช้ จากบทที่ 2 เราทราบแล้วว่าพัลส์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ถูกกระตุ้นให้สั่นจะค่อยๆลดทอนกำลังลงตามเวลาและระยะทาง ในการตรวจสอบแบบพัลส์-สะท้อนกลับเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกวิ่งไปกระทบวัสดุจะเกิดคลื่นสะท้อนกลับ โดยแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับจะลดทอนลงอย่างช้าๆตามเวลา โดยช่วงเวลานี้จะสั้นหรือยาวขึ้นอยู่กับแดมป์แฟกเตอร์ (damping factor) ของอัลตราโซนิกโพรบและเครื่องพัลส์เซอร์ที่นำมาใช้ ซึ่งในช่วงเวลานี้จะไม่สามารถตรวจสอบพัลส์ของคลื่นสะท้อนกลับลูกอื่นๆได้ เรียกระยะทางช่วงนี้ว่า "เดดโซน" (dead zone) ดังนั้นเดดโซนจึงเป็นขีดจำกัดที่บอกถึงตำแหน่งตื้นที่สุดในการตรวจสอบจุดบกพร่องภายในเนื้อวัสดุ ได้ทำการทดลองวัดคาบเวลาเดดโซน (t_d) กับชุดเครื่องมือที่นำมาใช้ในงานวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วยเครื่องพัลส์เซอร์รุ่น 5072PR และ 5073PR กับอัลตราโซนิกโพรบรุ่น V310-N-SU ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3 รูปถ่ายสัญญาณเดดโซนที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองวัดคาบเวลาเดโชนกับผลของเกนและแดมปีงแฟกเตอร์ของพัลส์เซอร์

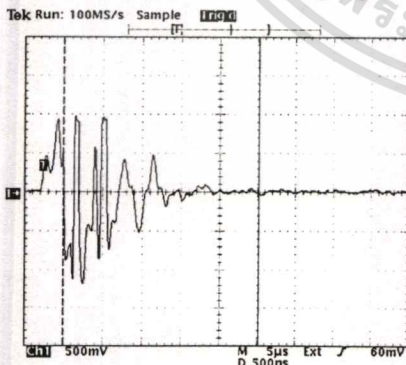
5072PR			5073PR		
Gain (dB)	Dampling	t_{dz} (μ s)	Gain (dB)	Dampling	t_{dz} (μ s)
0	3	0.59	0	2	0.59
10	3	1.35	10	2	0.59
20	3	1.35	20	2	0.59
30	3	1.49	30	2	0.64
40	3	2.01	39	2	1.00
50	3	4.42	30	4	0.64
50	5	2.53	30	6	0.59
50	7	2.01	30	8	0.59
50	8	2.01			



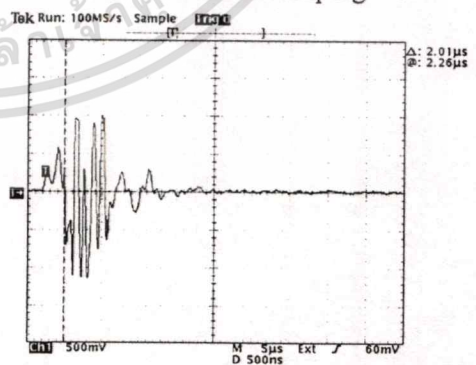
Gain = +10dB Damping = 3



Gain = +50dB Damping = 3



Gain = +50dB Damping = 5



Gain = +50dB Damping = 7

รูปที่ 5.4 สัญญาณเดโชนที่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการขยายของพัลส์เซอร์ 5072PR แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

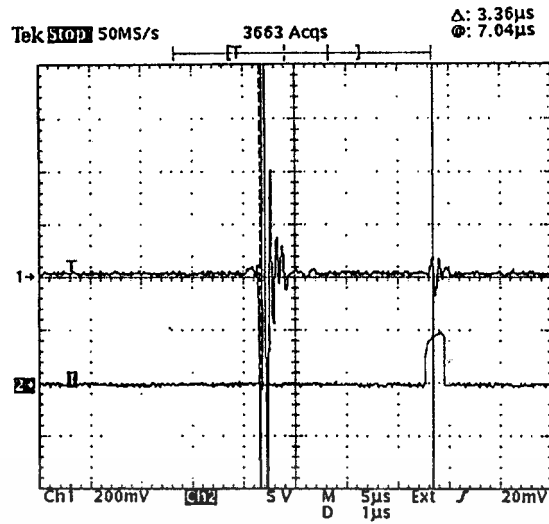
จากตัวเลขคาบเวลาเคดโซนในตารางที่ 5.3 สามารถนำไปคำนวณหาระยะทางคืนที่สุด (d) ภายในชิ้นงานวัสดุแต่ละชนิดที่สามารถตรวจสอบด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับ โดยแทนค่า v_w และความเร็วเสียงของวัสดุแต่ละชนิด v ลงในสมการ $d = \frac{vt_d}{2}$ เห็นว่ายิ่งคาบเวลาของเคดโซนมากเท่าใด ยิ่งไม่สามารถตรวจสอบจุดบกพร่องของชิ้นงานวัสดุที่ตำแหน่งคืนๆ ได้ และพบอีกว่าเครื่องพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR มีคาบเวลาเคดโซนแคบกว่ารุ่น 5072PR จึงเหมาะนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบชิ้นงานในระยะคืน โดยอัตราขยายของพัลส์เซอร์รุ่น 5073PR ไม่ค่อยมีผลต่อคาบเวลาเคดโซน ดังนั้นจึงมีความไวในการตรวจสอบมากกว่ารุ่น 5072PR โดยไม่ลดขีดความสามารถในการตรวจสอบชิ้นงานในระยะคืน

5.1.3 การเคลื่อนที่อัลตราโซนิกโพรบในแนวคิงและระยะโฟกัส

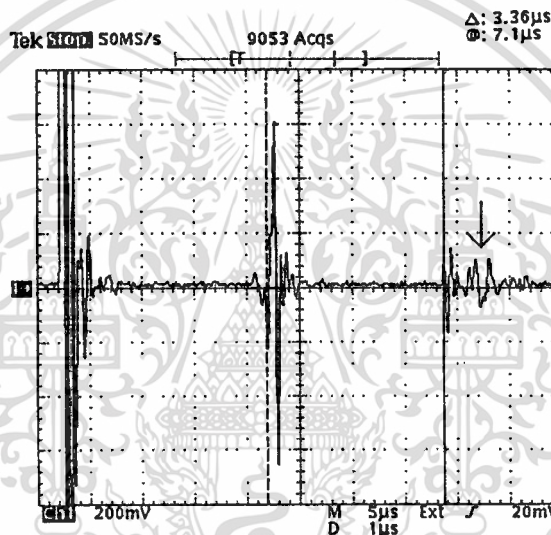
การทดสอบและการสร้างภาพวัสดุด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกซี-สแกนแบบจุ่ม (immersion method) พารามิเตอร์และแฟกเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ข้อจำกัดของระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงาน ความละเอียดของสเคปในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนคิง ระยะโฟกัสและโฟกัสโซนของหัวอัลตราโซนิกโพรบที่นำมาใช้ จากบทที่ 3 เราทราบมาว่าข้อจำกัดในการตรวจสอบแบบจุ่มนั้น อัลตราโซนิกโพรบและชิ้นงานจะต้องวางห่างกันเป็นระยะทางตามสมการที่ (5.2)

$$WP \geq n \left(\frac{v_w}{v_M} \right) MP \quad (5.2)$$

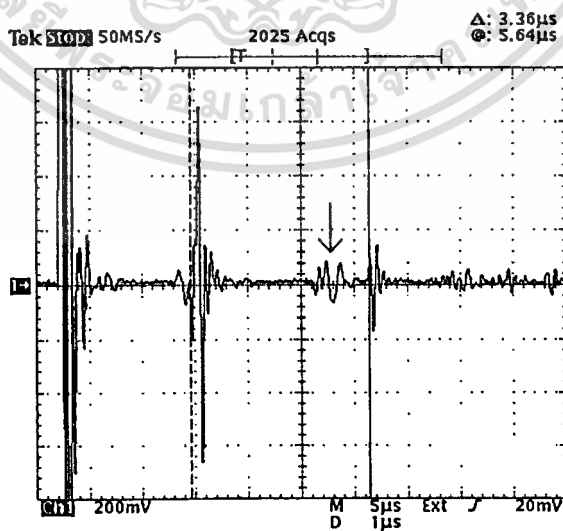
เมื่อ WP เป็นระยะทางระหว่างโพรบกับชิ้นงาน MP เป็นความหนาของชิ้นงานทดสอบ และ v_w กับ v_M เป็นความเร็วเสียงของน้ำและชิ้นงานตามลำดับ เพื่อทดสอบสมมติฐานนี้จึงได้ทำการทดลองกับชิ้นงานสแตนเลสหนา 1 เซนติเมตร มีความเร็วเสียงเท่ากับ 5700 เมตรต่อวินาที โดยนำสแตนเลสไปจุ่มลงในน้ำที่มีความเร็วเสียงประมาณ 1470 เมตรต่อวินาที จากการคำนวณพบว่าระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงานต้องวางห่างกันมากกว่า 2.5 มิลลิเมตร จึงทำการทดลองทดสอบที่ระยะห่างระหว่างโพรบกับสแตนเลสต่างๆกันที่ 25 2.5 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.5



(ก) ระยะห่าง = 25 มิลลิเมตร



(ข) ระยะห่าง = 2.5 มิลลิเมตร



(ค) ระยะห่าง = 1 มิลลิเมตร

รูปที่ 5.5 สัญญาณผลการทดลองวัดขีดจำกัดของระยะห่างของโพรมกับชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.5 สังเกตเห็นว่า ที่ระยะห่างระหว่างหัวโพรบกับสเตนเลสหลายๆ (25 มม.) จะเกิดคลื่นสะท้อนกลับเพียงสองลูก (พิจารณารูปที่ 5.5ก ประกอบ) โดยลูกหนึ่งเป็นคลื่นสะท้อนที่บริเวณผิวหน้าของสเตนเลส อีกลูกคลื่นหนึ่งเป็นคลื่นสะท้อนที่ผนังหลังของชิ้นงาน เมื่อนำผลต่างของเวลาของคลื่นลูกแรกและคลื่นลูกสองมาคำนวณกลับหาความหนาของสเตนเลสได้ประมาณ 0.98 ซม. ซึ่งใกล้เคียงกับความหนาของชิ้นงานสเตนเลสที่นำมาทดสอบ จากรูปเมื่อนำโพรบวางใกล้ชิ้นงานเป็นระยะทางน้อยกว่าระยะที่คำนวณได้ (2.5 มม.) โดยวางโพรบห่างเป็นระยะ 1 มม. จากชิ้นงานสเตนเลส (พิจารณารูปที่ 5.5ค ประกอบ) สังเกตเห็นว่า มีสัญญาณคลื่นสะท้อนแปลกปลอมเข้ามาอยู่ระหว่างคลื่นสะท้อนจากผิวหน้าและผนังด้านหลัง (ตำแหน่งที่ลูกศรชี้ในรูปที่ 5.5ข และ 5.5ค) ซึ่งเป็นผลให้เกิดความสับสนและเข้าใจผิดในการวิเคราะห์ผลและตีความจากการทดลองพบว่าคลื่นสะท้อนแปลกปลอมดังกล่าวเป็นผลมาจากคลื่นสะท้อนกลับที่บริเวณผิวหน้าลูกที่สอง สังเกตได้จากความแตกต่างของคาบเวลาจากพัลส์กระตุ้นถึงคลื่นสะท้อนที่ผิวหน้าลูกแรกและจากคลื่นลูกแรกถึงคลื่นสะท้อนลูกที่สองมีคาบเวลาเท่ากัน ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า ชัดจำกัดในการตรวจสอบแบบจุ่มคือตำแหน่งของโพรบต้องวางห่างจากชิ้นงานเป็นระยะทางมากกว่าสมการที่ (5.2) เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากการสะท้อนกลับของลูกคลื่นสะท้อนจากผิวหน้าของชิ้นงาน

ความละเอียดของสเต็ปการหมุนของมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ในแนวแกน z หรือในแนวตั้งเป็นแฟกเตอร์หนึ่งที่สำคัญซึ่งบอกถึงระยะทางละเอียดในการขยับเคลื่อนปรับตำแหน่งระยะโฟกัสในแนวแกน z โดยอาศัยเทคนิคการวัดความแตกต่างของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการทดลองในหัวข้อที่ 5.1.1 ข้อมูลผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.4 ผลการทดลองมีข้อพึงระวังเช่นเดียวกับการทดลองใน 5.1.1 คือต้องวัดในขณะที่อุณหภูมิของน้ำไม่แตกต่างกันมาก โดยขณะทดลองวัดอุณหภูมิของน้ำได้เท่ากับ 26.2 องศาเซลเซียส หรือเทียบเป็นความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำได้เท่ากับ 1,495 เมตรต่อวินาที

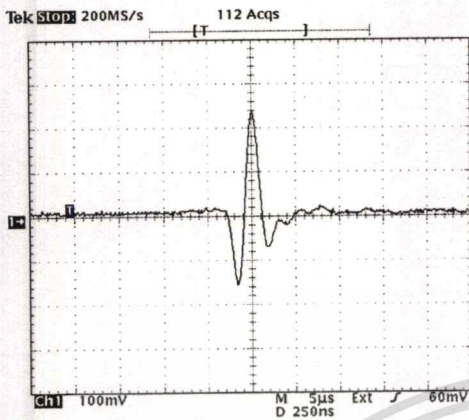
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองวัดความละเอียดของสตีปในการเคลื่อนที่ตามแนวแกน z

# of step	Δt (ns)	$\Delta t(i) - \Delta t(i-1)$ (ns)	Δz (μm)
1	0		
2	215	215	160.7
3	425	210	157.0
4	570	145	108.4
5	815	245	183.1
6	950	135	100.9
7	1195	245	183.1
8	1330	135	100.9
9	1560	230	171.9
10	1710	150	112.1
11	1945	235	175.7
12	2095	150	112.1
13	2320	225	168.2
14	2475	155	115.9
15	2690	215	160.7
Δz เฉลี่ย (μm)			143.6

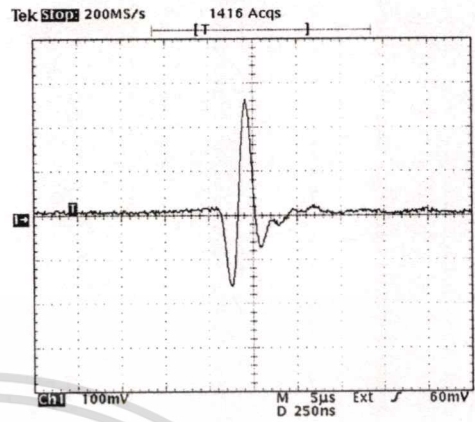
จากผลการทดลองเราสามารถสรุปได้ว่า ระยะความละเอียดในการเคลื่อนที่อัลตราโซนิกโพรบตามแนวแกน z เฉลี่ยเท่ากับ 143.6 ไมโครเมตร

ในการทดลองข้างต้นเป็นการศึกษาขีดจำกัดในการวางตำแหน่งอัลตราโซนิกโพรบของระบบสร้างภาพที่ได้พัฒนาขึ้น ต่อไปจะศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของอัลตราโซนิกโพรบที่ใช้ในระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนอันหนึ่งได้แก่ ระยะโฟกัส โดยคลื่นสะท้อนกลับที่ตำแหน่งโฟกัสนี้จะมีขนาดของแอมพลิจูดสูงกว่าที่ตำแหน่งอื่น เพื่อศึกษาคุณสมบัติการโฟกัสของอัลตราโซนิกโพรบที่นำมาใช้ PANAMETRICS รุ่น V310-N-SU ได้ทำการทดลองปรับเลื่อนตำแหน่งของอัลตราโซนิกโพรบตามแนวแกน z แล้ววัดขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับที่ความสูง z ต่างๆ เพื่อสังเกตลักษณะของการโฟกัส (focusing profile) วิธีการวัดระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงานใช้หลักการหาระยะทางด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ทำโดยการวัดคาบเวลาของคลื่นสะท้อนกลับที่ความสูงต่างๆ และควบคุมอุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

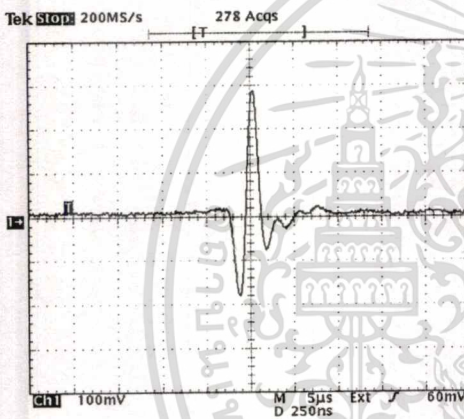
ของน้ำคงที่ไว้ที่ 26.1 องศาเซลเซียส ดังนั้นความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำจะประมาณ 1495 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.6 และสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 5.5



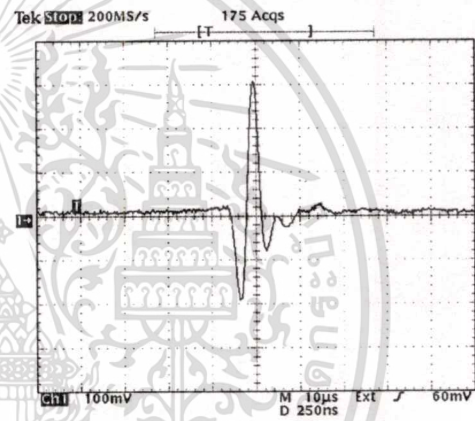
ระยะห่าง = 21.7 มม.



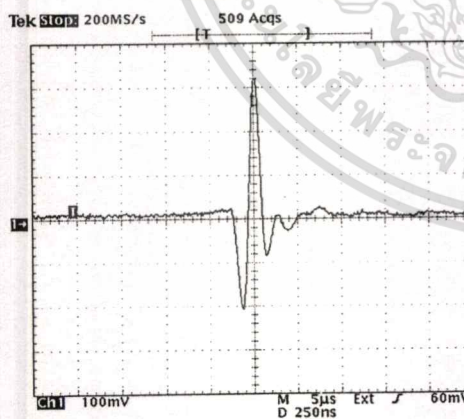
ระยะห่าง = 22.6 มม.



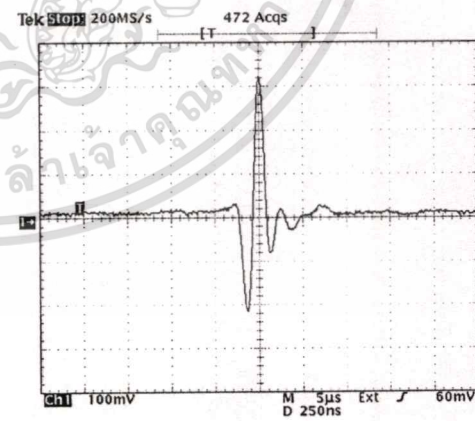
ระยะห่าง = 24.4 มม.



ระยะห่าง = 25.6 มม.



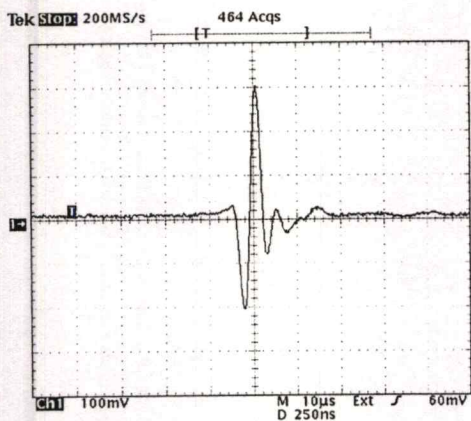
ระยะห่าง = 27.4 มม.



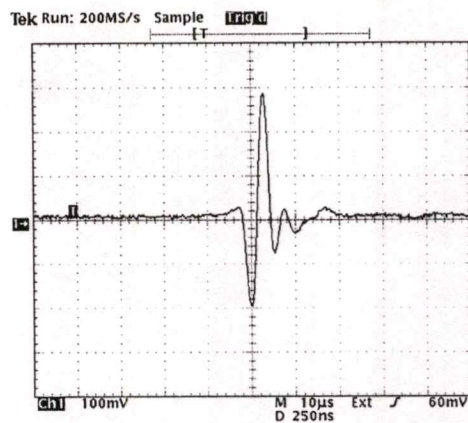
ระยะห่าง = 31.6 มม.

รูปที่ 5.6 สัญญาณคลื่นสะท้อนที่ระยะห่างของโพรบกับชิ้นงานต่างๆกัน

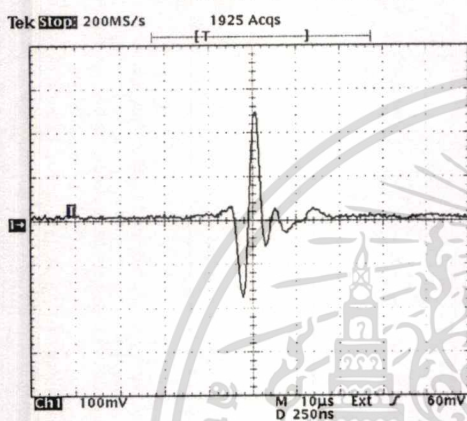
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



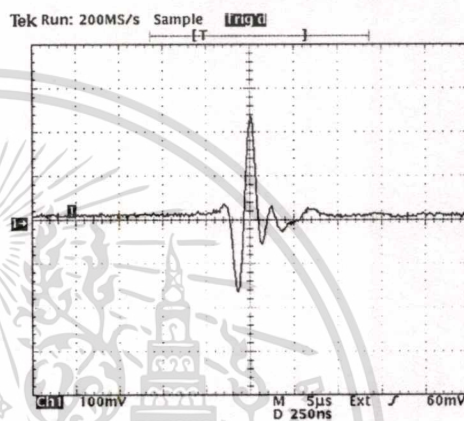
ระยะห่าง = 34.1 มม.



ระยะห่าง = 36.0 มม.



ระยะห่าง = 40.4 มม.



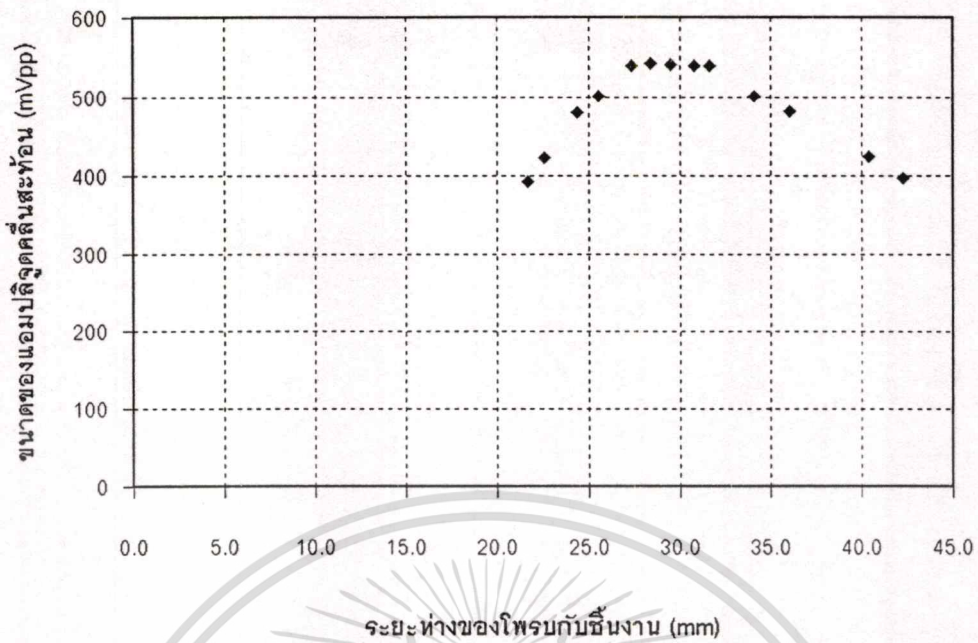
รูปที่ 5.6(ต่อ) สัญญาณคลื่นสะท้อนที่ระยะห่างของโพรบกับชิ้นงานต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ของระยะห่างของโพรบกับขนาดของคลื่นสะท้อน

คาบเวลา (μ s)	ระยะห่าง (มม.)	ระยะห่าง (นิ้ว)	แอมพลิจูด (mVpp)
29.0	21.7	0.853	392
30.2	22.6	0.889	422
32.6	24.4	0.959	480
34.2	25.6	1.006	502
36.6	27.4	1.077	540
38.0	28.4	1.118	542
39.5	29.5	1.162	541
41.2	30.8	1.212	540
42.3	31.6	1.245	540
45.6	34.1	1.342	502
48.2	36.0	1.418	482
54.0	40.4	1.589	424
56.6	42.3	1.666	396

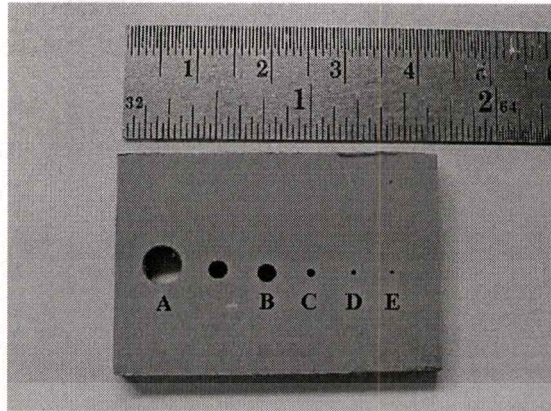
จากตารางที่ 5.5 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบและชิ้นงานกับขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนได้ดังรูปที่ 5.7 ตำแหน่งที่มีขนาดของแอมพลิจูดสูงที่สุดเท่ากับ 540 มิลลิโวลต์อยู่ในช่วงระยะ 27.4 ถึง 31.6 มิลลิเมตร (หรือเท่ากับ 1.007 ถึง 1.245 นิ้ว) กำหนดให้ช่วงนี้เรียกว่าโฟกัสซิงโซน (focussing zone) ข้อมูลดังกล่าวบอกให้ทราบว่าระยะการโฟกัสในแนวแกน z สามารถคลาดเคลื่อนได้ประมาณ 4.2 มิลลิเมตรโดยไม่ทำให้สัญญาณแอมพลิจูดลดลงหรือเปลี่ยนแปลง จากกราฟยังแสดงให้เห็นแนวโน้มของการลดทอนขนาดแอมพลิจูดที่ระยะห่างของอัลตราโซนิกโพรบตำแหน่งต่างๆ โดยแอมพลิจูดที่ตำแหน่งของหัวโพรบยาวกว่าจุดโฟกัสมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆเป็นเชิงเส้น ในขณะที่แอมพลิจูดที่ตำแหน่งของหัวโพรบสั้นกว่าจุดโฟกัสมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เป็นเชิงเส้น



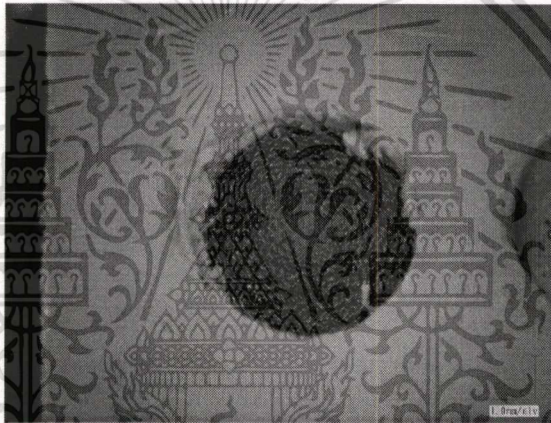
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างโพรบกับขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับ

5.1.4 ความละเอียด (Resolution) ในการตรวจสอบวัสดุ

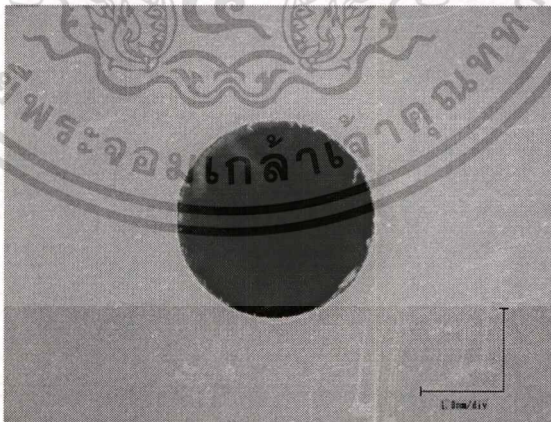
หัวข้อนี้เป็นการทดลองสร้างภาพวัสดุที่ทราบขนาดและตำแหน่งของจุดบกพร่องเพื่อศึกษาความละเอียดในการสร้างภาพของระบบที่ได้พัฒนาขึ้นมา โดยนำแผ่นพลาสติกพีวีซีไปเจาะรูให้มีขนาดต่างๆกันดังรูปที่ 5.8 ขนาดของรูถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลวิดีโอไมโครสโคป (Digital Video Microscope) ของ KEYENCE รุ่น VH-7000 แสดงดังรูปที่ 5.9 และภาพถ่ายจากระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.8 แผ่นพีวีซีที่นำไปเจาะรูเพื่อใช้เป็นวัสดุทดสอบความละเอียดของระบบสร้างภาพ



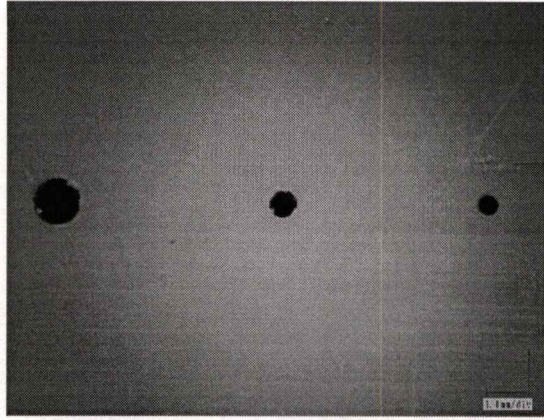
(ก) เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรู A ขนาดประมาณ 5 มม.



(ข) เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของรู B ขนาดประมาณ 2 มม.

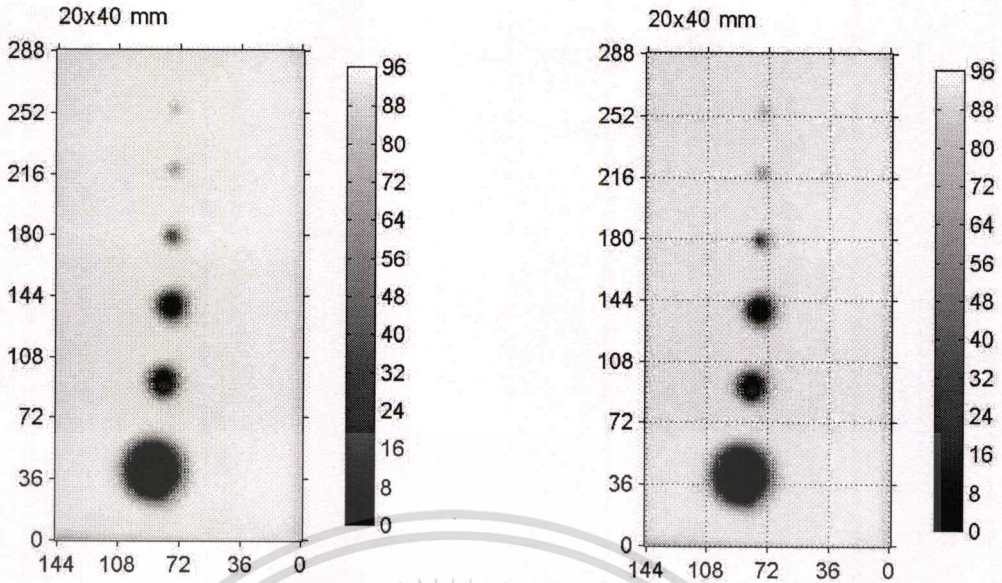
รูปที่ 5.9 ขนาดของรูบนแผ่นพลาสติกจากกล้องวิดีโอไมโครสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

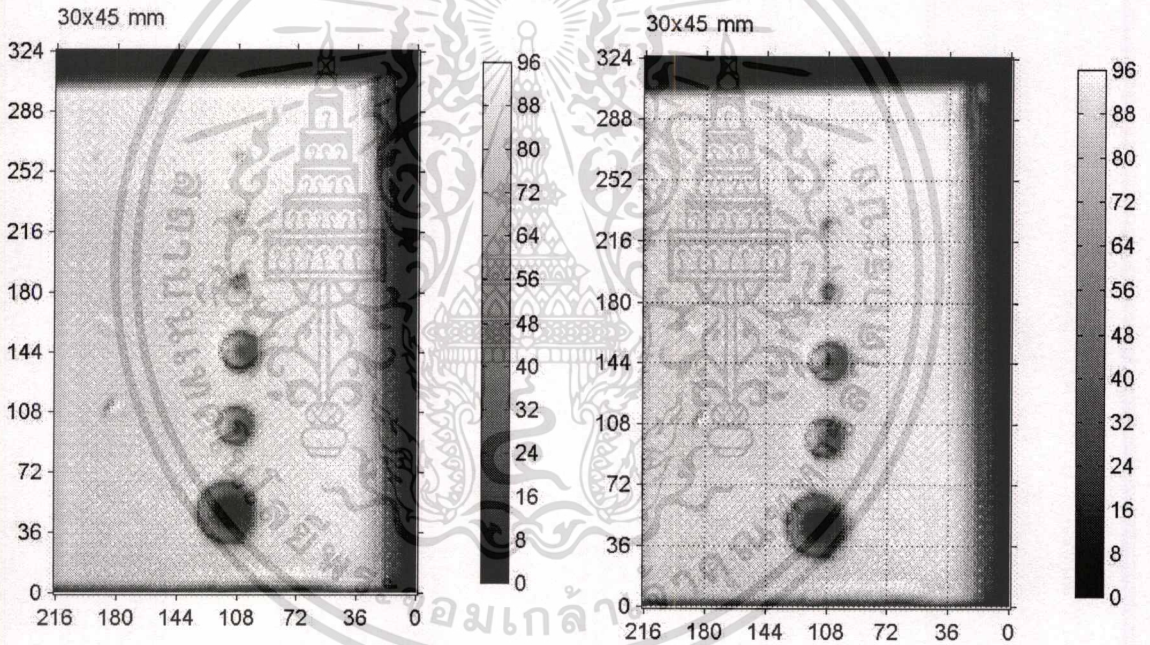


(ค) เส้นผ่าศูนย์กลางของรู C D และ E ขนาดประมาณ 1 0.75 และ 0.5 มม. ตามลำดับ
รูปที่ 5.9 (ต่อ) ขนาดของรูบนแผ่นพลาสติกจากกล้องวิดีโอไมโครสโคป

ในรูปที่ 5.10 ตัวเลขของทั้งแกน x และแกน y เป็นตัวเลขของจำนวนสเกลในการกวาดหัวอัลตราโซนิกโพรบ โดยระยะการเคลื่อนสเกล 0 ถึง 36 เท่ากับระยะทางที่เคลื่อนโพรบไปเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ภาพถ่ายซี-สแกนด้านขวามือเป็นภาพถ่ายซี-สแกนที่เพิ่มเส้นแบ่งช่อง (grid line) เพื่อเป็นประโยชน์ในการคาดคะเนขนาดของรูหรือจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานพลาสติก โดย 1 ช่องมีขนาดตามแนวตั้งและแนวนอนเท่ากับ 5 มม. x 5 มม. แถบบาร์สเกลด้านข้างภาพถ่ายซี-สแกนในแต่ละภาพแสดงจำนวนสเกลในการแบ่งโทนสีเทาทั้งหมด 96 ระดับ โดยโทนสีเทาระดับที่ 0 หมายความว่า เป็นบริเวณที่ไม่มีสัญญาณสะท้อนกลับหรือมีขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับเป็นศูนย์ และโทนสีเทาระดับที่ 96 หมายความว่า เป็นบริเวณที่มีสัญญาณสะท้อนกลับเท่ากับ 4 มิลลิโวลต์ x 96 เท่ากับ 384 มิลลิโวลต์ (จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ว่าค่าความละเอียดในการแปลงข้อมูลอนาลอกเป็นดิจิตอล 1 บิต หรือเปลี่ยนจาก 00000000b เป็น 00000001b ของเครื่องตรวจจับพิก 5607 ประมาณ 4 มิลลิโวลต์) จากภาพถ่ายซี-สแกนในรูปที่ 5.10 พอสรุปได้ว่า จิตความสามารถของระบบสแกนด้วยหัวอัลตราโซนิกโพรบขนาดความถี่ 5 MHz สามารถตรวจจับจุดบกพร่องหรือรูโพรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.2 และ 1 มิลลิเมตรได้ชัดเจน ส่วนรูโพรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 มิลลิเมตรได้แก่ 0.75 และ 0.5 มิลลิเมตรสามารถแยกแยะออกแต่ได้ภาพไม่ค่อยชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของลำคลื่นอัลตราโซนิกที่นำมาใช้มีขนาดประมาณ 0.9 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นข้อจำกัดในด้านความละเอียดของการสแกนของระบบสร้างภาพที่ได้พัฒนาขึ้น



(ก) ที่ระยะห่าง 26.2 มม. อัตราขยาย +10dB



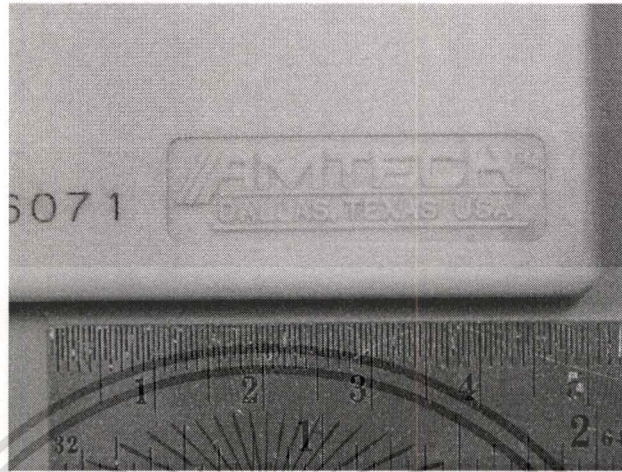
(ข) ที่ระยะห่าง 30.7 มม. อัตราขยาย +20dB

รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายอัลตราโซนิกซี-สแกนของรูบนแผ่นพลาสติกจากเครื่องที่พัฒนาขึ้น

เพื่อทดสอบความสามารถในการแยกแยะ รวมถึงความละเอียดของภาพถ่ายซี-สแกนที่ถ่ายจากชุดเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น นอกจากทดลองสร้างภาพจากข้อบกพร่องรูปทรงกลมแล้ว ต้องการทดสอบระบบด้วยการสร้างภาพของวัสดุที่มีรูปร่างโครงสร้าง (geometry) ที่ซับซ้อนขึ้น จึงได้ทดลองสร้างภาพของตัวอักษรบนบัตรทางด่วน ดังรูปที่ 5.11 โดยภาพถ่ายด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนแสดงดังรูปที่ 5.12 จากภาพถ่ายซี-สแกนในรูปที่ 5.12 สังเกตเห็นว่าภาพถ่ายมีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

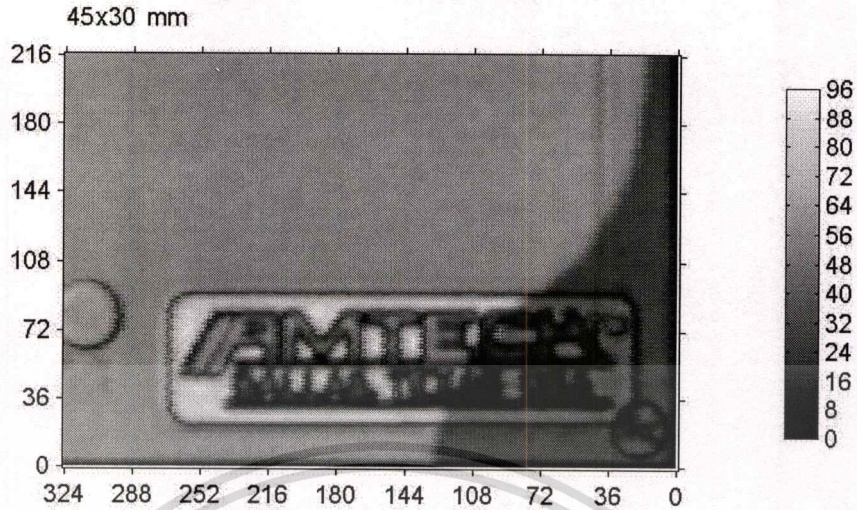
สามารถแยกแยะตัวอักษรขนาดใหญ่ (พิจารณารูปที่ 5.11 AMTECH) ได้ชัดเจนแต่ภาพที่ได้ยังไม่คม ส่วนตัวอักษรขนาดเล็ก (DALLAS, TEXAS USA) ไม่สามารถแยกแยะได้ชัดเจน



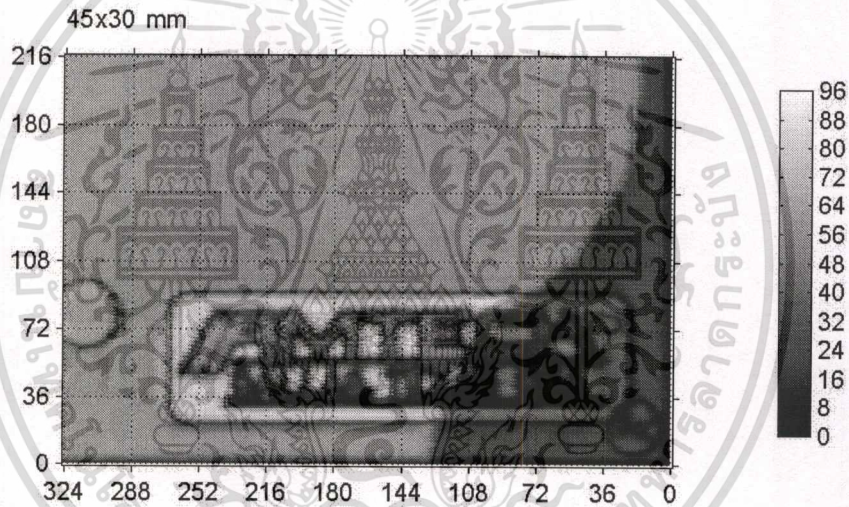
รูปที่ 5.11 ตัวอักษรบนบัตรทางด่วน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



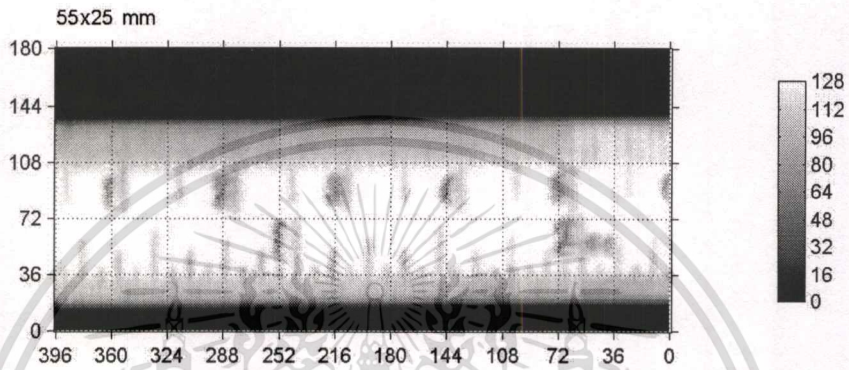
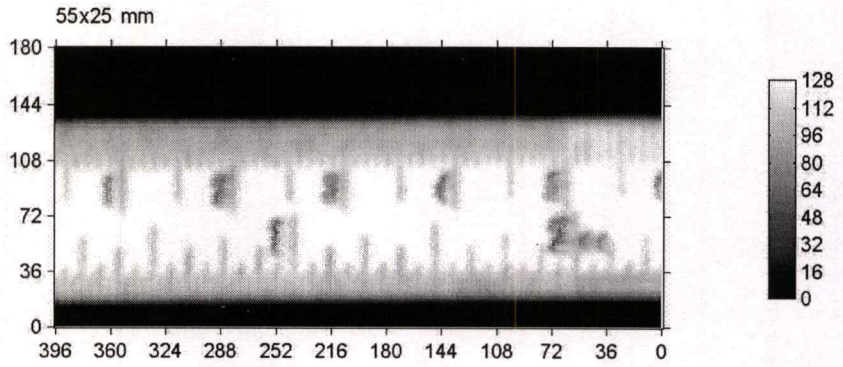
(ก) แบบไม่มีเส้นแบ่งช่อง



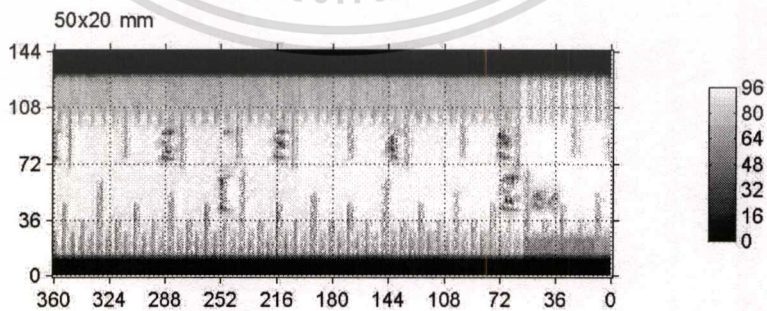
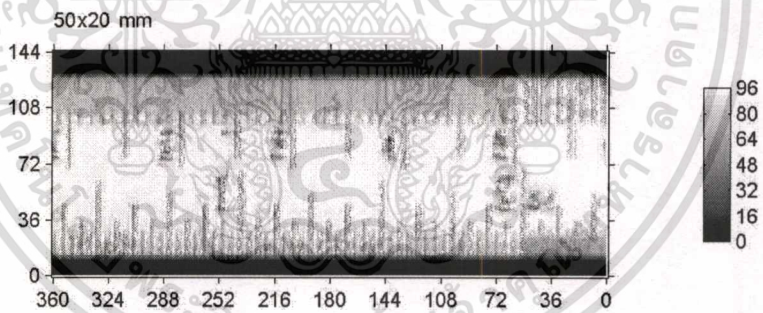
(ข) แบบมีเส้นแบ่งช่อง โดย 1 ช่อง (0-36) เท่ากับ 5 มม.

รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายซี-สแกนของตัวอักษรบนบัตรทางด่วน

เพื่อศึกษาและทดลองหาข้อสนับสนุนขีดความสามารถในด้านความละเอียดในการสแกนของระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดลองสร้างภาพของไม้บรรทัดเหล็กที่ทำจากวัสดุสเตนเลสด้วยหัวอัลตราโซนิกโพรบความถี่ 5 MHz (แสดงดังรูปที่ 5.13) และด้วยอัลตราโซนิกโพรบความถี่ 15 MHz ของ PANAMETRICS รุ่น V313 (แสดงดังรูปที่ 5.14) ซึ่งจากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำคลื่นได้ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายซี-สแกนของไม้บรรทัดเหล็กด้วยอัลตราโซนิกโพรบความถี่ 5 MHz



รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายซี-สแกนของไม้บรรทัดเหล็กด้วยอัลตราโซนิกโพรบความถี่ 15 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

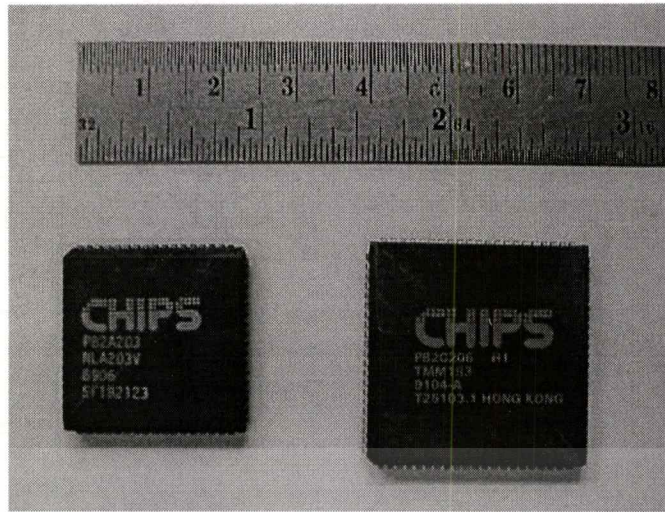
จากรูปที่ 5.13 และ 5.14 สังเกตเห็นว่าภาพซี-สแกนที่สร้างขึ้นจากอัลตราโซนิกโพรบที่มีขนาดความถี่สูงสามารถสร้างภาพที่มีความละเอียด ความคมชัด และความสามารถแยกแยะได้ดี โดยจากรูปทั้งสองยังสามารถสรุปความถูกต้องในเรื่องของขนาดที่ถ่ายได้จากภาพอัลตราโซนิกซี-สแกน ซึ่งพบว่าขนาดของภาพถ่ายซี-สแกนที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องเมื่อเทียบกับสเกลบนไม้บรรทัดเหล็กที่นำมา สร้างภาพ โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นแบ่งช่อง ซึ่งแต่ละช่องมีขนาด 5 มิลลิเมตร

5.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบที่พัฒนาขึ้นประยุกต์สร้างภาพวัสดุ

ในการทดลองที่สองเป็นการศึกษาความเป็นไปได้และการประยุกต์ใช้ระบบสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้วัดและศึกษาวัสดุ ซึ่งทั่วไปแล้วระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกนิยมประยุกต์สร้างภาพจุดบกพร่อง โพรง หรือรอยร้าวที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ รวมไปถึงตำแหน่งของจุดบกพร่องในเนื้อวัสดุด้วย วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกศึกษาการสร้างภาพของวัสดุที่แตกต่างออกไป ซึ่งเล็งเห็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อไปในอนาคต ได้แก่ การศึกษาวิธีการสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวมและการศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างภาพโฟลว์แพทเทิร์นของพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป โดยในกรณีหลังจะเป็นพื้นฐานในการเรียนรู้และเข้าใจฟิสิกส์ของกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป

5.2.1 การศึกษาการสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวม

จากการทดลองตอนที่หนึ่ง พิสูจน์แล้วว่าระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้นมาสามารถสร้างภาพถ่ายของจุดบกพร่องและความไม่ต่อเนื่องบนชิ้นงานวัสดุได้จริงและมีความถูกต้อง เพื่อทดลองสร้างภาพโครงสร้างภายในหรือจุดบกพร่องภายในชิ้นงานวัสดุได้เลือกศึกษาการสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวม โดยทดสอบเบื้องต้นด้วยเทคนิคแบบเอ-สแกนเพื่อหาตำแหน่งของความไม่ต่อเนื่องภายในตัวเก็บวงจรรวม เมื่อทราบตำแหน่งของความไม่ต่อเนื่องในเนื้อชิ้นงานแล้วจึงนำมาสร้างภาพถ่ายอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน โดยใช้ระบบสร้างภาพที่พัฒนาขึ้นร่วมกับหัววัดอัลตราโซนิก โพรบขนาด 5 MHz ทดลองสร้างภาพของตัวเก็บวงจรรวมแสดงดังรูปที่ 5.15



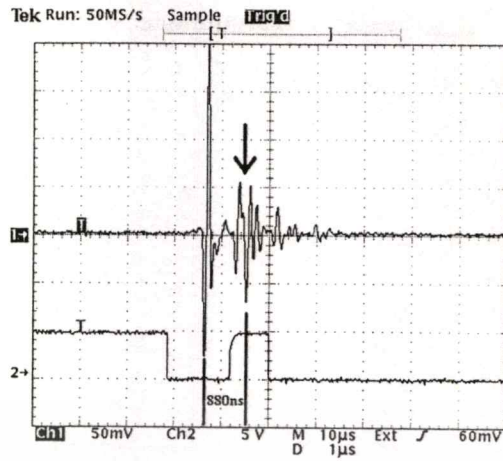
(ก)

(ข)

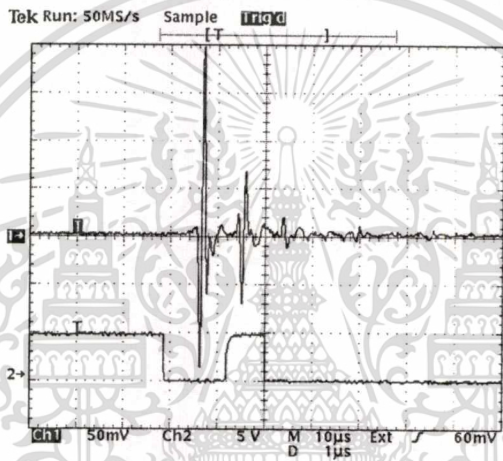
รูปที่ 5.15 ตัวเก็บวงจรรวม (ก) ขนาด 25 x 25 มิลลิเมตร และ (ข) ขนาด 30 x 30 มิลลิเมตร

การทดสอบตัวเก็บวงจรรวมด้วยเทคนิคเอ-สแกน

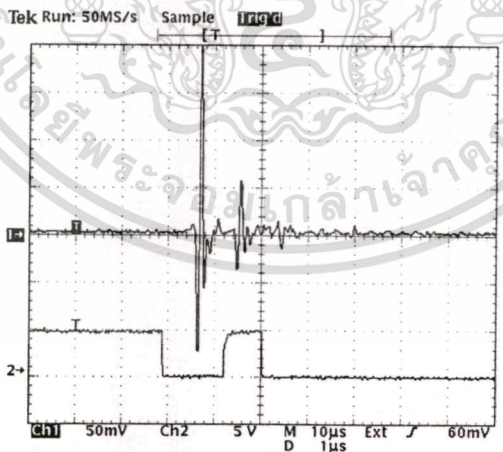
ทดลองเก็บสัญญาณรูปคลื่นที่แสดงบนจอออสซิลโลสโคปจากการทดสอบตัวเก็บวงจรรวมทั้งสองขนาดดังแสดงในรูปที่ 5.15 ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิคพัลส์-สะท้อนกลับแบบเอ-สแกน ได้รูปคลื่นสัญญาณแสดงดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 ตามลำดับ สังเกตในรูปที่ 5.16ก และ 5.17ก พบว่าที่บริเวณกึ่งกลางของตัวเก็บวงจรรวม ณ ตำแหน่งลูกศรชี้มีลักษณะลูกคลื่นสะท้อนกลับที่แตกต่างจากรูปคลื่นอื่น โดยมีลักษณะเป็นพัลส์กระเดื่อง ได้ตั้งสมมติฐานว่าเป็นบริเวณของตาย (die) หรือซิลิกอนเวเฟอร์ โดยในกรณีของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม. สัญญาณอยู่ลึกลงไปจากผิวหน้าประมาณ 880 นาโนวินาที (ns) และในกรณีของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 30 x 30 มม. ลูกคลื่นสัญญาณอยู่ลึกลงไปจากผิวหน้าประมาณ 1,060 นาโนวินาที



(ก) ตำแหน่งกึ่งกลาง



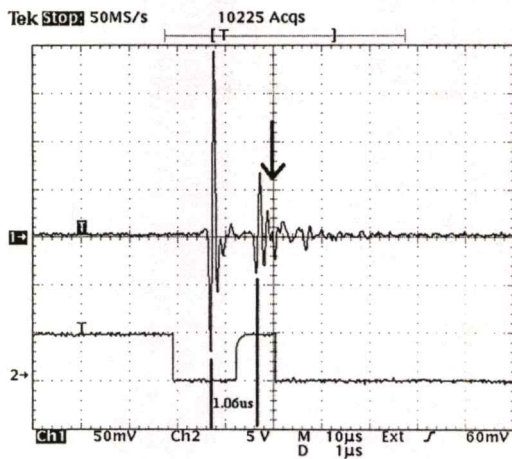
(ข) ตำแหน่งขวาครึ่ง



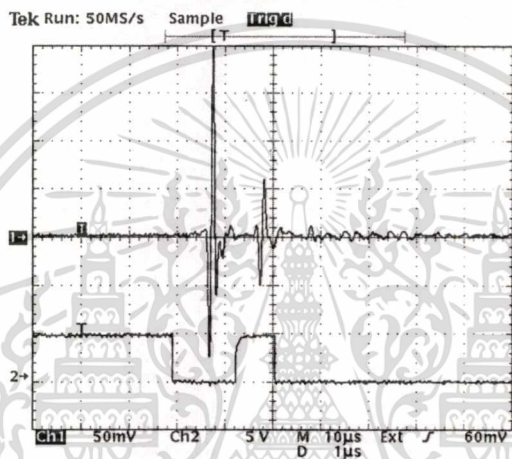
(ค) ตำแหน่งซ้ายครึ่ง

รูปที่ 5.16 สัญญาณเอ-สแกนจากตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม.

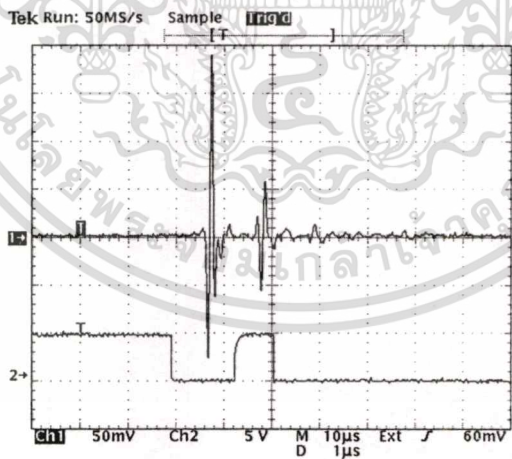
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตำแหน่งกึ่งกลาง



(ข) ตำแหน่งขวากลาง



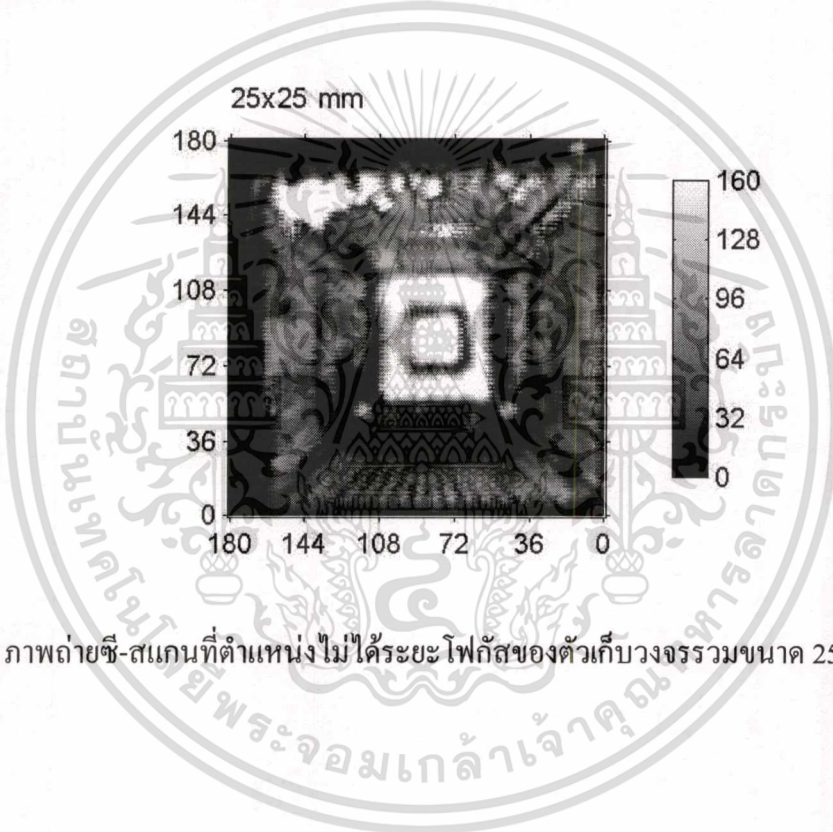
(ค) ตำแหน่งซ้ายกลาง

รูปที่ 5.17 สัญญาณเอ-สแกนจากตัวเก็บวงจรรวมขนาด 30 x 30 มม.

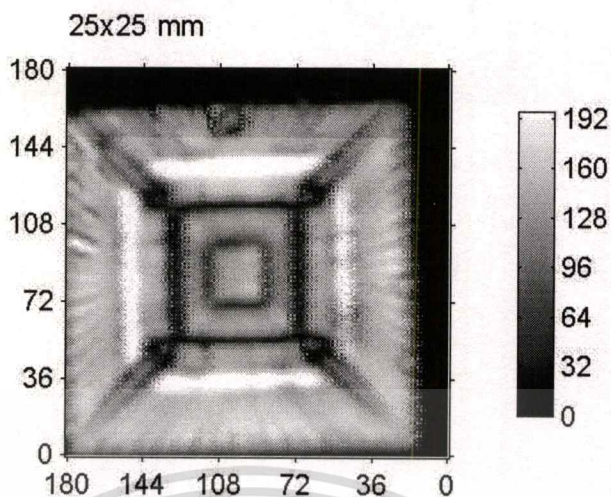
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างภาพตัวเก็บวงจรรวมด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

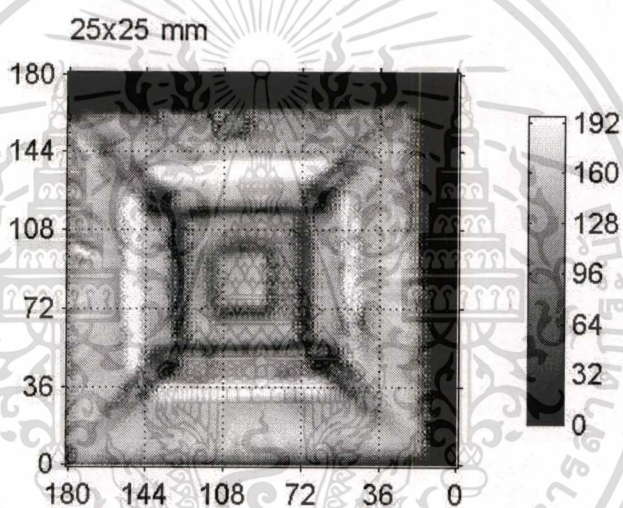
จากรูปที่ 5.16 และ 5.17 จึงได้ทำการทดลองสร้างภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่ง 880 นาโนวินาทีสำหรับตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม. และสร้างภาพถ่ายที่ตำแหน่ง 1060 นาโนวินาทีสำหรับตัวเก็บวงจรรวมขนาด 30 x 30 มม. โดยรูปที่ 5.18 เป็นภาพถ่ายซี-สแกนของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม. ในระยะที่ลำคลื่นอัลตราโซนิกไม่อยู่ในตำแหน่งโฟกัส สังเกตว่าภาพถ่ายซี-สแกนที่ได้บางตำแหน่งไม่ชัดเจนและสัญญาณแอมพลิจูดที่แต่ละตำแหน่งมีขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับน้อย และในรูปที่ 5.19 และ 5.20 เป็นภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งโฟกัสของทั้งตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม. และ 30 x 30 มม. ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งไม่ได้ระยะโฟกัสของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม.



(ก)

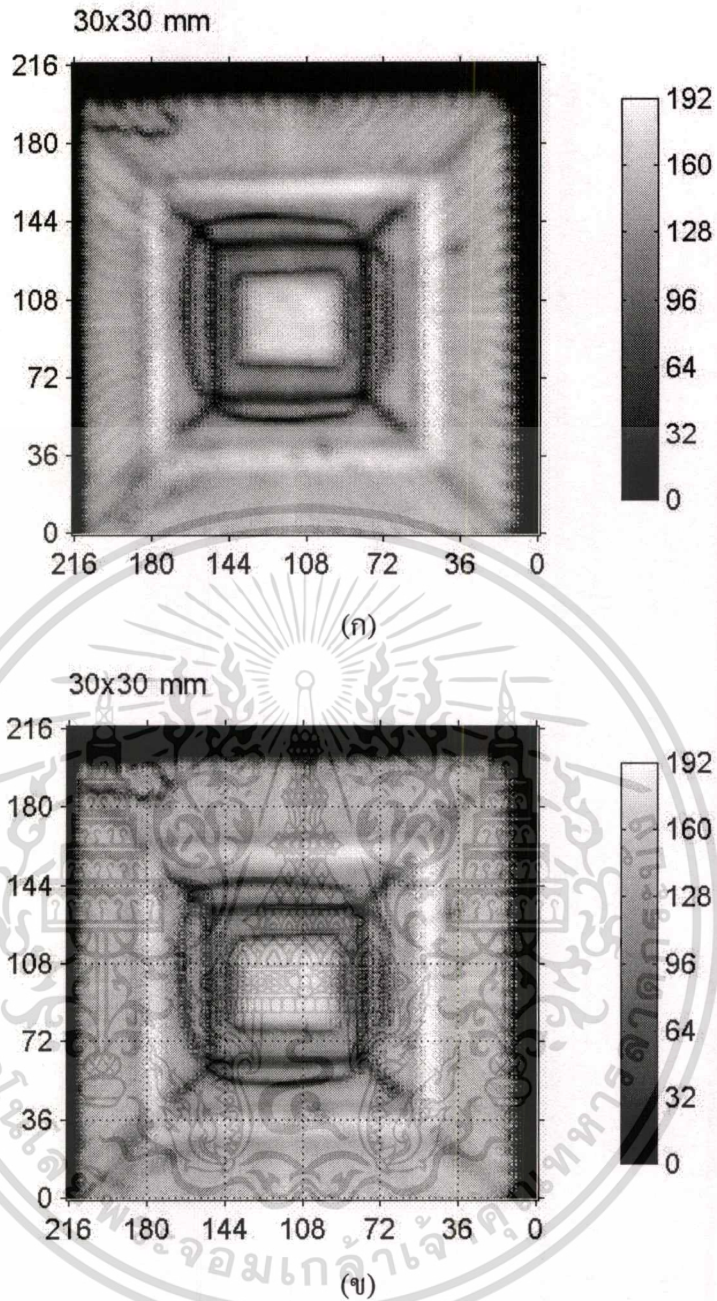


(ข)

รูปที่ 5.19 ภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 25 x 25 มม.

(ก) แบบไม่มีเส้นแบ่งช่อง

(ข) แบบมีเส้นแบ่งช่อง โดย 1 ช่อง (0-36) เท่ากับ 5 มม.



รูปที่ 5.20 ภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่งระยะโฟกัสของตัวเก็บวงจรรวมขนาด 30 x 30 มม.

(ก) แบบไม่มีเส้นแบ่งช่อง

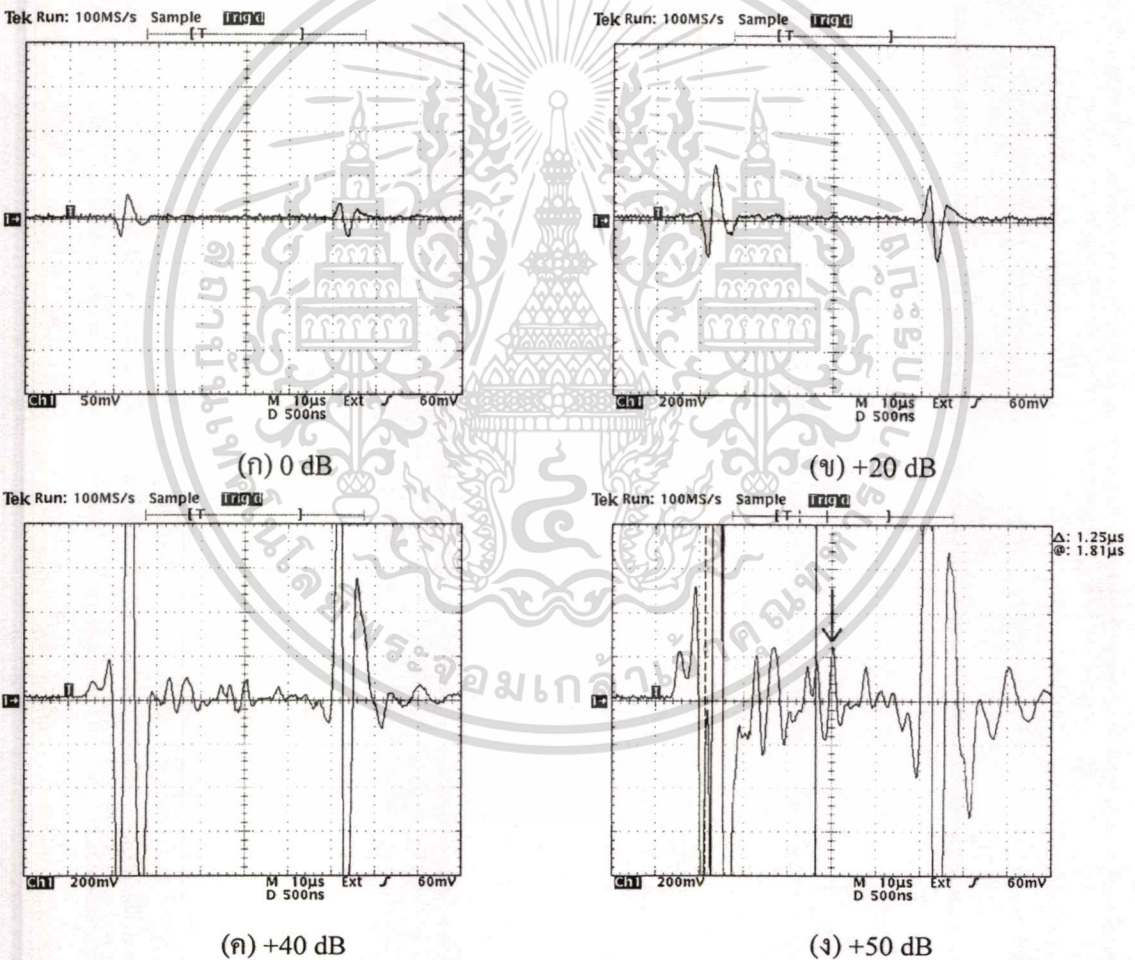
(ข) แบบมีเส้นแบ่งช่อง โดย 1 ช่อง (0-36) เท่ากับ 5 มม.

5.2.2 การศึกษาการสร้างภาพโฟลว์แพทเทิร์นของพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป

ในปัจจุบันการออกแบบผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการฉีดพลาสติก (injection-molded plastic) นั้น อาศัยการจำลองภาพทิศทางการไหลภายในแม่พิมพ์ (mold) ของโพลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น MoldFlow เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตภัณฑ์ ข้อมูลที่ได้เป็นลักษณะการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้ที่เวลาต่างๆ ซึ่งเป็นเพียงแบบจำลองไม่สามารถเห็นภาพโครงสร้างภายใน เช่น รูพรุน โพรง และความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพลาสติกจากกระบวนการผลิตจริงได้ วิธีทดสอบทำได้โดยวิธีสุ่มตรวจสอบด้วยวิธีการแบบทำลายชิ้นงาน อย่างไรก็ตามนอกจากความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อพลาสติกประเภทรูพรุนหรือโพรงอากาศที่เกิดขึ้นแล้ว ยังรวมถึงความหนาแน่นของเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันเนื่องจากการเย็นตัวไม่พร้อมกันในกระบวนการฉีดพลาสติกซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพลาสติกอีกด้วย การทดสอบชิ้นงานด้วยวิธีทางวิศวกรรมเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการผลิต (process condition) กับการวัดคุณสมบัติของวัสดุที่ผลิตขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ไม่ช่วยให้เข้าใจฟิสิกส์ของการผลิตพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป เพียงแต่เข้าใจความสัมพันธ์และเงื่อนไขของการเพิ่มประสิทธิภาพเท่านั้น ในการทดลองส่วนนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อศึกษาฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต โดยตั้งจากสมมติฐานที่ว่า ในกระบวนการผลิตพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป พารามิเตอร์และเงื่อนไขในการผลิตพลาสติกประกอบไปด้วย อุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการเย็นตัวของพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นพลาสติกที่ผลิตขึ้นน่าจะมี ความหนาแน่นในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากันเนื่องจากเกรเดียนต์ของความดัน (pressure gradient) และเวลาในการเย็นตัว ซึ่งส่งผลให้แต่ละตำแหน่งมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นไม่เท่ากัน จากหลักการสะท้อนและทะลุผ่านของคลื่นอัลตราโซนิกพบว่า เมื่อวัสดุมีความหนาแน่นหรืออิมพีแดนซ์ของเสียงไม่เท่ากันแล้ว คลื่นอัลตราโซนิกจะเกิดการสะท้อนกลับและทะลุผ่าน จากหลักการดังกล่าวเราจึงน่าจะสร้างภาพของความหนาแน่นที่แตกต่างกันภายในชิ้นงานพลาสติกได้ จึงทำการทดลองเพื่อพิสูจน์สมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ ซึ่งมีผลกระทลทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

การทดสอบวัสดุพลาสติกด้วยเทคนิคเอ-สแกน

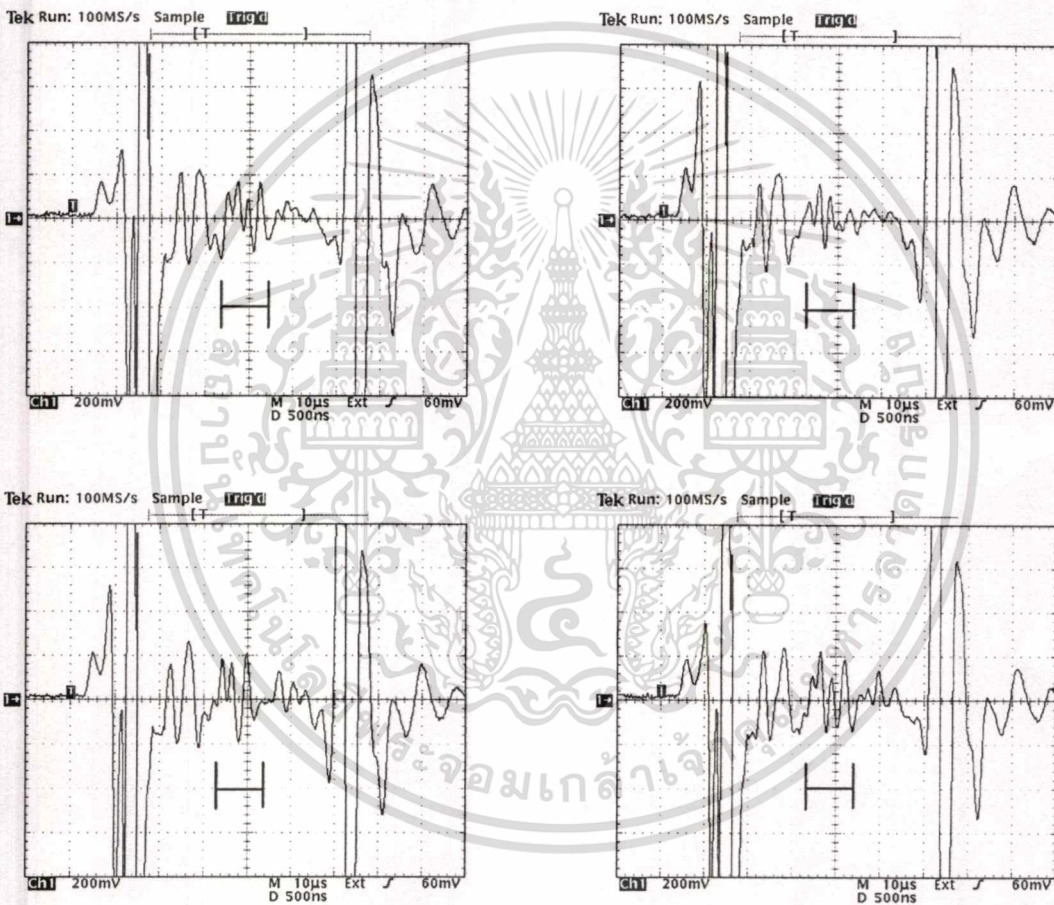
เพื่อพิจารณาปรากฏการณ์ของคลื่นอัลตราโซนิกที่สะท้อนกลับจากชิ้นงานพลาสติกแบบฉีดยื่นรูปและเพื่อค้นหาตำแหน่งและความลึกในเนื้อพลาสติกของสัญญาณสะท้อนจากสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ว่าเนื้อพลาสติกน่าจะมีขนาดหนาแน่นไม่เท่ากัน ได้ทำการทดลองสร้างภาพจากเทคนิคเอ-สแกนด้วยหัววัดอัลตราโซนิกโพรบความถี่ 5 MHz ที่อัตราขยายของภาครับต่างๆกัน และที่ตำแหน่งต่างๆในเนื้อชิ้นงานพลาสติก แสดงรูปคลื่นสัญญาณดังรูปที่ 5.21 และ 5.22 ตามลำดับ และได้ทดสอบสัญญาณเอ-สแกนกับหัวโพรบที่ความถี่ค่าอื่นๆ ได้แก่ที่ระดับความถี่ 15 และ 25 MHz ได้ผลดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.21 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกสะท้อนกลับจากเนื้อพลาสติกที่อัตราขยายต่างๆกัน

จากรูปที่ 5.21 สังเกตเห็นว่าที่อัตราขยายสูง +40dB และ +50dB พบว่ามีคลื่นสะท้อนกลับที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเนื้อพลาสติกแบบฉีดยื่นรูป ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในพัลส์เซอร์หรือตัว

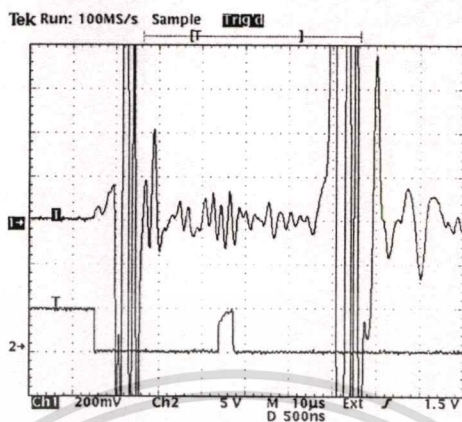
รับอัตราโชนิกที่มีอัตราขยายต่ำ ในกรณีที่อัตราขยายเท่ากับ +50dB หรืออัตราขยายประมาณ 316 เท่า วัดแอมพลิจูดของสัญญาณสะท้อนกลับที่ตำแหน่งลูกศรชี้ได้เท่ากับ 400 มิลลิโวลต์พีคทูพีค (mV_{pp}) ซึ่งหมายความว่าแอมพลิจูดของสัญญาณจริงในกรณีที่ไม่มีอัตราขยายจะประมาณ 1.27 มิลลิโวลต์พีคทูพีค ดังนั้นจากรูปที่ 5.21 สามารถสรุปได้ว่ามีจุดบกพร่องและความไม่ต่อเนื่องภายในเนื้อของชิ้นงานพลาสติกจริงดังที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ ณ ตำแหน่งคาบเวลาประมาณ 1.25 ไมโครวินาที จาก [3] ทราบว่าความเร็วเสียงของพลาสติกที่นำมาทำการทดสอบมีความเร็วเสียงประมาณ 2,530 เมตรต่อวินาที นำมาคำนวณได้ว่าระยะทางของความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานพลาสติกอยู่ลึกจากผิวหน้าเป็นระยะประมาณ 1.58 มิลลิเมตร



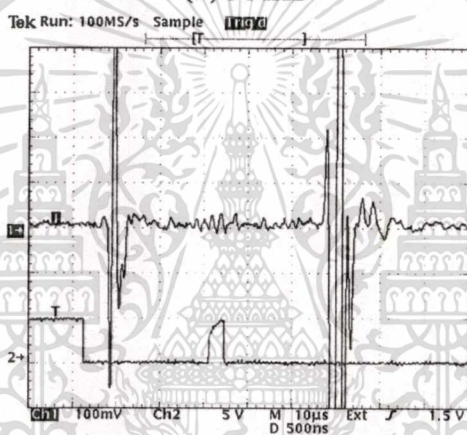
รูปที่ 5.22 รูปคลื่นสัญญาณสะท้อนที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานพลาสติกที่ตำแหน่งต่างๆกัน

จากรูปที่ 5.22 สังเกตว่าสัญญาณสะท้อนกลับที่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน (ลึกจากผิวหน้าชิ้นงานประมาณ 1.58 มม.) ที่ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงานพลาสติกมีขนาดของแอมพลิจูดและรูปคลื่นสะท้อนกลับแตกต่างกันไปในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าสัญญาณสะท้อนกลับที่สังเกตเห็น

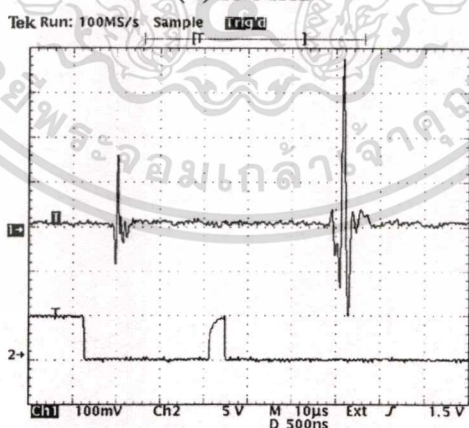
ไม่ใช่เกิดขึ้นมาจากธรูหรือโพรงอากาศแต่เป็นคุณสมบัติของพลาสติกที่ได้จากการผ่านกระบวนการผลิตแบบฉีดขึ้นรูป



(ก) 5 MHz



(ข) 15 MHz



(ค) 25 MHz

รูปที่ 5.23 สัญญาณสะท้อนกลับจากชิ้นงานพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูปที่ความถี่ของหัวโพรบต่างๆ โดยมี อัตราขยายของภาครับคงที่เท่ากับ +50 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.23 แสดงให้เห็นว่า ยิ่งความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกสูงการลดทอนในเนื้อวัสดุพลาสติกแบบฉุดขึ้นรูปจะสูงตามไปด้วย ทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นพัลส์สะท้อนกลับบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานพลาสติกได้ ดังนั้นการจะสร้างภาพความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานพลาสติกต้องเลือกใช้หัววัดอัลตราโซนิกโพรบชนิดความถี่ต่ำในการศึกษา

การสร้างภาพวัสดุพลาสติกด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

จากข้อมูลในหัวข้อที่ผ่านมา ได้ทดลองสร้างภาพของพลาสติกแบบฉุดขึ้นรูปชนิดโพลีบิวไทลีนเทเรฟทาเลทหรือพีบีที (Polybutylene terephthalate, PBT) ซึ่งมีทิศทางการฉุดพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่แบบ (mold) แสดงดังรูปที่ 5.24 ด้วยระบบสร้างภาพที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้อัลตราโซนิกโพรบขนาด 5 MHz ในการทดสอบ ได้ผลของการสร้างภาพอัลตราโซนิกซี-สแกนแสดงดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.24 ชิ้นงานพลาสติกพีบีทีที่นำมาใช้ในการสร้างภาพซี-สแกน

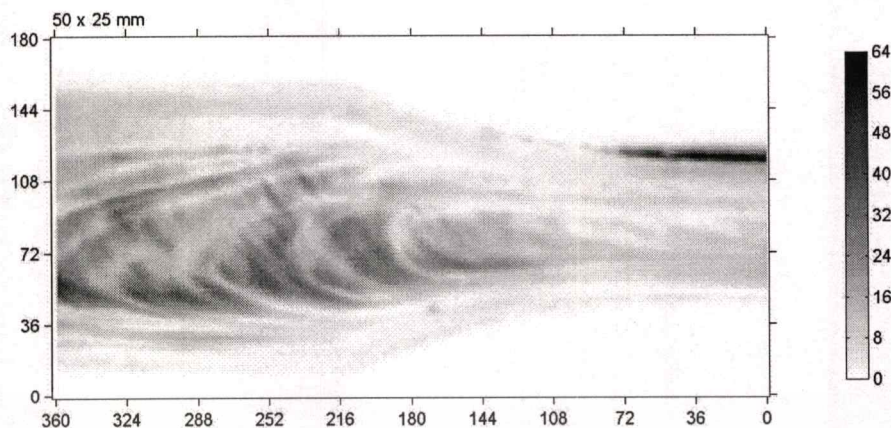
จากรูปที่ 5.25 สังเกตเห็นว่าภาพถ่ายซี-สแกนซึ่งสร้างภาพที่ระยะลึกจากผิวหน้าของชิ้นงานพลาสติกพีบีทีประมาณ 1.8 มิลลิเมตร สามารถมองเห็นความไม่ต่อเนื่องอันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นในเนื้อพลาสติกได้ โดยความไม่สม่ำเสมอมีลักษณะเป็นทิศทางการไหล (flow pattern) ของพลาสติกเหลวในกระบวนการฉุดขึ้นรูปพลาสติกดังที่ได้ตั้งสมมติฐานเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

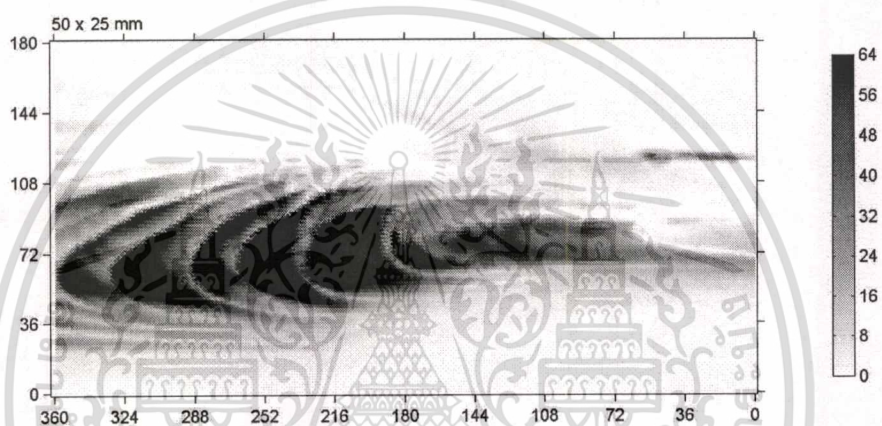
ต้นไว้ โดยรูปที่ 5.25ก เป็นภาพถ่ายในตำแหน่งที่ไม่ได้ระยะโฟกัส ส่วนรูปที่ 5.25ข เป็นภาพถ่ายซี-สแกนที่ตำแหน่ง $x-y$ เดิมในตำแหน่งโฟกัสของลำคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งสังเกตเห็นว่าความเข้มของภาพสูงกว่าในรูปที่ 5.25ก อีกทั้งยังเห็นโฟลว์แพทเทิร์นของพลาสมาชัดเจนกว่าอีกด้วย ส่วนภาพถ่ายซี-สแกนในรูปที่ 5.25ค เป็นภาพถ่ายที่ระยะ $x-y$ อื่นของชิ้นงานในรูปที่ 5.24



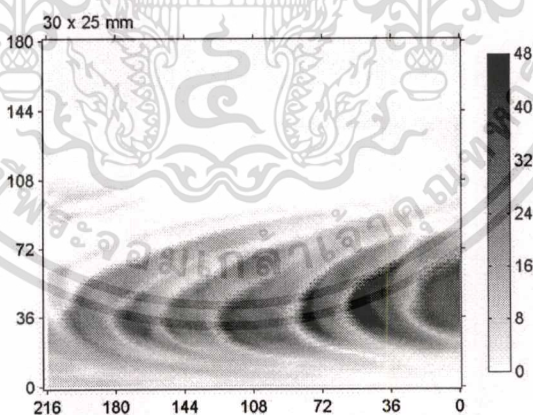
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ระยะเวลาออกโฟกัส



(ข) ระยะเวลาโฟกัสของลำคลื่นอัลตราโซนิก



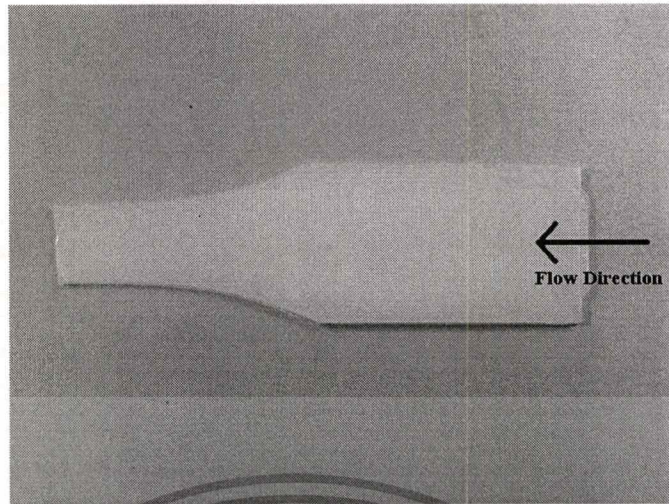
(ค) ตำแหน่งต่อจาก (ก) และ (ข)

รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายซี-สแกนของชิ้นงานในรูปที่ 5.24

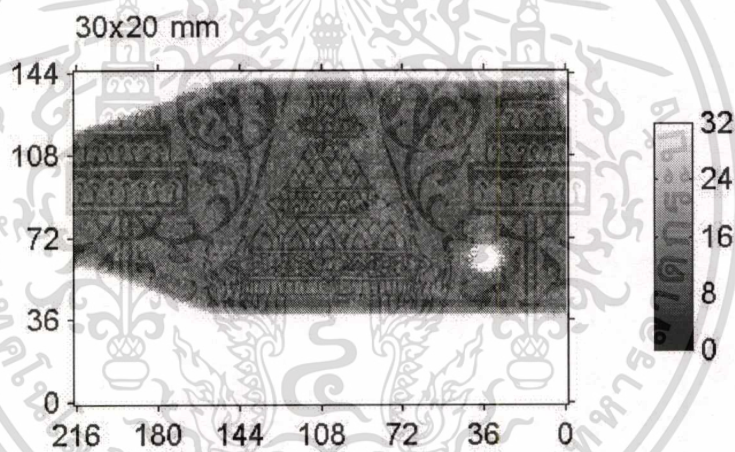
เพื่อยืนยันสมมติฐานที่ตั้งไว้แต่เดิม ได้ทดลองสร้างภาพซี-สแกนกับชิ้นงานตัวอย่างพลาสติกชนิดอื่น โดยเลือกทดลองสร้างภาพของชิ้นงานพลาสติกชนิดพีอีที่มีความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) แสดงดังรูปที่ 5.26 ซึ่งมีทิศทางการฉีดพลาสติกเหลวเข้ามาในแม่แบบแสดงดังรูปที่ 5.26 โดยภาพถ่ายซี-สแกนแสดงดังรูปที่ 5.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

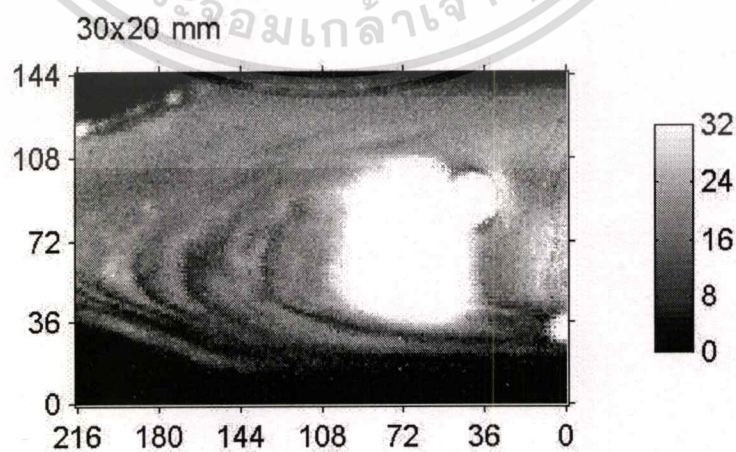
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 ชิ้นงานพลาสติกฟอที่ที่นำมาใช้ในการสร้างภาพซี-สแกน



(ก) ระยะนอกจุดโฟกัส



(ข) ระยะโฟกัส

รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายซี-สแกนของชิ้นงานในรูปที่ 5.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.27k จะสังเกตว่าในกรณีที่ปรับระยะโฟกัสและเลือกตำแหน่งความลึกในการสร้างภาพไม่ถูกต้องจะไม่สามารถสังเกตเห็นความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นในเนื้อชิ้นงานพลาสติกได้ แต่สังเกตเห็นรูโพรงหรือจุดบกพร่องในเนื้อชิ้นงานได้ ในกรณีรูปที่ 5.27x เมื่อเลือกระยะโฟกัสและตำแหน่งความลึกถูกต้อง เราจะสังเกตเห็นความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นเป็นลักษณะการไหลของพลาสติกซึ่งเป็นไปตามทิศการฉีดของพลาสติกเหลวดังรูปที่ 5.26 จากภาพถ่ายอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนทั้งในรูปที่ 5.25 และ 5.27 จึงเป็นข้อพิสูจน์สมมติฐานที่ได้ตั้งขึ้นว่าในชิ้นงานพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากเทคนิคการฉีดขึ้นรูป (injection mold plastic) จะมีความแตกต่างและความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นตลอดทั่วชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากความดัน (pressure) ในการอัดพลาสติกเหลว และเวลาในการเย็นตัวของพลาสติกเมื่อกระทบกับแม่แบบ และพารามิเตอร์อื่นอีกเป็นต้น โดยความไม่สม่ำเสมอของความหนาแน่นนี้สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ต่ำ จากภาพถ่ายแบบซี-สแกนตลอดระนาบ x-y ของชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่าความไม่สม่ำเสมอนั้นมีลักษณะเป็นโฟลว์แพทเทิร์นของพลาสติกเหลวที่แข็งตัวแล้ว



บทสรุป แนวทางในการพัฒนาและการประยุกต์

ในบทนี้เป็นส่วนสรุปผลการดำเนินงานของการออกแบบและพัฒนาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกน ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน รวมถึงผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นและการทดลองศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบสร้างภาพวัสดุชนิดต่างๆ ในส่วนท้ายของบทนี้ได้เสนอข้อเสนอแนะ แนวทางพัฒนาและปรับปรุง และการประยุกต์ใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยในอนาคตต่อไป

6.1 สรุปผลการวิจัยพัฒนาระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกและการทดสอบ

1. ระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่ได้พัฒนาขึ้นมา อาศัยหลักการสะท้อนกลับและทะลุผ่านเมื่อลำคลื่นอัลตราโซนิกกระทบกับบริเวณรอยต่อระหว่างสองวัสดุที่มีอิมพีแดนซ์ของเสียงแตกต่างกัน โดยนำขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับมาใช้สร้างเป็นภาพของวัสดุในแต่ละตำแหน่ง เนื่องจากสัญญาณแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน สัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน เป็นต้น ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำเอาข้อมูลขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนมาวิเคราะห์หาความแข็งแรงหรือความยืดหยุ่นของวัสดุ ภาพถ่ายซี-สแกนที่ได้จึงเหมาะต่อการใช้เพียงเพื่อบอกถึงความไม่ต่อเนื่องในเนื้อวัสดุ เช่น ความเป็นรูพรุน จุดบกพร่อง หรือรอยแตก รอยร้าว เป็นต้น
2. อุปกรณ์และชุดเครื่องมือของระบบสร้างภาพที่ได้พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย (1) หัวอัลตราโซนิกโพรบ ทำหน้าที่สร้างคลื่นอัลตราโซนิกจากสัญญาณไฟฟ้าและรับ/แปลงคลื่นอัลตราโซนิกเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีความถี่กลางอยู่ที่ 5.6 MHz มีระยะโฟกัสที่ 0.75 นิ้ว หรือประมาณ 19 มิลลิเมตร ลำคลื่นมีความกว้างประมาณ 0.902 มิลลิเมตร (2) พัลส์เซอร์และตัวรับ เป็นเครื่องมือสำหรับสร้างพัลส์กระตุ้นอัลตราโซนิกโพรบ มีพลังงานสูงสุดเท่ากับ 310 ไมโครจูล (μJ) และมีอัตราขยายภาครับสูงสุดที่ +59 dB หรือมีอัตราขยายประมาณ 1,000 เท่า (3) เครื่องตรวจจับสัญญาณพิก ใช้ทำหน้าที่แปลงพิกแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้เป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต โดยมีความละเอียด เท่ากับ 3.92 มิลลิโวลต์ (4) ชุดสแกนทางกลในแนว xyz และอ่างน้ำ มีระยะสแกนทั้งแนวแกน x y และ z เท่ากัน เท่ากับ 310 มิลลิเมตร (5) ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของชุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สแกน ทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในแนว x y และ z (6) ออสซิลโลสโคป ใช้มอเตอร์สัญญาณในขั้นตอนติดตั้งและก่อนเริ่มทดลองสร้างภาพของวัสดุ และ (7) เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำหรับสร้างภาพ พัฒนาด้วย MATLAB Release 11 ทำหน้าที่อ่านและแปลงเพิ่มข้อมูลที่เก็บไว้เป็นภาพถ่ายซี-สแกน

3. ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบความคลาดเคลื่อนของระบบสแกนตามแนวแกนตั้ง z ด้วยเทคนิคการวัดหาระยะทางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบพัลส์-สะท้อนกลับ ดังข้อมูลในตารางที่ 5.1 และ 5.2 และในรูปที่ 5.2 เมื่อนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่คลาดเคลื่อนไปกับระยะทางตามแนวระนาบ xy พบว่า ระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน x เท่ากับ 3.43 ± 0.32 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตร และมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน y เท่ากับ 59.6 ± 0.3 ไมโครเมตรต่อเซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเป็นบวกหมายความว่า ระยะห่างระหว่างอัลตราโซนิกโพรบกับชิ้นงานมีระยะทางมากขึ้นเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง และจากข้อมูลที่ได้ ในการทดลองสร้างภาพเพื่อไม่ให้เกิดผลรบกวนต่อระยะโฟกัสในระหว่างการตรวจสอบและสร้างภาพ จึงวางชิ้นงานวัสดุด้านยาวตามแนวแกน x เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่าและวางชิ้นงานวัสดุด้านกว้างตามแนวแกน y
4. ได้ทำการทดลองหาความละเอียดในการเคลื่อนที่ของชุดสแกนในแนว x y และ z เนื่องจากชุดสแกนในแนว x y และ z มีระยะพิทของแกนเกลียวเท่ากัน คือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร และใช้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ชุดเดียวกัน ดังนั้นระยะในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ทั้งสามแกนจึงมีระยะทางเท่ากัน จึงทดลองวัดความละเอียดในการเคลื่อนที่ของชุดสแกนเฉพาะแนวแกน z เนื่องจากสามารถวัดระยะทางได้ง่ายด้วยเทคนิคอัลตราโซนิกดังกล่าวมาแล้วในข้อที่ 3 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5.4 โดยระยะความละเอียดของการเคลื่อนที่เฉลี่ยคำนวณจากสมการ

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

ได้เท่ากับ 143.6 ไมโครเมตร โดยจากข้อมูลในตารางที่ 5.4 นำมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (standard deviation of mean value) จากสมการ

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad \text{และ} \quad s_{\bar{X}} = \frac{s}{\sqrt{N-1}}$$

ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความละเอียดในการสแกนเท่ากับ 32.8 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความละเอียดในการสแกนเฉลี่ยเท่ากับ 9.1 ดังนั้นระยะความละเอียดในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนอัลตราโซนิคโพรบของระบบสร้างภาพอัลตราโซนิคที่ได้พัฒนาขึ้นเท่ากับ 143.6 ± 9.1 ไมโครเมตร ที่ความเชื่อมั่น 68%

5. จากข้อ 2 เราทราบระยะโฟกัสของอัลตราโซนิคโพรบว่าประมาณ 19 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะโฟกัสที่ผู้ผลิตวัดจากการทดสอบกับวัตถุสะท้อนที่มีลักษณะเป็นจุดทรงกลม เพื่อศึกษาระยะโฟกัสของอัลตราโซนิคโพรบที่นำมาใช้กับชิ้นงานวัสดุที่ต้องการทดสอบ (มีรูปทรงลักษณะเป็นระนาบเรียบ) จึงได้ทดลองวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนกลับและระยะห่างระหว่างโพรบกับชิ้นงาน ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.7 โดยตำแหน่งที่มีขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนสูงที่สุดอยู่ในช่วงระยะระหว่าง 27.4 ถึง 31.6 มิลลิเมตร จากข้อมูลดังกล่าวสังเกตเห็นว่าขนาดแอมพลิจูดจะมีค่าสูงสุดและคงที่ในช่วงระยะประมาณ 4.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงระยะทางที่อัลตราโซนิคโพรบสามารถคลาดเคลื่อนได้โดยไม่ทำให้ผลของข้อมูลเสียหาย และจากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.7 ยังบอกข้อมูลเพิ่มเติมว่า เมื่ออัลตราโซนิคโพรบมีระยะห่างจากชิ้นงานเกินระยะโฟกัสออกไป แอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเป็นลักษณะเชิงเส้น เมื่อนำมาฟิต (fit) กับสมการเชิงเส้นได้ $y = -13.234x + 956.9$ โดยมี R^2 เท่ากับ 0.9983 (ค่า R^2 เป็นพารามิเตอร์ที่บอกเราถึงความถูกต้องของสมการที่นำมาฟิตกับข้อมูล ค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1.00 จะมีความถูกต้องมาก) โดย x คือระยะทางหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ y เป็นขนาดแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนหน่วยเป็นมิลลิโวลท์พีคทูพีค ส่วนในกรณีที่อัลตราโซนิคโพรบกับชิ้นงานมีระยะห่างใกล้กันมากขึ้น แอมพลิจูดของสัญญาณมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วและไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังสมการ $y = 637.58 \ln(x) - 1565$ โดยมี R^2 เท่ากับ 0.9914
6. จากผลการสร้างภาพถ่ายซี-สแกนของสเกลบนไม้บรรทัดเหล็กด้วยอัลตราโซนิคโพรบขนาดความถี่ 5 MHz และขนาดความถี่ 15 MHz เพื่อทดสอบความละเอียดในการตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องหรือจุดบกพร่องของชิ้นงาน จากรูปที่ 5.13 และ 5.14 พบว่า ภาพถ่ายซี-สแกนที่สร้างขึ้นจากหัวอัลตราโซนิคโพรบความถี่สูงสามารถสร้างภาพที่มีความคมชัดและความสามารถในการแยกแยะได้ดีกว่าหัวอัลตราโซนิคโพรบความถี่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของลำคลื่นอัลตราโซนิคจากโพรบความถี่สูง 15 MHz เล็กกว่า (จากการคำนวณ เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร) ในขณะที่โพรบความถี่ต่ำ 5 MHz มีลำคลื่นกว้าง 0.9 มิลลิเมตร
7. จากผลการทดลองในรูปที่ 5.13 และ 5.14 เมื่อเพิ่มเส้นแบ่งช่องเข้าไปในภาพถ่ายเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของระยะทางที่หาได้จากภาพถ่ายซี-สแกนกับระยะทางจริงของวัสดุ พบว่าภาพถ่ายที่ได้มีความถูกต้องของระยะทาง โดยคิดเป็นการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไป 36 สเต็ปจะเท่ากับระยะทางที่หัวโพรบเคลื่อนไป 5 มิลลิเมตร
8. จากผลการทดลองทดสอบการสร้างภาพของชิ้นงานที่รู้ตำแหน่งและขนาดของจุดบกพร่องด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นร่วมกับหัวโพรบความถี่ 5 MHz แสดงดังรูปที่ 5.10 และ 5.12 พบว่าภาพถ่ายที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้สามารถแยกแยะและให้รายละเอียดของตำแหน่งและขนาดของจุดบกพร่องได้ดีในขนาดความละเอียดของจุดบกพร่องมากกว่า 1 มิลลิเมตร ส่วนขนาดของจุดบกพร่องที่มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร พอจะสังเกตเห็นได้แต่ไม่ได้ความคมชัดและขนาดที่ถูกต้องเมื่อเทียบกับกรณีของความไม่ต่อเนื่องที่มีขนาดใหญ่

6.2 ปัญหาที่พบ แนวทางแก้ไขและพัฒนาระบบต่อไป

ปัญหาที่พบในระหว่างขั้นตอนการพัฒนาและทดสอบลักษณะสมบัติของระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิคแบบซี-สแกนที่ได้พัฒนาขึ้น ได้แก่

1. เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีความลาดเอียงตลอดแนวระนาบจากบทสรุปในหัวข้อ 6.1 ข้อที่ 3 ซึ่งส่งผลให้ข้อมูลที่ได้ลดความสามารถในการตีความและผลการวิเคราะห์ลง เนื่องจากพัลส์สะท้อนกลับจะไม่อยู่นิ่งกับที่ แต่จะเคลื่อนไปด้านหน้าหรือด้านหลังของเกตวินโดว์ (gated window) ที่เครื่องตรวจจับเปิดไว้ ดังนั้นการจะสร้างภาพของพัลส์สะท้อนกลับที่ความลึกนั้น จำเป็นต้องเปิดเกตวินโดว์ให้มีความกว้างครอบคลุมระยะที่พัลส์เคลื่อนที่ไป จึงส่งผลลบต่อระบบที่พัฒนาขึ้นซึ่งจะไม่สามารถสร้างภาพที่ตำแหน่งความลึกที่แตกต่างกันน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนตามแนว x และ y ได้ หมายความว่า เมื่อต้องการสร้างภาพของวัตถุที่มีระยะ 10×10 มิลลิเมตร จะต้องเปิดวินโดว์ไว้เป็นระยะประมาณ $59.6 + 3.43 = 63$ ไมครอน
2. ในด้านความละเอียดและระยะการสแกนอัลตราโซนิคโพรบ จากข้อมูลในตารางที่ 5.4 พบว่าระยะทางจริงที่ชุดสแกนเคลื่อนไปในแต่ละสเต็ปจะมีอยู่สองรูปแบบด้วยกันคือ เท่ากับประมาณ 110 ไมครอนและประมาณ 170 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการขับมอเตอร์แบบบริชเลตที่พัฒนาขึ้นมาเป็นแบบผสม ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วมอเตอร์ในแต่ละแกนจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางเฉลี่ยดังสรุปในหัวข้อ 6.1 ข้อที่ 4 เพื่อให้ภาพถ่ายที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ได้ทดลองพัฒนาระบบในการอ่านสัญญาณพัลส์จากตัวเข้าสัญญาณ (encoder) เพื่อเพิ่มความละเอียดในการสแกนภาพถ่าย โดยมีพัลส์เท่ากับ 1000 พัลส์ต่อการหมุนของมอเตอร์ 1 รอบ คิดเป็น 1 พัลส์ต่อระยะ 5 ไมครอน แต่เนื่องจากไม่สามารถควบคุมมอเตอร์ให้หยุดในตำแหน่งที่ต้องการได้ จึงเลือกใช้การสแกนแบบผสมดังได้กล่าวในบทที่ 4 เพื่อพัฒนาระบบให้มีความถูกต้องและความละเอียดสูงขึ้น จึงควรเปลี่ยนมอเตอร์ของชุดสแกนที่ใช้เป็นแบบสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งถึงแม้จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการขับสูงกว่า เคลื่อนที่ช้ากว่า แต่จะมีความสามารถในการเคลื่อนที่หัวโพรบที่ละเอียดขึ้น

3. จากการทดลองเราทราบแล้วว่าขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณไม่สามารถนำมาใช้ตีความทางฟิสิกส์ได้มาก จากเอกสารอ้างอิงและผลงานตีพิมพ์ต่างๆทางด้านฟิสิกส์ของคลื่นอัลตราโซนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่า ข้อมูลตัวสำคัญซึ่งสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของวัสดุได้แก่ ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในเนื้อชิ้นงาน โดยเราสามารถวัดความเร็วได้จากเวลาในการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ดังนั้นการพัฒนาชุดเครื่องมือขึ้นเองเพื่อสร้างภาพของเวลาในการเคลื่อนที่เพื่อนำมาแปลงเป็นภาพของความยืดหยุ่นที่แต่ละตำแหน่งของชิ้นงานจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจพัฒนาและวิจัยต่อไป

6.3 สรุปผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำระบบที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์สร้างภาพตัวเก็บวงจรรวมและพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป

1. ในการทดลองสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวม จุดประสงค์เพื่อเป็นการทดสอบระบบในการสร้างภาพโครงสร้างภายในเนื้อวัสดุที่ไม่สามารถมองเห็นได้ จำเป็นต้องทำลายชิ้นงานเสียก่อน จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างภาพโครงสร้างภายในของตัวเก็บวงจรรวม ได้โดยอาศัยสัญญาณสะท้อนกลับเนื่องจากความแตกต่างของวัสดุที่ประกอบอยู่ในแต่ละตำแหน่งของตัวเก็บวงจรรวม จากภาพบริเวณตรงกลางเป็นคานหรือแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีวงจรรวมอยู่และเนื่องจากความถี่ของหัวโพรบที่นำมาใช้มีความถี่ต่ำ ประมาณ 5 MHz ความละเอียดและการแยกแยะของภาพจึงมีคุณภาพต่ำ ไม่สามารถสร้างภาพของเส้นลวดวงจรบริเวณคานหรือจุดบัพร่องขนาดเล็กกระดัดไมครอนได้ สามารถสังเกตได้เพียงระดับมิลลิเมตร ดังนั้นภาพถ่ายซี-สแกนที่ได้จึงไม่ได้มีนัยสำคัญทางความหมายในเชิงวิทยาศาสตร์แต่อย่างใด เพียงแต่เป็นจุดเริ่มต้นในการวิจัยและพัฒนาสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
2. ในการทดลองสร้างภาพพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป โดยการตั้งสมมติฐานเบื้องต้นว่าในกระบวนการผลิตพลาสติกแบบฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปในแม่พิมพ์ พลาสติกเหลวจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ตามความดัน (pressure) ของแรงอัด จากฟิสิกส์ของของไหลความเร็วของพลาสติกเหลวที่แต่ละตำแหน่งจะไม่เท่ากันเนื่องจากความหนืด (viscosity) ของพลาสติก เมื่อพิจารณาว่าพลาสติกไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) บริเวณตรงกลางจะมีความเร็วสูงสุดและความเร็วของพลาสติกบริเวณขอบของแม่พิมพ์จะช้าที่สุด และเมื่อพลาสติกกระทบกับวัสดุแม่พิมพ์ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ พลาสติกเหลวจะแข็งตัวเป็นพลาสติกแข็ง ดังนั้นบริเวณตรงกลางน่าจะมีความหนาแน่นของพลาสติกมากกว่าบริเวณขอบ และการแข็งตัวของพลาสติกน่าจะมีลักษณะเป็นทิศทางการไหลหรือโฟลว์แพทเทิร์นเป็นแบบลามินาร์ เมื่อนำวัสดุชิ้นงานพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปมาสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ภาพถ่ายที่ได้น่าจะแสดงทิศทางการไหลหรือโฟลว์แพทเทิร์นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในแต่ละบริเวณ จากการทดลองในรูปแบบที่ 5.21 สรุปได้ว่าบริเวณส่วนตรงกลางของชิ้นงานมีสัญญาณสะท้อนกลับขนาดเล็กมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ประมาณ 1 มิลลิโวลต์) และได้ทดลองวัดด้วยอัลตราโซนิกโพรบความถี่ต่างกันดังรูปที่ 5.22 พบว่า เมื่อใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงไม่สามารถสังเกตเห็นสัญญาณสะท้อนกลับบริเวณตรงกลางของชิ้นงานพลาสติกได้ สัญญาณถูกลดทอนหมด ดังนั้นก็จะสร้างภาพโพลัมแพเทิร์นของพลาสติกจึงจำเป็นต้องใช้หัวโพรบความถี่ต่ำและเครื่องรับที่มีอัตราขยายสูง จากข้อมูลดังกล่าวได้ทำการทดลองสร้างภาพด้วยหัวโพรบขนาด 5 MHz ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5.25 และ 5.27 ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนต้นนั้นถูกต้อง

3. ภาพถ่ายซี-สแกนของชิ้นงานพลาสติก PBT ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วัสดุมีความหนาแน่นของโพลิเมอร์ไม่เท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน โดยบริเวณแกนกลางของชิ้นงานจะมีความหนาแน่นสูงกว่า ซึ่งหมายถึงมีคุณสมบัติเป็นผลึกหรือกึ่งผลึกมากกว่าบริเวณขอบของชิ้นงานซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า ดังนั้นการทดสอบความต้านทานแรงดึงหรือความแข็งแรงของวัสดุด้วยวิธีการทั่วไปตาม ASTM D 638 (ทดสอบแรงดึงของพลาสติกด้วยรูปทรงกระดูกหมา) เพื่อหาเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมของเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดในกระบวนการผลิตพลาสติกด้วยเทคนิคการฉีดขึ้นรูป จึงเป็นการวิเคราะห์อย่างหยาบหรือเป็นเพียงผลจากคุณสมบัติรวมของทั้งชิ้นงาน โดยผลที่วัดได้จะเป็นจริงเฉพาะกรณีของโครงสร้างของแม่แบบแบบทรงกระดูกหมาเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากวิธีสร้างภาพถ่ายซี-สแกนด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ภาพที่ได้แสดงให้เห็นการกระจายตัวที่แต่ละตำแหน่ง ดังนั้นจึงไม่ขึ้นกับรูปทรงของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ ยังมีข้อจำกัดในการตรวจสอบได้เพียงวัสดุชิ้นงานที่เป็นแผ่นเรียบ

6.4 แนวทางวิจัยและพัฒนาในอนาคต

1. จากบทสรุปในหัวข้อ 6.3 ข้อที่ 2 และ 3 จึงเป็นการเปิดโอกาสให้สามารถนำระบบสร้างภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาฟิสิกส์ของกระบวนการผลิตพลาสติกแบบฉีดขึ้นรูป โดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการผลิต เช่น ความดัน อุณหภูมิ เวลาในการเย็นตัวของพลาสติก และขนาดรูทางเข้าของแม่พิมพ์ เป็นต้น เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของพลาสติกเหลวที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิต โดยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ คือ ความสามารถในการหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตได้ ไม่ได้มองหาปัญหาจากข้อมูลภาพรวม (global information) ที่ได้จากการวัดในเชิงวิศวกรรมและทดสอบแบบทำลายชิ้นงาน นอกจากนั้นเทคนิคที่กล่าวถึงนี้น่าจะช่วยวิศวกร โพลิเมอร์และพลาสติกในการหาเงื่อนไขของการผลิตชิ้นงานที่ดีและเหมาะสมที่สุดได้อีกด้วย
2. การสร้างภาพด้วยอัลตราโซนิกแบบซี-สแกนที่ใช้หัวอัลตราโซนิกโพรบความถี่ต่ำจะมีสัมประสิทธิ์การลดทอนต่ำ ทำให้เปิดโอกาสในการประยุกต์นำขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณ

คลื่นอัลตราโซนิคมาคำนวณหาความหนาแน่นที่เปลี่ยนไปได้ เนื่องจากการลดทอนลงของ แอมพลิจูดจากผลของการดูดกลืนในวัสดุตัว ทำให้สามารถพิจารณาได้ว่า ขนาดแอมพลิจูด ของสัญญาณขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนและทะลุผ่านเท่านั้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสอง ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ของเสียง สมมติในกรณีที่ความเร็วเสียงในตัวกลางคงที่ เราจะสามารถคำนวณหาความแตกต่างของความหนาแน่นในเนื้อตัวกลางทดสอบได้

↓

↓

↓

↓

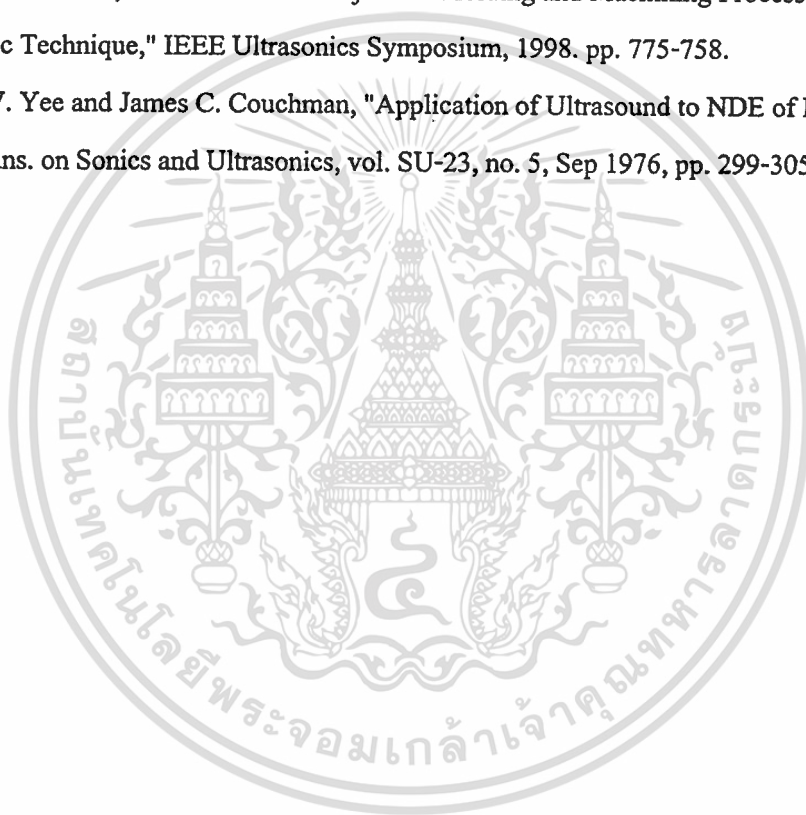


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] D.W. Van Krevelen. **Properties of Polymers**. 3rd Ed. New York : Elsevier. 1990.
- [2] Pual McIntire (editor). **Nondestructive Testing Handbook ; Volume 7 – Ultrasonic Testing**. 2nd Ed. New York : American Society for Nondestructive Testing. 1991.
- [3] Alan R. Selfridge. "Approximate Material Properties in Isotropic Materials", IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-32, no. 3, May 1985. pp. 381-394.
- [4] Heinrich Kuttruff. **Ultrasonics ; Fundamentals and Applications**. London : Elsevier 1991.
- [5] Gilmore R.S. and Howard P.J. "Method of Dynamic Thresholding for Flaw Detection in Ultrasonic C-scan Images." U.S. Patent no. 5608814. 1997.
- [6] Josef Krautkramer and Herbert Krautkramer. **Ultrasonic Testing of Materials**. 4th Ed. New York: Springer-Verlag. 1990
- [7] Jack Blitz and Geoff Simpson. **Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing**. London : Chapman & Hall. 1996.
- [8] Richard P. Feynman et. al., **The Feynman Lectures on Physics ; Commemorative Issue volume 2**. Canada : California Institute of Technology. 1989.
- [9] Lawrence E. Kinsler et. al., **Fundamentals of Acoustics**. 3rd Ed. Singapore : John Wiley & Sons. 1982.
- [10] Alan R. Selfridge, "Approximate Material Properties in Isotropic Materials," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, vol. su-32, no. 3, May 1985.
- [11] Lawrence E. Kinsler et. al., **Fundamentals of Acoustics**. 3rd Ed. Singapore : John Wiley & Sons. 1982.
- [12] ดุสิต เครื่องาม. **โซลิตอสเตทฟิสิกส์**. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2521
- [13] สุรวุฒิ กิจสัมพันธ์. "การวัดสมบัติทางกลของเหล็กหล่อด้วยคลื่นอัลตราโซนิก." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [14] Wichit Sirichote, "Investigation of the Orientation of Glass Fiber in Glass Fiber Reinforced Plastic through Shear Modulus Ultrasonic Measurements," TDO Quarterly, vol. 4, no. 1, 1995. pp. 36-41.

- [15] Wichit Sirichote et.al., "Poisson's Ratio of Sintered Al Measured by Ultrasonic Method," Report of Tohoku National Industrial Research Institute, no. 28, 1995. pp. 15-22.
- [16] S.H. Ong et. al., "Acoustic Microscopy Reveals IC Packaging Hidden Defects," IEEE Electronic Packaging Technology Conference, 1997. pp. 297-303.
- [17] Eurico J. D'Sa et. al., "Defect Detection in Ultrasonic Images," TENCON'89 Fourth IEEE Region 10 International Conference, 1989. pp. 577-580.
- [18] T. Wang and J. Saniie, "Evaluation of Ultrasonic C-scan Attenuation Image," IEEE Ultrasonics Symposium, 1991. pp. 791-794.
- [19] N. Nishiwaki et. al., "Measurement of Injection Molding and Machining Process Using Ultrasonic Technique," IEEE Ultrasonics Symposium, 1998. pp. 775-758.
- [20] Bill G.W. Yee and James C. Couchman, "Application of Ultrasound to NDE of Materials," IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, vol. SU-23, no. 5, Sep 1976, pp. 299-305.



ประวัติผู้เขียน

นายบัณฑิต คำรงค์ศักดิ์ เกิดวันที่ 10 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาโพลีเมรีนเจอร์ จากภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ปีการศึกษา 2540 หลังจบการศึกษาเข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัยของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยี กลุ่มบริษัทพรีเมียร์ เป็นระยะเวลา 1 ปี หลังจากนั้นเข้ารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สจล. จนถึงปัจจุบัน ปัจจุบันร่วมวิจัยกับห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีวัสดุสารกึ่งตัวนำ ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในโครงการ “Epitaxial Growth of Silicon Multi-layers for Solar Cell Application”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้