

การสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยร้าวจำลองในแผ่นโลหะ

AN EDDY CURRENT IMAGING SYSTEM FOR SIMULATED CRACK
DETECTION IN METAL PLATES

จิรายุต์ พูลขำ
JIRAYUT PULKHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยร้าวจำลองในแผ่นโลหะ

**AN EDDY CURRENT IMAGING SYSTEM FOR SIMULATED CRACK
DETECTION IN METAL PLATES**



จिरายุต พูลขำ

JIRAYUT PULKHAM

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์**

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**AN EDDY CURRENT IMAGING SYSTEM FOR SIMULATED CRACK
DETECTION IN METAL PLATES**

JIRAYUT PULKHAM

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยร้าว จำลองในแผ่นโลหะ
นักศึกษา	นายจิรายุส พูลขำ
รหัสประจำตัว	45061238
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. กิตติพล ชิตสกุล

บทคัดย่อ

ภาพรอยบกพร่องภายในวัสดุตัวนำซึ่งใช้เทคนิคกระแสไหลวน อาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่รูปไซน์ที่ขดลวดตัวนำ แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของค่าศักดาไฟฟ้าตกคล่อมขดลวดตัวนำนั้น ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กจากกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่องในเนื้อโลหะ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบภาพกระแสไหลวนเพื่อตรวจสอบรอยบกพร่องจำลองในวัสดุตัวนำ โดยใช้โพรบแบบขดลวดเดี่ยว พันบนแกนเฟอร์ไรต์ ค่าศักดาไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในแต่ละจุดจากการเคลื่อนโพรบตามแกน X-Y จำนวน 3,600 ครั้ง ได้พื้นที่การวัดเท่ากับ 40×40 มม. ข้อมูลค่าศักดาไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละจุดจะใช้ระดับสี 64 ระดับ เพื่อแสดงความแตกต่างเป็นข้อมูลภาพแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลของรอยบกพร่องจำลองที่วัดได้นั้น ได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่รูปไซน์ 150 mA_{p-p} ที่ความถี่ 1KHz. โดยทำการทดสอบกับแผ่นโลหะอลูมิเนียมหนา 3 มม. ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 40×40 มม. และมีรอยบกพร่องจำลองลักษณะต่างๆ ซึ่งระบบสร้างภาพกระแสไหลวนและขดลวดโพรบที่สร้างขึ้น สามารถแยกแยะระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองขนาด 2×20 มม. ภายในเนื้ออลูมิเนียมได้ใกล้สุด 12.5 มม. และสามารถตรวจจับรอยบกพร่องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างอากาศจำลองเท่ากับ 2.0 มม. ภายในเนื้ออลูมิเนียมได้ลึกถึง 1.5 มม. อีกทั้งยังสามารถบ่งบอกลักษณะของรอยบกพร่องจำลองได้ชัดเจน

Thesis	An Eddy Current Imaging System for Simulated Crack Detection in Metal Plates
Student	Mr. Jirayut Pulkham
Student ID.	45061238
Degree	Master of Engineering
Program	Electronic Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Dr. Kitiphol Chitsakul

ABSTRACT

An Eddy Current Imaging System using the principle of electromagnetism is presented. By applying AC current to a coil winding on a conductive material, amplitude of voltage dropped across the coil are changed due to induced magnetic fields from Eddy current. This thesis presents the design and Implementation of the Eddy Current Imaging System for detecting simulated cracks in metal plates. The system employs single probe with ferrite core and measures the voltage of 3,600 different points by changing the position of the X-Y stage corresponding measured area of 40×40 mm. The voltage values are monitored on the computer screen using 64 shades of color. The simulated cracks were observed by applying 150 mA_{p-p} of 1 KHz to the coil placed over aluminum plates (3 mm, 40×40 mm; thickness, width and length). By the method, the minimum space between two simulated fissures size of 2×20 mm. in the aluminum plate which the system could distinguish was 12.5 mm. The simulated air space of 1.5 mm. depth from the surface, with diameter of 2 mm. can be clearly verified the shapes.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร. กิติพล ชิตสกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ที่ให้คำแนะนำและวางแนวทางในการทำวิจัย ตลอดจนชี้แนะแนวทางแก้ปัญหาจนทำให้วิทยานิพนธ์
ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร. สิริเดช บุญแสง และ รศ. จิรวัดน์ ปานกลาง ประธานและ
กรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ ที่ชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหาและกำหนดขอบเขตการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้แนวทางและ
ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณอภิษฎ์ ฤกษ์รัตน์ นักวิจัยประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำใน
การแก้ปัญหาที่ทำการทดลอง ตลอดจนอำนวยความสะดวกเรื่องมีวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ด้วยดี
เสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนปริญญาโททุกท่าน สำหรับการแลกเปลี่ยนความรู้ ความช่วยเหลือ และ
กำลังใจที่ดีตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนในการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ ความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจที่มีให้เสมอมา จาก
ครอบครัวพูลจำ

ผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสร้างประโยชน์แก่ผู้อ่าน ไม่นานก็น้อย และหากมี
ข้อผิดพลาดประการใดต้องขออภัยไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

จิรายุส พูลจำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
1.4 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 พื้นฐานการสร้างภาพโดยใช้วิธีกระแสไหลวน.....	4
2.1 การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current Testing).....	4
2.2 พื้นฐานการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Principal of Eddy Current Testing).....	4
2.2.1 เครื่องมือพื้นฐาน.....	4
2.3 การเหนี่ยวนำกระแสไหลวน.....	6
2.4 สมบัติของกระแสไหลวนของกระแสไหลวน (Properties of Eddy Current).....	9
2.5 อิมพีแดนซ์ของโพรบ.....	13
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบกับสมบัติ ของชิ้นงานที่ตรวจสอบ.....	17
2.7 เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน.....	18
2.8 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว (Surface Probe).....	19
2.9 การวิเคราะห์สัญญาณ.....	21
2.9.1 ผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตรวจสอบ.....	21
2.9.2 ลักษณะของสัญญาณเมื่อมีรอยบกพร่อง.....	23
2.9.3 ลักษณะของสัญญาณที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนสมบัติของวัสดุ.....	25
2.9.4 รอยบกพร่องสอบเทียบ (Calibration Defect).....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบระบบสร้างภาพกระแสไหลวน (Eddy Current Imaging System Design).....	28
3.1 การออกแบบโพรบตรวจสอบ (Testing Probe).....	29
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine Wave Generator).....	31
3.3 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source).....	33
3.4 วงจรขยายสัญญาณกระแสสลับ (Amplifier Circuit).....	36
3.5 วงจรกรองความถี่เป็นช่วง (Band Pass Filter).....	37
3.6 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี (RMS-To-DC Converter Circuit).....	38
3.7 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog To Digital Converter).....	40
3.8 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ (Stepping motor driver circuit) สำหรับควบคุมการเคลื่อนเก็บข้อมูล.....	41
3.9 การ์ดอินเตอร์เฟส (Interface Card).....	42
3.10 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ (Stepping motor driver circuit) สำหรับปรับระยะ Lift off ของหัวโพรบในแนวแกน Z.....	46
3.11 อัลกอริทึมในการเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวน.....	49
3.12 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล.....	50
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	51
4.1 การทดสอบวงจรเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวน.....	51
4.1.1 การทดสอบสัญญาณของวงจรมกำเนิดสัญญาณไซน์.....	51
4.1.2 การทดสอบสัญญาณของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	52
4.1.3 การทดสอบสัญญาณของวงจขยายสัญญาณและ วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์.....	54
4.1.4 การทดสอบสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอส เป็นสัญญาณดีซี.....	55
4.2 การทดสอบสัญญาณจากระบบที่ออกแบบขึ้นเมื่อวัดจากแผ่น โลหะทดสอบ.....	57
4.2.1 การทดสอบปรับเปลี่ยนความถี่ให้กับหัวโพรบ.....	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การทดสอบปรับเปลี่ยนการจ่ายกระแสคงที่ให้กับหัวโพรบ.....	59
4.2.3 การทดสอบระยะห่างระหว่างโพรบกับชิ้นงาน (Lift off).....	62
4.2.4 การทดสอบหัวโพรบต่อความหนาของแผ่นโลหะ.....	64
4.2.5 การทดสอบหัวโพรบต่อระดับความลึกของรอยบกพร่อง บนแผ่นอลูมิเนียม.....	65
4.2.6 การทดสอบหัวโพรบต่อระยะความลึกที่พบช่องว่าง อากาศภายในเนื้ออลูมิเนียม.....	67
4.2.7 การทดสอบหาขนาดความกว้างของรอยบกพร่องและ ขนาดช่องว่างอากาศภายในแผ่นโลหะอลูมิเนียม.....	68
4.3 การทดสอบการสร้างภาพจากข้อมูลจำลองโดยวัดด้านที่เกิดรอยบกพร่อง.....	70
4.4 การทดสอบการสร้างภาพกระแสไหลวนโดยวัดจากด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง.....	73
4.4.1 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนที่มีระยะห่างระหว่างรอย บกพร่องจำลองที่แตกต่างกัน.....	74
4.4.2 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลอง ที่ระยะความลึกของช่องว่างอากาศที่แตกต่างกัน.....	80
4.4.3 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลอง ที่มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน.....	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	90
5.1 บทสรุป.....	90
5.2 บทวิจารณ์.....	92
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	92
บรรณานุกรม.....	93
ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ.....	94
ภาคผนวก ข แผนผังการทำงานและโปรแกรม.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของวัสดุทดสอบชนิดต่างๆ.....	12
3.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเข้าตู้ฟูทไอซี MAX 038.....	32
3.2 ค่าแรงดันเข้าตู้ฟูทของ LF351(U1) และค่ากระแสเข้าตู้ฟูทของวงจรจ่ายกระแส.....	35
3.3 ค่าความต้านทานของ Rselect Gain (R_G) ที่ใช้กำหนดอัตราขยาย.....	37
3.4 คุณสมบัติของการ์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลรุ่น ET-AD 12.....	41
3.5 คุณสมบัติของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET-8255.....	43
3.6 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET-8255.....	45
4.1 ค่าแรงดันเข้าตู้ฟูทที่ได้จากการทดสอบระยะ Lift off.....	63
4.2 ค่าแรงดันเข้าตู้ฟูทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.5- 6.0 มม.	65
4.3 ค่าแรงดันเข้าตู้ฟูทที่ได้จากการทดสอบหาระดับความลึกของรอยบกพร่อง.....	66
4.4 ค่าแรงดันเข้าตู้ฟูทที่ได้จากการทดสอบหาระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศ	67
4.5 การทดลองสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีขนาด ของรอยบกพร่อง 1- 4 มม.	71
4.6 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีระยะห่าง ระหว่างรอยบกพร่อง 10- 25 มม.	74
4.7 การทดสอบสร้างภาพจากรอยบกพร่องจำลองที่มีระยะความลึกช่องว่างอากาศ ที่อยู่ใต้ผิวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 0.5- 1.5 มม.	80
4.8 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีลักษณะ รูปร่างของรอยบกพร่องที่แตกต่างกัน.....	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องมือพื้นฐาน.....	5
2.2 ระบบการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนแบบต่างๆ.....	5
2.3 การเกิดกระแสไหลวน.....	6
2.4 รอยบกพร่องกับกระแสไหลวน.....	6
2.5 การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า.....	7
2.6 ความลึกในการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน.....	10
2.7 ความถี่และสมบัติของวัสดุที่มีผลกระทบต่อความลึกของกระแสไหลวน.....	11
2.8 ความลึกของชิ้นงานที่ทดสอบกับความถี่.....	12
2.9 ความสัมพันธ์ทางเฟสของปริมาณต่างๆในการไหลของกระแสไหลวน.....	13
2.10 ความสัมพันธ์ของความต้านทานและรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำของโพรบ.....	14
2.11 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างขดลวด โพรบกับชิ้นงานทดสอบ.....	15
2.12 วงจรสมมูลของขดลวด โพรบกับชิ้นงานทดสอบ.....	16
2.13 กราฟอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบ.....	17
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับสมบัติของชิ้นงาน.....	18
2.15 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบธรรมดา.....	19
2.16 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบพิเศษ.....	20
2.17 ผลของทิศทางต่อการตรวจจับของ โพรบพื้นผิว.....	21
2.18 ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์.....	22
2.19 ลักษณะของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง.....	23
2.20 ลักษณะการไหลของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง.....	23
2.21 ลักษณะของสัญญาณจากการตรวจสอบรอยบกพร่องแบบต่างๆ.....	24
2.22 สัญญาณจากรอยบกพร่องจริงและรอยบกพร่องสอบเทียบ.....	25
2.23 ลักษณะของสัญญาณจากการแปรเปลี่ยนสมบัติของวัสดุและความหนา ที่ความถี่ต่างกัน.....	26
2.24 มาตรฐานการสอบเทียบ.....	27
3.1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่อง จำลองที่อยู่ภายในแผ่น โลหะ.....	28
3.2 แกน X-Y ที่ใช้เคลื่อนแผ่นทดสอบ.....	29

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 โพรบที่ออกแบบขึ้น.....	30
3.4 โพรบที่ทำการสร้างขึ้น.....	30
3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์.....	31
3.6 วงจรขยายแบบอินเวอร์ตติ้งแอมป์.....	33
3.7 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	35
3.8 วงจรขยายสัญญาณกระแสสลับ.....	36
3.9 วงจรรองความถี่เป็นช่วงผ่าน.....	37
3.10 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซี.....	39
3.11 เอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.10 เมื่อวาดใหม่.....	40
3.12 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล รุ่น ET-AD12.....	40
3.13 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์สำหรับเคลื่อนแกน X-Y.....	42
3.14 ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟสรุ่น ET-8255.....	43
3.15 วงจรภายในของการ์ด ET-8255.....	44
3.16 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม.....	45
3.17 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ (Stepping motor driver circuit) สำหรับควบคุม การเคลื่อนหัววัดในแนวแกน Z.....	48
3.18 อัลกอริทึมในการเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวน.....	49
3.19 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูลและเคลื่อนแกน X-Y.....	50
4.1 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 1 KHz.....	51
4.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 10 KHz.....	52
4.3 บล็อกไดอะแกรมทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรถูกจ่ายกระแสคงที่.....	52
4.4 ค่าแรงดันตกคร่อม โหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 2- 10 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 6 ค่า.....	53
4.5 ค่าแรงดันตกคร่อม โหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 20- 100 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 6 ค่า.....	53
4.6 ค่ากระแสที่ไหลผ่าน โหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อม โหลดที่วัดได้ ในช่วงโหลด 2- 10 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 6 ค่า.....	54

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ ในช่วงโหลด 20- 100 โอห์ม ในย่านกระแสต่างๆ ทั้ง 6 ค่า.....	54
4.8 บล็อกไดอะแกรมทดสอบสัญญาณของวงจรขยายที่ผ่านวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์.....	55
4.9 สัญญาณอินพุทและเอาต์พุทของวงจรขยายสัญญาณจากขดลวดโพรบที่ความถี่ 1 KHz.....	55
4.10 บล็อกไดอะแกรมทดสอบสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอส เป็นสัญญาณดีซี.....	55
4.11 สัญญาณอินพุทและสัญญาณเอาต์พุทของวงจรอาร์เอ็มเอสทูดีซีที่ความถี่ 1 KHz.....	56
4.12 แสดงสัญญาณรบกวนที่ขึ้นสัญญาณดีซีที่เอาต์พุทของอาร์เอ็มเอสทูดีซี.....	56
4.13 ช่วงเวลาที่ใช้ในการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าแต่ละค่า.....	56
4.14 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบหัว โพรบ.....	57
4.15 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่ พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 0.5 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.....	58
4.16 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่ พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 1.0 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.....	58
4.17 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่ พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 1.5 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.....	58
4.18 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่ พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 2.0 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.....	59
4.19 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่ พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 2.5 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.....	59
4.20 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่าง อากาศภายในเท่ากับ 0.5 มม. โดยจ่ายกระแสสลับที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}	60
4.21 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่าง อากาศภายในเท่ากับ 1.0 มม. โดยจ่ายกระแสสลับที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}	60
4.22 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่าง อากาศภายในเท่ากับ 1.5 มม. โดยจ่ายกระแสสลับที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}	61
4.23 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่าง อากาศภายในเท่ากับ 2.0 มม. โดยจ่ายกระแสสลับที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}	61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบระยะห่างระหว่างหัวโพรบกับแผ่นอลูมิเนียม (Lift off).....	62
4.25 สัญญาณเอาต์พุตขณะวางโพรบบนแผ่นอลูมิเนียมห่าง 0 มม.	62
4.26 สัญญาณเอาต์พุตขณะวางโพรบบนแผ่นอลูมิเนียมห่าง 20 มม.	63
4.27 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบระยะ Lift off.....	64
4.28 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบความหนาของแผ่นอลูมิเนียม.....	64
4.29 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบความหนา แผ่นอลูมิเนียม 0.5-6.0 มม.	64
4.30 บล็อกไดอะแกรมทดสอบหาระดับความลึกของรอยบกพร่องภายในเนื้ออลูมิเนียม.....	66
4.31 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบหาระดับความลึก ของรอยบกพร่อง.....	66
4.32 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบหาระดับความลึกที่พบช่องว่างอากาศ ที่อยู่ภายในแผ่นอลูมิเนียม.....	67
4.33 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบหาระดับความลึก ที่พบช่องว่างอากาศ.....	68
4.34 บล็อกไดอะแกรมทดสอบหาขนาดความกว้างของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียม.....	68
4.35 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตจากการวัดขนาดของรอยบกพร่อง 1×20, 2×20, 3×20 และ 5×20 มม. โดยทำการวัดด้านที่มีรอยบกพร่อง.....	69
4.36 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบความกว้างของช่องว่างอากาศภายในแผ่นอลูมิเนียม.....	69
4.37 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตจากการวัดขนาดของรอยบกพร่อง 1×20, 2×20, 3×20 และ 5×20 มม. โดยทำการวัดด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง.....	69
4.38 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบการสร้างภาพจากด้านที่เกิดรอยบกพร่อง.....	70
4.39 ลักษณะของแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดสอบ.....	71
4.40 บริเวณตำแหน่งที่ทดสอบ.....	71
4.41 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 1 มม.	72
4.42 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 2 มม.	72
4.43 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 3 มม.	72
4.44 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 4 มม.	73
4.45 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบการสร้างภาพจากด้านที่ไม่เกิดรอยบกพร่อง.....	74

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 10 มม.....	75
4.47 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 12.5 มม.	76
4.48 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 15 มม.	77
4.49 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 20 มม.	78
4.51 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 25 มม.	79
4.52 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม โดยมีระยะความลึกที่พบรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 0.5 มม.	81
4.53 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม โดยมีระยะความลึกที่พบรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 1.0 มม.	82
4.54 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม โดยมีระยะความลึกที่พบรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 1.5 มม.	83
4.55 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งมีรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรไอ.....	85
4.56 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งมีรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรเอ็คซ์.....	86
4.57 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งมีรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรที.....	87
4.58 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งมีรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรแอล.....	88
ก1 เครื่องสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องจำลองในแผ่นอลูมิเนียม.....	95
ก2 สวิตช์ควบคุมการทำงานของวงจรที่อยู่ภายในระบบสร้างภาพกระแสไหลวน(ด้านหน้า).....	95
ก3 วงจรต่างๆ ที่อยู่ภายในระบบสร้างภาพกระแสไหลวน.....	96
ก4 จุดเชื่อมต่อต่างๆ สำหรับควบคุมแกน X-Y-Z และจุดเชื่อมต่อควบคุมการรับส่งข้อมูล.....	96

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก5 แกน X-Y-Z สำหรับเคลื่อนแผ่นโลหะอลูมิเนียมทดสอบและปรับระยะ Lift off.....	97
ก6 หน้าจอที่ใช้ควบคุมการทำงานและแสดงผลรอยบกพร่องจำลอง.....	97
ก7 แผ่นอลูมิเนียมที่มีรอยบกพร่องจำลองลักษณะต่างๆ ที่ใช้สำหรับทดสอบ.....	98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานในทางอุตสาหกรรมมากมาย ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีในด้านการผลิต หรือการตรวจสอบคุณภาพ

เทคโนโลยีด้านการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing: NDT) นับว่าเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อช่วยในการทดสอบวัตถุต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบแบบไม่ทำลายจะไม่ส่งผลกระทบต่อที่เสียหายให้เกิดกับชิ้นงานหรือวัตถุที่นำมาทดสอบ นับว่าเป็นการเพิ่มค่า Yield ในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงมีการวิจัยและค้นคว้าเทคโนโลยีด้านการทดสอบแบบไม่ทำลายเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] เพื่อสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current Testing: ET) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความนิยมอย่างสูงซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจสอบสภาพบกพร่องของโลหะประเภทที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Non Permeability) เช่น อลูมิเนียม ทองแดง และ สแตนเลส เป็นต้น ซึ่งโลหะเหล่านี้จะตรวจสอบส่วนบกพร่องได้ยากกว่าโลหะชนิดที่มีความเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจสอบหารอยบกพร่องจำลองในแผ่นโลหะชนิดนี้ขึ้นมา

ในการตรวจสอบรอยบกพร่องภายในของวัสดุ หรือภายในโครงสร้างต่างๆ ว่าเกิดรอยบกพร่องภายในหรือไม่นั้น การทำให้แตกหักแล้วสังเกตด้วยตาเป็นวิธีที่ต้องทำลายวัสดุ และเสียเวลา อีกทั้งอาจเกิดความผิดพลาดได้จากผู้ตรวจสอบ (Human Error) ยิ่งไปกว่านั้นการวัดระดับความแข็งแรงของวัสดุ โดยใช้การทดสอบเชิงกล (ส่วนใหญ่เป็นการทดสอบแบบทำลาย) เนื่องจากการทดสอบแบบทำลายนั้น จะทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายและไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีก ในเชิงอุตสาหกรรมจะพบว่า ทำให้เกิดความสูญเสียทั้งงบประมาณ (Cost) ปริมาณ (Volume) และเวลา (Cycle time) ดังนั้นเทคนิคการตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลายจึงเป็นอีกทางเลือกที่ได้รับการตอบรับอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม

การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Testing: NDT) ซึ่งสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลของอเมริกา (ASME) จะเรียกว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Examination : NDE) สามารถกล่าวได้ คือ เป็นการทดสอบวัสดุชิ้นงาน โดยไม่ทำลายให้เสียหายนั่นเอง กล่าวคือเป็นการทดสอบชิ้นงานที่เหมือนกับวัสดุ อุปกรณ์ หรือ โครงสร้าง โดยไม่ก่อให้เกิดรอยขีดข่วน การแยกส่วน หรือการแตกหักเสียหาย กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การตรวจสอบลักษณะสมบัติ สมรรถภาพ

โครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องภายใน โดยไม่ทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด หรือสมรรถนะ ซึ่งในงานนี้จะใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานที่ทำการทดสอบ เช่น แสง ความร้อน รังสี คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ไฟฟ้าหรืออำนาจแม่เหล็กซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความผิดปกติของโครงสร้างภายในหรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ แล้วใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายวัดลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์เหล่านี้ เพื่อประเมินความผิดปกติของโครงสร้างภายใน หรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ได้

ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเบื้องต้นนั้น ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์มาช่วยตรวจสอบเลยก็ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่เร็วที่สุดและประหยัดที่สุด คือ การตรวจสอบด้วยสายตาเป็นขั้นเริ่มแรก แต่ถ้าส่วนบกพร่องอยู่ในเนื้อโลหะจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และเทคนิคต่างๆ เข้ามาช่วย เช่น การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยอัลตราโซนิก, การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยผงแม่เหล็ก, การตรวจสอบรอยบกพร่องโดยใช้รังสี และการตรวจสอบโดยใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (การตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยกระแสไหลวน)

จากที่กล่าวมาข้างต้น การทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นใช้แทนการทดสอบแบบทำลายได้ แต่ไม่ได้หมายความว่า เมื่อทำการทดสอบแบบไม่ทำลายได้แล้ว การทดสอบแบบทำลายจะกลายเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นอีกต่อไป การทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นเป็นการใช้ลักษณะสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานทดสอบในการประเมินสภาพความบกพร่อง หรือความแข็งแรง ทว่าข้อมูลของการทดสอบแบบทำลายก็เป็นส่วนประกอบที่จำเป็นเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การเชื่อมแผ่นเหล็กทดสอบโดยวิธีการเดียวกับการเชื่อมโครงสร้างของสิ่งก่อสร้างแล้วใช้การทดสอบแบบทำลายกับแผ่นเหล็กทดสอบ (ซึ่งเรียกว่า Test Plate Testing) เพื่อเป็นการประเมินความแข็งแรงของรอยเชื่อม และเป็นการประกันความปลอดภัยของรอยเชื่อม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการศึกษาหลักการรวมถึงการออกแบบสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุ (Material Quality) เพื่อตรวจหารอยบกพร่องในเนื้อวัสดุตัวนำ (Conductive Material Defect) โดยเน้นโลหะประเภทที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Non Permeability) โดยอาศัยหลักการ การเกิดกระแสไหลวน เพื่อเป็นแนวทางในการนำหลักการดังกล่าวไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ด้านการศึกษาวัสดุศาสตร์ และด้านการวิเคราะห์หรือรอยบกพร่อง (defect analysis) เป็นต้น

1.3 ขั้นตอนของการศึกษา

ในการวิจัยนี้มีการศึกษาระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยร้าวในแผ่น

โลหะ เพื่อนำเสนอหลักการและทฤษฎีการสร้างข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจวัดแผ่นโลหะที่มีรอยบกพร่องที่จำลองขึ้นมา โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีการเกิดกระแสไหลวน ตลอดจนนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดรอยบกพร่องลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ
2. ออกแบบและสร้างระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องที่อยู่ในวัสดุ โดยวัสดุที่ทดสอบเป็นแผ่นโลหะอลูมิเนียม
3. ทดลองปรับเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ทดสอบกับแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่ความถี่ 1 KHz ถึง 10 KHz เพื่อพิจารณาผลของกระแสไหลวนที่แทรกเข้าไปในเนื้ออลูมิเนียมที่ระยะความลึกต่างๆ สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าศักดาไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของรอยบกพร่อง
4. ทดลองจ่ายค่ากระแสคงที่รูปไซน์ขนาด 100 mAp-p, 150 mAp-p และ 200 mAp-p เพื่อดูผลความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงค่าศักดาไฟฟ้า
5. ทดสอบการสร้างภาพกระแสไหลวน โดยใช้โพรบที่ออกแบบขึ้นมาทดลองสร้างภาพกระแสไหลวน โดยสังเกตผลของความลึกที่สามารถพบรอยบกพร่องและสังเกตผลการแยกแยะรูปร่างลักษณะของช่องว่างอากาศที่แตกต่างออกจากกันได้

1.4 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เรื่องระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยร้าวในแผ่นโลหะ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน การสร้างภาพโดยใช้หลักการเกิดกระแสไหลวน

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดของระบบเก็บข้อมูลจำลองที่สร้างขึ้น

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของระบบเก็บข้อมูลที่สร้างขึ้นเพื่อใช้วัดช่องว่างอากาศภายในโลหะตัวนำที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Non Permeability)

บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางการพัฒนา

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ การสร้างภาพโดยใช้หลักการเกิด กระแสไหลวน

2.1 การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Eddy Current Testing)

การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (ET) ซึ่งเป็นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่อาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนในเนื้อวัสดุที่ถูกตรวจสอบ และการสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไหลวนกับลักษณะของเนื้อวัสดุกระแสไหลวนถูกเหนี่ยวนำ โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กจากขดลวดภายในโพรบตรวจสอบ (Testing Probe) และในขณะเดียวกันจะถูกตรวจวัดด้วยการวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของขดลวดในโพรบตรวจสอบ เนื่องจากการเหนี่ยวนำกระแสไหลวนเกิดขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องสัมผัสระหว่างโพรบกับชิ้นงานโดยตรง แต่อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่จะทำการตรวจสอบได้ต้องเป็นตัวนำไฟฟ้า

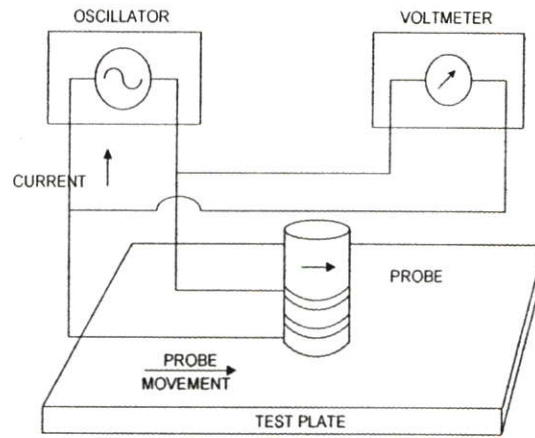
การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนเป็นเทคนิคที่ใช้ได้กว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับวัสดุแผ่นบาง สำหรับวัสดุหนา การตรวจสอบมักกระทำเพื่อตรวจสอบชั้นพื้นผิวเท่านั้น นอกเหนือจากการตรวจสอบเพื่อหารอยบกร่องแล้วการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนสามารถใช้ตรวจสอบคุณลักษณะทางกลและทางโลหะการ ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กได้โดยทางอ้อม นอกจากนี้ผลกระทบทางรูปทรง เช่น ความหนา ความโค้งช่องว่างระหว่างโพรบกับชิ้นงานก็จะมีผลต่อการไหลหรือเหนี่ยวนำของกระแสไหลวนและสามารถตรวจวัดได้

เนื่องจากมีตัวแปรสำคัญมากมายที่มีอิทธิพลต่อการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน ซึ่งก็เป็นทั้งข้อดีและข้อเสียของเทคนิคนี้ เพราะพารามิเตอร์ที่ไม่สำคัญอาจจะรบกวนหรือบดบังข้อมูลที่สำคัญทำให้แปลผลการตรวจสอบผิดพลาดได้ ดังนั้นตัวแปรทุกตัวที่มีผลกระทบต่อการใช้ของกระแสไหลวนหรืออิมพีแดนซ์ของโพรบจะต้องนำมาพิจารณาเสมอ จึงทำให้การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนค่อนข้างซับซ้อน และต้องการความชำนาญของผู้ปฏิบัติการ

2.2 พื้นฐานการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน (Principle of Eddy Current Testing)

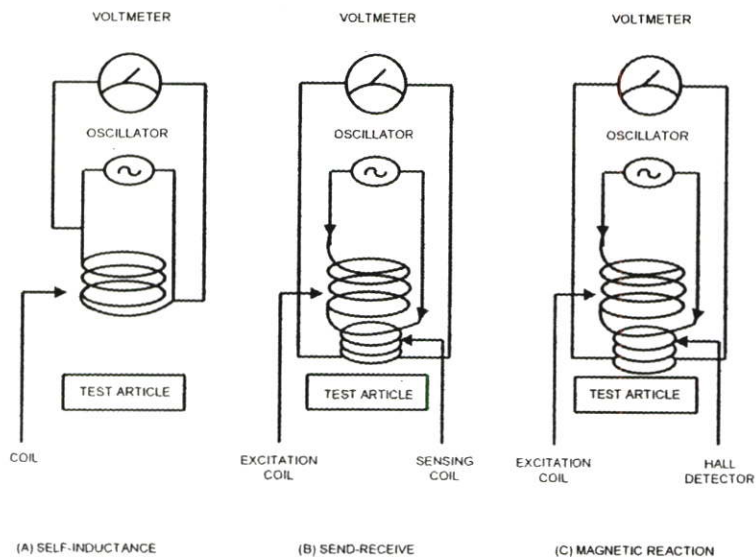
2.2.1 เครื่องมือพื้นฐาน

เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน ประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสสลับ หรือ ออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) โพรบซึ่งมีขดลวดเชื่อมต่อกับออสซิลเลเตอร์ และมีโวลต์มิเตอร์เพื่อใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดคั้งแสดงในรูปที่ 2.1



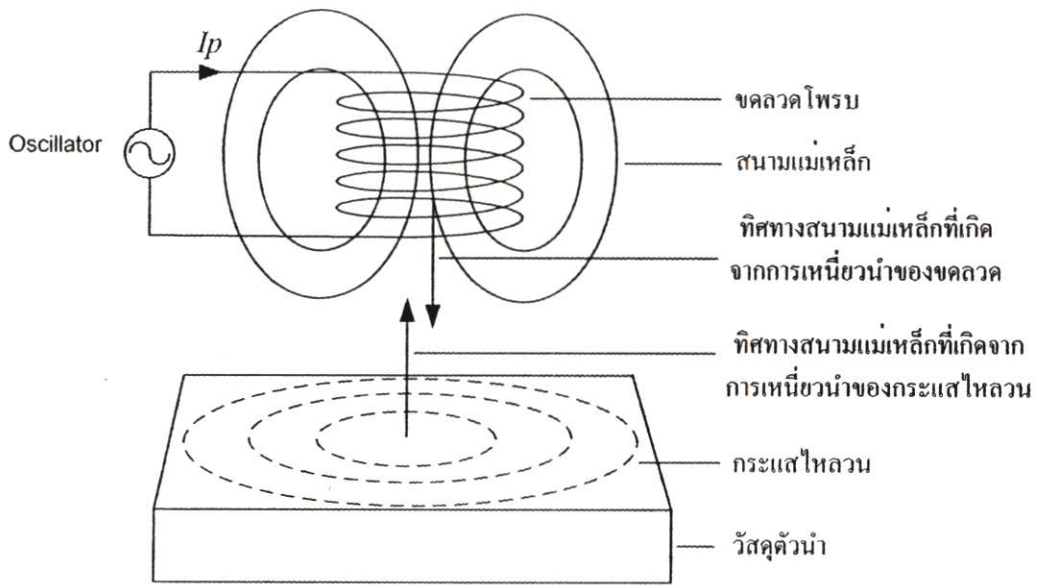
รูปที่ 2.1 เครื่องมือพื้นฐาน

ในการตรวจสอบสภาพความบกพร่องภายในเนื้อของวัสดุ ออสซิลเลเตอร์จะจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่รูปคลื่นไซน์หรือรูปพัลส์ [2] ซึ่งค่าความถี่ที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุที่ทำกรทดสอบ โดยขดลวดของโพรบตรวจสอบจะเป็นเส้นลวดทองแดงเคลือบฉนวนพันในรูปแบบที่เหมาะสม ซึ่งทั้งขนาดเส้นลวด จำนวนรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดต่างก็เป็นตัวแปรที่สำคัญต้องพิจารณา เพื่อให้สามารถใช้ในภาวะการตรวจสอบอย่างได้ผล ทั้งนี้ลักษณะของโพรบตรวจสอบอาจจะประกอบด้วย ขดลวดเพียงขดเดียวหรือขดลวดกระตุ้นแยกกับขดลวดรับ หรือมีขดลวดกระตุ้นกับตัวตรวจจับฟลักซ์แม่เหล็กแบบ HALL ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่โวลต์มิเตอร์จะใช้วัดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวด ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติของวัสดุที่ถูกตรวจสอบหรือการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์ระหว่างขดลวดกับวัสดุที่ถูกตรวจสอบ โดยที่การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้านี้จะประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) และเฟส (Phase) เทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด



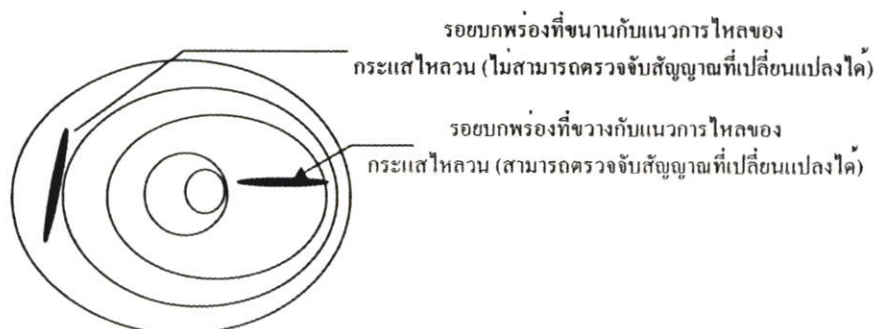
รูปที่ 2.2 ระบบการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนแบบต่างๆ

2.3 การเหนี่ยวนำกระแสไหลวน



รูปที่ 2.3 การเกิดกระแสไหลวน

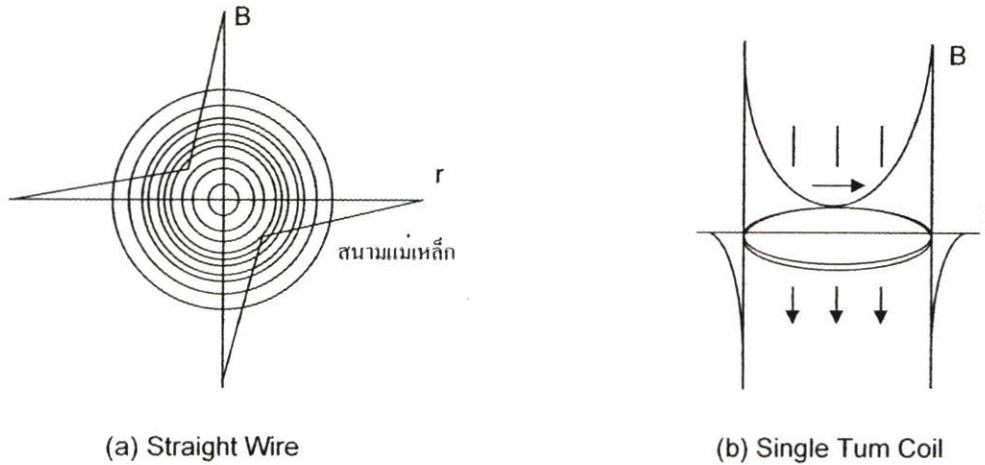
จากรูปที่ 2.3 เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปใกล้ชิ้นตัวนำ (ชิ้นงานทดสอบ) บริเวณรอบๆ ขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กกระทำต่อชิ้นตัวนำ เนื่องจากสนามแม่เหล็กของขดลวดนั้นเกิดจากกระแสสลับ ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อชิ้นตัวนำจะมีทิศทางและขนาดแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งในกรณีเช่นนี้จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อชิ้นตัวนำ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กบนตัวนำนี้ ในรูป 2.3 จะแสดงเป็นเส้นประไปรอบๆ เส้นแรงบนตัวนำซึ่งลักษณะของกระแสที่เกิดขึ้นบนตัวนำนี้เรียกว่า กระแสไหลวน ขนาดของกระแสไหลวนที่เกิดบนชิ้นตัวนำ ตลอดจนลักษณะการกระจายขึ้นอยู่กับความถี่ ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นตัวนำ ค่าแม่เหล็ก รูปร่างและขนาดของชิ้นตัวนำกระแสในขดลวด ระยะที่ห่างจากตัวนำ (Lift off) และการเปลี่ยนแปลงตามรอยบกพร่อง เช่น รอยแตกบนชิ้นตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รอยบกพร่องกับกระแสไหลวน

ดังนั้นจากการสังเกตลักษณะการแปรเปลี่ยนการไหลของกระแสไหลวนบนชิ้นวัสดุทดสอบก็จะทราบได้ว่ามีรอยบกพร่องหรือไม่

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำก็จะเกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) รอบๆ ตัวนำ ซึ่งทิศทางของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก B (Magnetic Flux Density) ภายในสนามแม่เหล็กนั้นจะขึ้นกับตำแหน่งและกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla:T) หรือ เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber/m² :Wb/m²) ดังในรูปที่ 2.5



(a) Straight Wire

(b) Single Turn Coil

รูปที่ 2.5 การกระจายของเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้า

ในวงจรไฟฟ้าใดๆ กระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปฐมภูมิ สามารถเขียนได้ในเทอมของแรงดันไฟฟ้า V_p และอิมพีแดนซ์ Z_p ของวงจรปฐมภูมิ

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} \quad (2.1)$$

ซึ่ง Z_p ประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้า R (Ohmic Resistance) และรีแอกแตนซ์ L (Reactance) จากการเหนี่ยวนำของขดลวด ดังสมการ (2.2)

$$Z_p = R + iX_L \quad (2.2)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.3)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) และ L คือค่าความเหนี่ยวนำในหน่วยเฮนรี (H)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนภายในโพรบซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงจรปฐมภูมิ จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์

$$I_p = I_o \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

โดยที่ I_o คือค่ากระแสสูงสุดหน่วยแอมแปร์ (A) และ ω คือค่าความถี่เชิงมุมโดย

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{Rad/s}) \quad (2.5)$$

จากรูปที่ 2.3 เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ_p เกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดเป็นสัดส่วนกับกระแส I_p และ จำนวนรอบของขดลวด N_p

$$\phi_p \propto N_p I_p \quad (2.6)$$

เนื่องจากกระแส I_p เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ก็ทำให้ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเช่นกัน การเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิ V_s ตามกฎของฟาราเดย์ คือ

$$V_s = -N_p \frac{d\phi_p}{dt} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\frac{d\phi_p}{dt}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลง ϕ_p เทียบกับเวลา

เนื่องจากกระแส I_p เปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์ด้วย

$$\phi_p = \phi_o \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิที่ถูกเหนี่ยวนำ มีค่าเป็น

$$V_s = -N_p \frac{d}{dt} (\phi_o \sin(\omega t)) \quad (2.9)$$

$$V_s = -N_p \omega \phi_o \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

เมื่อนำขดลวดโพรบเข้าใกล้ชิ้นงานซึ่งถูกตรวจสอบ แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทุติยภูมิ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ I_S ไหลในชิ้นงาน

$$I_S = \frac{V_S}{Z_S} \quad (2.11)$$

เมื่อ Z_S คือ อิมพีแดนซ์ของชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าทุติยภูมิ I_S นี้ถูกเรียกว่า กระแสไหลวน (Eddy Current) เนื่องจากลักษณะการไหลที่เป็นวงกลมกระแสไหลวนนี้ จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก ทุติยภูมิมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก

$$\phi_S \propto (-I_S) \quad (2.12)$$

ผลลัพธ์ของเส้นแรงแม่เหล็กในสภาพสมดุรอบๆ ขดลวดเมื่อมีชิ้นงานอยู่ใกล้ๆ

$$\phi_E = \phi_P - \phi_S \quad (2.13)$$

ซึ่งการไหลของกระแสไหลวนจะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดปฐมภูมิเปลี่ยนแปลง และทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลัพธ์ลดลง

$$Z_P \propto \phi_E \quad (2.14)$$

$$V_P = Z_P I_P \quad (2.15)$$

ซึ่งจากสมการ (2.14) และสมการ (2.15) แสดงว่า อิมพีแดนซ์ของขดลวดของโพรบวัด เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกควบคุม โดยกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นในชิ้นงาน

2.4 สมบัติการไหลของกระแสไหลวน (Properties of Eddy Current)

กระแสไหลวนเป็นกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำให้ไหลเป็นวงกลม ในระนาบตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งตามปกติมักจะไหลขนานกับขดลวด และพื้นผิวภายในขอบเขตของสนามแม่เหล็ก โดยความถี่ที่ใช้ตรวจสอบจะขึ้นอยู่กับสมบัติความนำไฟฟ้า และความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดความลึกของ

ค่ากระแสไหลวนที่แทรกเข้าไปในเนื้อของวัสดุ ทั้งนี้เนื่องจากว่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงตามความลึกจากผิวของวัสดุ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Skin Depth Effect” ดังสมการ 2.16 [3]

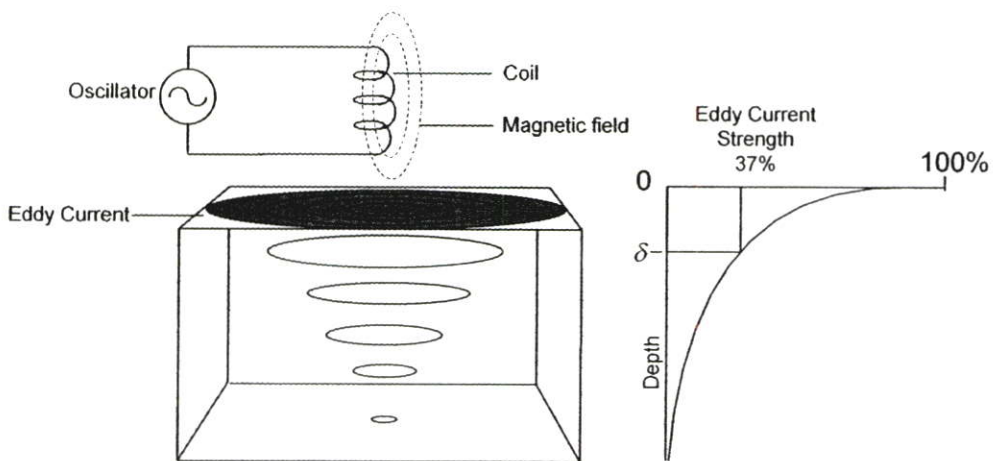
$$J_x = J_0 \exp(-x\sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad (2.16)$$

- เมื่อ J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสไหลวนที่ผิวของวัสดุในหน่วย A/m^2
 J_x คือ ความหนาแน่นกระแสไหลวนที่ตำแหน่ง x ในหน่วย A/m^2
 x คือ ค่าความลึกจากผิวของวัสดุ หรือความลึกห้วงผล (δ)
 π คือ ค่าคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 3.1429
 f คือ ค่าความถี่ที่ใช้ทดสอบ ในหน่วย Hz
 μ คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)
 σ คือ ความนำไฟฟ้า (Conductivity) ในหน่วยโมห์ (mho)

โดยที่ความหนาแน่นของกระแสจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่ง δ จะมีค่าเท่ากับ $1/e$ [3] เพราะฉะนั้นจากสมการที่ 2.16 ค่าความลึกมาตรฐานในการแทรกซึม (Standard Depth of Penetration: SDP) δ มีค่าเท่ากับ

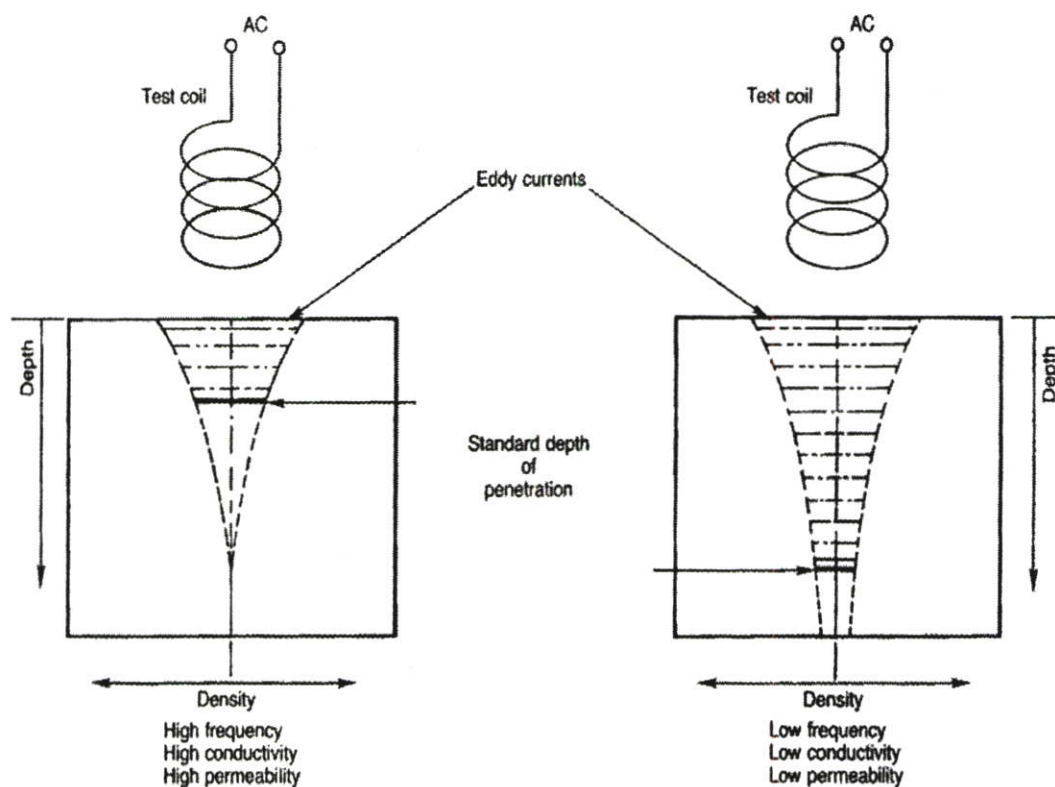
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \mu}} \quad \text{mm} \quad (2.17)$$

เมื่อ ρ คือความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) หน่วยไมโครโห์มเซนติเมตร ($\mu\Omega - cm$)



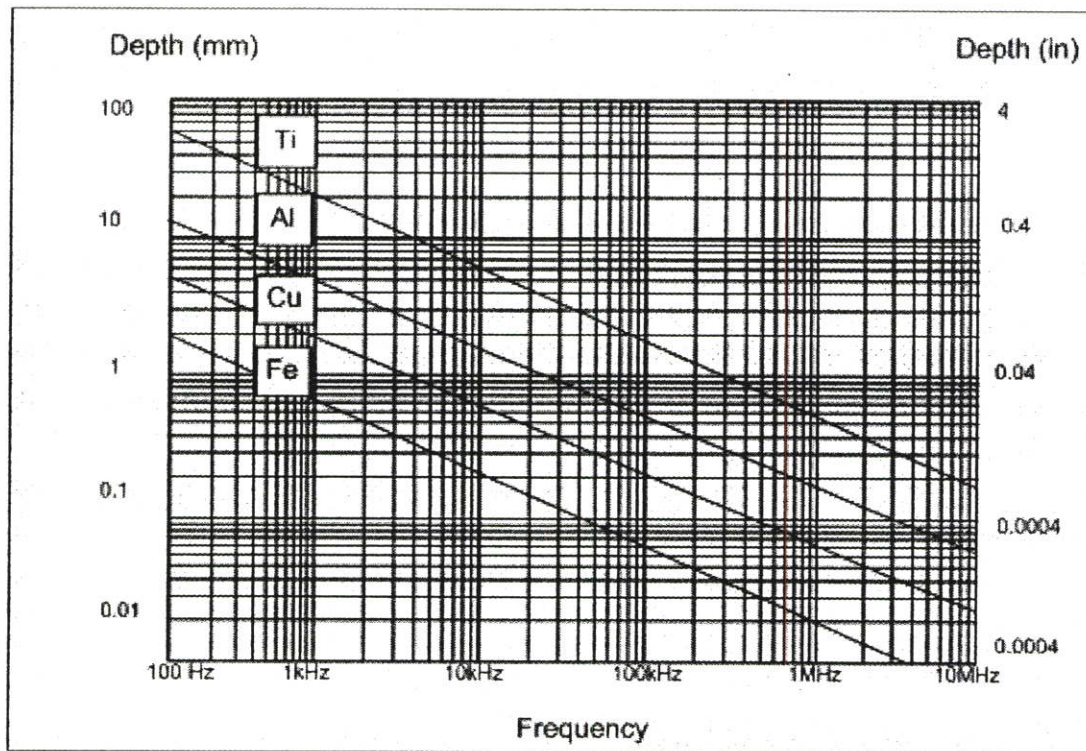
รูปที่ 2.6 ความลึกในการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน

ซึ่งจากรูปที่ 2.6 พบว่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนมีค่าสูงสุดที่ผิวชิ้นงานและลดลงเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะความลึก โดยที่ระยะความลึกมาตรฐานในการแทรกซึม 1δ ค่าความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะเหลือเพียง 37% [4] และที่ความลึกมากกว่า 3δ จะถือว่าไม่มีกระแสไหลวน ดังนั้นจึงใช้การปรับความถี่เพื่อกำหนดความลึกในการแทรกซึมของกระแสไหลวนที่ต้องการ โดย δ เป็นค่าความลึกจากผิวถึงตำแหน่ง x ซึ่งความหนาแน่นของกระแสไหลวนที่ตำแหน่ง x มีค่าประมาณ 37% ของ J_0 ดังนั้น δ จึงเป็นค่าที่ใช้แสดงค่าความลึกของการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็ก โดยค่าความถี่ที่ใช้ทดสอบ (f), ค่าความซาบซึมแม่เหล็ก (μ) และค่าความนำไฟฟ้าของชิ้นงานทดสอบ (σ) ต่างมีผลกระทบต่อระยะความลึกและความหนาแน่นของค่ากระแสไหลวน ดังรูปที่ 2.7.



รูปที่ 2.7 ความถี่และสมบัติของวัสดุที่มีผลกระทบต่อความลึกของกระแสไหลวน

ดังนั้นการตรวจสอบโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจหารอยบกพร่อง ที่มีระยะความลึกมากๆ ไปจากค่าความลึกดังกล่าวเป็นหลายๆ เท่าย่อมเป็นไปได้ยาก จำเป็นต้องกำหนดค่าของความถี่ (f) เพื่อใช้ในการตรวจสอบให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะต่างๆ ด้วย ดังในรูปที่ 2.8 [5] แสดงค่าความลึกในการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็กซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่าความถี่ของวัสดุชนิดต่างๆ ส่วนสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าสภาพความต้านทาน (ρ) และค่าความซาบซึมแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) ของวัสดุชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.1



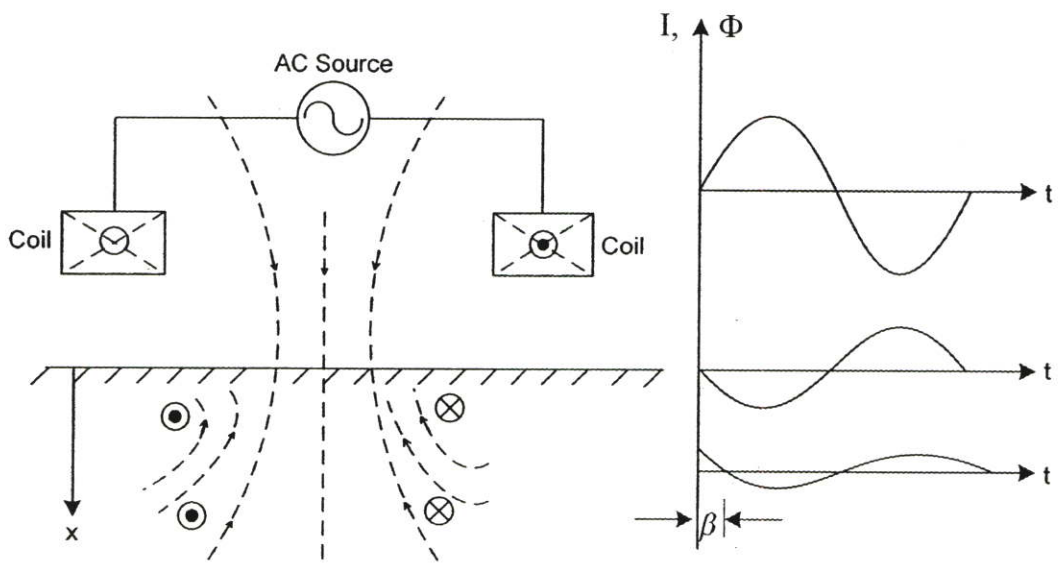
รูปที่ 2.8 ความลึกของชิ้นงานที่ทดสอบกับความถี่

ตารางที่ 2.1 สมบัติของวัสดุทดสอบชนิดต่างๆ

วัสดุทดสอบ	ค่าสภาพความต้านทาน ρ ($\mu\Omega - cm$)	ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก สัมพัทธ์ μ_r
กราไฟต์	800	1
ปรอท	95.8	1
เหล็กสแตนเลส	70	1
เซอร์โคเนียม	50	1
ยูเรเนียม	28.8	1
ตะกั่ว	22	1
อะลูมิเนียม	4.1	1
ทองแดง	1.72	1
เหล็กบริสุทธิ์	11	250

นอกจากความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงตามความลึกแล้ว กระแสไหลวนยังมีเฟสช้าลงตามความลึกอีกด้วย ซึ่งเฟสจะช้าลงเป็นฟังก์ชันเส้นตรงตามระยะลึก ดังแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ทางเฟสของปริมาณต่างๆ ในรูปที่ 2.9 เฟสที่ช้าลงของกระแสไหลวนตามระดับความลึกเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ทำให้การทดสอบ ด้วยกระแสไหลวนสามารถที่จะตรวจสอบ

คุณสมบัติได้หลายอย่างทั้งนี้เนื่องจากว่า สัญญาณที่เกิดจากรอยบกพร่องจะมีการเปลี่ยนทั้งแอมพลิจูดและเฟส ซึ่งมุมเฟสที่ความถี่ 1δ มีค่าประมาณ 57 องศา [6]



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ทางเฟสของปริมาณต่างๆ ในการไหลของกระแสไหลวน

2.5 อิมพีแดนซ์ของโพรบ

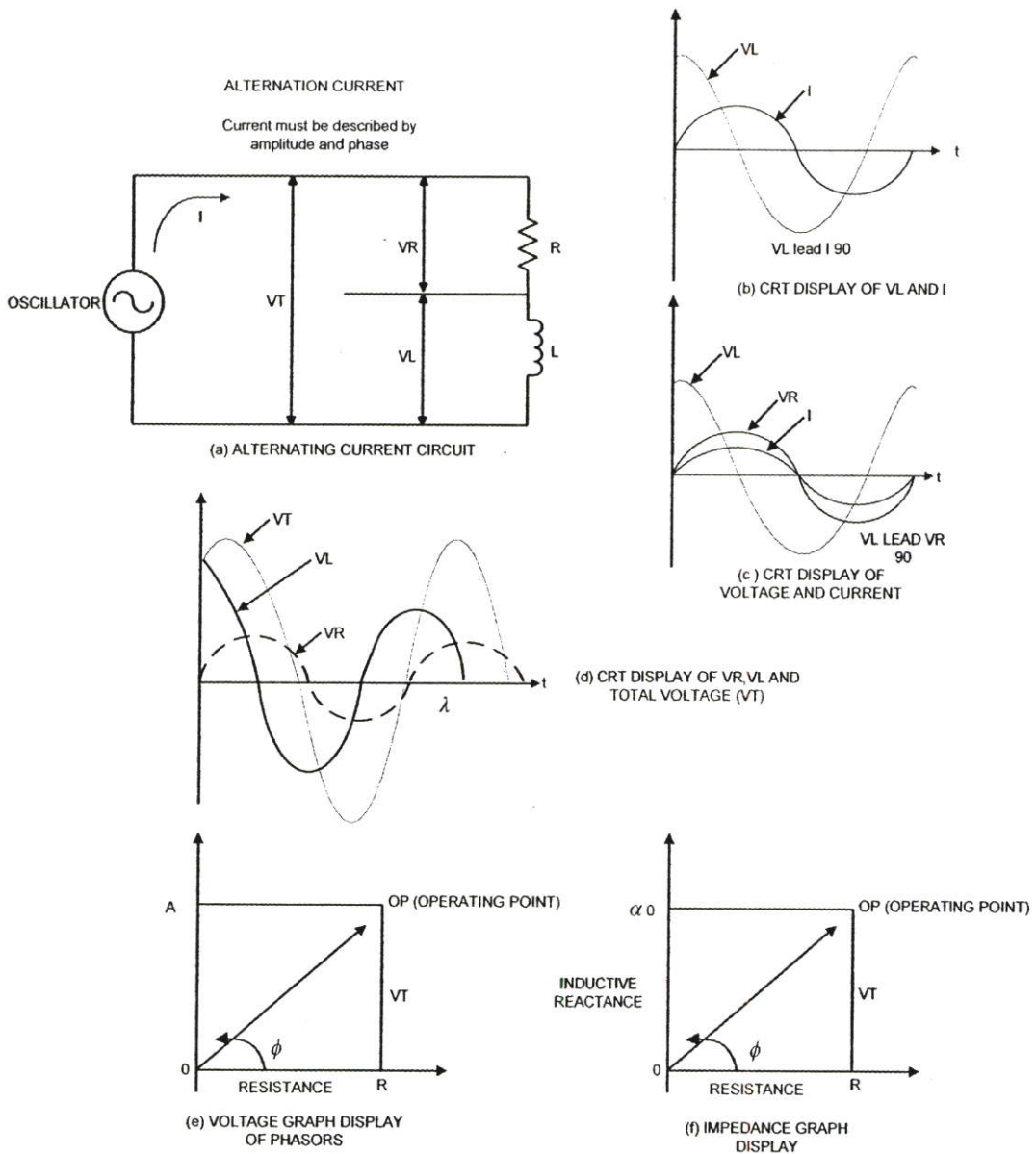
ขดลวดของ โพรบมีอิมพีแดนซ์เป็นปริมาณเชิงซ้อน $Z = R + iX_L$ [6] เมื่อนำไปวิเคราะห์ในวงจรปฐมภูมิที่เป็นวงจรกระแสสลับ แรงดันไฟฟ้า V_R คร่อมความต้านทาน R จะมีเฟสตรงกับกระแสที่ไหล แต่แรงดันไฟฟ้า V_L ที่คร่อมอินดักเตอร์ L จะมีเฟสนำกระแสที่ไหลอยู่ 90 องศา โดยใช้กระแสเป็นหลักแรงดันไฟฟ้ารวม V_T จะมีเฟสนำกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าอยู่ 90 องศา

$$V_T = V_R + iV_L = I_R + iX_L = I(R + i\omega L) \tag{2.18}$$

และ

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_L}{V_R} = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \tag{2.19}$$

ซึ่งความสัมพันธ์เหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 โดยที่รูปที่ 2.10(e) คือแผนรูปภาพเฟสเซอร์ (phasor) ของแรงดันไฟฟ้า และรูปที่ 2.10(f) คือแผนภาพเฟสเซอร์ของอิมพีแดนซ์ของโพรบ ทั้งนี้ความยาวของเวกเตอร์ OP คือขนาดของอิมพีแดนซ์



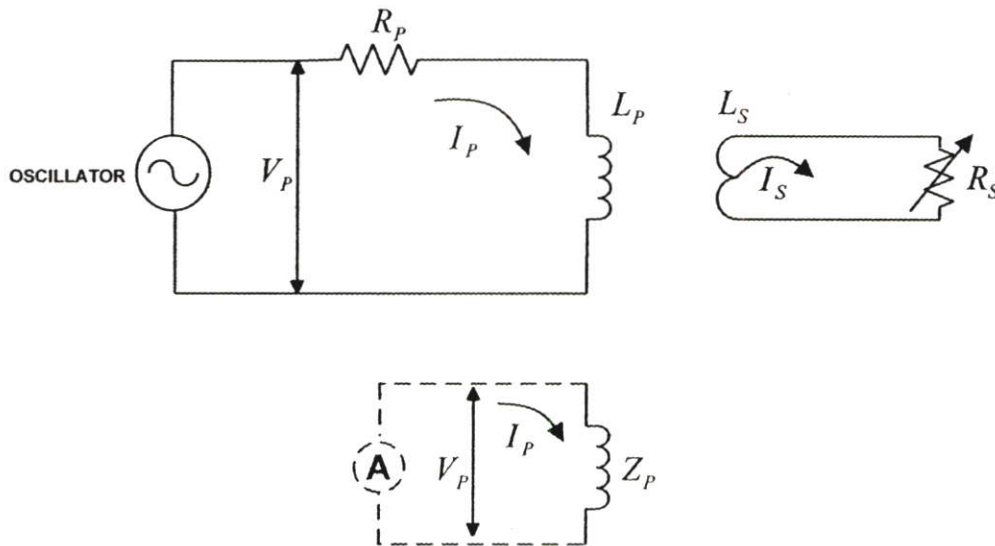
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความต้านทานและรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำของโพรบ

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \Omega \quad (2.20)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานหรือรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำ ก็จะทำให้ตำแหน่งจุดปลายของเวกเตอร์ OP (Operating Point) เปลี่ยนไป

ขดลวดของโพรบตรวจสอบ เมื่อนำมาใกล้ชิ้นงานสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นขดลวดปฐมภูมิ และจะเหนี่ยวนำกระแสไหลวนในชิ้นงาน ซึ่งเปรียบเสมือนขดลวดทุติยภูมิที่มีเพียงหนึ่งรอบ กระแสไหลวนจะเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งต้านกับสนามแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งมีวิธีการที่ใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ครอบคลุมขดลวดปฐมภูมิและวิธีการรับส่ง ซึ่งใช้

ขดลวดสองขด โดยที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำจากขดลวดตัวส่ง และจะถูกตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดตัวรับขดที่สอง ดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 2.11



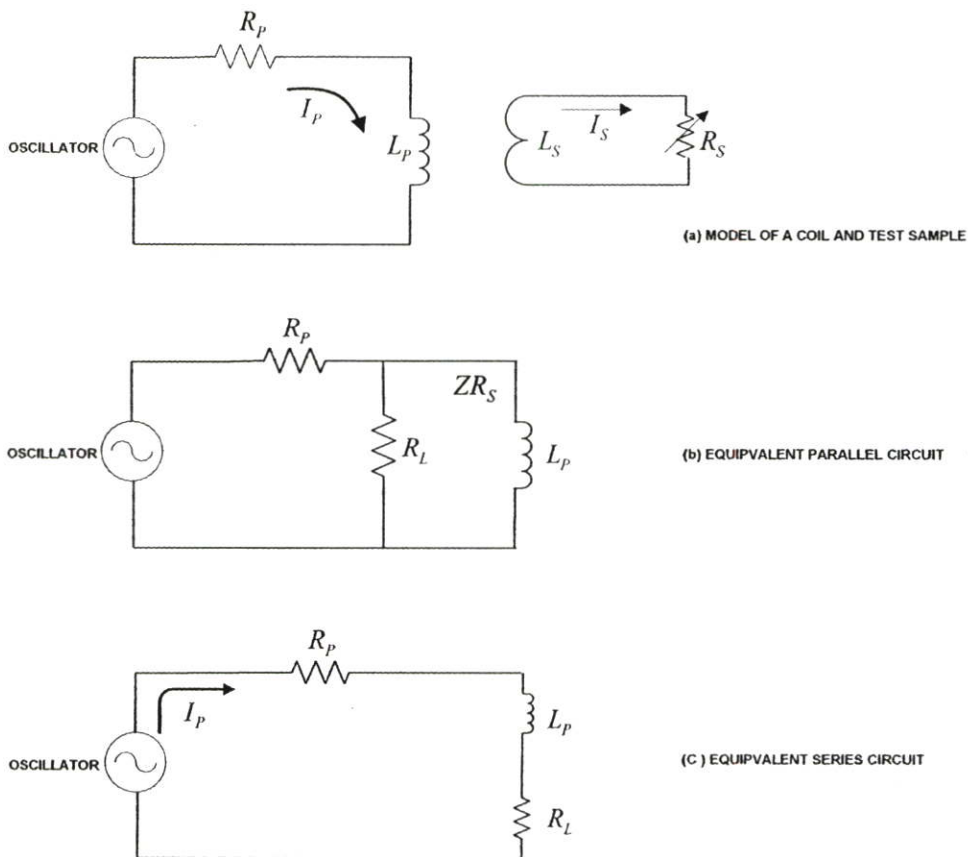
รูปที่ 2.11 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างขดลวด โพรบกับชิ้นงานทดสอบ

วงจรสมมูลซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิ (ขดลวดของ โพรบ) และขดลวดทุติยภูมิ (ชิ้นงานตรวจสอบ) ดังรูปที่ 2.12(a) สามารถทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายขึ้นโดยการศึกษาจากวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ซึ่งโหลดของวงจรทุติยภูมิจะแสดงอยู่ในลักษณะของโหลดค่าความต้านทานขนานที่ต่อกับรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำของขดลวด โพรบ ดังรูปที่ 2.12(b) วงจรนี้เป็นแบบจำลองโดยประมาณของขดลวดโพรบเมื่ออยู่ใกล้ตัวนำไฟฟ้า โดยสมมุติว่าเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจากขดลวดปฐมภูมิเชื่อมต่อกับชิ้นงานที่ตรวจสอบอย่างสมบูรณ์ และยังสมมุติอีกว่าไม่มีการลดทอนจาก “Skin Effect” หรือไม่มีเฟสแตกต่างกันตลอดความหนาของชิ้นงานซึ่งค่าโหลดของความต้านทาน ทุติยภูมิ R_s ถูกถ่ายโอนไปยังวงจรขดลวดปฐมภูมิ โดยอัตราส่วนของจำนวนขดลวดกำลังสอง $(N_p / N_s)^2$ และ $N_s = 1$ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลแบบขนานมีค่า

$$Z_p = \frac{(N_p^2 R_s)(iX_o)}{N_p^2 R_s + iX_o} \quad (2.21)$$

เมื่อ $X_o = \omega L_o$ คือ รีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำในอากาศ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้ยังสามารถแปลงสภาพต่อไปเป็น

$$Z_p = \frac{N_p^2 R_s^2 X_o^2}{(N_p^2 R_s)^2 + X_o^2} + \frac{(N_p^2 R_s)^2 X_o}{(N_p^2 R_s)^2 + X_o} \quad (2.22)$$

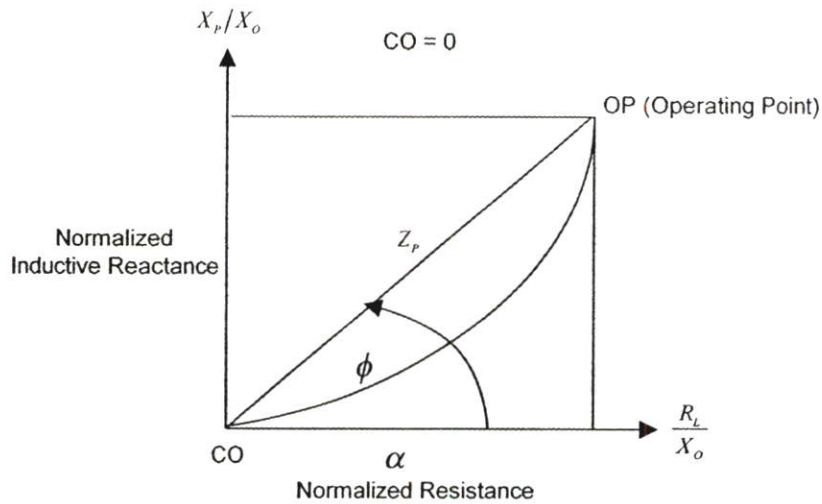


รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของขดลวดโพรบกับชิ้นงานทดสอบ

ซึ่งสามารถพิจารณาในลักษณะของวงจรอนุกรม โดยมีความต้านทาน R_L และรีแอกแตนซ์จากการเหนี่ยวนำ X_L นั้นเอง ดังนั้นวงจรอนุกรมในรูปที่ 2.12(c) จึงสมมูลกับวงจรขนานในรูปที่ 2.12(b) ซึ่งใช้แทนอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบได้สำหรับโพรบ และเครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนที่เงื่อนไขการตรวจสอบแต่ละชุดจะมีค่าคงที่ต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การตรวจสอบในเงื่อนไขต่างๆ สามารถเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นจึงต้องทำให้อิมพีแดนซ์เป็นบรรทัดฐานเทียบกับ X_o นั่นคือ

$$\frac{Z_p}{X_o} = \frac{\left(\frac{X_o}{N_p^2 R_s}\right)}{1 + \left(\frac{X_o}{N_p^2 R_s}\right)^2} + i \frac{1}{1 + \left(\frac{X_o}{N_p^2 R_s}\right)^2} \tag{2.23}$$

จะพบว่า ทางเดินของนอร์แมลไลซ์อิมพีแดนซ์ (Normalized Impedance) มีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $(X_p / X_o, R_L / X_o)$ และรัศมีเท่ากับ $|Z_p|$ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 แผนภาพทางเดินของอิมพีแดนซ์จะแสดงให้เห็นถึง ค่าความสัมพันธ์ของคุณลักษณะของชิ้นงานต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.13 กราฟอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบ

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบกับสมบัติของชิ้นงาน ที่ตรวจสอบ

ผลกระทบของการแปรเปลี่ยนของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการตรวจสอบอิมพีแดนซ์ของโพรบสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ Z_p ของวงจรสมมูล ถ้าพารามิเตอร์ใดทำให้เทอมของ $X_o / N_p^2 R_s$ มีค่าเพิ่มขึ้นจุดทำงานหรือตำแหน่งบนกราฟอิมพีแดนซ์จะเคลื่อนที่ตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ และถ้าพารามิเตอร์ใดทำให้เทอม X_o / N_p^2 มีค่าลดลงจุดทำงานจะเคลื่อนที่ขึ้นตามเส้นโค้งของอิมพีแดนซ์ ซึ่งความสัมพันธ์นี้มีประโยชน์ในเชิงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนั้นอาจสรุปได้โดยการแปรค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ก) เพิ่มความต้านทานของชิ้นงาน R ทำให้เทอม $X_o / N_p^2 R_s$ ลดลง ดังนั้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ขึ้นตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูป 2.14(A)

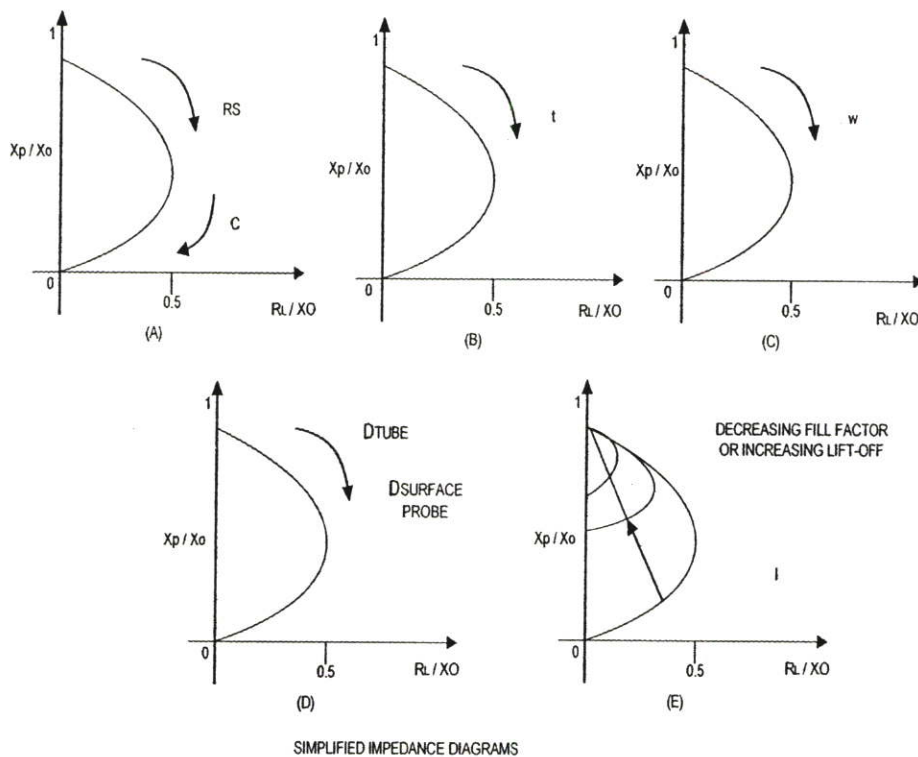
ก1) เนื่องจาก $R_s = \rho l / A$ เมื่อ l คือระยะทางการไหลของกระแสไหลวน และ A คือพื้นที่หน้าตัดของการไหลของกระแส ดังนั้น $\rho = Constant \times R_s$ นั่นคือ ถ้าค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ขึ้นตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ และถ้าเป็นความนำไฟฟ้าก็จะเข้าไปในทางตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.14(A)

ก2) สำหรับท่อผนังบางหรือโลหะความหนา t ซึ่ง $R_s = \rho l / A = \rho \pi D / tw$ เมื่อ D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบ และ w คือ ความกว้างของท่อโลหะจะได้ว่า $R_s = Constant / t$ ดังนั้นถ้าความหนาเพิ่มขึ้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ลงตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.14 (B)

ข) เพิ่มความถี่ในการตรวจสอบเทอม $X_o / N_p^2 R_s = \omega L_o / N_p^2 R_s$ จะเพิ่มขึ้นดังนั้นจุดทำงานจะเคลื่อนที่ลงตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.14(C)

ก) เพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางลวดโพรบหรือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเนื่องจาก $L_O = \text{Constant} / D$ และ $R_S = \text{Constant} \times D$ ดังนั้น $\omega L_O / N_p^2 R_S = \text{Constant} \times D$ จะเพิ่มขึ้น นั่นคือจุดทำงานจะเคลื่อนที่ลงตามเส้นโค้งอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 2.14(D)

ง) ถ้าการเชื่อมต่อทางเส้นแรงแม่เหล็กกระหว่างโพรบกับชิ้นงานที่ตรวจสอบลดลง ซึ่งอาจเกิดจากระยะห่างของโพรบกับชิ้นงานมากขึ้น หรืออัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดโพรบ (โพรบอยู่ภายใน) หรืออาจเกิดจากอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดโพรบต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อโลหะกลม (Fill Factor) ลดลง โดยขนาดของทางเดินอิมพีแดนซ์ครึ่งวงกลมจะมีขนาดเล็กลง เมื่อค่าของ $X_O / N_p^2 R_S$ เพิ่มจากศูนย์สู่ค่าอนันต์ ดังรูปที่ 2.14 (E)



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับสมบัติของชิ้นงาน

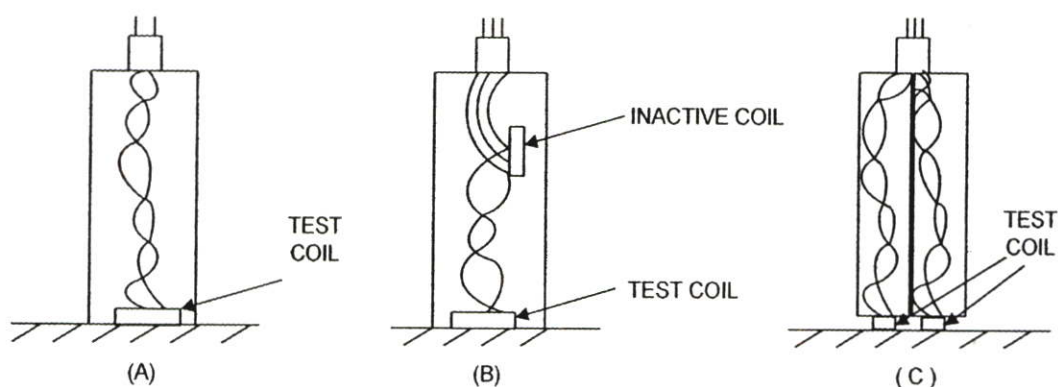
2.7 เครื่องมือตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

ขณะที่ข้อมูลระดับแรงดันที่ได้จากการตรวจสอบชิ้นงาน โดยขดลวดโพรบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กรอบๆ โพรบ ถ้ารักษาระดับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิให้คงที่สม่ำเสมอ การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบก็สามารถตรวจวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดโพรบได้ ($V_p = I_p Z_p$) ในการตรวจสอบส่วนมากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบ หรือแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดโพรบมีค่าน้อยมากใน

ขณะที่โพรบเคลื่อนผ่านส่วนบกพร่อง ซึ่งโดยปกติทั่วๆ ไปการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันน้อยกว่า 1%

2.8 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว (Surface Probes)

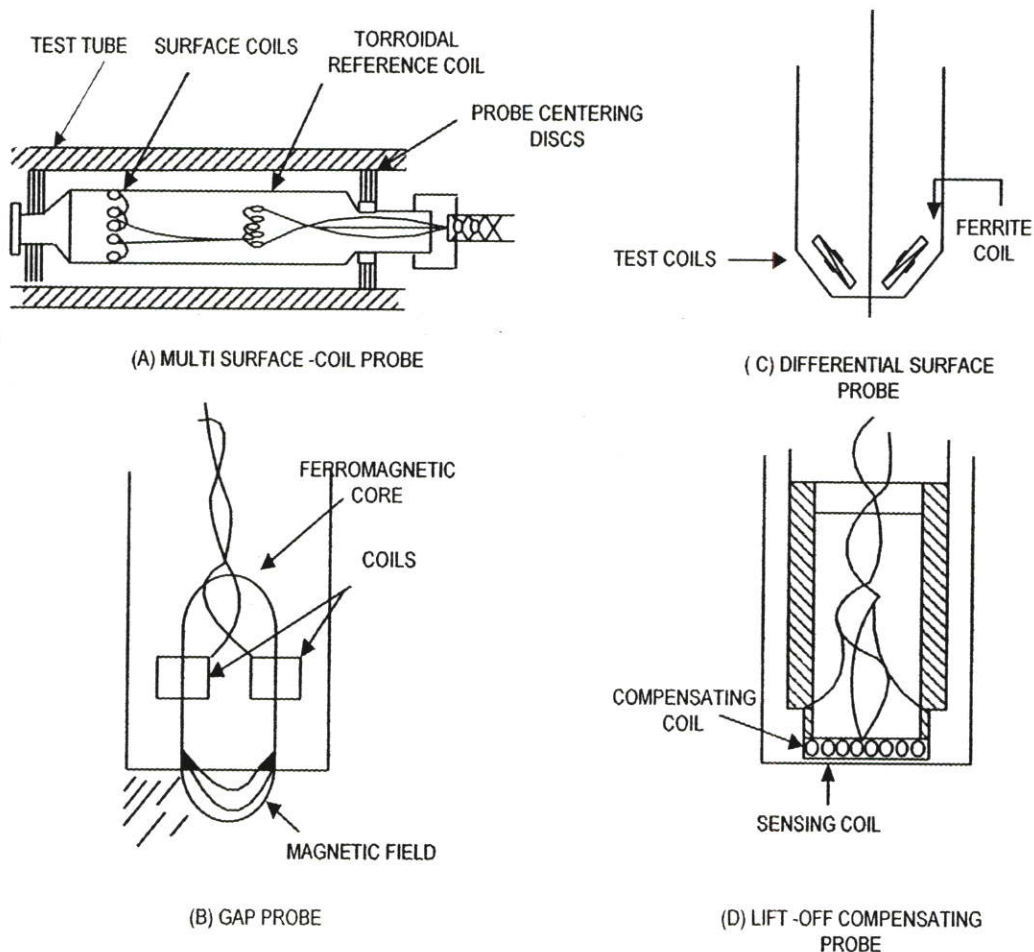
โพรบที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน มีหน้าที่สำคัญสองประการ ได้แก่ หนึ่งหน้ากระแสไหลวน และตรวจจับการบิดเบี้ยวของการไหลของกระแสไหลวนซึ่งเกิดจากรอยบกพร่องต่างๆ ความไวในการตรวจจับรอยบกพร่องและตัวแปรอื่นๆ อาจจะถูกกระทบกระเทือนโดยการเลือกใช้โพรบ โพรบที่พบเห็นโดยทั่วไปคือโพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวซึ่งอาจเป็นพื้นผิวเรียบหรือพื้นผิวโค้ง โดยที่รอยบกพร่องอาจจะเป็นได้ทั้งรอยบกพร่องที่ผิว หรือรอยบกพร่องที่อยู่ภายใน (ซึ่งลึกจากผิวไม่มากนัก) โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบธรรมดา จะมีขดลวดหนึ่งหรือสองขดอยู่ภายในโพรบดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยโพรบที่ใช้ขดลวดหนึ่งขดจะมีการเสริมแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite) เพื่อให้มีความเหนี่ยวนำสูงขึ้น และช่วยลดพื้นที่ในการสัมผัสระหว่างขดลวดโพรบกับชิ้นงานทดสอบ ดังรูปที่ 2.15(A) ส่วนโพรบอีกชนิดจะเป็นแบบขดลวดสองขด ซึ่งแบ่งเป็นสองอย่างคือโพรบสมบูรณ์ (Absolute Probe) ซึ่งใช้ขดลวดเพียงขดเดียวในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตรวจสอบ โดยขดลวดขดที่สองใช้เป็นขดลวดอ้างอิง และถูกวางห่างจากกันอย่างเพียงพอ ดังรูปที่ 2.15(B) ในขณะที่โพรบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Probe) จะใช้ขดลวดทั้งสองในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานและขดลวดทั้งสองขดจะอ้างอิงซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.15(C)



รูปที่ 2.15 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบธรรมดา

เพื่อให้สามารถตรวจสอบรอยบกพร่อง ที่ไม่สามารถใช้ในโพรบแบบธรรมดาตรวจจับได้ หรือลดผลกระทบการแปรเปลี่ยนของเนื้อวัสดุหรือการเชื่อมต่อทางสนามแม่เหล็กกระหว่างโพรบกับชิ้นงาน (Lift off) ดังนั้นจำเป็นจะต้องใช้โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบพิเศษ เช่น ดังรูปที่ 2.16

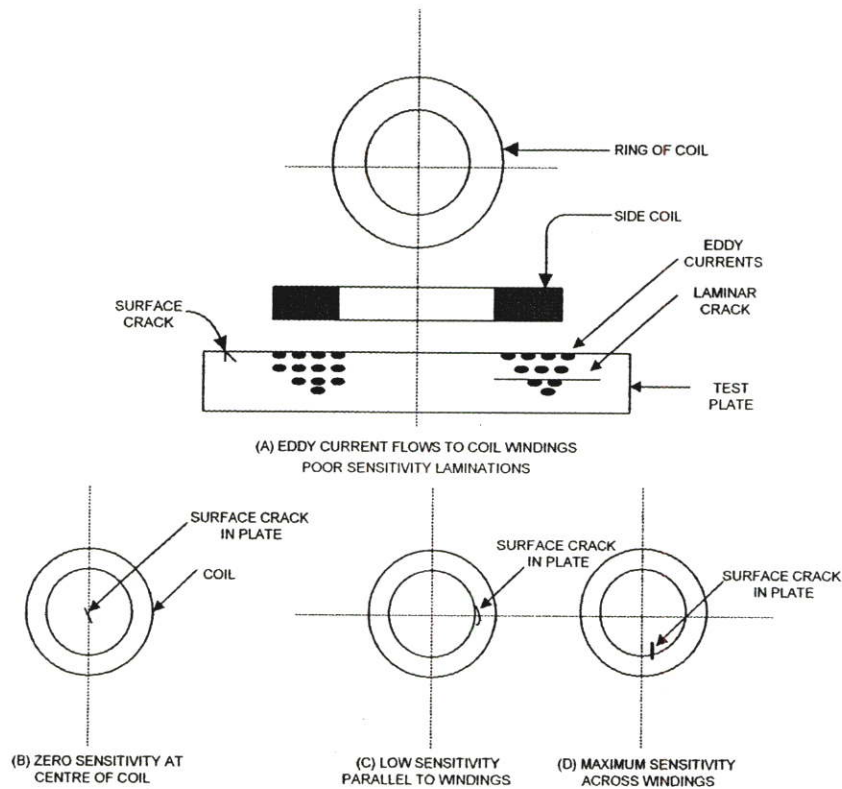
จากลักษณะของโพรบที่มีขดลวดวางขนานกับพื้นผิวที่จะตรวจสอบนั้น จะทำให้กระแสไหลวนที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น จะมีทิศทางการไหลขนานกับขดลวดหรือพื้นผิวนั้นเอง ซึ่งทำให้โพรบตรวจสอบพื้นผิวโดยทั่วไปไม่ไวต่อรอยบกพร่องที่ขนานกับพื้นผิว เช่น รอยแยกที่ขนานกับพื้นผิวของวัสดุ (Lamination) ดังรูปที่ 2.17(A) นอกจากนี้เนื่องจากขดลวดมีลักษณะเป็นวงแหวนทำให้กระแสไหลวนมีปริมาณมากบริเวณใต้ขดลวด จึงทำให้ตำแหน่งบางตำแหน่งของรอยบกพร่อง เมื่อเทียบกับขดลวดโพรบมีผลต่อการตรวจจับ เช่น เมื่อรอยร้าวที่อยู่บริเวณจุดศูนย์กลางของขดลวด ความไวในการตรวจจับจะน้อยมาก เนื่องจากที่จุดศูนย์กลางจะไม่มีสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.17(B) และถ้าแนวของรอยร้าวในอยู่แนวเดียวกับการไหลของกระแสไหลวน ก็จะทำให้ความไวในการตรวจจับน้อยกว่าเมื่อรอยร้าววางแนวการไหลของกระแสไหลวนเป็นต้น ดังรูปที่ 2.17(C) และรูปที่ 2.17(D)



รูปที่ 2.16 โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิวแบบพิเศษ

พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อความไวในการตรวจจับความบกพร่อง ได้แก่ระยะห่างของหัวโพรบกับชิ้นงาน ถ้าโพรบห่างจากชิ้นงานมากความไวจะลดลง เนื่องจากการเชื่อมต่อ

สนามแม่เหล็กลดลง [7] และระดับลึกของรอยบกพร่องภายใน (Subsurface Detect) ยิ่งลึกจากผิวมาก ความไวจะลดลง เนื่องจากผลของ Skin Effect ที่ทำให้กระแสไหลวนลดลงตามความลึกตลอดจนค่าความยาวของรอยบกพร่อง ซึ่งโดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวผลของโพรบ (Effective Diameter) ควรเท่ากับหรือเล็กกว่าความยาวของรอยบกพร่อง ($D_{eff} = D_{coil} + 4\delta$)



รูปที่ 2.17 ผลของทิศทางต่อการตรวจจับของโพรบพื้นผิว

2.9 การวิเคราะห์สัญญาณ

การวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้ในการตรวจสอบสามารถแบ่งออก ได้ดังนี้

2.9.1. ผลกระทบของพารามิเตอร์ในการตรวจสอบ

เนื่องจากมีพารามิเตอร์จำนวนมากที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสไหลวน หรือ อิมพีแดนซ์ของโพรบ จึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงลักษณะของผลกระทบจากพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเลือกเงื่อนไขในการตรวจสอบที่เหมาะสมและการวิเคราะห์สัญญาณความต้านทาน

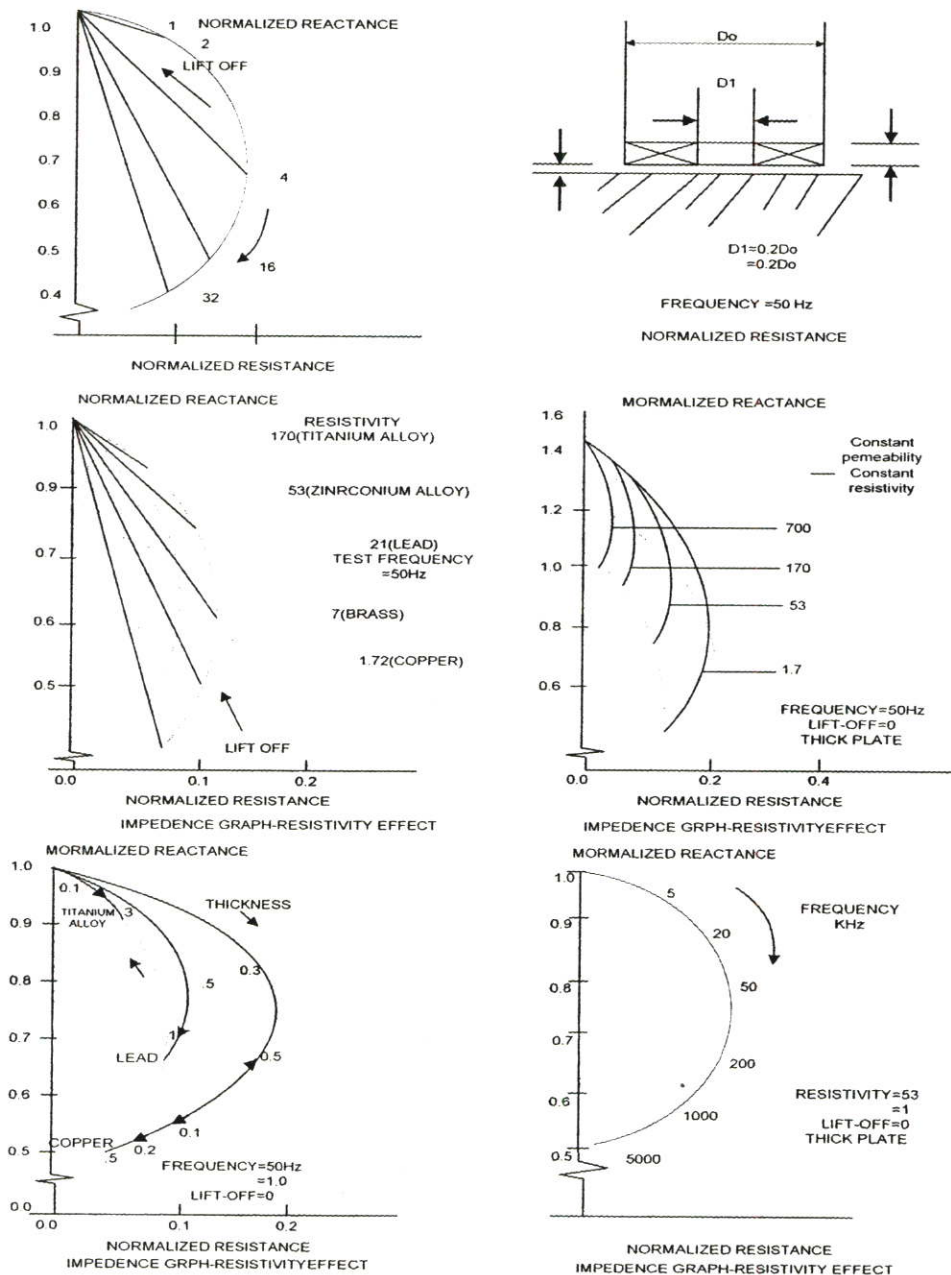
เมื่อค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างโพรบกับชิ้นงานตรวจสอบ จะส่งผลทำให้ขนาดของรัศมีวงกลมเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 2.18(a)

เมื่อความขรุขระผิวแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นเพียงเล็กน้อย จะมีผลกระทบอย่างมากต่ออิมพีแดนซ์ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.18(b)

เมื่อความหนาของชั้นงานลดลง ทำให้เกิดความต้านทานต่อการไหลของกระแสไหลวนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจุดอิมพีแดนซ์จะเลื่อนขึ้นไปด้านบนแต่มีลักษณะที่เบี่ยงเบนไปจากแนวกราฟอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงความต้านทานโดยตรง (เส้นประ) ทั้งนี้เนื่องมาจาก Skin Effect และเฟสที่ช้าลง ดังแสดงในรูปที่ 2.18(c)

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นกระแสไหลวนจะถูกเหนี่ยวนำได้เฉพาะที่ บริเวณใกล้ ๆ ทำให้เสมือนกับว่าความต้านทานในชั้นงานลดลงนั้นจุดอิมพีแดนซ์จะเลื่อนลงด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.18(d)

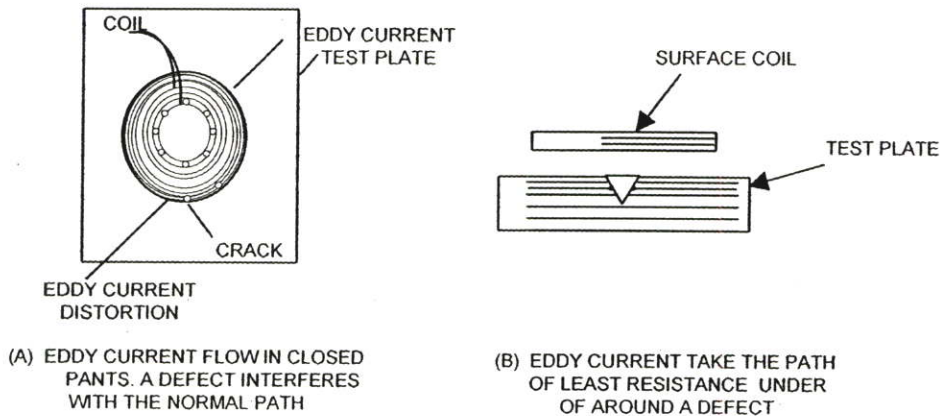
การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดโพรบจะเลื่อนจุดอิมพีแดนซ์ลงด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.18(e) และได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2.6



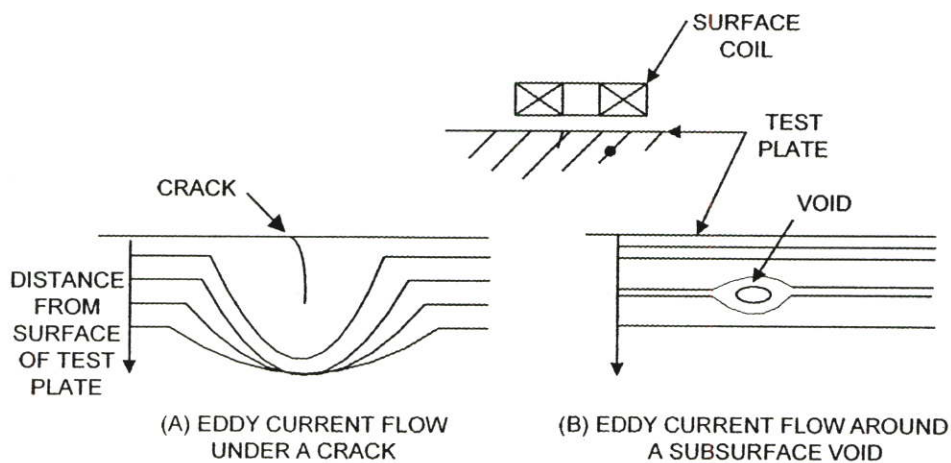
รูปที่ 2.18 ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์

2.9.2 ลักษณะของสัญญาณเมื่อมีรอยบกพร่อง

รอยบกพร่องซึ่งขัดขวางการไหลของกระแสไหลวน จะทำให้อิมพีแดนซ์ของโพรบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตรวจโพรบผ่านรอยบกพร่องนั้นๆ ลักษณะเช่นนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งกระแสไหลวนจะต้องไหลอ้อม หรือลดลงลอดใต้รอยบกพร่องนั้นๆ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าของความต้านทานต่อการไหลของกระแสไหลวนนั่นเอง เนื่องจากกระแสไหลวนจะพยายามเลือกทางเดินที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ดังนั้นถ้าหากรอยบกพร่องที่พื้นผิวมีความลึกระดับเดียวกับรอยบกพร่องภายในรอยบกพร่องที่พื้นผิว จะทำให้กระแสไหลวนต้องเปลี่ยนแปลงทางเดินได้มากกว่ารอยบกพร่องภายใน เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะมีค่ามากที่ผิวและลดลงตามระดับความลึก ดังรูปที่ 2.20 นั่นคือรอยบกพร่องที่พื้นผิวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้มากกว่าซึ่งย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโพรบมากกว่าอีกด้วย (แอมพลิจูดของสัญญาณที่ตรวจจับได้จะมีขนาดใหญ่กว่า)



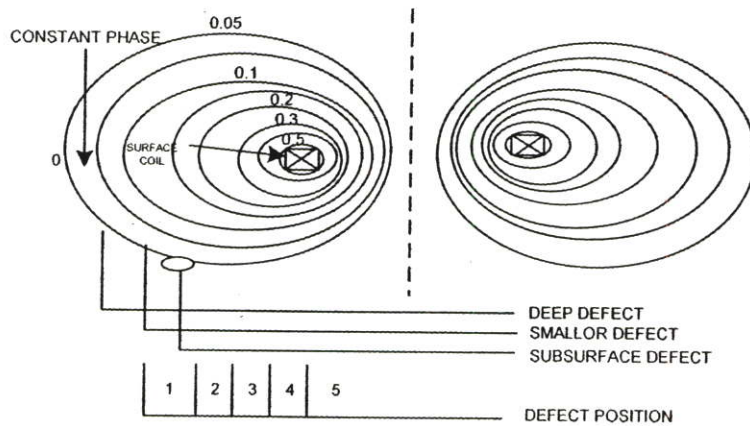
รูปที่ 2.19 ลักษณะของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง



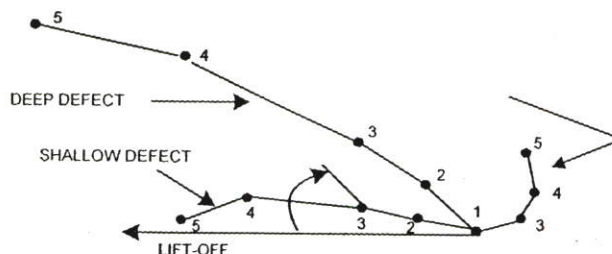
รูปที่ 2.20 ลักษณะการไหลของกระแสไหลวนเมื่อมีรอยบกพร่อง

สัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งประกอบด้วยค่าแอมพลิจูดและเฟส ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งเป็นภาพตัดขวางของ โพรบสำหรับตรวจสอบพื้นผิว ซึ่งแสดงการกระจายของสนามแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดโพรบ โดยที่ เส้นที่บแสดงระดับที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่ และเส้นประแสดงระดับของเฟสคงที่ ทั้งนี้ เฟสของสนามแม่เหล็กจะใกล้เคียงกันกับค่าเฟสของ กระแสไหลวนและ จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อ ระยะทางตามแนวแกนหรือความลึกเพิ่มขึ้น และเฟสจะช้ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยเช่นกัน

ผลกระทบของรอยบกพร่องทั้งสามแบบในรูปเมื่อเลื่อนจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 5 ของรูปที่ 2.21(A) แสดงด้วยลักษณะของสัญญาณที่ตรวจจับได้ ของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแส ไหลวน ดังรูปที่ 2.21(B) ลักษณะของสัญญาณจากรอยบกพร่องจะเป็นเส้นโค้งแยกออกจากแนว Lift off เท่ากับ 2β ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่าเกิดจากเฟสที่ช้าลงของสนามแม่เหล็กเมื่อห่างจาก ขดลวดบวกกับเฟสที่ช้าลงของกระแสไหลวน เมื่อสะท้อนกลับไปยังขดลวดโพรบสำหรับรอย บกพร่องที่พื้นผิวแบบต่างๆ ซึ่งจะมีมุมเฟส β อยู่ในช่วง 20-25 องศาตามรูปที่ 2.21(B) จะมีแนว สัมผัสของสัญญาณ 2β ประมาณ 45 องศา ขณะที่รอยบกพร่องใต้พื้นผิวมีระดับเฟส β ประมาณ 70 องศา มีแนวสัมผัสของสัญญาณ 2β ประมาณ 130 องศา ส่วนรอยบกพร่องพื้นผิวที่มีความลึก มากจะมีช่วงเฟส β กว้างจาก 20-60 องศา ซึ่งอาจใช้ค่าเฉลี่ยประมาณ 35 องศา ดังนั้นแนวสัมผัส ของสัญญาณทำมุม 2β ประมาณ 70 องศา



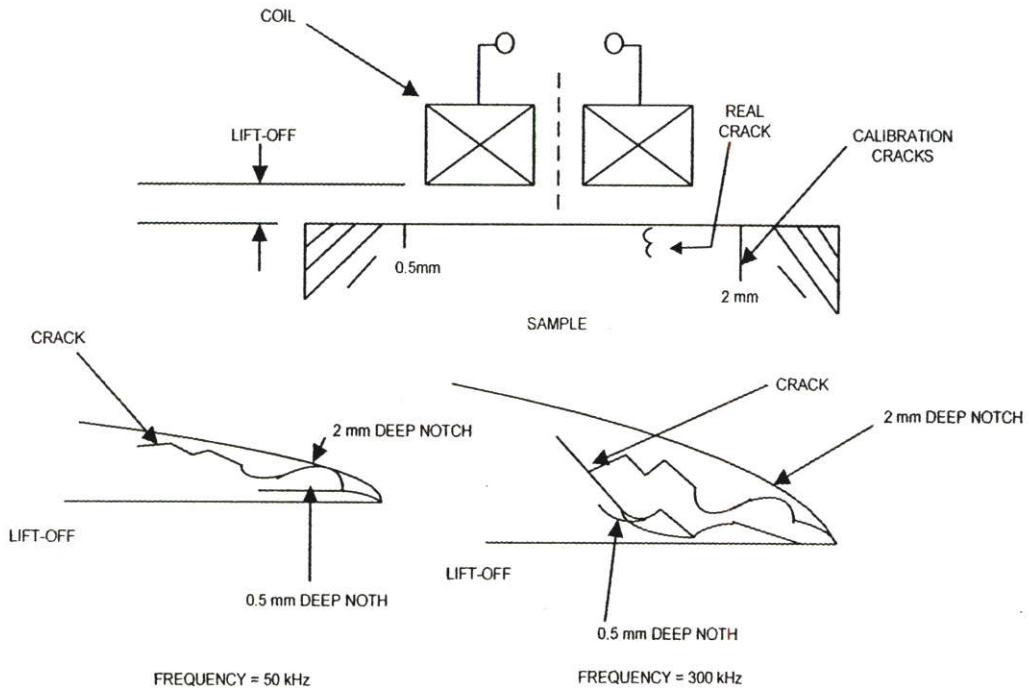
(A) Defect Position



(B) Derivation of Eddy Current Signal Appearance for Three Types of Defects

รูปที่ 2.21 ลักษณะของสัญญาณจากการตรวจสอบรอยบกพร่องทั้ง 3 แบบ

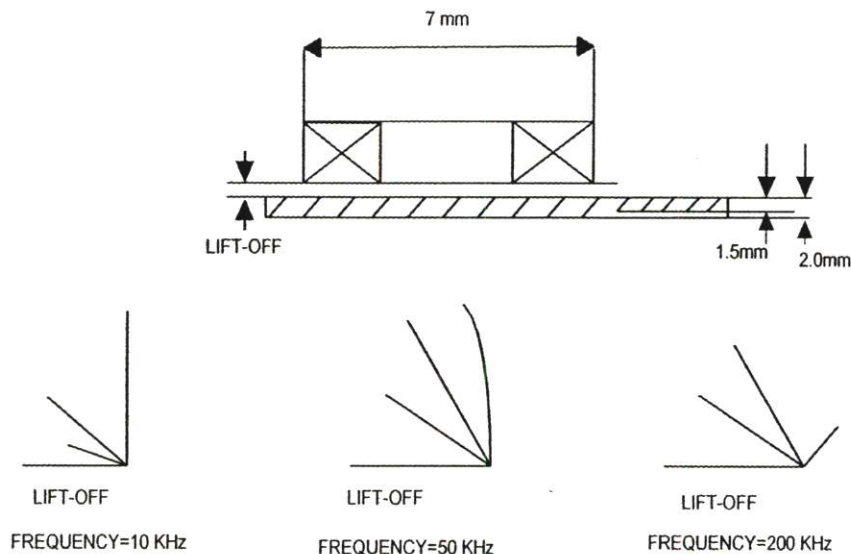
ในกรณีของรอยบกพร่องจริง ซึ่งลักษณะของผนังขรุขระและอาจมีบางส่วนแตกต่างกันอยู่จะทำให้สัญญาณที่ได้รับไม่ชัดเจนเหมือนเช่นที่แสดงไว้ใน การตรวจสอบจริง ลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกัน ดังนั้นการพิจารณาความลึกของรอยบกพร่องที่พื้นผิวต้องอาศัยการเปรียบเทียบกับรอยบกพร่อง (รอยบาก) สอบเทียบ (Calibration Defect) ที่ทำขึ้นทั้งแอมพลิจูดและเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 สัญญาณจากรอยบกพร่องจริงและรอยบกพร่องสอบเทียบ

2.9.3 ลักษณะของสัญญาณที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนสมบัติของวัสดุและความหนา

ลักษณะของสัญญาณที่เกิดจากการแปรเปลี่ยนสมบัติของวัสดุและความหนาที่ความถี่ต่างๆ กัน โดยปรับให้แนว Lift off อยู่ในแนวราบ พบว่าการแปรเปลี่ยนสมบัติของวัสดุและความหนาขึ้นงานตรวจสอบ จะทำให้เกิดสัญญาณแยกตัวออกจากแนว Lift off ในทิศทางเชิงนาฬิกา โดยจะมีขนาดและเฟสขึ้นกับความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบ เช่นที่ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณเนื่องจากการเพิ่มค่าความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก ($+\Delta\mu$) จะมีค่าสูงและมีมุมเฟส 2β ประมาณ 90 องศา ขณะที่สัญญาณจากการเพิ่มค่าความต้านทาน ($+\Delta\rho$) และสัญญาณจากการลดความหนา ($-\Delta t$) ให้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดและเฟสใกล้เคียงกัน เมื่อค่าความถี่ในการตรวจสอบเพิ่มขึ้น ลักษณะของสัญญาณทั้งสามก็จะเปลี่ยนไปจากเดิม เช่นที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ สัญญาณ $-\Delta t$ ทำมุมเฟส 2β ประมาณ 90 องศา จากแนว Lift off และขณะเดียวกันสัญญาณ $+\Delta\rho$ และ $+\Delta\mu$ จะเคลื่อนเข้าใกล้กัน ดังรูปที่ 2.23



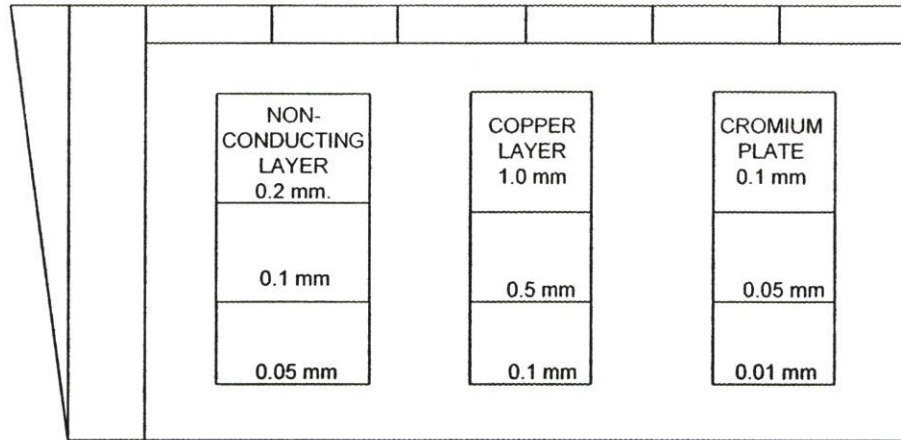
รูปที่ 2.23 ลักษณะของสัญญาณจากการแปรเปลี่ยนสมบัติของวัสดุและความหนาที่ความถี่ต่างกัน

2.9.4 รอยบกพร่องสอบเทียบ (Calibration Defect)

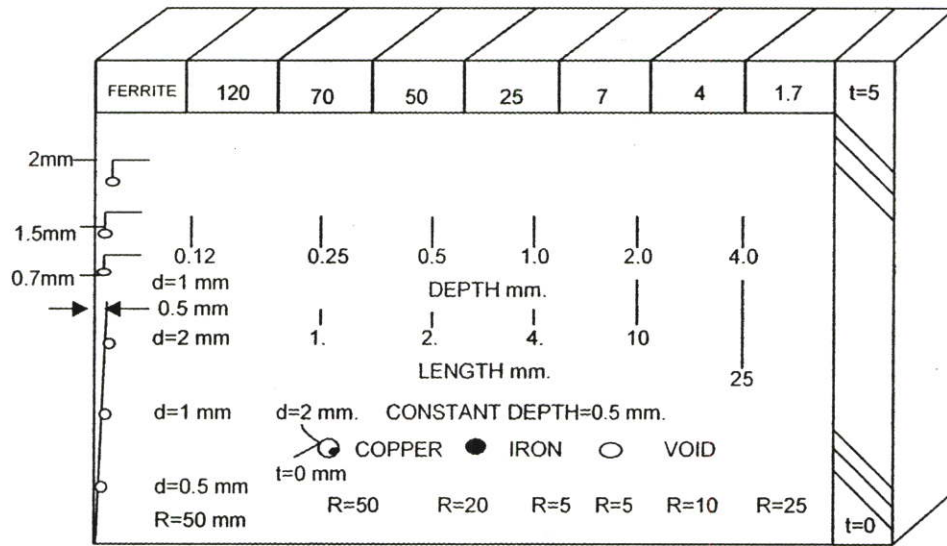
การวิเคราะห์สัญญาณจากการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน เป็นเทคนิคที่อาศัยการเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องมีมาตรฐานการสอบเทียบ เพื่อใช้เปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดและเฟสของรอยบกพร่องในชิ้นงานซึ่งไม่ทราบชนิด นอกจากนี้สัญญาณจากมาตรฐานการสอบเทียบยังอาจใช้ในการปรับความไวและมุมของเครื่องมือด้วย

รูปที่ 2.24 แสดงแผ่นทดสอบเทียบชนิดหนึ่งสำหรับการใช้งานทั่วไปที่ใช้เพื่อแสดงผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่

- ความต้านทานไฟฟ้า
- ความหนา
- ลักษณะพื้นผิว
- ความยาวของรอยบกพร่องเมื่อความลึกคงที่
- ความลึกของรอยบกพร่องเมื่อความยาวคงที่
- ขนาดของรอยบกพร่องได้ผิวเมื่อความลึกคงที่
- ความลึกของรอยบกพร่องได้ผิวเมื่อขนาดคงที่
- ความหนาของชั้น ไม่นำไฟฟ้า
- ความหนาของชั้นนำไฟฟ้า
- การปะปนของสารแม่เหล็ก



(B) BACK SIDE



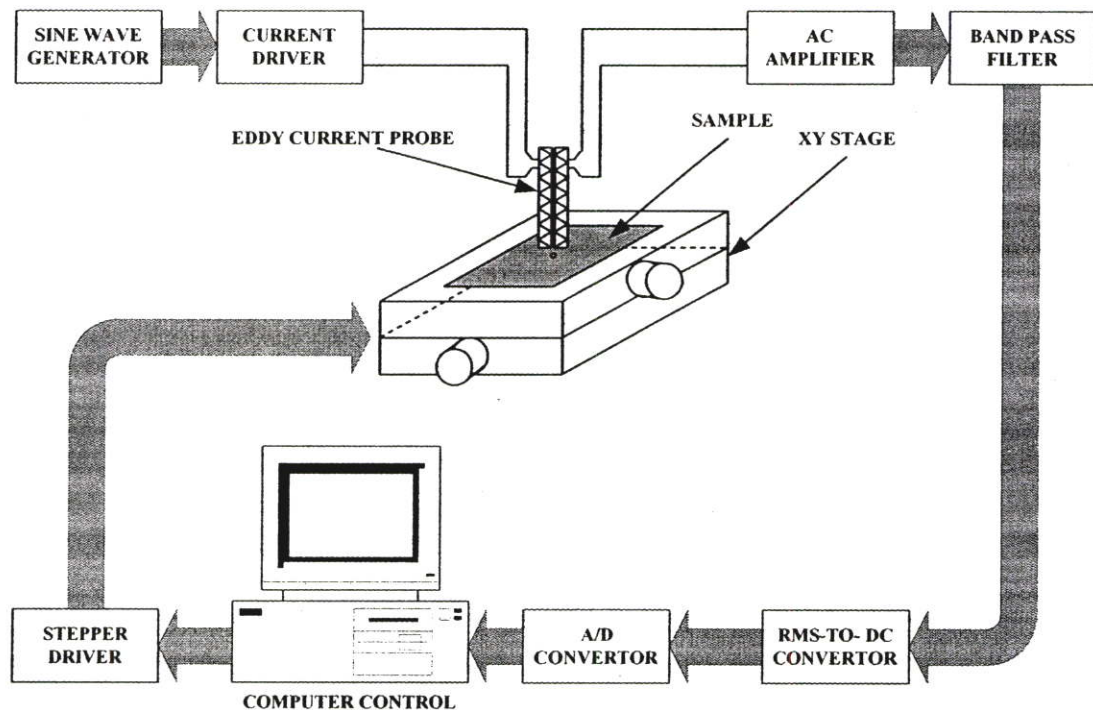
(A) FRONT SIDE
CALIBRATION STANDARD

รูปที่ 2.24 มาตรฐานสอบเทียบ

บทที่ 3

การออกแบบระบบสร้างภาพกระแสไหลวน (Eddy Current Imaging System Design)

ระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องภายในแผ่นโลหะ เพื่อนำระบบที่สร้างขึ้นไปใช้ในการตรวจหารอยบกพร่องต่างๆ ภายในแผ่นโลหะ อาทิเช่น รอยบกพร่องที่เกิดจากการสึกกร่อนจากสนิม เป็นต้น สำหรับส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องในแผ่นโลหะที่สร้างสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมเครื่องสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องจำลองที่อยู่ภายในแผ่นโลหะ

จากรูปที่ 3.1 หัวโพรบตรวจวัดกระแสไหลวน (Eddy Current Probe) ซึ่งใช้แบบหัวโพรบเดี่ยวในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าศักดาไฟฟ้า โดยเมื่อจ่ายกระแสแรงดันที่มีค่าเหมาะสมให้กับขดลวดจะเกิดฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นรอบขดลวด ฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะไปเหนี่ยวนำที่ชิ้นงานที่เป็นโลหะตัวนำทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่โลหะตัวนำและกระแสไหลวนที่เกิดในโลหะตัวนำจะเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเกิดฟลักซ์แม่เหล็กต่อต้านกับฟลักซ์แม่เหล็กเดิม ดังนั้นทำให้อิมพีแดนซ์ของขดลวดโพรบเกิดการเปลี่ยนแปลง และหากแผ่นโลหะที่

นำมาทดสอบมีรอยบกพร่อง ก็จะส่งผลให้กระแสไหลวนในแผ่นโลหะเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลวนนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงตามขนาดและลักษณะของรอยบกพร่องภายในแผ่นโลหะที่นำมาทดสอบ ด้วยเหตุนี้หากทำการเคลื่อนแผ่นโลหะที่นำมาทดสอบโดยใช้แกน X-Y (X-Y Stage) ดังรูปที่ 3.2 แล้วทำการเก็บข้อมูลค่าศักดาไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่านในแต่ละจุด ก็สามารถนำข้อมูลของค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้มาสร้างเป็นข้อมูลภาพเพื่อแสดงส่วนบกพร่องของแผ่นโลหะที่นำมาทดสอบได้



รูปที่ 3.2 แกน X-Y ที่ใช้เคลื่อนแผ่นโลหะทดสอบ

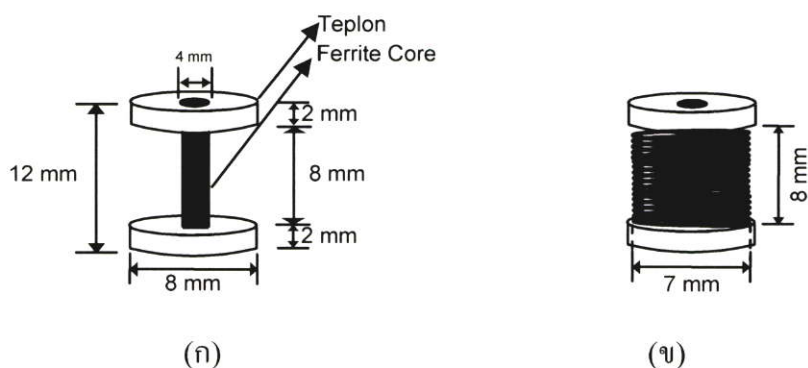
จากรูปที่ 3.1 รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบสร้างภาพกระแสไหลวน สำหรับตรวจหารอยบกพร่องในแผ่นโลหะสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 การออกแบบโพรบตรวจสอบ (Testing Probe)

โพรบที่ใช้ตรวจสอบรอยบกพร่องเป็นส่วนที่สำคัญ เนื่องจากขดลวดโพรบเมื่อได้รับสัญญาณรูปไซน์ที่มีการจ่ายกระแสคงที่ค่าที่เหมาะสม และเมื่อมีวัสดุตัวนำเข้าใกล้จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลวนที่ผิวหรือภายในเนื้อของวัสดุ ซึ่งความลึกของกระแสไหลวนที่แทรกเข้าได้ผิวจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่จ่ายให้กับขดลวดโพรบ การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนตามรอยบกพร่องเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ จึงต้องมีการออกแบบและทดลองขดลวดโพรบที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนตามรอยบกพร่องที่มีลักษณะต่างๆ กัน โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนไม่สามารถวัดโดยตรงได้ แต่สามารถวัดโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของขดลวดที่เกิดจากผลของกระแสไหลวน ซึ่งงานวิจัยนี้เน้นการเปลี่ยนแปลงของ

สัญญาณแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดรอยบกพร่องของวัสดุตัวนำ จึงทำการออกแบบและสร้างโพรบตรวจสอบแบบขดลวดโพรบเดี่ยว (Single Probe)

การออกแบบโพรบแบบขดลวดโพรบเดี่ยว ประกอบด้วยขดลวดตัวนำเพียงชุดเดียว ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณคลื่นรูปไซน์และทำการตรวจจับสัญญาณที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไหลวนในวัสดุตัวนำ ซึ่งจะใช้ขดลวดตัวนำร่วมกัน โดยโพรบที่ใช้ทำการทดลองถูกพันด้วยลวดทองแดงรอบๆ แกนเฟอร์ไรต์ ซึ่งแกนเฟอร์ไรต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ยาว 12 มม. โดยที่ส่วนปลายทั้งสองข้างของแกนเฟอร์ไรต์จะถูกสวมด้วยวัสดุเทปลอนหนา 2 มม. เพราะฉะนั้นจะเหลือความยาวของแกนเฟอร์ไรต์ 8 มม. ดังรูปที่ 3.3 (ก) โดยแกนเฟอร์ไรต์จะถูกพันด้วยลวดทองแดงเบอร์ AWG 35 และเคลือบน้ำยาที่เป็นฉนวน โดยพันทั้งหมด 8 ชั้นๆ ละ 31 รอบ เป็นจำนวน 248 รอบ ได้ค่าความเหนียวนำ 2 มิลลิเฮนรี และได้เส้นผ่านศูนย์กลางรวม 7 มม. ดังรูปที่ 3.3 (ข) จากนั้นจะบรรจุขดลวดโพรบด้วยวัสดุเทปลอนหนา 2 มม. และแผ่นทองแดงหุ้มล้อมรอบหนา 0.5 มม. เพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กรั่วไหลซึ่งได้โพรบที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 โพรบที่ออกแบบขึ้นโดย

(ก) แกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้สำหรับสร้างขดลวดโพรบ

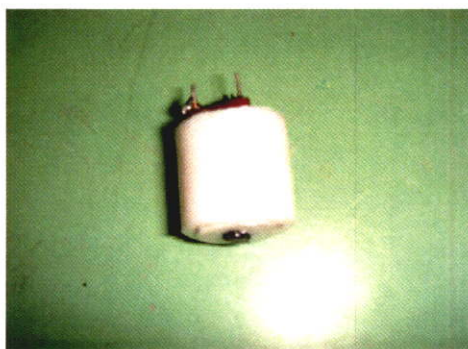
(ข) แกนเฟอร์ไรต์ที่ถูกพันรอบๆ ด้วยลวดทองแดง



(ก)



(ข)



(ค)



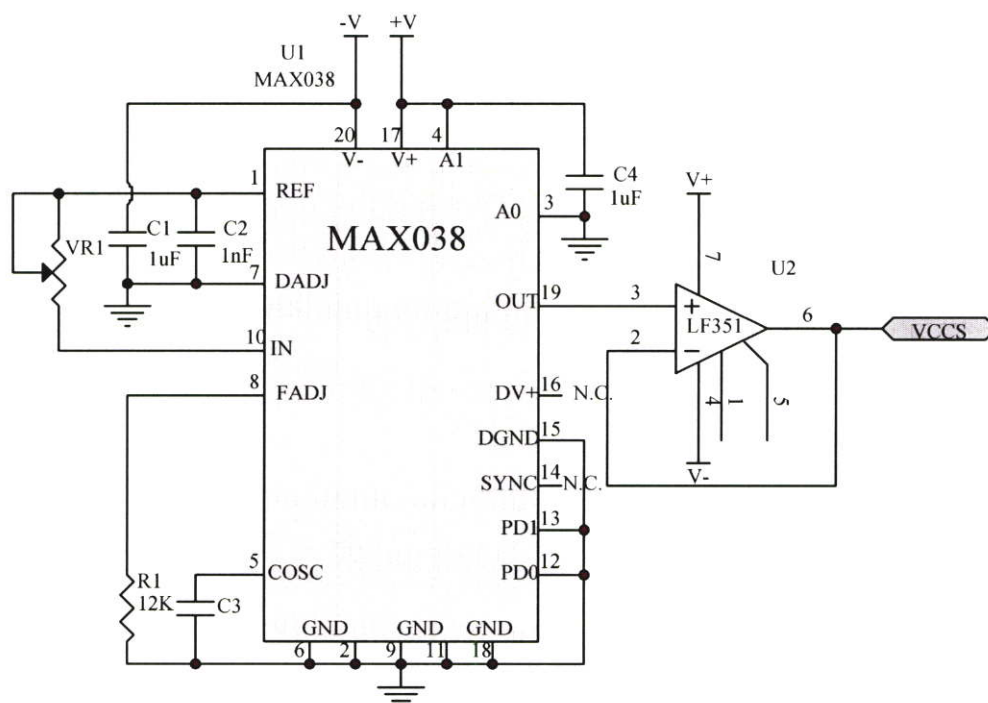
(ง)

รูปที่ 3.4 โพรบที่สร้างขึ้นโดย

- (ก) แกนเฟอร์ไรต์ที่ใช้สำหรับสร้างขดลวดโพรบ
- (ข) แกนเฟอร์ไรต์ที่ถูกพันรอบๆ ด้วยลวดทองแดง
- (ค) ขดลวดโพรบที่หุ้มด้วยวัสดุเทปลอนหนา 2 มม.
- (ง) ขดลวดโพรบที่หุ้มด้วยวัสดุเทปลอนและแผ่นทองแดง

3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ (Sine Wave Generator)

วงจรนี้เป็นวงจรสร้างสัญญาณไซน์ เพื่อป้อนให้กับวงจรจ่ายกระแสคงที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source) โดยลักษณะของวงจรสร้างสัญญาณไซน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

จากวงจรในรูป 3.5 ใช้ไอซี MAX 308 ในการกำเนิดความถี่ ไอซี MAX 038 เป็นไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Waveform Generator) โดยสามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงในรูปแบบสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle Wave) สัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth Wave) สัญญาณไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) และการกำหนดชนิดของสัญญาณสามารถกำหนดได้โดยขา A0 (ขา3) และ ขา A1 (ขา4) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเลือกชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของไอซี MAX 038

A0	A1	ชนิดของสัญญาณ
X	1	สัญญาณไซน์
0	0	สัญญาณสี่เหลี่ยม
1	0	สัญญาณสามเหลี่ยม

ไอซี MAX 038 สามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 1 Hz ถึง 20 MHz สำหรับในวงจรดังรูปที่ 3.2 ค่าความถี่ของวงจรควบคุมโดย VR_1 และ C_3 โดยความถี่เอาต์พุตของวงจรสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.1)

$$F_o = \frac{V_m}{R_m \cdot C_F} \quad (3.1)$$

เมื่อ V_m คือ แรงดันอินพุตมีค่าเท่ากับ 5 V

R_m คือ ค่าความต้านทาน VR_1

C_F คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ มีค่าเท่ากับ C_3

เนื่องจากค่าดัชนีท (Data sheet) กำหนด R_m ควรอยู่ในช่วง 12.5 K Ω -500 K Ω และต้องการความถี่เอาต์พุตสูงสุด 20 KHz

เพราะฉะนั้น จากสมการที่ (3.1) หาค่า C_3 ได้ดังนี้

$$C_3 = \frac{V_m}{R_m F_o} = \frac{5}{20 \times 10^3 \times 12.5 \times 10^3} = 20 \text{ nF} \quad (3.2)$$

เลือก $VR_1 = 500 \text{ K}\Omega$ เพราะฉะนั้นความถี่เอาต์พุตต่ำสุดมีค่าเท่ากับ

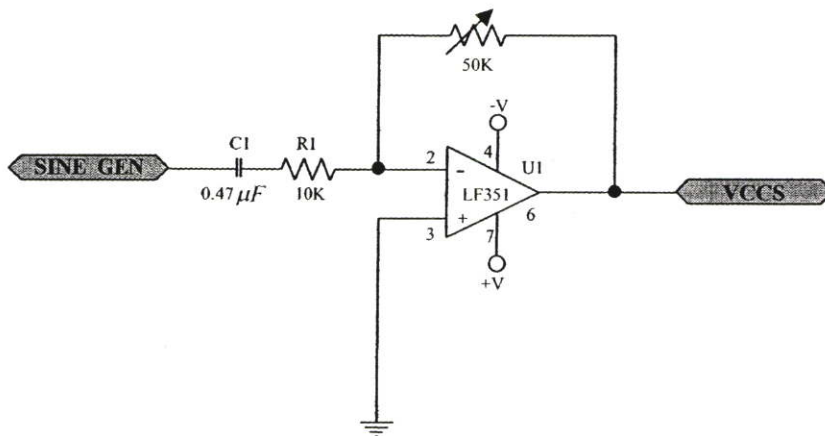
$$F_o = \frac{5}{500 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-9}} = 0.5 \text{ KHz} \quad (3.3)$$

เพราะฉะนั้น วงจรในรูปที่ 3.5 สามารถผลิตสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 0.5 KHz ถึง 20 KHz และมีขนาดแอมพลิจูด $2 V_{p-p}$

3.3 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source)

วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันทำหน้าที่ในการกำหนดค่ากระแสคงที่ ที่จะจ่ายให้กับ ขดลวด โดยวงจรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสามารถแสดงดังรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7

โดยการทำงานของวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์ รับสัญญาณอินพุตซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ความถี่ 0.5-20 KHz. แอมพลิจูด $2 V_{p-p}$ ซึ่งได้จากวงจรผลิตสัญญาณไซน์จะถูกป้อนให้กับ LF 351(U1) ซึ่งต่อเป็นวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์ ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรขยายแบบอินเวอร์ตติ้งแอมป์

โดยมี R_1 และ VR_1 เป็นตัวกำหนดเกณฑ์การขยายโดยจากวงจรรูปที่ 3.5 จะปรับ อัตราขยาย เพื่อให้ได้แรงดันที่เอาต์พุตของ LF351(U1) เท่ากับ $10 V_{p-p}$ เพื่อป้อนให้กับวงจรจ่าย กระแสควบคุมด้วยแรงดัน และสามารถกำหนดค่าอุปกรณ์ภายในได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_o = -\frac{V_{in}}{R_1} VR_1 \quad (3.4)$$

$$V_o = -A V_{in} \quad (3.5)$$

เมื่อ A คือ อัตราขยายแอมพลิไฟเออร์

V_{in} คือ สัญญาณอินพุตมีค่าเท่ากับ $2 V_{p-p}$

ถ้าต้องการค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรรีโวลต์จิ้งแอมป์เท่ากับ $10 V_{p-p}$ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าอัตราขยายแอมพลิไฟเออร์ได้จากสมการ (3.5) เท่ากับ

$$A = 5 \text{ เท่า} \quad (3.6)$$

และกำหนดค่าความต้านทาน $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าความต้านทาน VR_1 จากสมการ (3.4)

$$VR_1 = \frac{V_o \times R_1}{V_m} = 50 \text{ K}\Omega \quad (3.7)$$

สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรรีโวลต์จิ้งแอมป์จะป้อนให้กับอินพุตของ LF351(U2A) ซึ่งต่อเป็นวงจรรายกระแสที่ควบคุมด้วยแรงดัน และค่าความต้านทาน $R_{control}$ จะเป็นค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโพรบ และสามารถคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตแต่ละจุดได้ โดยอ้างอิงวงจรรูปที่ 3.7 โดยกำหนดค่า R_2, R_3, R_4, R_5 และ R_6 มีค่าความต้านทานเท่ากันหมดเพื่อปรับ Unity Gain เท่ากับ 1 ($A=1$) ดังรูปที่ 3.6 จะได้

$$V_1 = -\left(\frac{V_{in}}{R} + \frac{V_{out}}{R}\right)R = -(V_{in} + V_{out}) \quad (3.8)$$

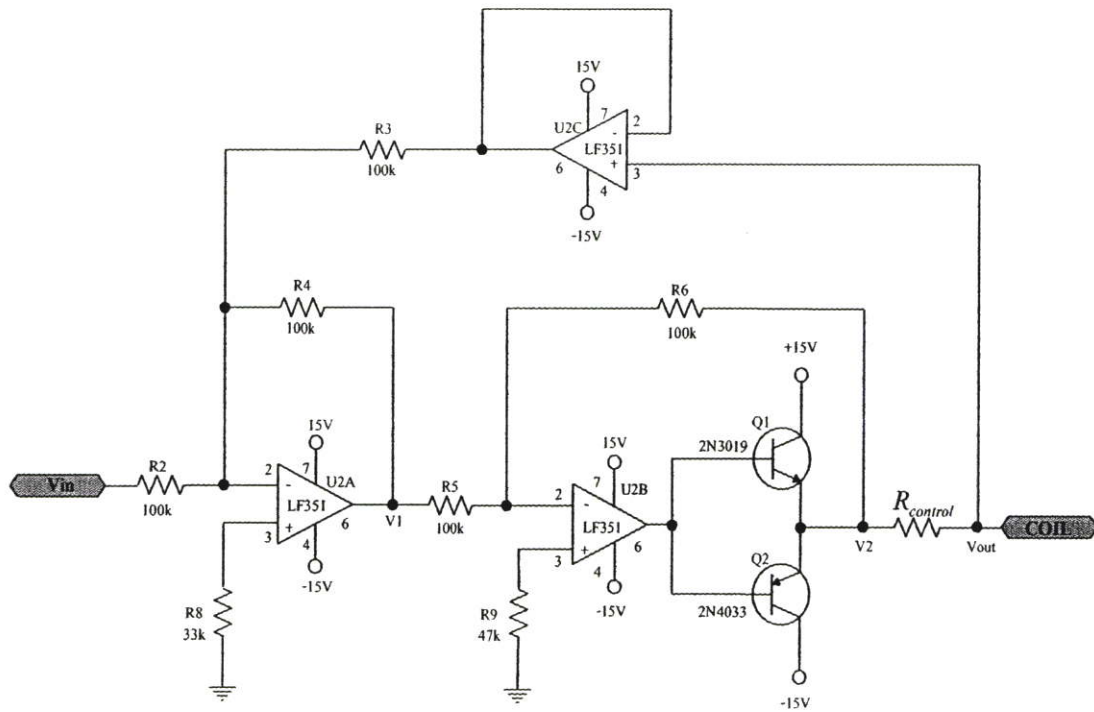
$$V_2 = (V_{in} + V_{out}) \quad (3.9)$$

เพราะฉะนั้นสามารถกำหนดค่ากระแสได้ดังสมการ (3.10) และสมการ (3.11)

$$I_o = \frac{V_2 - V_{out}}{R_{control}} \quad (3.10)$$

$$I_o = \frac{V_{in}}{R_{control}} \quad (3.11)$$

- เมื่อ $R_{control}$ คือ ค่าความต้านทานสำหรับกำหนดค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวด
 V_m คือ ค่าแรงดันอินพุตของวงจรรายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน
 I_o คือ ค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวด



รูปที่ 3.7 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน

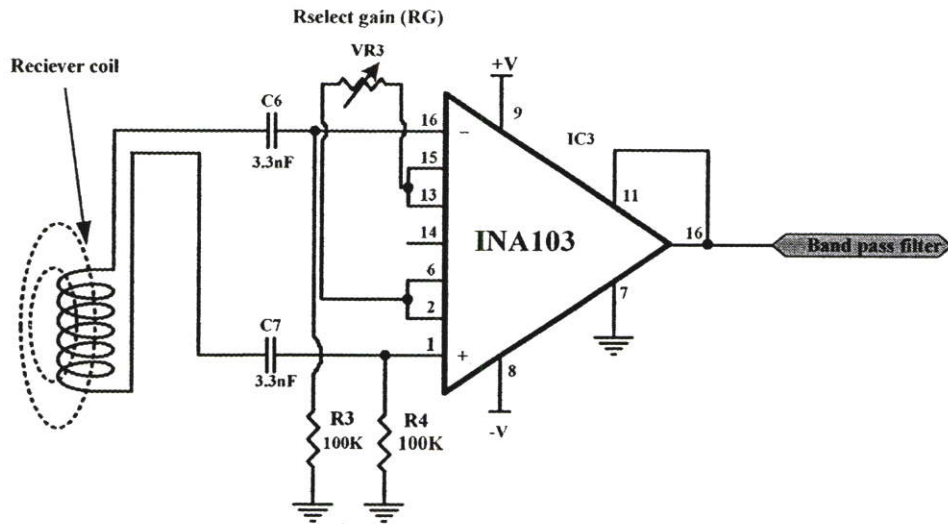
จากสมการที่ (3.11) สามารถเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเอาต์พุต ที่จ่ายให้กับขดลวดโพรบ โดยการปรับค่าความต้านทาน VR_1 ของวงจรรีโวลต์จิ้งแอมป์ (U1) จาก 1-5 เท่า เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 2- 10 V_{p-p} และกำหนดค่าความต้านทานของ $R_{control}$ คงที่เท่ากับ 30 โอห์ม ได้ค่ากระแสเอาต์พุตที่ต้องการไว้ 6 ค่าคือ 70, 100, 150, 200, 250 และ 300 mA_{p-p} ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตของ LF351(U1) และค่ากระแสเอาต์พุตของวงจรรายกระแส

ตารางแสดงค่าแรงดันเอาต์พุต U1 ที่ใช้เลือกค่ากระแสคงที่	
ค่าแรงดันเอาต์พุต U1 (V_{p-p})	กระแส (mA_{p-p})
2.1	70
3.0	100
4.5	150
6.0	200
7.5	250
9.0	300

3.4 วงจรขยายสัญญาณกระแสกลับ (Amplifier Circuit)

สำหรับวงจรขยายสัญญาณจากขดลวดโพรบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรขยายสัญญาณกระแสกลับ

วงจรในส่วนนี้จะประกอบด้วยไอซี INA 103 ซึ่งเป็นไอซีอินทรูเมนเตชันแอมพลิไฟเออร์ (Instrumentation Amplifier) ของบริษัท BURR-BROWN เพื่อทำการขยายสัญญาณที่ได้รับจากขดลวดให้มีแอมพลิจูดของสัญญาณสูงขึ้น และมีวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่อินพุทของวงจร INA 103 โดยมีความถี่คัตออฟ (f_c) เท่ากับ

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 0.48 \text{ KHz} \quad (3.12)$$

จากวงจรรูปที่ 3.8 สามารถปรับอัตราขยายของ INA 103 โดยเปลี่ยนค่าความต้านทานของ Rselect Gain (R_G) ซึ่งสามารถคำนวณค่าความต้านทานสำหรับนำมาต่อเพื่อปรับค่าอัตราขยายของ INA 103 ได้จากสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14)

$$G = 1 + \frac{6}{R_G} \text{ K}\Omega \quad (3.13)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.13) จะได้

$$R_G = \frac{6}{G-1} \text{ K}\Omega \quad (3.14)$$

เมื่อ G คือ อัตราขยายของอินทรเมนเดชันแอมพลิไฟเออร์

R_G คือ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่นำมาต่อเพื่อปรับอัตราขยาย

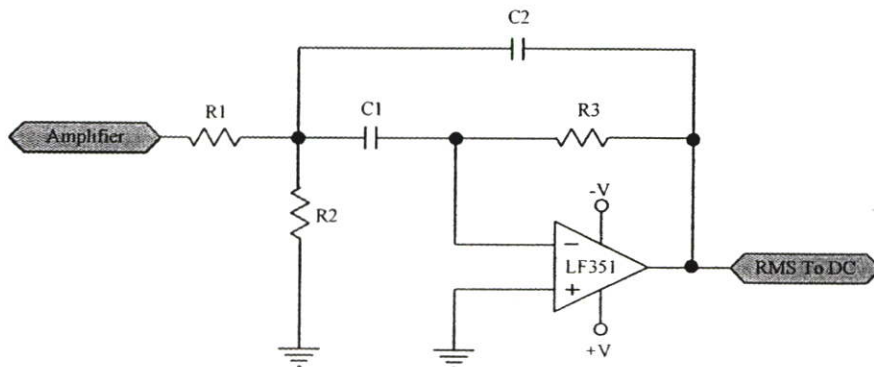
จากวงจรรูปที่ 3.8 สามารถปรับอัตราขยายของ INA 103 ได้ในช่วงตั้งแต่ 2 เท่า จนถึง 101 เท่า โดยการปรับค่าความต้านทาน VR3 ดังตารางที่ 3.3 และสัญญาณที่ถูกขยายโดย INA 103 จะป้อนให้กับวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ต่อไป

ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานของ Rselect Gain (R_G) ที่ใช้กำหนดอัตราขยาย

ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดอัตราขยาย	
ความต้านทาน (โอห์ม)	อัตราขยาย (เท่า)
6K	2
2K	4
1.2K	6
850	8.1
600	11
300	21
150	41
100	61
60	101

3.5 วงจรกรองความถี่เป็นช่วง (Band Pass Filter)

สัญญาณที่มาจากวงจรขยายจะมีสัญญาณรบกวนมาด้วย เพราะฉะนั้นจึงต้องใช้วงจรกรองความถี่เป็นช่วง ช่วยเลือกสัญญาณที่ต้องการดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรกรองความถี่เป็นช่วงผ่าน

วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่ออกแบบ เป็นวงจรฟิลเตอร์ช่วงกว้าง โดยกำหนดสัญญาณความถี่ลดลง (f_L) เท่ากับ 0.5 KHz. ถึงความถี่สูงขึ้น(f_H) เท่ากับ 1.5 KHz. ผ่านได้ และมีความถี่เรโซแนนท์ (f_r) เท่ากับ 1 KHz. จากวงจรรูปที่ 3.9 สามารถหาค่าตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_p R_3 C_1 C_2}} \quad (3.15)$$

โดยที่ $R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.16)$

$$Q = \frac{f_r}{B_w} = 0.5 \sqrt{\frac{R_3}{R_p}} \quad (3.17)$$

เมื่อ $C_1 = C_2 = C$

โดยกำหนดค่า $R_1 = R_2 = 10 \text{ K}\Omega$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (3.16)

$$R_p = 5 \text{ K}\Omega$$

จากสมการ (3.17)

$$R_3 = 4Q^2 R_p = 20 \text{ K}\Omega$$

จากสมการ (3.15)

$$C = \frac{1}{2\pi f_r \sqrt{R_p R_3}} = 15.92 \text{ nF} \text{ (เลือกค่า } C = 15 \text{ nF)} \quad (3.18)$$

3.6 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี (RMS-To-DC Converter Circuit)

วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี ในระบบนี้จะใช้ไอซีของบริษัท MAXIM เบอร์ MX 536A ซึ่งรองรับแรงดันอินพุตได้ในช่วง 0–7 V_{RMS} โดยวงจรอาร์เอ็มเอส-ทูดีซี ทำหน้าที่แปลง

สัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz ที่รับจากวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ดีซี (DC) สำหรับลักษณะของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซีโดยไอซี MX 536A จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.10

จากค่าตัวชี้ของไอซี MX 536A และวงจรฟิลเตอร์ [8,9] สามารถคำนวณหาค่าอุปกรณ์ ต่อรวมในรูปที่ 3.11 ซึ่งมีวงจรฟิลเตอร์อยู่ 2 จุด (Two Pole Filter) คือ ก่อนเข้าวงจรเคอร์เร็นท์มิเลอร์ (Current Mirror) ซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอันดับหนึ่ง (First Order Low Pass Filter) ดังสมการที่ (3.19) และส่วนเข้าคัพทของวงจรซึ่งเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง (Second Order Low Pass Filter) ดังรูป 3.11 และดังสมการ (3.20)

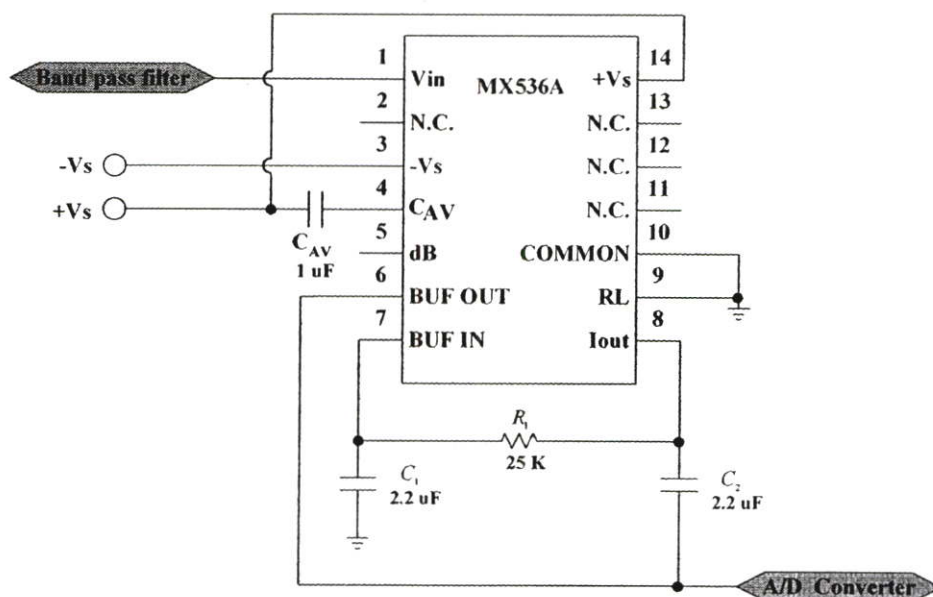
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอันดับหนึ่ง (First Order)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC_{AV}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 25 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}} = 6.369 \text{ Hz} \quad (3.19)$$

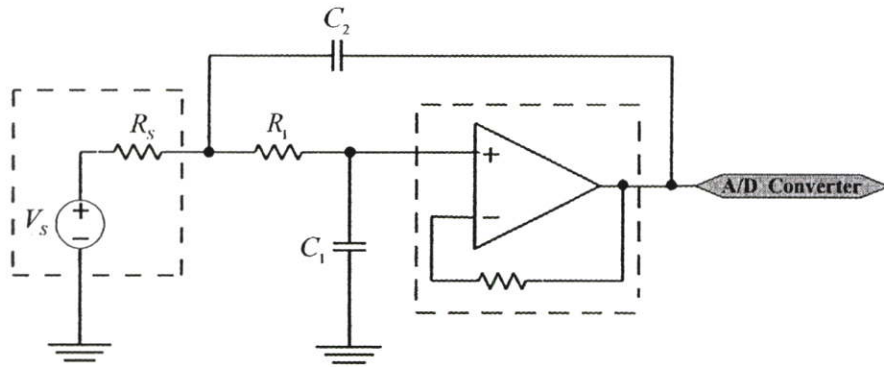
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบอันดับสอง (Second Order)

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_s R_1 C_1 C_2}} \quad (3.20)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{25 \times 10^3 \times 25 \times 10^3 \times 2.2 \times 10^{-6} \times 2.2 \times 10^{-6}}} = 2.895 \text{ Hz} \quad (3.21)$$



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี

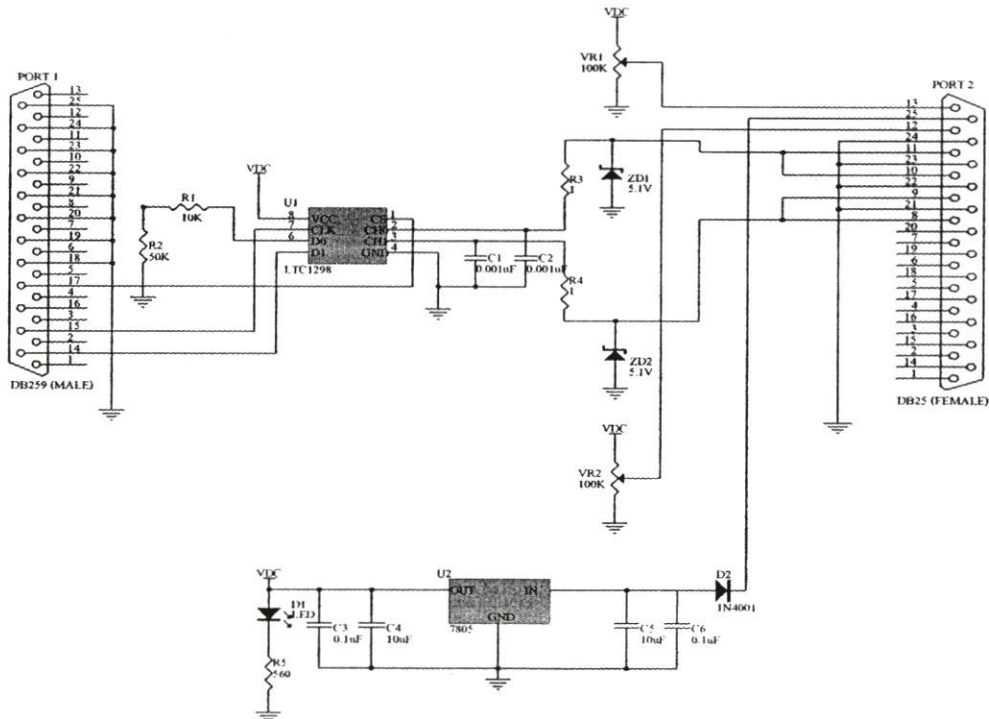


รูปที่ 3.11 เอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 3.10 เมื่อวัดใหม่

เอาต์พุตจากวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีจะถูกส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลเพื่อทำการบันทึกข้อมูลของการวัดต่อไป

3.7 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog To Digital Converter)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลจะใช้การ์ดของบริษัท ETT รุ่น ET-AD12 ซึ่งเป็นการ์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิต ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (Printer Port) โดยมีลักษณะและคุณสมบัติของวงจรดังรูปที่ 3.12 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.12 วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของการ์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

คุณสมบัติของของการ์ด A/D Converter	
CONVERTION TIME	60 μ s
SAMPLING RATE	11.1 KHz
INPUT CHANNEL	2 CHANNEL
GAIN ERROR	+/- 2 LSB
ANALOG INPUT RANGE	-0.05 V TO +5.05 V
+VCC SUPPLY	+9 VDC

3.8 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ (Stepping motor driver circuit) สำหรับควบคุมการ

เคลื่อนเก็บข้อมูล

วงจรถับสเต็ปปีงมอเตอร์ ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้แก่ขดลวดแต่ละเฟสภายในสเต็ปปีงมอเตอร์สำหรับเคลื่อนแกน X-Y เพื่อเก็บข้อมูลแต่ละจุด โดยสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ 4 เฟส แรงดัน 5 โวลต์ กระแส 1 แอมป์ เคลื่อนที่ 1.8 องศาต่อสเต็ป และทำงานโดยรับสัญญาณอินพุตจากคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดอินเตอร์เฟส ซึ่งสัญญาณควบคุมจะถูกส่งผ่านมายังตัวเชื่อมต่อทางแสงเบอร์ 4N25 เพื่อนำค่ากระแสไปไบอัสที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เบอร์ BD 681 ซึ่งภายในของทรานซิสเตอร์ BD 681 จะมีทรานซิสเตอร์สองตัวต่อกันแบบคาลิงตัน โดยจะทำการขยายกระแสให้กับขดลวดแต่ละเฟสภายในสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งทรานซิสเตอร์เบอร์ BD 681 จะทำงานในย่านคัตออฟและย่านอิ่มตัว โดยมีไดโอดต่อคร่อมขดลวดแต่ละเฟสที่อยู่ภายในสเต็ปปีงมอเตอร์ เพื่อป้องกันกระแสย้อนกลับมาจากขดลวดในกรณีที่ทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส (back emf) ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ทรานซิสเตอร์ ดังรูปที่ 3.13 และสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์ที่นำมาต่อรวมได้ดังนี้

จากข้อมูลคาต้าชีท (Data Sheet) ออปโตทรานซิสเตอร์เบอร์ 4N25 กำหนดค่า $I_F = 10$ mA, $V_F = 1.1$ V, $V_{CE(sat)} = 0.5$ V และอัตราส่งผ่านกระแสอินพุตไปด้านเข้าที่พุทมีอัตราส่งผ่าน 20% เพราะฉะนั้นกระแส I_{C1} เท่ากับ 2 mA

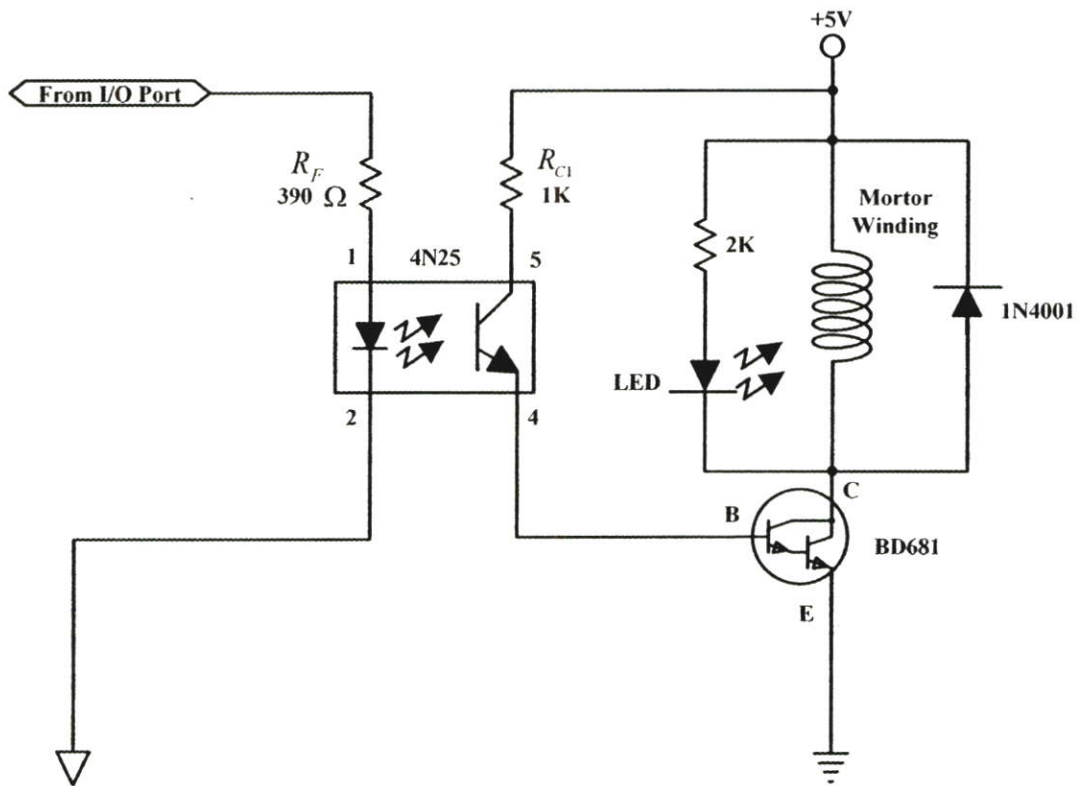
$$V_{in} - I_F R_F - V_F = 0 \quad (3.22)$$

$$R_F = \frac{V_{in} - V_F}{I_F} = \frac{5V - 1.1V}{10mA} = 390\Omega \quad (3.23)$$

จากข้อมูลค่าชี้ที่ (Data Sheet) ทรานซิสเตอร์เบอร์ BD 681 กำหนดค่า $V_{BE2} = 2.5 \text{ V}$ และสามารถคำนวณหาค่า R_{C1} ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{CC} - I_{C1}R_{C1} - V_{CE1(sat)} - V_{BE2} = 0 \quad (3.24)$$

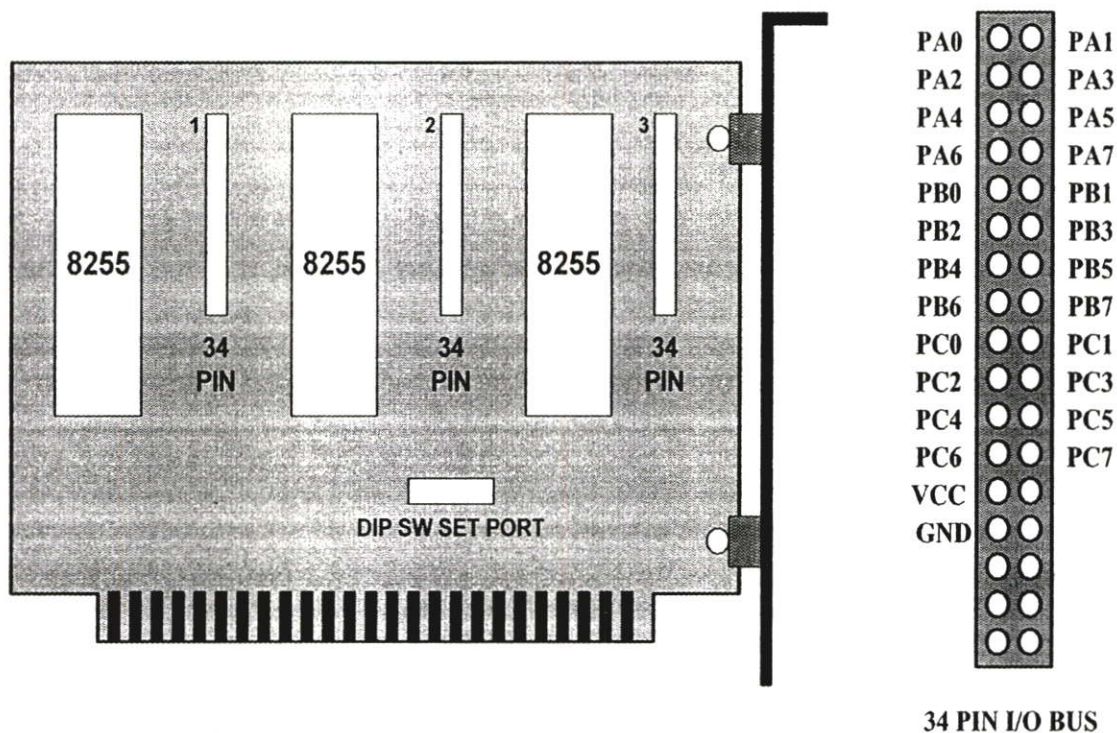
$$R_{C1} = \frac{V_{cc} - V_{CE1(sat)} - V_{BE2}}{I_{C1}} = \frac{5V - 0.5V - 2.5V}{2mA} = 1 \text{ K}\Omega \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.13 วงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์สำหรับเคลื่อนแกน X-Y

3.9 การ์ดอินเตอร์เฟซ (Interface Card)

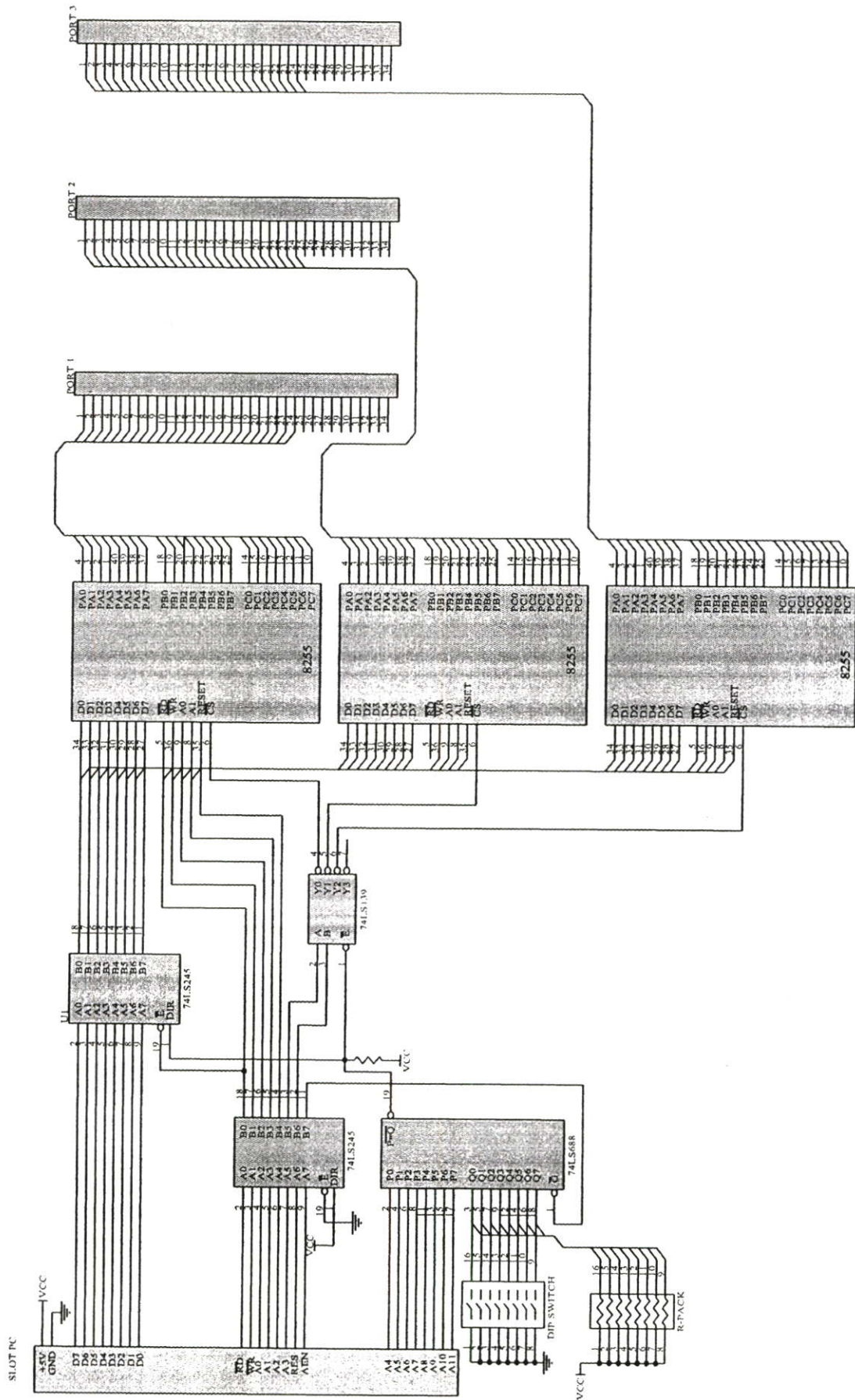
การ์ดอินเตอร์เฟซทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์สำหรับเคลื่อนแกน X-Y โดยการ์ดอินเตอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการ์ดต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุทพอร์ตและเอาต์พุทพอร์ตเพิ่มขึ้น โดยในส่วนของการ์ดอินเตอร์เฟซนี้จะมีพอร์ตให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ต หรือ 72 บิต (1 พอร์ตมี 8 บิต) ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติของการ์ด ET-8255 สามารถแสดงดังรูปที่ 3.14 และตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.14 ลักษณะของการ์คอินเตอร์เฟสรุ่น ET – 8255

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของการ์คอินเตอร์เฟสรุ่น ET – 8255

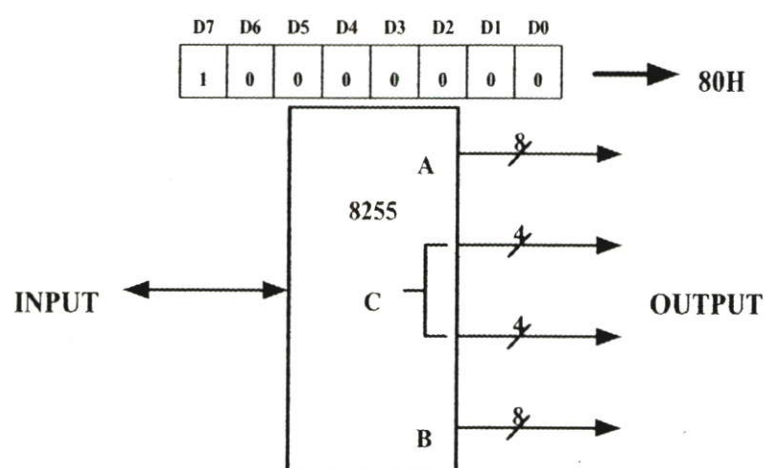
คุณสมบัติของของบอร์ด ET-8255	
INPUT LOGIC LOW	MIN = -0.5 VOLTS , MAX = 0.8 VOLTS
INPUT LOGIC HIGH	MIN = 2.0 VOLTS , MAX = 5 VOLTS
OUTPUT LOW VOLTAGE PORTS (I-SINK = 1.7 mA)	0.45 VOLTS
OUTPUT HIGH VOLTAGE PORTS (I-SOURCE = 200 μ A)	2.4 VOLTS
POWER CONSUMPTION	300 mA
SIZE	HALF SLOT (13×11 CM).
PORT	3 (8255 I/O PORT 3×8 BIT)
CONNECTOR	3 (34 PIN)
DECODE PORT	8 POSITION DIP SW.



รูปที่ 3.15 วงจรภายในของการ์ด ET-8255

สำหรับรูปที่ 3.15 แสดงลักษณะวงจรของการ์ด ET-8255 ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของไอซี 8255 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอินพุตพอร์ตและเอาต์พุตพอร์ต และส่วนของไอซีที่ทำหน้าที่ในการเลือกแอดเดรสของพอร์ต คือ ไอซี 74LS688 , 74LS139 และดิฟสวิทช์

ในส่วนภายในของไอซี 8255 นี้จะมีพอร์ตใช้งาน 3 พอร์ตและพอร์ตควบคุมอีก 1 พอร์ต โดยก่อนที่จะใช้งานไอซี 8255 จะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังพอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดให้พอร์ตทั้ง 3 พอร์ต ทำหน้าที่เป็นอินพุตพอร์ตหรือเอาต์พุตพอร์ต โดยในระบบเก็บข้อมูลนี้จะกำหนดพอร์ตทั้งหมดให้เป็นเอาต์พุตพอร์ต ซึ่งจะใช้โหมดในการควบคุมเป็นโหมด 0 และคอลโทรลโค้ด (Control Code) 80H ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ลักษณะพอร์ตของไอซี 8255 และสัญญาณควบคุม

ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรสสามารถแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET - 8255

ตารางการใช้พอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ของการ์ด ET-8255	
หมายเลขพอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์	การใช้งานพอร์ตของการ์ด ET-8255
300H	PORT A 8255#1
301H	PORT B 8255#1
302H	PORT C 8255#1
303H	CONTROL PORT 8255#1
304H	PORT A 8255#2

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

305H	PORT B 8255#2
306H	PORT C 8255#2
307H	CONTROL PORT 8255#2
308H	PORT A 8255#3
309H	PORT B 8255#3
30AH	PORT C 8255#3
30BH	CONTROL PORT 8255#3

3.10 วงจรขับสเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping motor driver circuit) สำหรับปรับระยะ

Lift off ของหัวโพรบในแนวแกน Z

วงจรถับสเต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้เคลื่อนหัวโพรบในแนวแกน Z จะใช้ไอซีเบอร์ 555 ความเป็นวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) โดยวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะต่อขา 2 (Trigger Input) เข้ากับขา 6 (Threshold) ซึ่งต่อ C_A อยู่เพื่อให้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงของ C_A ป้อนเข้าจุดชนวนการทำงานของวงจรถับสเต็ปป์มอเตอร์จากภายนอก และปรับค่าความถี่ไซเคิล (Duty Cycle) เท่ากับ 50% จึงต้องมีไดโอด D_1 และ D_2 ปิดกั้นทางเดินกระแสที่ C_A ที่ใช้ในการเก็บประจุและคายประจุ ซึ่งจะได้สัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยมป้อนให้กับเจเคฟลิปฟลอป (JK Flip Flop) โดยเจเคฟลิปฟลอปและเอ็กคลูซีฟออร์เกต (Exclusive Or Gate) จะทำหน้าที่ลำดับการทำงานของขดลวดแต่ละเฟสภายในสเต็ปป์มอเตอร์ โดยมีวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นตัวกระตุ้นให้เจเคฟลิปฟลอปทำงานตามความถี่ที่ออกแบบ ซึ่งขดลวดภายในสเต็ปป์มอเตอร์จะทำงานสองเฟสพร้อมกันเพื่อเพิ่มแรงบิดให้กับสเต็ปป์มอเตอร์ และส่งสัญญาณควบคุมไปที่วงจรถับกระแส ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BD 681 ช่วยขับกระแสเพื่อจ่ายให้กับขดลวดภายในสเต็ปป์มอเตอร์ ดังรูปที่ 3.17

ในการขับสเต็ปป์มอเตอร์จะใช้เวลาที่ต่ำๆ เพื่อจะได้แรงบิดที่เพียงพอต่อการหมุนแกน ซึ่งลักษณะการเชื่อมต่อแกนจะต่อกับสเต็ปป์โดยตรง และสเต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ 4 เฟส แรงดัน 12 V กระแส 1 A เคลื่อนที่ 1.8 องศาต่อสเต็ป ซึ่งภายใน 1 รอบ จะหมุนเท่ากับ $360/1.8$ เท่ากับ 200 สเต็ป ได้ระยะเคลื่อนที่ 4 มิลลิเมตร และกำหนด 1 รอบของการหมุนใช้เวลา 6 วินาที เพราะฉะนั้น คาบ (Period:T) ใช้เวลา $6/200$ เท่ากับ 30 ms. และจากการออกแบบวงจระอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ซึ่งกำหนดค่าความถี่ไซเคิลเท่ากับ 50% จะได้ $t_1 = t_2 = 15$ ms. ซึ่งสามารถคำนวณค่าอุปกรณ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

จากข้อมูลค่าชั้ท (Data Sheet) ของไอซีเบอร์ 555 กำหนดว่า

$$I_{C(\min)} \gg I_{th} = 0.25 \mu A$$

$$I_{C(\min)} \gg I_{trig} = 0.5 \mu A$$

$$\text{เลือกค่า } I_{C(\min)} = 0.1 \text{ mA}$$

$$R_A + R_B = \frac{V_{CC}}{3 \times I_{C(\min)}} = \frac{12}{3 \times 0.1 \times 10^{-3}} = 40 \text{ K}\Omega \quad (3.26)$$

$$t_1 = 0.693 \times C_A \times R_A \quad (3.27)$$

$$t_2 = 0.693 \times C_A \times R_B \quad (3.28)$$

จากการกำหนดค่าตัวชั้ทไอซีเกิล (Duty Cycle) มีค่าเท่ากับ 50% เพราะฉะนั้นจากสมการ (3.27) และสมการ (3.28) จะได้

$$R_A = R_B = 20 \text{ K}\Omega \quad (3.29)$$

จากสมการ (3.27) และสมการ (3.29) หาค่า C_A ได้เท่ากับ

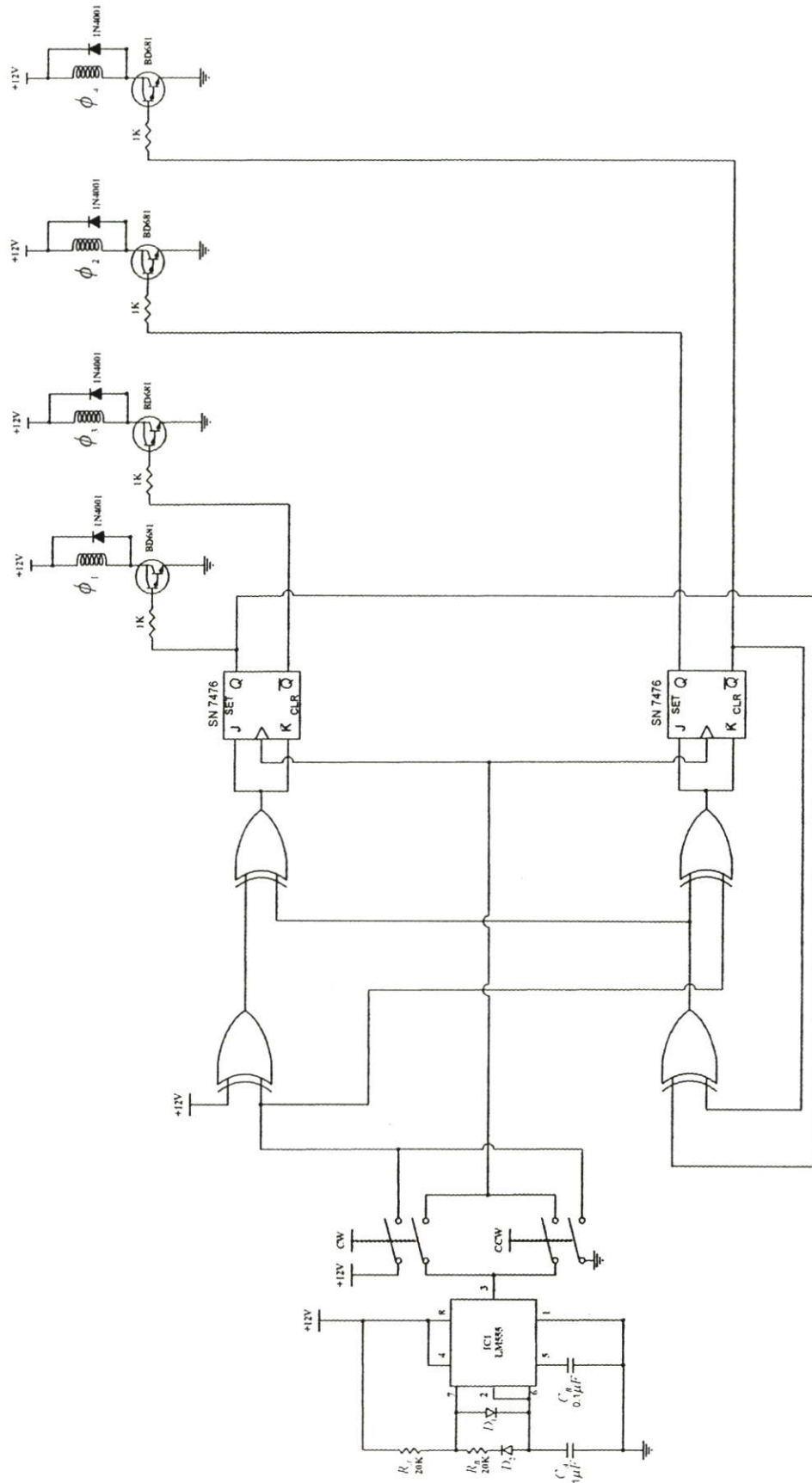
$$C_A = \frac{t_1}{0.693 \times R_A} = \frac{15 \times 10^{-3}}{0.693 \times 20 \times 10^3} = 1.08 \mu F \text{ (เลือกค่า } 1 \mu F) \quad (3.30)$$

จากข้อมูลค่าชั้ท (Data Sheet) ของไอซีเบอร์ SN7476 กระแสเข้าชั้พุทที่ออกจาก Q, \bar{Q} ของเจเกฟลิปฟลอมมีค่าเท่ากับ 10 mA

และจากข้อมูลค่าชั้ทของไอซีเบอร์ BD 681 ค่า $V_{BE} = 2.0 \text{ V}$ สามารถหาค่า R_B ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0 \quad (3.31)$$

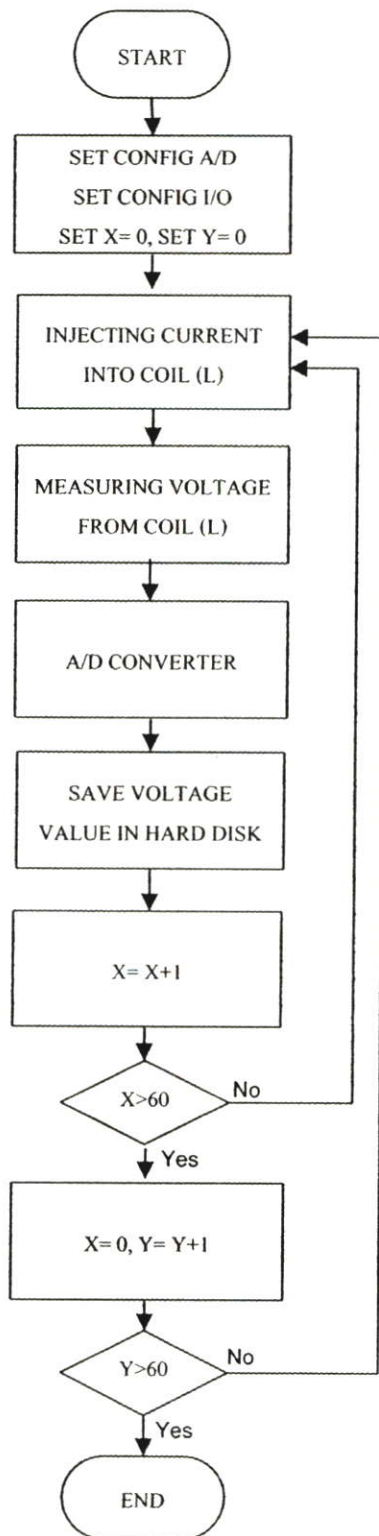
$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 2}{10 \times 10^{-3}} = 1 \text{ K}\Omega \quad (3.32)$$



รูปที่ 3.17 วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ (Stepping motor driver circuit) สำหรับควบคุมการเคลื่อน
หัวโพรบในแนวแกน Z

3.11 อัลกอริธึมในการเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวน

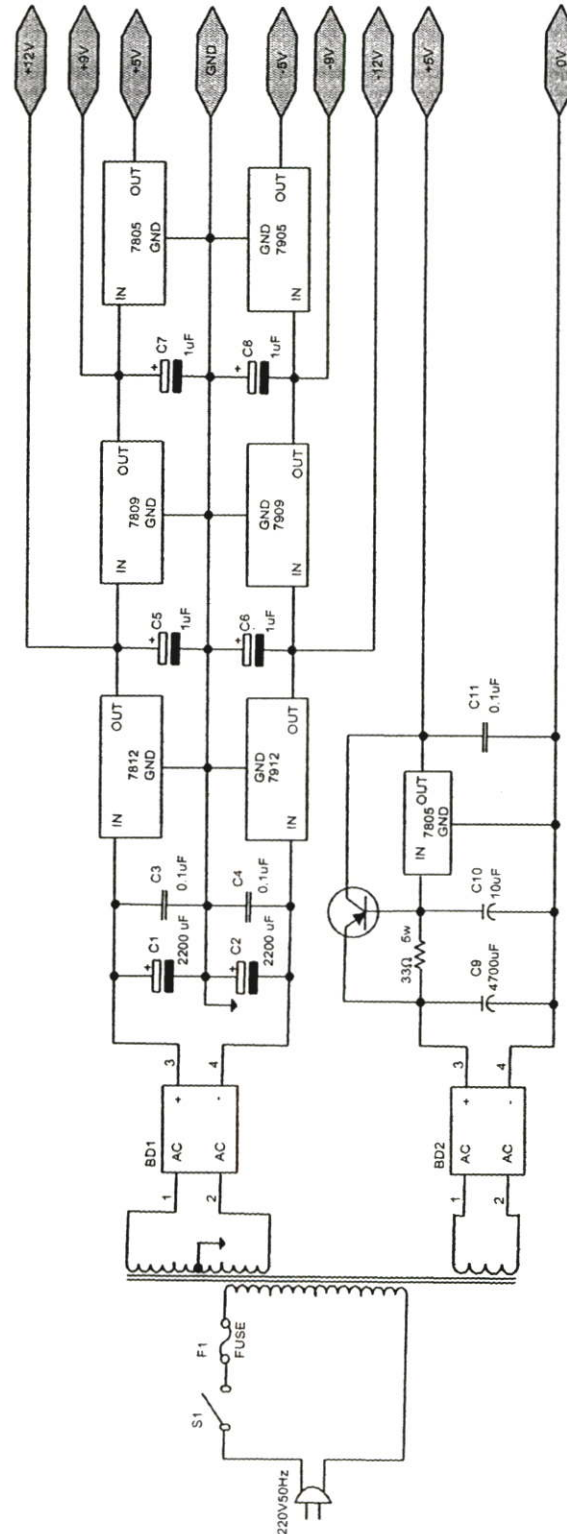
อัลกอริธึมในการเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 โดยข้อมูลที่ทำการวัดได้จะถูกส่งไปสร้างภาพกระแสไหลวนโดยโปรแกรม MATLAB ต่อไป



รูปที่ 3.18 อัลกอริธึมในการเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวน

3.12 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูล

วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูลและเคลื่อนแกน X-Y-Z สามารถแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบเก็บข้อมูลและเคลื่อนแกน X-Y-Z

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

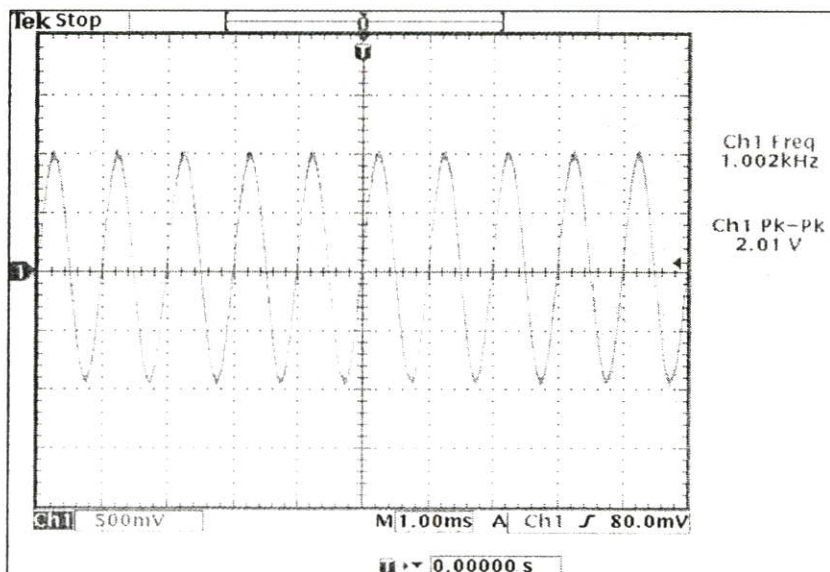
สำหรับบทนี้จะกล่าวถึง การทดสอบระบบสร้างภาพกระแสไหลวนที่ได้ทำการออกแบบขึ้นซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่จะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะฉะนั้นวงจรจะต้องมีความเสถียรภาพ จากนั้นทดสอบหัวโพรบที่สร้างขึ้น โดยการทดสอบจะแบ่งเป็น ทดสอบเงื่อนไขของหัวโพรบที่ได้สร้างขึ้น และนำหัวโพรบที่สร้างขึ้นทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การทดสอบวงจรเก็บข้อมูลสำหรับสร้างภาพกระแสไหลวน

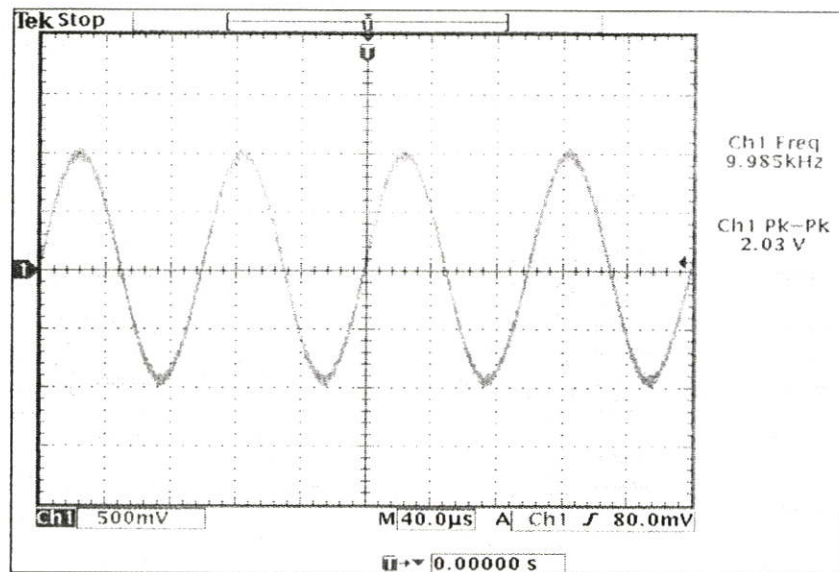
วงจรที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของการสร้างภาพจากข้อมูลจำลองประกอบด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์, วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน, วงจรขยายสัญญาณกระแสสลับที่ได้รับจากขดลวดโพรบ, และวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซี โดยการทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะแบ่งออกเป็นแต่ละภาคส่วนดังต่อไปนี้

4.1.1 การทดสอบสัญญาณวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

สำหรับวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ออกแบบขึ้นจะผลิตความถี่ในช่วง 1 Hz ถึง 20 MHz แต่จะใช้งานจริงในช่วงความถี่ 1 KHz ถึง 10 KHz ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่ความถี่ 1 KHz

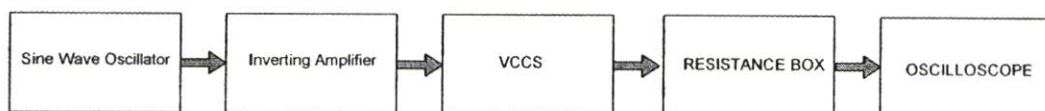


รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 10 KHz

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 สัญญาณรูปไซน์ที่ออกจากวงจรกำเนิดสัญญาณ โดยในระบบที่สร้างขึ้นใช้ไอซี MAX 038 ซึ่งเป็นไอซีชนิดฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ ซึ่งทำการเลือกความถี่โดยการปรับค่าความต้านทาน โดยสัญญาณที่ออกมาไม่มีค่าความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณ และไม่มีสัญญาณรบกวนขึ้นมากับรูปสัญญาณที่มีความถี่ 1 KHz และ 10 KHz

4.1.2 การทดสอบสัญญาณของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน

ในส่วนของการทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสคงที่ให้กับขดลวดโพรบ จะใช้โหลดตัวต้านทานทำการทดสอบแทนขดลวดโพรบ โดยต่อวงจรทดสอบกระแสคงที่ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่

สำหรับในการทดสอบจะทำการปรับค่าความต้านทานของโหลดตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม ในย่านกระแสต่างๆ ทั้ง 6 ค่า คือ 70, 100, 150, 200, 250 และ 300 mA_{p-p} แล้วจึงนำค่าแรงดันตกคร่อมโหลดมาคำนวณเพื่อหาค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลดโดยสมการที่ (4.1)

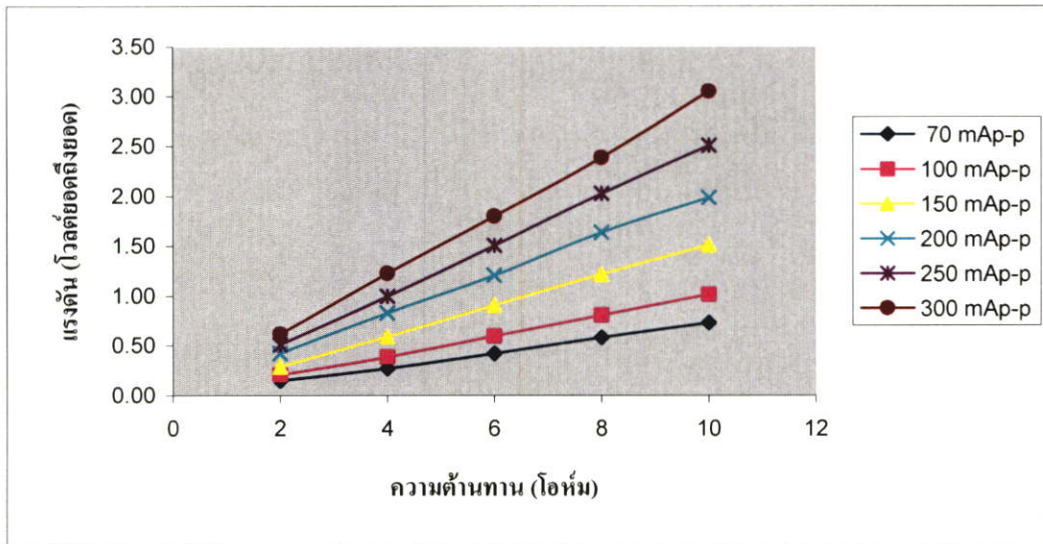
$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (4.1)$$

เมื่อ I_L คือ ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลด (mA_{p-p})

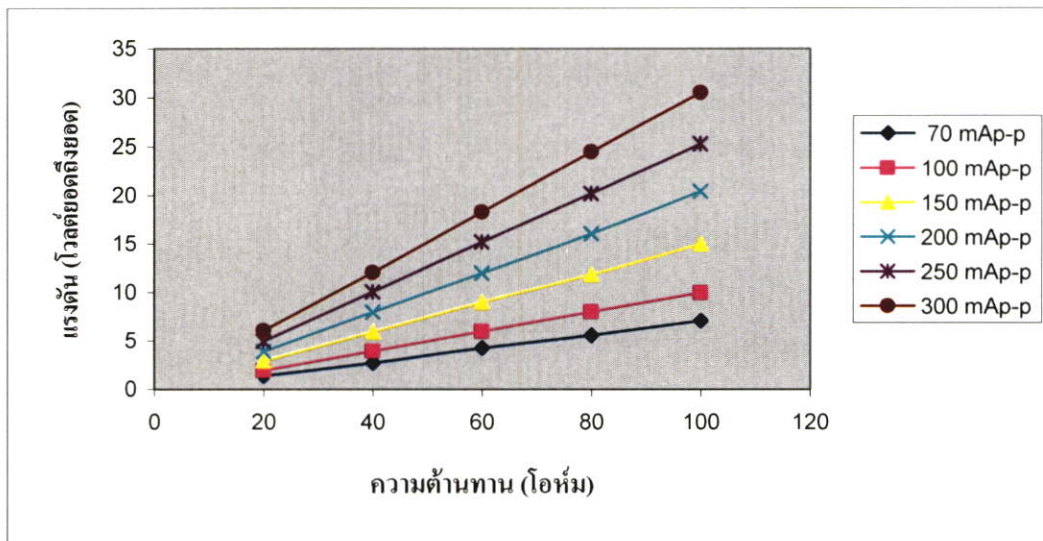
R_L คือ ค่าความต้านทานโหลด (โอห์ม)

V_L คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมโหลด (V_{p-p})

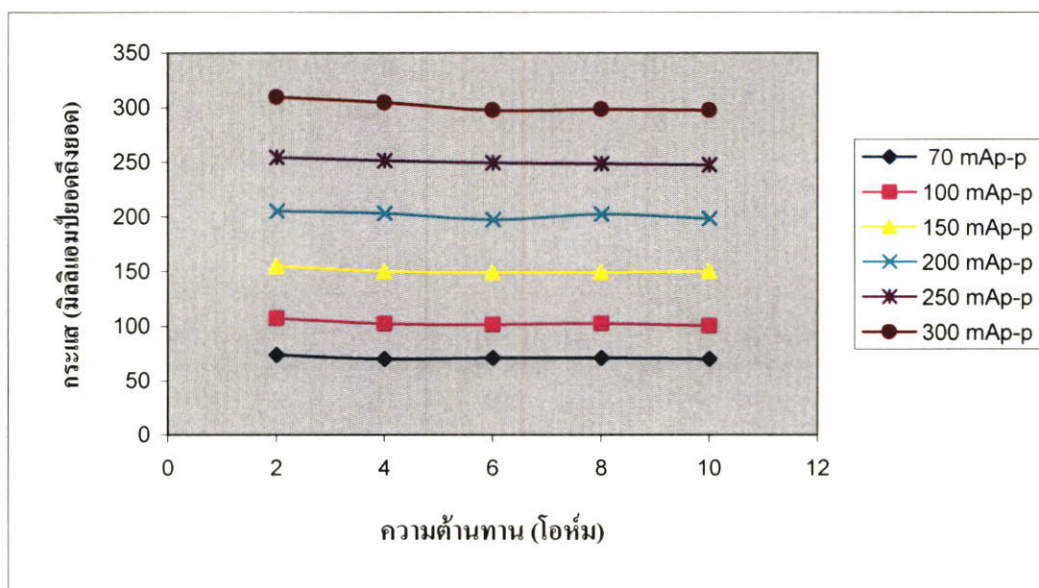
จากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้และค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณได้ในแต่ละย่านกระแสมาพล็อตเปรียบเทียบเพื่อดูความสามารถในการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่ ที่ได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7



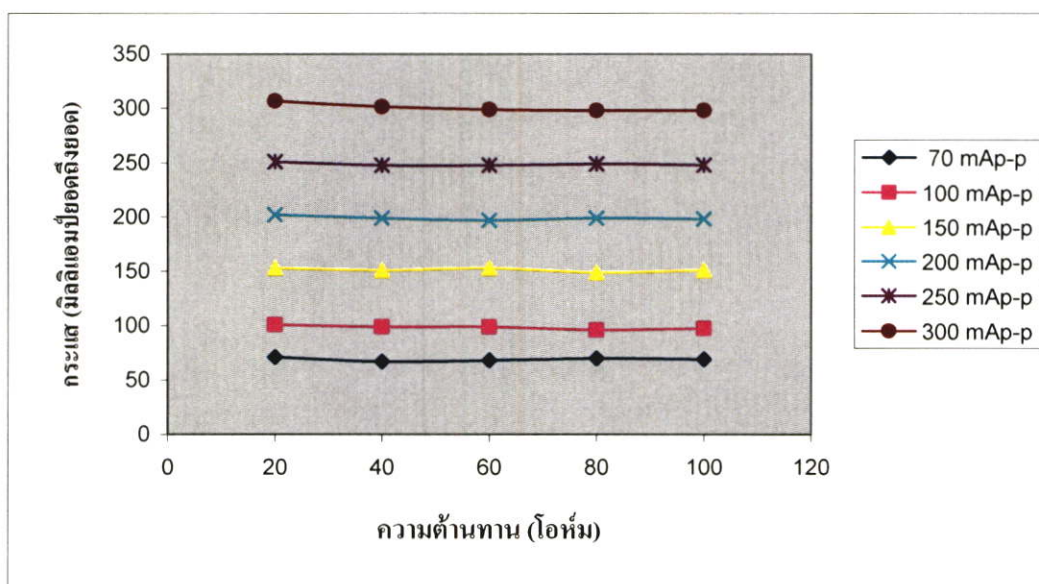
รูปที่ 4.4 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 2-10 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 6 ค่า



รูปที่ 4.5 ค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ที่ช่วงโหลด 20-100 โอห์ม ในย่านกระแสค่าต่างๆ ทั้ง 6 ค่า



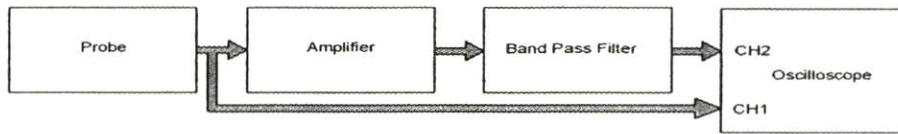
รูปที่ 4.6 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ใน ช่วงโหลด 2-10 โอห์ม ในย่านกระแสต่างๆ ทั้ง 6 ค่า



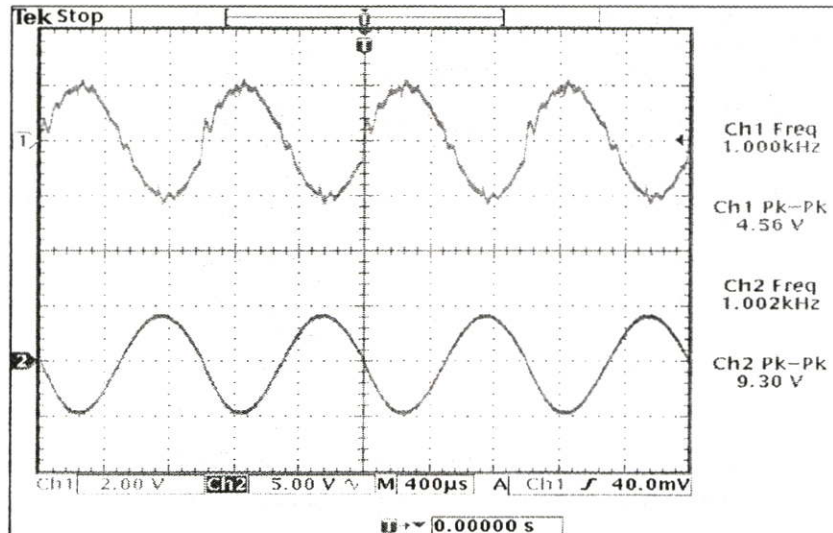
รูปที่ 4.7 ค่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดที่คำนวณจากค่าแรงดันตกคร่อมโหลดที่วัดได้ใน ช่วงโหลด 20-100 โอห์ม ในย่านกระแสต่างๆ ทั้ง 6 ค่า

4.1.3 การทดสอบสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณและวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์

สำหรับลักษณะสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งทดสอบโดยต่อวงจรตามบล็อกไดอะแกรมดังรูป 4.8 โดยใช้ฮอสซิลโลสโคปแชนแนล 1 (Ch1) วัดที่เอาต์พุตของขดลวดโพรบส่วนแชนแนล 2 (Ch2) วัดที่เอาต์พุตของวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งจะได้รูปสัญญาณดังรูป 4.9



รูปที่ 4.8 บล็อกไดอะแกรมทดสอบสัญญาณของวงจรขยายที่ผ่านวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์

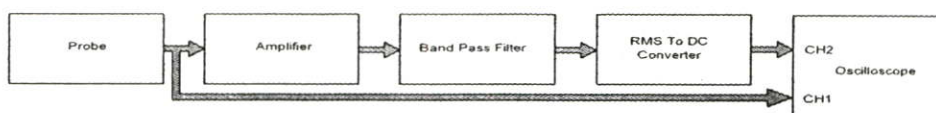


รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณจากขดลวดโพรบที่มีความถี่ 1 KHz

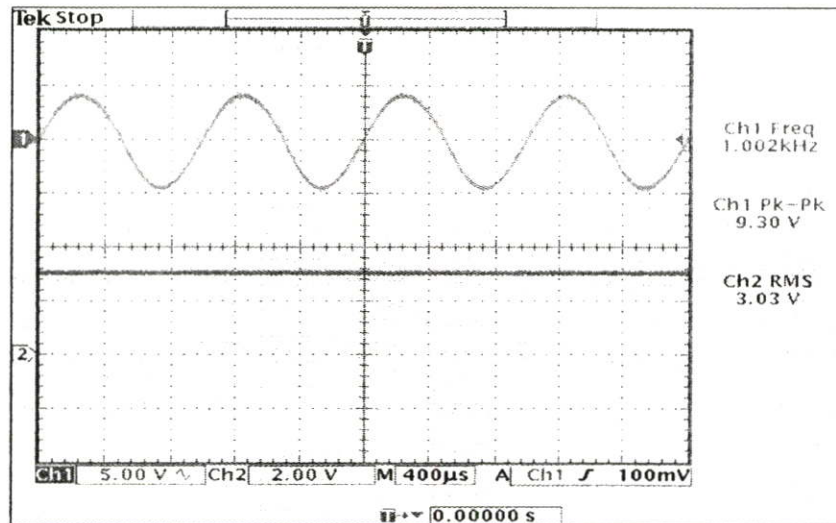
จากรูปที่ 4.9 เป็นสัญญาณรูปไซน์ที่รับจากเอาต์พุตของขดลวดโพรบ จะเห็นว่าสัญญาณที่ได้รับจากขดลวดโพรบมีสัญญาณรบกวนขึ้นมากับคลื่นรูปไซน์ที่ความถี่ 1 KHz ส่วนเอาต์พุตของวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่ผ่านภาคขยายสัญญาณกระแสสลับจะขยายสัญญาณรูปไซน์ให้มีระดับแอมพลิจูดของสัญญาณให้สูงขึ้นแต่จะขยายสัญญาณรบกวนด้วยจึงต้องมีวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์เลือกช่วงสัญญาณความถี่ 1 KHz ซึ่งวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ที่ใช้เป็นชนิดแบบกลับเฟส ทำให้รูปสัญญาณเอาต์พุตมีเฟสต่างจากสัญญาณอินพุต 180 องศา

4.1.4 การทดสอบสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซี

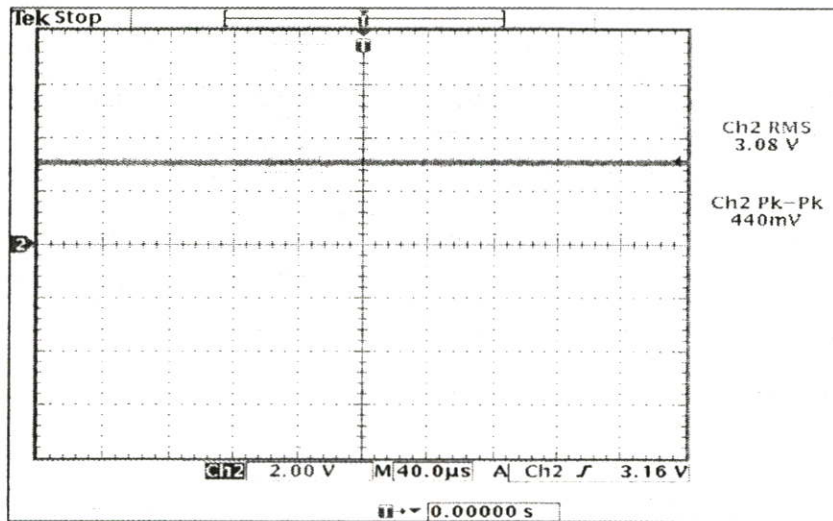
สำหรับลักษณะของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซี ซึ่งทดสอบโดยต่อวงจรตามบล็อกไดอะแกรมดังรูป 4.10 โดยใช้ฮอสซิติลโลสโคปแชนแนล 1 (Ch1) วัดที่เอาต์พุตของวงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ส่วนแชนแนล 2 (Ch2) วัดที่เอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซี ซึ่งจะได้รูปสัญญาณดังรูป 4.11 ถึงรูปที่ 4.12



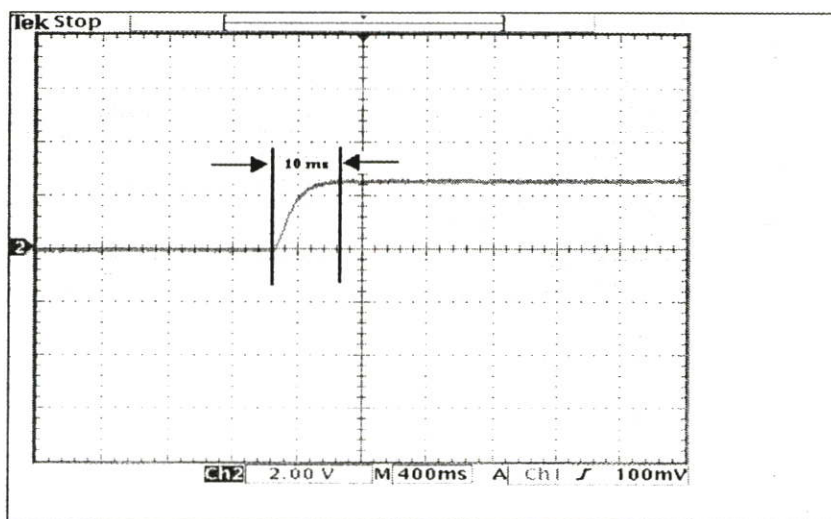
รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมทดสอบสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นสัญญาณดีซี



รูปที่ 4.11 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรีเอมอสทูตัสที่ความถี่ 1 KHz



รูปที่ 4.12 แสดงสัญญาณรบกวนที่ขึ้นบนสัญญาณดีซีที่เอาต์พุตของอาร์เอ็มเอสทูตัส



รูปที่ 4.13 ช่วงเวลาที่ใช้ในการอ่านค่าศักดาไฟฟ้าแต่ละค่า

จากรูปที่ 4.11 จะเป็นสัญญาณไซน์ก่อนที่จะแปลงเป็นแรงดันไฟตรง (DC) โดยรับมาจาก วงจรแบนด์พาสฟิลเตอร์ ส่วน Ch2 แสดงขนาดของแรงดันไฟตรง ซึ่งเป็นเอาต์พุตของวงจร RMS To DC Converter โดยแรงดันไฟตรงที่ได้จะมีขนาดเทียบเท่ากับค่า RMS ของสัญญาณไซน์ที่อินพุต ของวงจร และขณะเดียวกันบนแรงดันไฟตรงนั้น จะพบว่าสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับค่าแสดงใน รูปที่ 4.12 (Ch2) และในรูปที่ 4.13 แสดงช่วงเวลาในการแปลงเป็นแรงดันไฟตรงโดยต้องหน่วง เวลาการเคลื่อนแกนเก็บค่าแรงดันไฟตรงมากกว่าค่าเวลาที่ใช้ในการแปลงเท่ากับ 10 ms

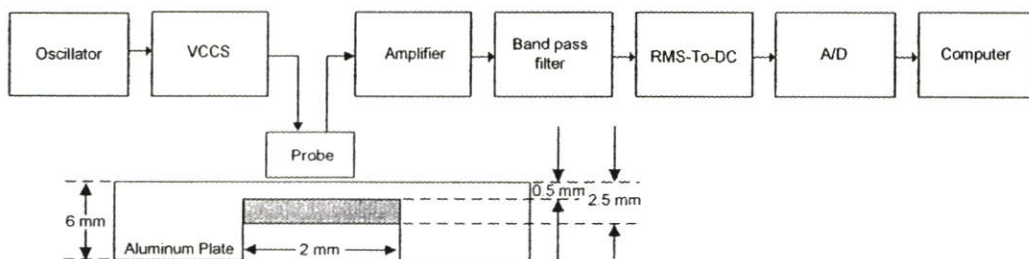
4.2 การทดสอบสัญญาณจากระบบที่ออกแบบขึ้นเมื่อวัดจากแผ่นโลหะทดสอบ

หลังจากทำการทดสอบความเสถียรภาพวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปแล้ว ในหัวข้อต่อไปนี้จะ นำวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทดสอบร่วมกับหัวโพรบที่ได้ทำการออกแบบขึ้นดังหัวข้อ 3.1 โดย ทดสอบกับโลหะอลูมิเนียมที่มีความหนา 0.5 มม. ถึง 6.0 มม. ซึ่งมีขนาดของรอยบกพร่องจำลอง ลักษณะต่างๆ ดังภาคผนวก ก และทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบสร้างภาพกระแส ไทลวดตามหัวข้อดังต่อไปนี้

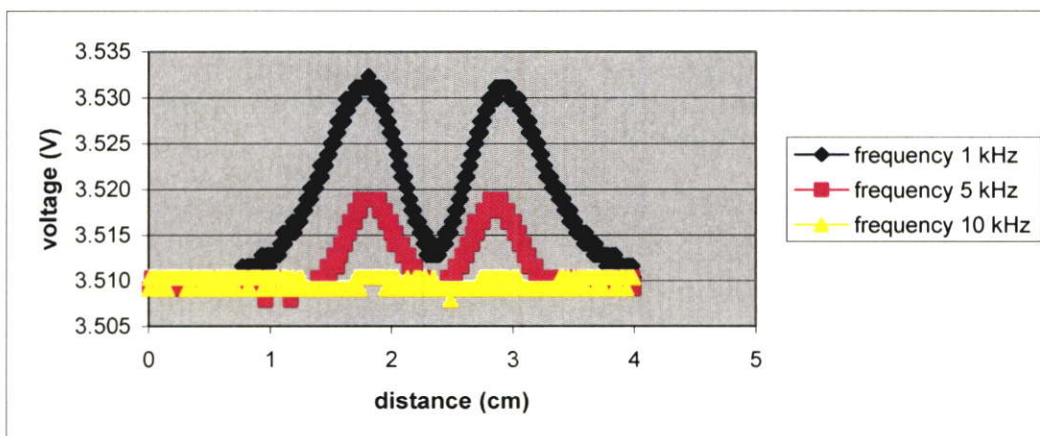
4.2.1 การทดสอบปรับเปลี่ยนความถี่ให้กับหัวโพรบ

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

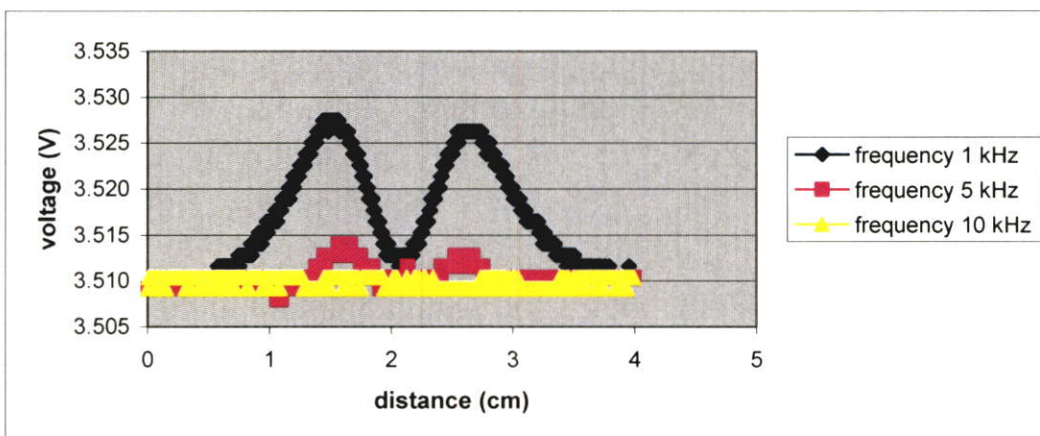
1. ต่อวงจรตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.14
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz, 5 KHz. และ 10 KHz ขนาด 150 mA_{p-p} ที่ อินพุตของหัวโพรบตามลำดับ
3. นำหัวโพรบวางบนแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งแผ่นอลูมิเนียมมีช่องว่างอากาศที่มีระยะความลึก ที่พบช่องว่างอากาศเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 มม. ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดด้านที่ไม่มี รอยบกพร่อง
4. ทำการเลื่อนแกนโดยมีระยะทาง 40 มม. และค่าแรงดันไฟฟ้าจะถูกเก็บที่ฮาร์ดดิสก์
5. นำค่าแรงดันไฟฟ้าไปพล็อตในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่า แรงดันไฟฟ้าต่อระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศที่มีความถี่ต่างๆ



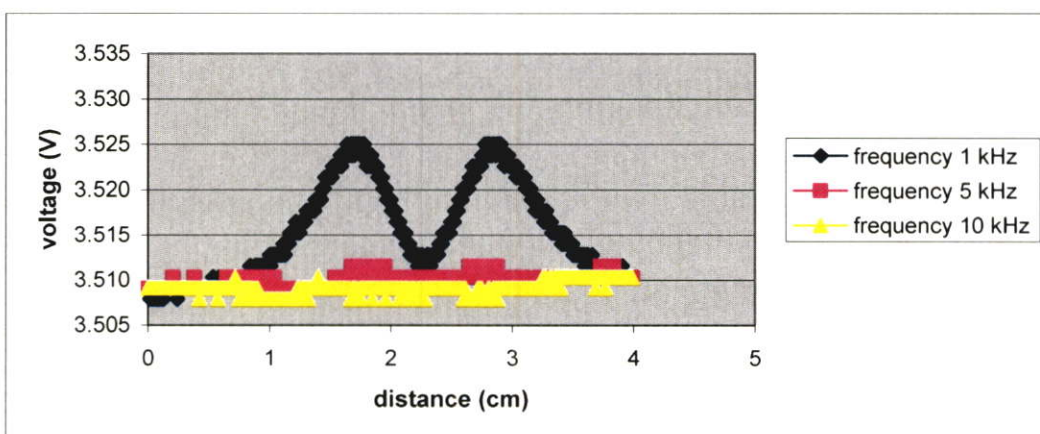
รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบหัวโพรบ



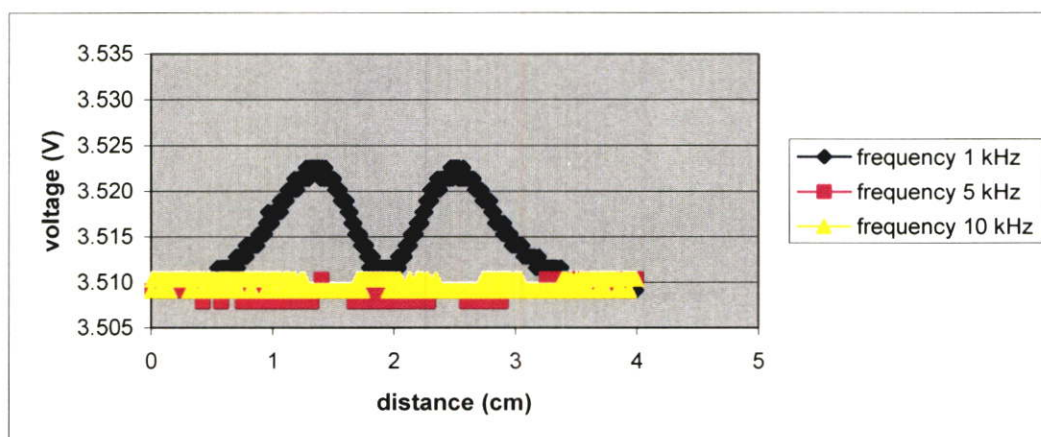
รูปที่ 4.15 ค่าแรงดันเข้าตัวพู่ที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 0.5 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.



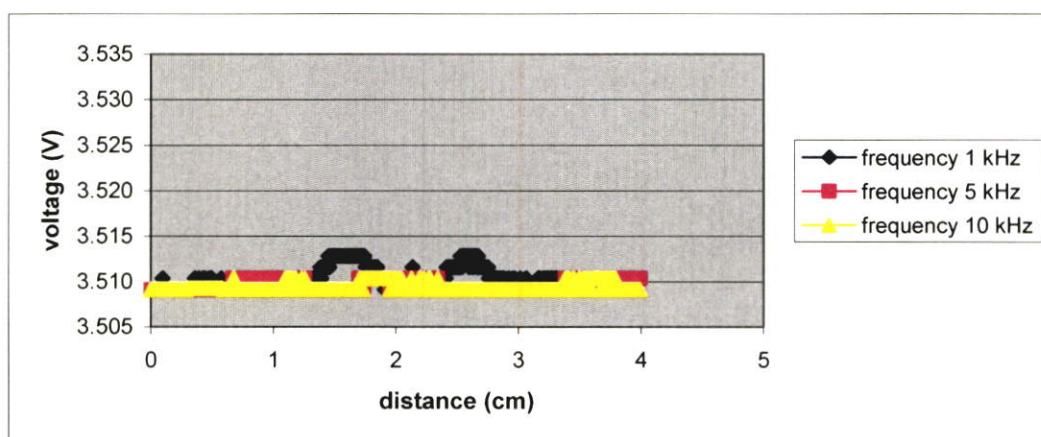
รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันเข้าตัวพู่ที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 1.0 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.



รูปที่ 4.17 ค่าแรงดันเข้าตัวพู่ที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 1.5 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.



รูปที่ 4.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 2.0 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.



รูปที่ 4.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 2.5 มม. โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 KHz.

จากรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าที่ความถี่ 1 KHz. กระแสไหลวนสามารถแทรกลึกลงไปใ้ในเนื้ออลูมิเนียมมากกว่า 2.0 มม. และระดับแรงดันจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเนื้ออลูมิเนียมที่เหลืออยู่ จากนั้นทดลองเพิ่มความถี่เป็น 5 KHz. กระแสไหลวนลงลึกไปในเนื้ออลูมิเนียมได้สูงสุด 1.0 มม. แต่ระดับแรงดันค่อนข้างต่ำมาก สุดท้ายเพิ่มความถี่เป็น 10 KHz. กระแสไหลวนไม่สามารถแทรกเข้าไปในเนื้ออลูมิเนียมได้ เพราะเกิดปรากฏการณ์ Skin Depth Effect สังเกตได้จากกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อหัวโพรบผ่านช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในแผ่นอลูมิเนียม

4.2.2 การทดสอบปรับเปลี่ยนการจ่ายกระแสลงที่ให้กับหัวโพรบ

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

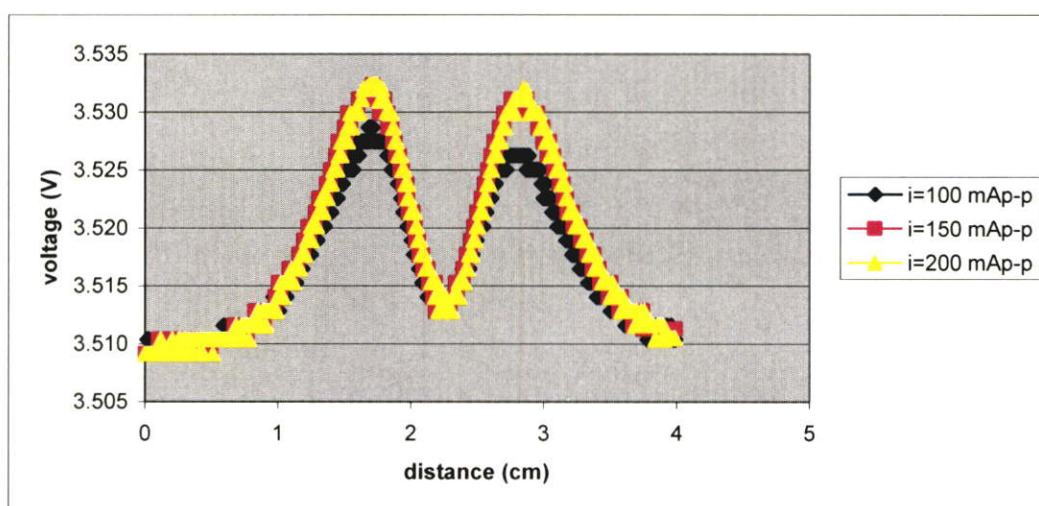
1. ต่อดังตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.14

2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 100,150, 200 mA_{p-p} ที่อินพุทของหัวโพรบ

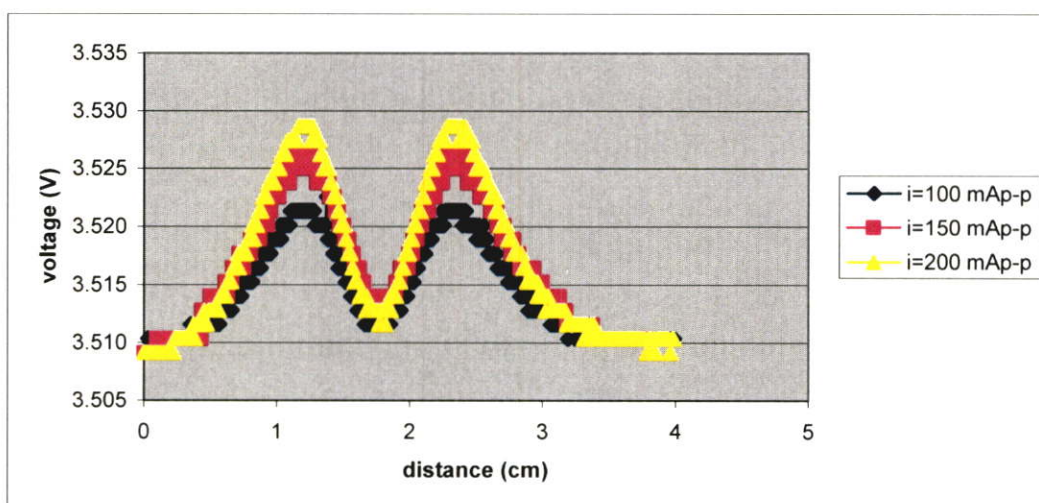
3. นำหัวโพรบวางบนแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งแผ่นอลูมิเนียมมีช่องว่างอากาศที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 มม. ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดค่าที่ไม่มีรอยบกพร่อง

4. ทำการเลื่อนแกนโดยมีระยะทาง 40 มม. และค่าแรงดันไฟฟ้าจะถูกเก็บที่ฮาร์ดดิสก์

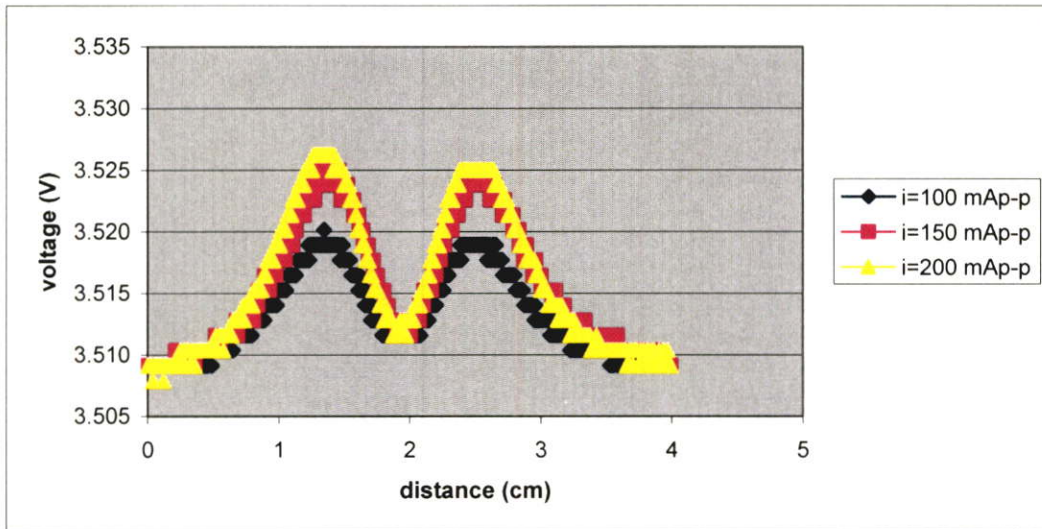
5. นำค่าแรงดันไฟฟ้าไปพล็อตในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศที่ความถี่ 1 KHz. โดยปรับเปลี่ยนค่ากระแสคงที่



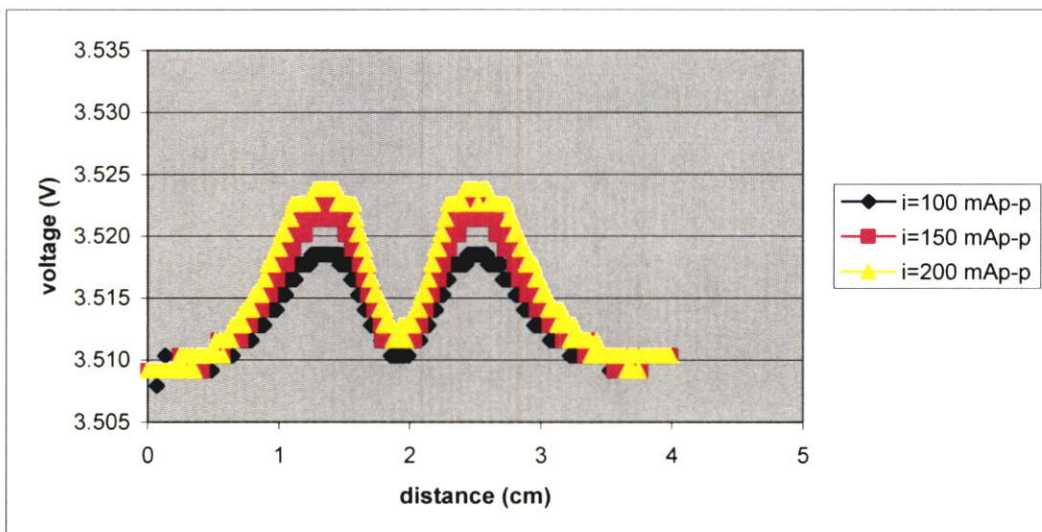
รูปที่ 4.20 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 0.5 มม. โดยจ่ายกระแสคงที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}



รูปที่ 4.21 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 1.0 มม. โดยจ่ายกระแสคงที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}



รูปที่ 4.22 ค่าแรงดันแอมป์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 1.5 มม. โดยจ่ายกระแสคงที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}



รูปที่ 4.23 ค่าแรงดันแอมป์พุทที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในเท่ากับ 2.0 มม. โดยจ่ายกระแสคงที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p}

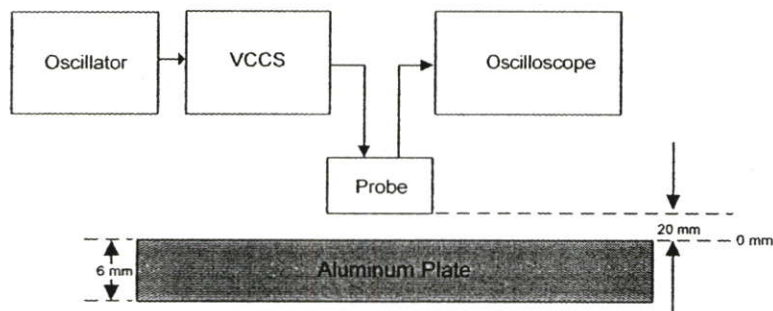
จากรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.23 เป็นค่าแรงดันแอมป์พุทที่ได้จากผลทดลองจ่ายค่ากระแสคงที่เท่ากับ 100, 150 และ 200 mA_{p-p} ตามลำดับ ให้กับหัวโพรบที่มีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 0.5 มม. ถึง 2.0 มม. โดยป้อนความถี่เท่ากับ 1 KHz. พบว่าถ้าจ่ายกระแสคงที่ให้กับหัวโพรบมากความแตกต่างของระดับแรงดันจะปรากฏชัดมากขึ้น เนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของกระแสไหลวนมีมากขึ้นตาม จนถึงค่าหนึ่งคือ 150 mA_{p-p} พอจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 200 mA_{p-p} ระดับแรงดันจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

4.2.3 การทดสอบระยะห่างระหว่างโพรบกับชิ้นงาน (Lift off)

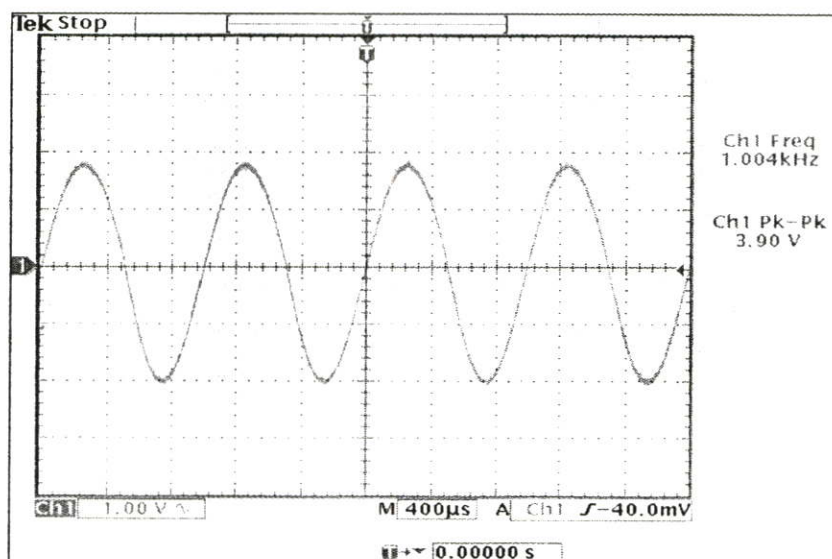
จากผลการทดลองเปลี่ยนความถี่ และผลของการจ่ายกระแสคงที่ จากหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าที่ความถี่ 1 KHz. ค่ากระแสไหลวนสามารถแทรกกลงไปในเนื้ออลูมิเนียมได้มากที่สุด และผลของการจ่ายกระแสคงที่ให้กับหัวโพรบ โดยค่ากระแสคงที่ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ระดับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าสามารถสังเกตเห็นได้ชัดคือ 150 mA_{p-p} เพราะฉะนั้นจากหัวข้อต่อไปนี้จะใช้ความถี่ 1 KHz. และจ่ายกระแสคงที่เท่ากับ 150 mA_{p-p}

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

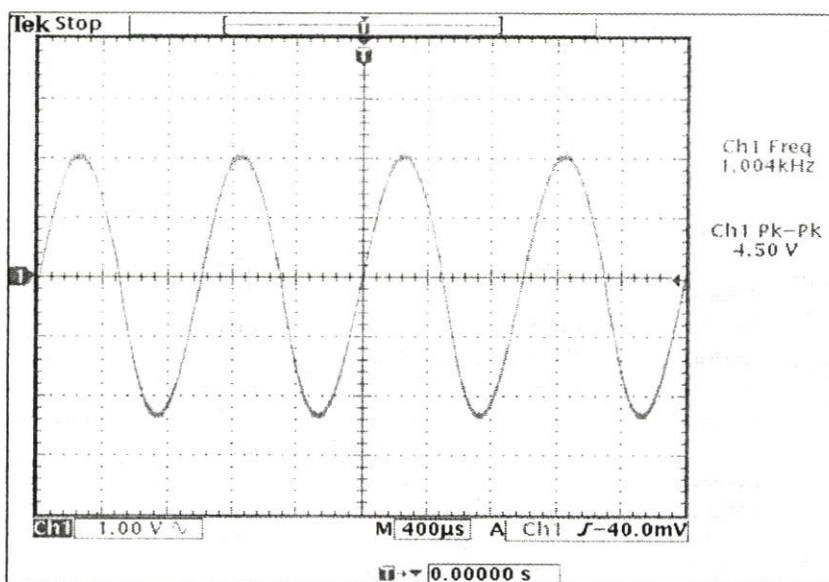
1. ต่อดวงจรตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.24
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1-KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุตของหัวโพรบ
3. นำโพรบวางบนแผ่นอลูมิเนียมที่ไม่มีรอยบดพรวงและมีระยะห่างระหว่างหัวโพรบกับชิ้นงานเท่ากับ 0 มม. ถึง 20 มม. ตามลำดับ
4. ใช้ข้อซิติล โดสโคปวัดสัญญาณและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.24 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบระยะห่างระหว่างหัวโพรบกับแผ่นอลูมิเนียม (Lift off)



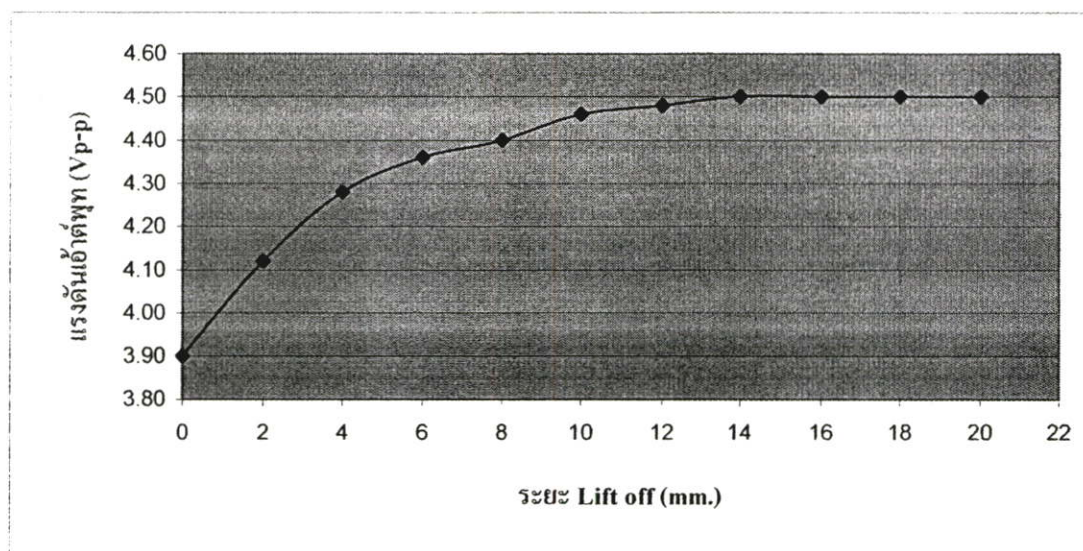
รูปที่ 4.25 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ขณะวางหัวโพรบบนแผ่นอลูมิเนียมทดสอบห่าง 0 มม.



รูปที่ 4.26 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ขณะวางหัวโพรบบนแผ่นอลูมิเนียมทดสอบห่าง 20 มม.

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบระยะ Lift off ของหัวโพรบ

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (KHz)	ระยะห่างระหว่างขดลวด โพรบกับชิ้นงาน (mm)	แรงดันเอาต์พุต (Vp-p)
1	0	3.90
1	2	4.12
1	4	4.28
1	6	4.36
1	8	4.40
1	10	4.46
1	12	4.48
1	14	4.50
1	16	4.50
1	18	4.50
1	20	4.50



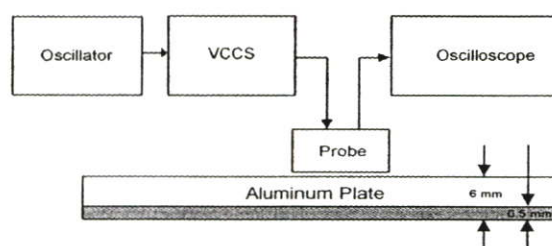
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบระยะ Lift off ของหัวโพรบ

จากกราฟรูปที่ 4.27 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการปรับระยะห่างระหว่างหัวโพรบกับแผ่นอลูมิเนียม (Lift off) จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างหัวโพรบกับแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะ 0 มม. จะมีระดับแรงดันต่ำสุดดังรูปที่ 4.25 โดยที่ระยะ Lift off ของหัวโพรบเท่ากับ 0 มม. ถึง 12 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่พอเพิ่มระยะ Lift off ของหัวโพรบจาก 12 มม. ถึง 20 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ในที่สุด โดยค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดที่ระยะ Lift off ของหัวโพรบเท่ากับ 14 มม. ถึง 20 มม. ดังรูปที่ 4.26

4.2.4 การทดสอบหัวโพรบต่อความหนาของแผ่นโลหะ

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

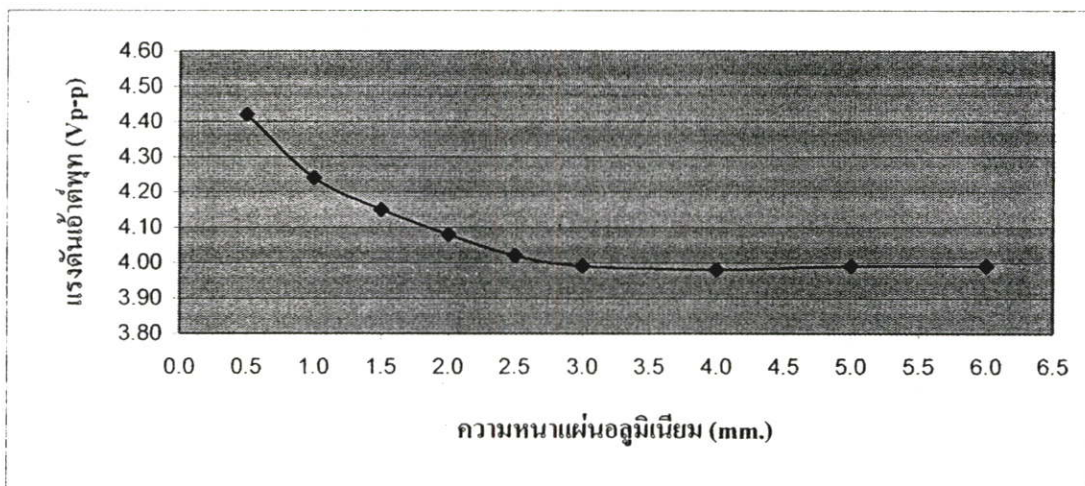
1. ต่อดวงจรตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.28
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุตของหัวโพรบ
3. นำหัวโพรบวางบนแผ่นอลูมิเนียมหนาที่มีความหนาของแผ่นเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 มม. ตามลำดับ
4. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.28 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบความหนาของแผ่นอลูมิเนียม

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.5- 6.0 มม.

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (KHz)	ความหนาของแผ่น อลูมิเนียม (mm)	แรงดันเอาต์พุต (Vp-p)
1	0.5	4.42
1	1.0	4.24
1	1.5	4.15
1	2.0	4.08
1	2.5	4.02
1	3.0	3.99
1	4.0	3.98
1	5.0	3.99
1	6.0	3.99



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบความหนาแผ่นอลูมิเนียม 0.5- 6.0 มม.

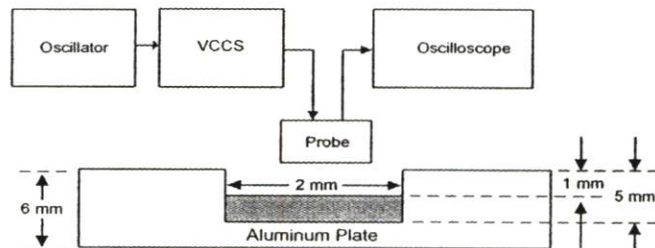
จากกราฟรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าที่ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม 0.5 มม. ถึง 1.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนถึง 180 mV_{p-p} พอเพิ่มความหนาของแผ่นอลูมิเนียมจาก 1.0 มม. ถึง 2.5 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 70 mV_{p-p} และสุดท้ายเพิ่มความหนาจาก 2.5 มม. ถึง 6.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ในที่สุด

4.2.5 การทดสอบหัวโพรบต่อระดับความลึกของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียม

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อยंत्रตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.30

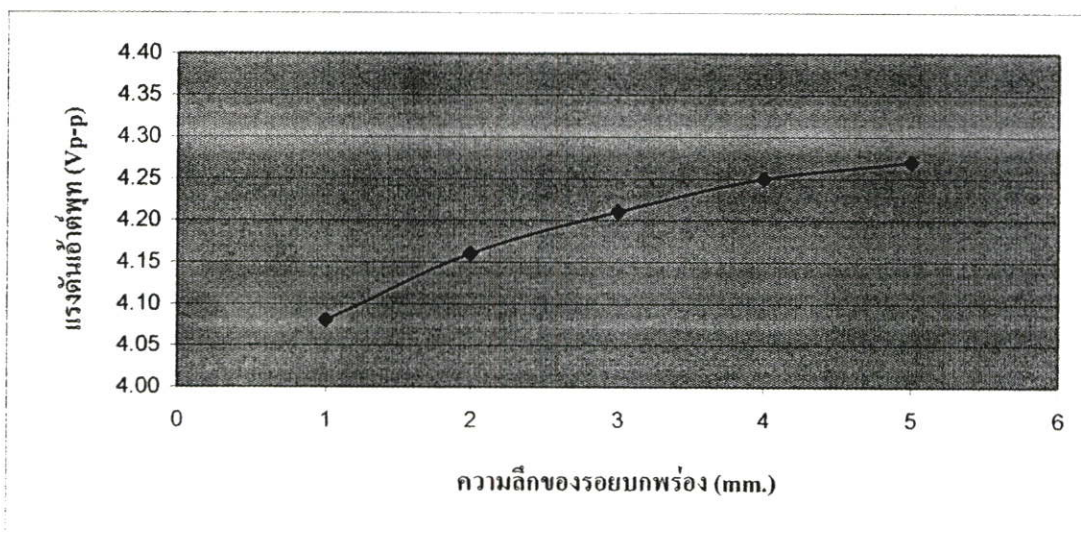
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุทของหัวโพรบ
3. นำหัวโพรบวางบนแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะความลึกของรอยบกดพร้อมเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5 มม. ตามลำดับ
4. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.30 บล็อกไดอะแกรมทดสอบหาระยะความลึกของรอยบกดพร้อมภายในเนื้ออลูมิเนียม

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบหาระดับความลึกของรอยบกดพร้อม

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (KHz)	ความลึกของรอยบกดพร้อม บนแผ่นอลูมิเนียม (mm)	แรงดันเอาต์พุท (Vp-p)
1	1	4.08
1	2	4.16
1	3	4.21
1	4	4.25
1	5	4.27

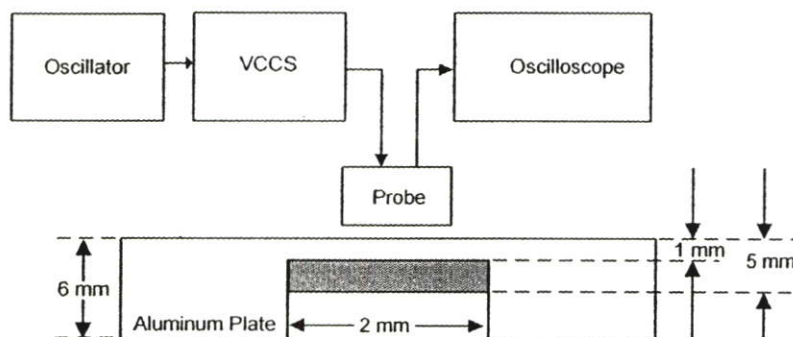


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุทที่ได้จากการทดสอบหาระยะความลึกของรอยบกดพร้อม

จากกราฟรูปที่ 4.31 พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระยะความลึกของรอยบดพ่นจากผิวของอลูมิเนียมที่ระยะความลึก 1.0 มม. ถึง 4.0 มม. มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60 mV_{p-p} และระยะความลึก 4.0 มม. ถึง 5.0 มม. มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 mV_{p-p}

4.2.6 การทดสอบหัวโพรบต่อระยะความลึกของช่องว่างอากาศภายในเนื้ออลูมิเนียมลำดับขั้นตอนการทดลอง

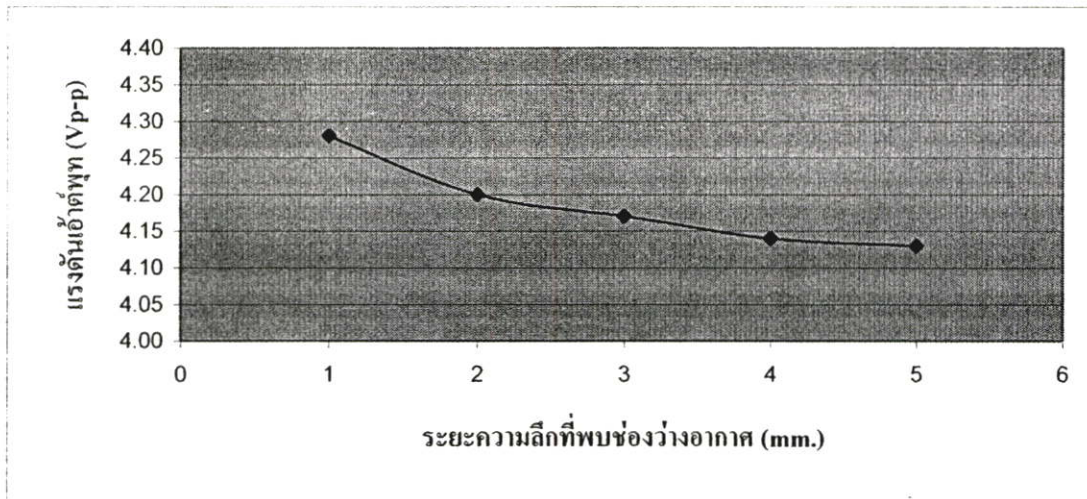
1. ต่อดวงจรมบลิ้อกไดอะแกรมรูปที่ 4.32
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุตของหัวโพรบ
3. นำหัวโพรบวางบนแผ่นอลูมิเนียมที่มีช่องว่างอากาศภายในแผ่นอลูมิเนียม โดยมีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 มม. ตามลำดับ
4. ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.32 บลิ้อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบหาระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศที่อยู่ในเนื้ออลูมิเนียม

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการทดสอบหาระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศ

ความถี่ที่ใช้ทดสอบ (KHz)	ระยะความลึกช่องว่างอากาศภายในเนื้ออลูมิเนียม (mm)	แรงดันเอาต์พุต (V_{p-p})
1	1	4.28
1	2	4.20
1	3	4.17
1	4	4.14
1	5	4.13

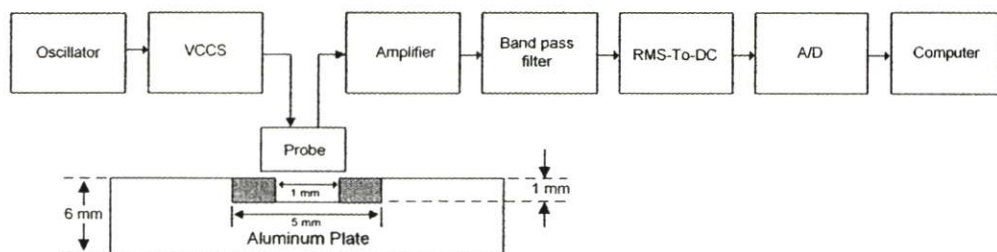


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าแรงดันแฉับพัทที่ได้จากการทดสอบหาระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศ

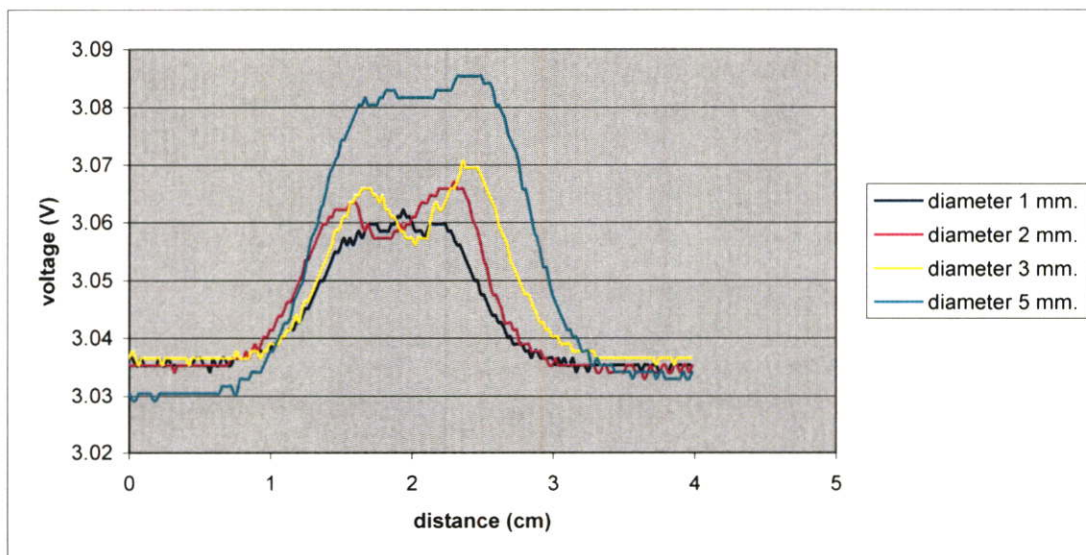
จากกราฟรูปที่ 4.33 เป็นผลทดลองเพื่อทดสอบหาระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศที่อยู่ในแผ่นอลูมิเนียม พบว่าที่ระยะความลึกของช่องว่างอากาศ 1.0 มม. ถึง 2.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง 80 mV_{p-p} และหากช่องว่างอากาศอยู่ลึกจากผิวอลูมิเนียมจาก 2.0 มม. ถึง 5.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 mV_{p-p}

4.2.7 การทดสอบหาขนาดความกว้างของรอยบกพร่องและช่องว่างอากาศภายในโลหะ ลำดับขั้นตอนการทดลอง

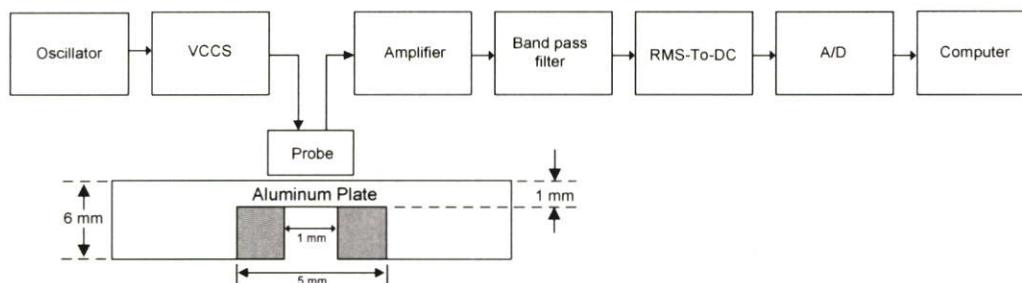
1. ต้องวางจตามบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.34 เมื่อทดสอบด้านที่มีรอยบกพร่องและทดสอบด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง โดยต้องวางจตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.36
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุทของหัวโพรบ
3. นำโพรบวางบนชิ้นงานทดสอบที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม โดยระยะ Lift off เท่ากับ 1 มม. กับรอยบกพร่องขนาด 1×20 , 2×20 , 3×20 และ 5×20 มม. ตามลำดับ จากนั้นทดสอบด้านที่มีรอยบกพร่องและด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง
4. ทำการเคลื่อนแกนและเก็บค่าแรงดันลงในฮาร์ดดิสก์ จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ไปพล็อตในโปรแกรม Microsoft Excel



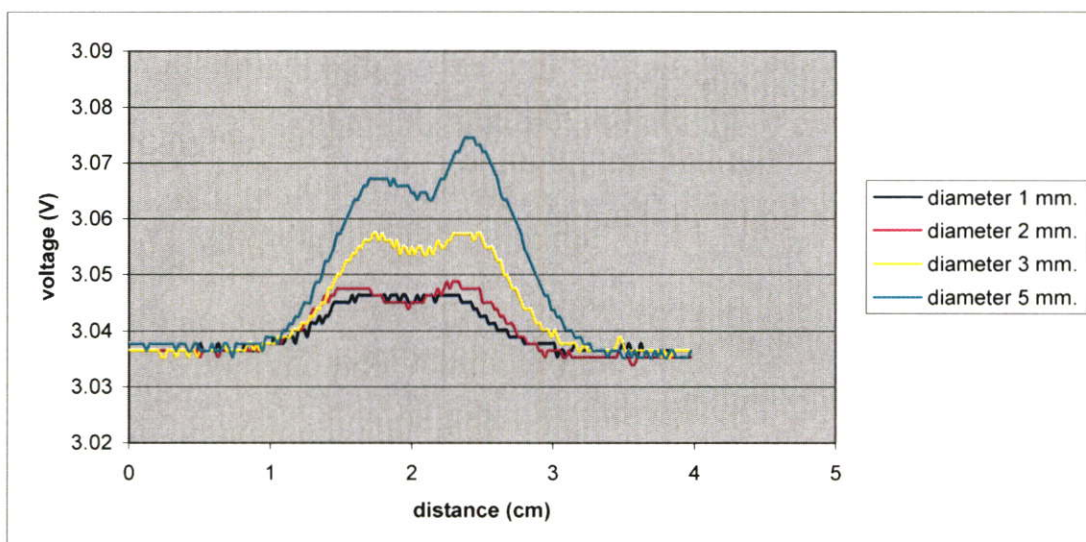
รูปที่ 4.34 บล็อกไดอะแกรมทดสอบหาขนาดความกว้างของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตจากการวัดขนาดของรอยบกพร่อง 1×20, 2×20, 3×20 และ 5×20 มม. โดยทำการวัดด้านที่มีรอยบกพร่อง



รูปที่ 4.36 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบความกว้างของช่องว่างอากาศภายในแผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าแรงดันเอาต์พุตจากการวัดขนาดของรอยบกพร่อง 1×20, 2×20, 3×20 และ 5×20 มม. โดยทำการวัดด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง

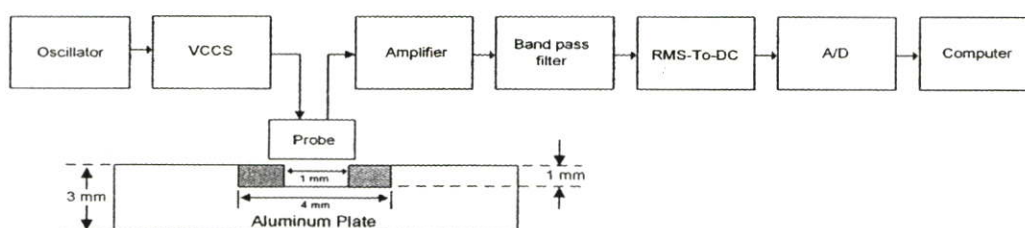
จากกราฟรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.37 เป็นผลการทดลองหาความแตกต่างของช่วงความกว้างที่พบรอยบกพร่อง โดยวัดด้านที่มีรอยบกพร่องดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.34 และด้านที่ไม่มีรอยบกพร่องดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.36 ตามลำดับ พบว่าสามารถแยกแยะระดับความกว้างของรอยบกพร่องให้เห็นได้ โดยสังเกตจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพบรอยบกพร่องที่ระยะทางประมาณ 1-1.5 ซม. โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีการแกว่งของสัญญาณที่ตำแหน่งตรงกลางของรูปภาพและค่าแรงดันไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ระยะทางประมาณ 2.9- 3.3 ซม. ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดจากด้านที่ไม่มีรอยบกพร่องจะมีระดับต่ำกว่าวัดด้านที่มีรอยบกพร่อง อีกทั้งระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าแตกต่างกันตามขนาดของรอยบกพร่อง

4.3 การทดสอบการสร้างภาพจากข้อมูลจำลองโดยวัดด้านที่เกิดรอยบกพร่อง

สำหรับหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบสร้างภาพกระแสไหลวนที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมา เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบลักษณะรอยบกพร่องที่ผิวชิ้นงานทดสอบที่เป็นแผ่นโลหะอลูมิเนียมที่มีขนาด 40×40 มม.หนา 3 มม. ดังรูปที่ 4.39 และมีลักษณะของรอยบกพร่องจำลองดังตารางที่ 4.5 โดยทำการวัดด้านที่มีรอยบกพร่อง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า จากนั้นจะนำข้อมูลที่เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเคลื่อนแกน X-Y มาสร้างเป็นข้อมูลภาพต่อไปโดยใช้โปรแกรมแมตแลป ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

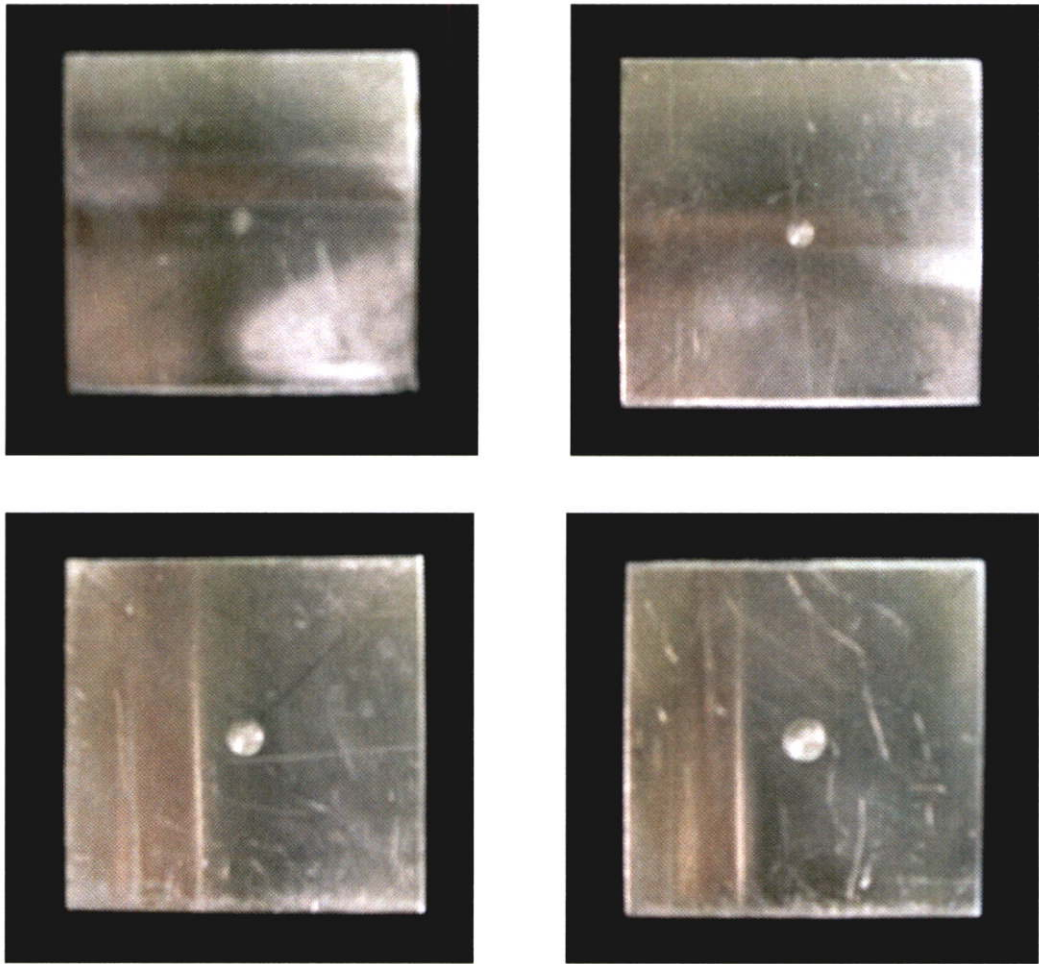
1. ทำการทดสอบโดยต่อวงจรตามบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.38
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุทของหัวโพรบ
3. ตั้งค่าอัตราขยายของวงจรขยายเท่ากับ 2 เท่า
4. นำหัวโพรบไปวางบนแผ่นอลูมิเนียมโดยมีระยะ Lift off เท่ากับ 1 มม. และทำการทดสอบตามเงื่อนไขตารางที่ 4.5
5. ทำการเรียกโปรแกรม Borland C โดยแสดงโปรแกรมไว้ที่ภาคผนวก ข จากนั้นทำการ Run โปรแกรม
6. เมื่อเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3,600 จุดครบ นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาสร้างเป็นข้อมูลภาพ โดยใช้โปรแกรมแมตแลป (Matlab) ช่วยคำนวณข้อมูลในแต่ละจุด



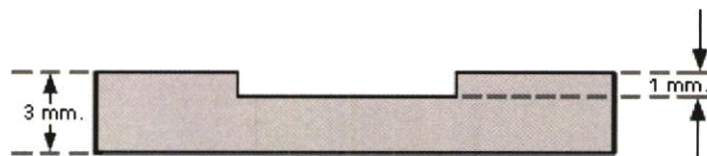
รูปที่ 4.38 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบการสร้างภาพจากด้านที่มีรอยบกพร่อง

ตาราง 4.5 การทดลองสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีขนาดของรอยบกพร่อง 1- 4 มม.

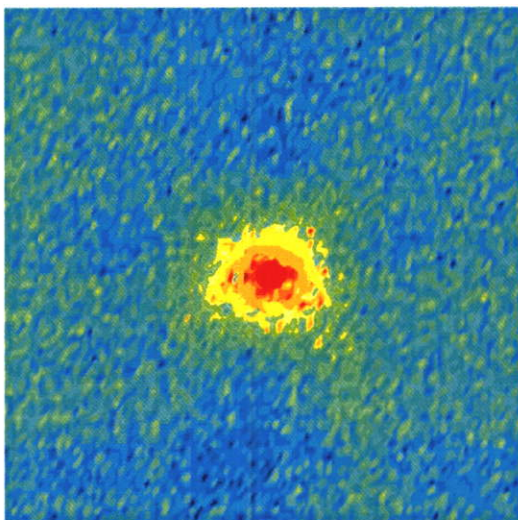
วัสดุ	การวิเคราะห์ชิ้นงาน	ความกว้างของรอยบกพร่อง
แผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 มม.	ทำการวิเคราะห์ชิ้นงาน บริเวณพื้นผิวด้านที่มีรอย บกพร่อง	- 1 มม.
		- 2 มม.
		- 3 มม.
		- 4 มม.



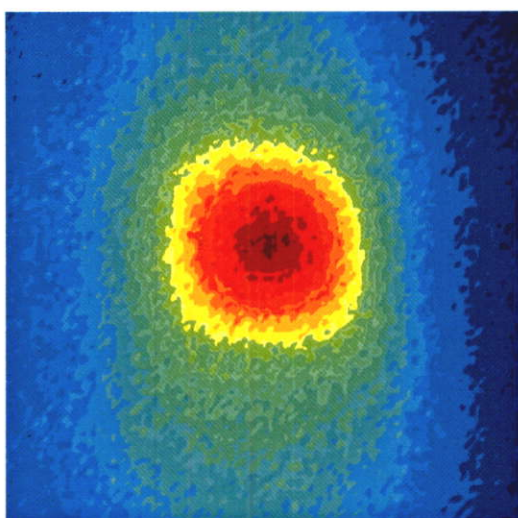
รูปที่ 4.39 ลักษณะของแผ่นอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดสอบ



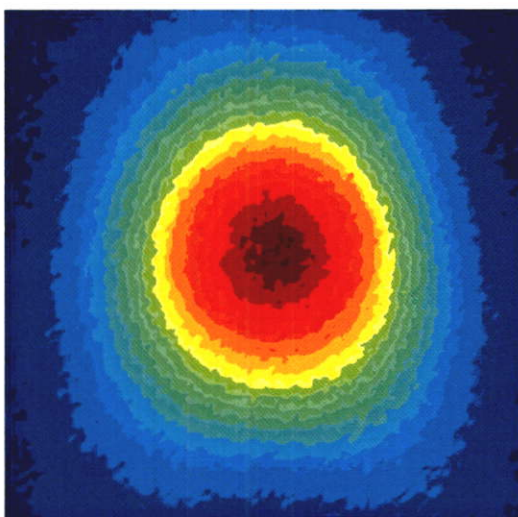
รูปที่ 4.40 บริเวณตำแหน่งที่ทดสอบ



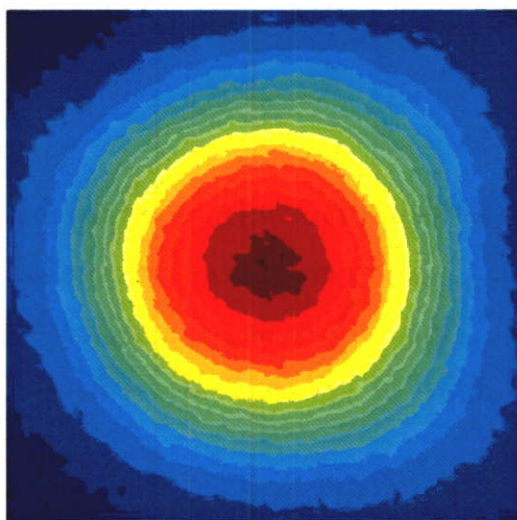
รูปที่ 4.41 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 1 มม.



รูปที่ 4.42 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 2 มม.



รูปที่ 4.43 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 3 มม.



รูปที่ 4.44 ลักษณะของภาพจำลองที่ผ่านการทดสอบกับแผ่นอลูมิเนียมเจาะรูขนาด 4 มม.

จากรูปที่ 4.41 ถึง 4.44 เป็นข้อมูลภาพที่ได้จากการทดสอบแผ่นอลูมิเนียมที่มีรอยบกร่องจำลองดังรูปที่ 4.39 โดยรอยบกร่องจำลองมีระยะความลึกจากผิวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 1.0 มม. และทำการวัดด้านที่มีรอยบกร่อง พบว่าขนาดของรอยบกร่องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม. จะสังเกตเห็นลักษณะของรอยบกร่องได้ไม่ชัดเจนนัก แต่พอเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบกร่องจำลองเป็น 2.0 มม. ถึง 4.0 มม. สามารถเห็นรอยบกร่องได้อย่างชัดเจน และยังสามารถเห็นความแตกต่างขนาดของรอยบกร่อง

ซึ่งจากการทดลองในหัวข้อ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ระบบมีความสามารถในการตรวจพบรอยบกร่องที่อยู่ด้านบนผิวอลูมิเนียม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบกร่องจำลองต่ำสุดเท่ากับ 2.0 มม. ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะเป็นการทดสอบตรวจวัดรอยบกร่องจำลองด้านที่ไม่เกิดรอยบกร่องโดยใช้วัสดุทดสอบที่เป็นแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

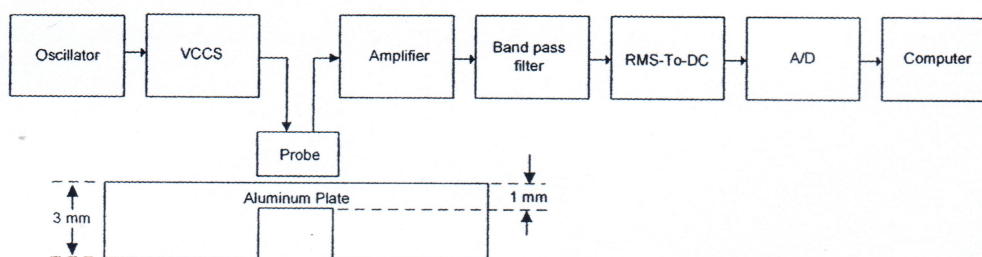
4.4 การทดสอบการสร้างภาพกระแสไหลวนโดยวัดจากด้านที่ไม่มีรอยบกร่อง

การวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของระบบสร้างภาพกระแสไหลวน โดยทำการวัดด้านที่ไม่มีรอยบกร่อง ซึ่งลักษณะเงื่อนไขของรอยบกร่องจำลองแบบต่างๆ ประกอบด้วยระยะห่างระหว่างช่องว่างอากาศจำลองที่อยู่ภายในเนื้อโลหะอลูมิเนียม (Defect spacing), ระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศจำลองที่อยู่ภายในแผ่นอลูมิเนียม และลักษณะรูปร่างของรอยบกร่องจำลองที่มีลักษณะแตกต่างกัน (Defect shape) ดังตารางที่ 4.6, ตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ี้ได้จากการทดสอบได้จากการเคลื่อนแกน X-Y เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ ก1 (ภาคผนวก ก) โดยมีพื้นที่ในการเคลื่อนเก็บข้อมูลเท่ากับ 40×40 มม. และจำนวนค่าแรงดันไฟฟ้าที่เก็บได้มีจำนวนเท่ากับ 3,600 ค่า โดยค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3,600 ค่า จะถูกแปลเป็นข้อมูลภาพโดยใช้โปรแกรมเมตแลป (Matlab) ช่วยคำนวณข้อมูลในแต่ละจุด

4.4.1 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองที่แตกต่างกัน

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

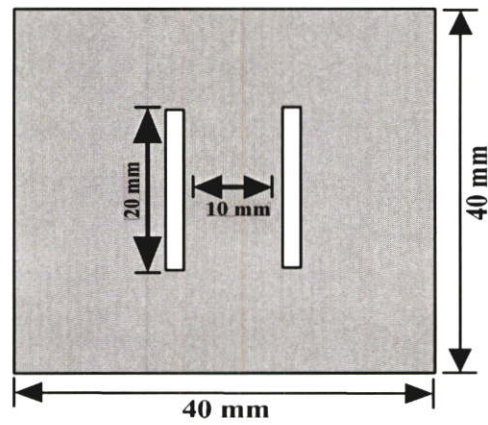
1. ทำการทดลองและสร้างภาพกระแสไหลวนจากข้อมูลจำลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 4.45
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุทของหัวโพรบ
3. ตั้งค่าอัตราขยายของวงจรขยาย (Amplifier) เท่ากับ 2 เท่า
4. นำหัวโพรบไปวางบนชิ้นงานโดยมีระยะ Lift off เท่ากับ 1 มม. และทำการทดสอบตามเงื่อนไขตาราง 4.6
5. ทำการเรียกโปรแกรม Borland C โดยแสดงโปรแกรมไว้ที่ภาคผนวก ข จากนั้นทำการ Run โปรแกรม
6. เมื่อเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3,600 จุดครบ นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาสร้างเป็นข้อมูลภาพ โดยใช้โปรแกรมแมตแลป (Matlab) ช่วยคำนวณข้อมูลในแต่ละจุด



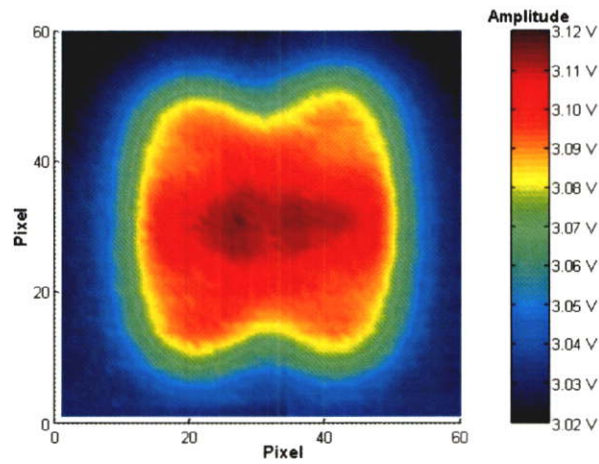
รูปที่ 4.45 บล็อกไดอะแกรมสำหรับทดสอบการสร้างภาพจากด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง

ตารางที่ 4.6 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่อง 10- 25 มม.

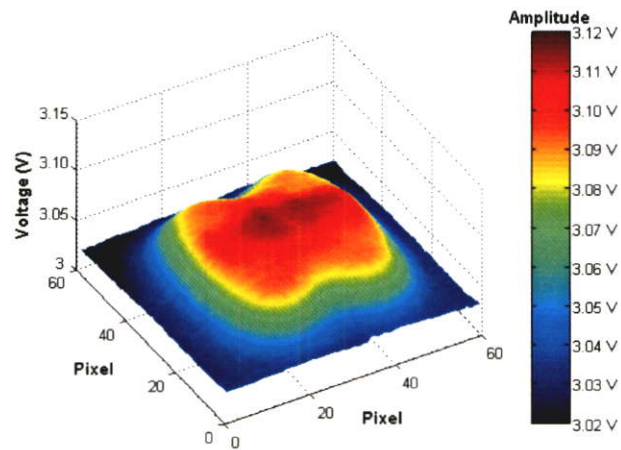
วัสดุ	การวิเคราะห์ชิ้นงาน	ระยะห่างของรอยบกพร่อง
แผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 มม.	ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานบริเวณพื้นผิวด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง	- 10 มม.
		- 12.5 มม.
		- 15 มม.
		- 20 มม.
		- 25 มม.



(ก)



(ข)



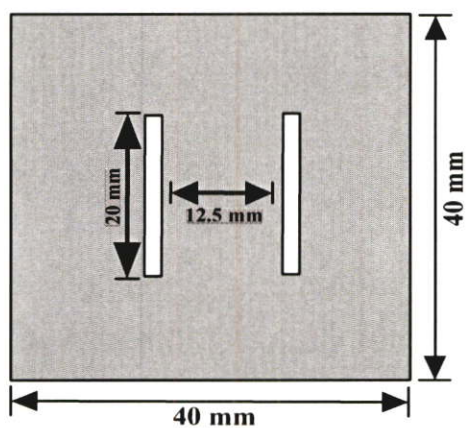
(ค)

รูปที่ 4.46 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 10 มม.

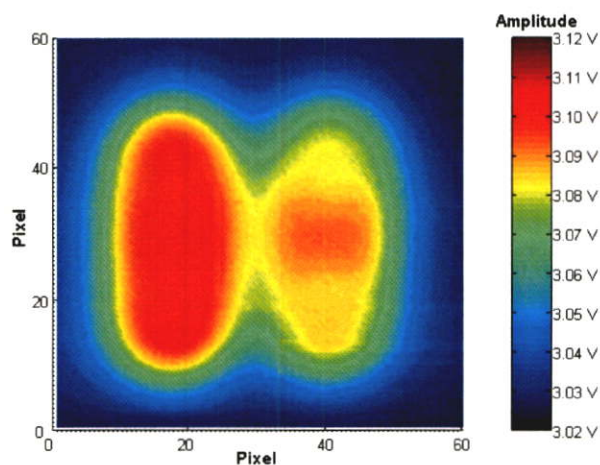
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

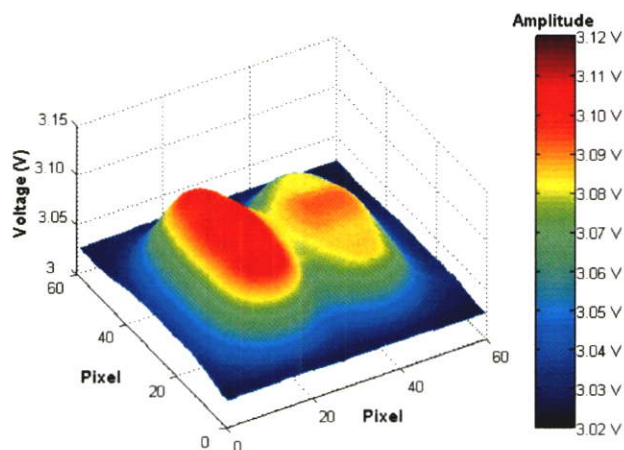
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



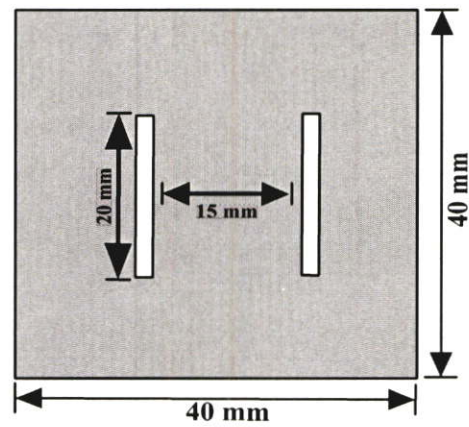
(ค)

รูปที่ 4.47 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 12.5 มม.

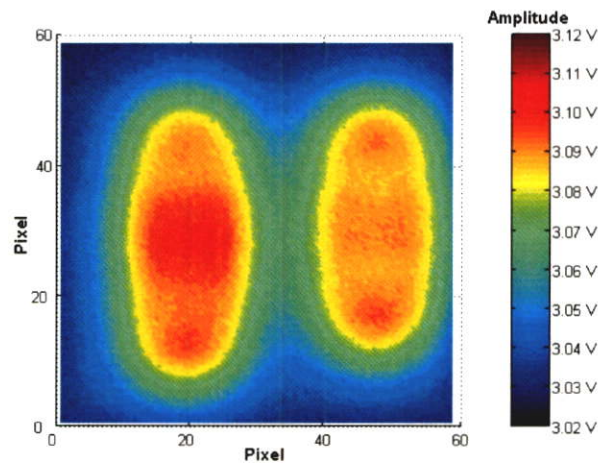
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

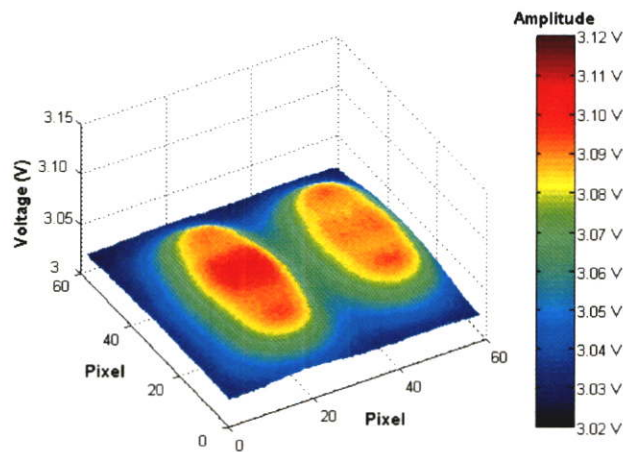
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



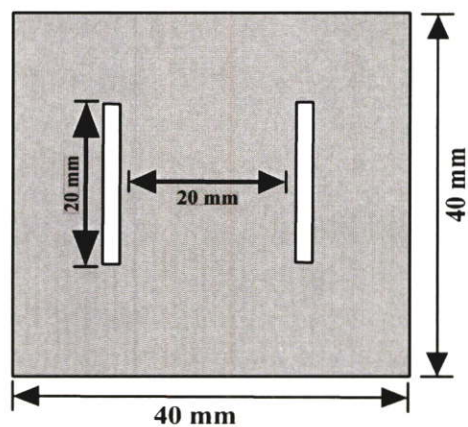
(ค)

รูปที่ 4.48 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 15 มม.

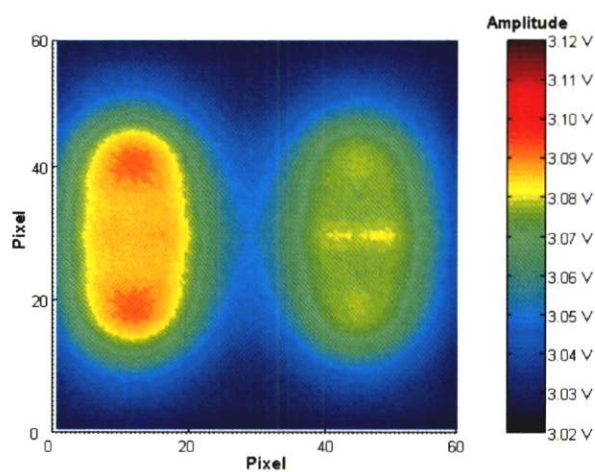
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

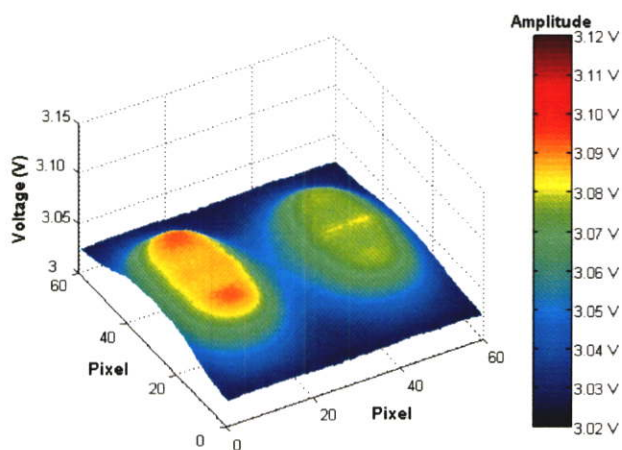
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



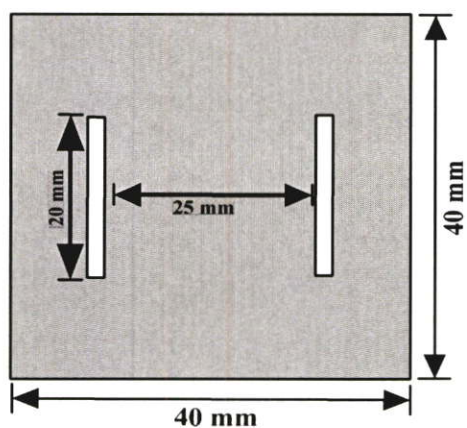
(ค)

รูปที่ 4.49 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 20 มม.

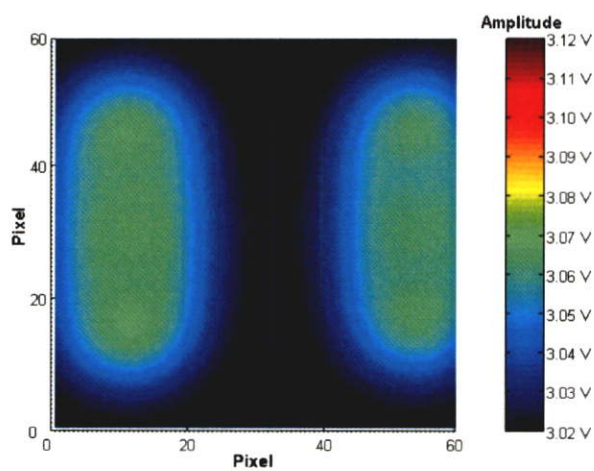
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

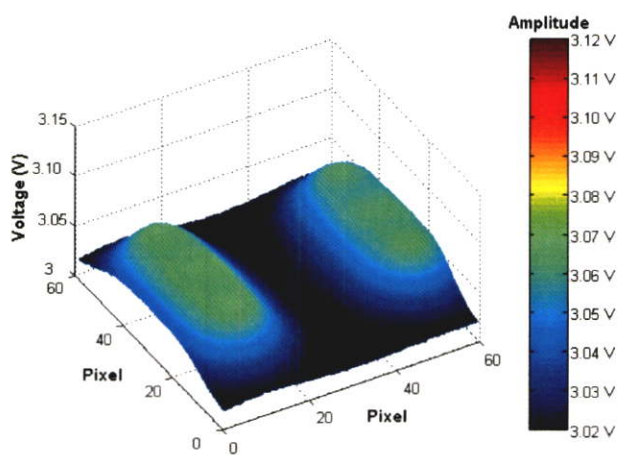
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.50 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมที่มีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 25 มม.

(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.46 ถึง 4.50 เป็นข้อมูลภาพที่วัดจากด้านที่ไม่มีรอยบกพร่องโดยมีระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 10, 12.5, 15, 20 และ 25 มม. โดยรูปที่ 4.46 ภาพที่ได้สามารถแยกระยะห่างของช่องว่างอากาศได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากหัวโพรบมีขนาด 7 มม. ซึ่งใกล้เคียงกับระยะห่างของจุดบกพร่อง ส่วนในรูปที่ 4.47 ระยะห่างของช่องว่างอากาศจำลองเท่ากับ 12.5 มม. ภาพที่ได้มีความชัดเจนมากขึ้นและสามารถแยกแยะรูปร่างได้ชัดเจนขึ้น ส่วนรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 ภาพที่ได้แบ่งช่องว่างระหว่างภาพได้อย่างชัดเจน ส่วนรูปที่ 4.50 ซึ่งมีระยะห่างภาพ 25 มม. ภาพที่ได้สามารถแยกแยะช่องว่างอากาศจำลองออกจากกันได้อย่างชัดเจนที่สุด

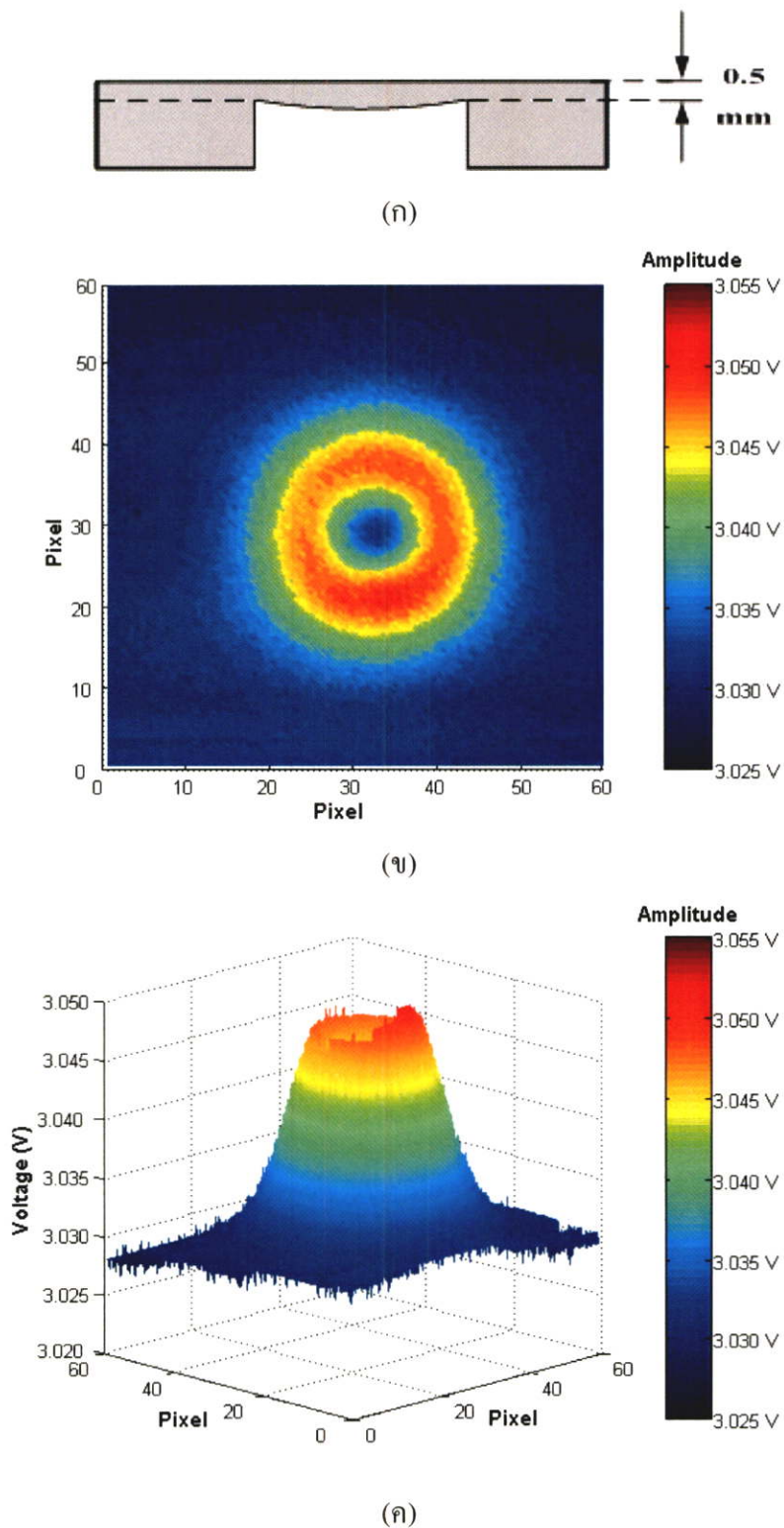
4.4.2 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่ระยะความลึกของช่องว่างอากาศที่แตกต่างกัน

ลำดับขั้นการทดลอง

1. ทำการทดลองและสร้างภาพกระแสไหลวนจากข้อมูลจำลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 4.45
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุทของหัวโพรบ
3. ตั้งค่าอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณกระแสสลับเท่ากับ 2 เท่า
4. นำหัวโพรบไปวางบนแผ่นอลูมิเนียมทดสอบ โดยแผ่นอลูมิเนียมมีความหนา 3 มม. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 2 มม. โดยมีระยะ Lift off เท่ากับ 1 มม. และทำการทดสอบตามเงื่อนไขตาราง 4.7
5. ทำการเรียกโปรแกรม Borland C โดยแสดงโปรแกรมไว้ที่ภาคผนวก ข จากนั้นทำการ Run โปรแกรม
6. เมื่อเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3,600 จุดครบ นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาสร้างเป็นข้อมูลภาพ โดยใช้โปรแกรมแมตแลป (Matlab) ช่วยคำนวณข้อมูลในแต่ละจุด

ตาราง 4.7 การทดสอบสร้างภาพจากรอยบกพร่องจำลองที่มีระยะความลึกช่องว่างอากาศที่อยู่ใต้ผิวของแผ่นอลูมิเนียมเท่ากับ 0.5- 1.5 มม.

วัสดุ	การวิเคราะห์ชิ้นงาน	ความลึกของรอยบกพร่อง
แผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 มม	ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานบริเวณพื้นผิวด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง	- 0.5 มม.
		- 1.0 มม.
		- 1.5 มม.

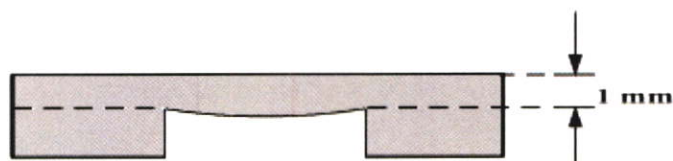


รูปที่ 4.51 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมโดยมีระยะความลึกที่พบรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 0.5 มม.

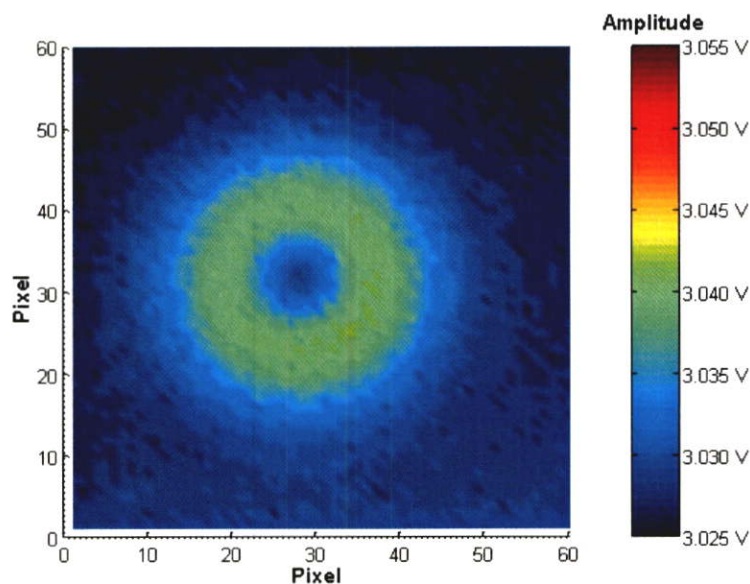
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

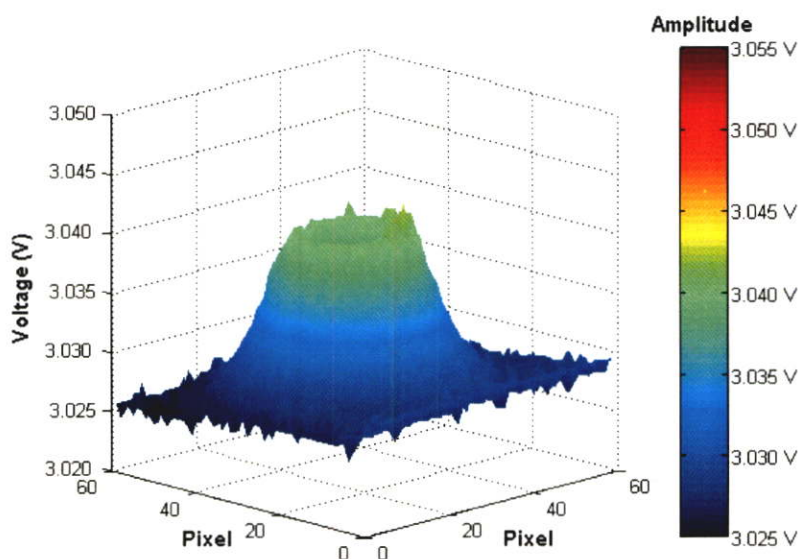
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



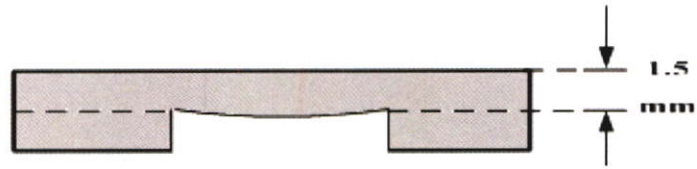
(ค)

รูปที่ 4.52 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมโดยมีระยะความลึกที่พบรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 1.0 มม.

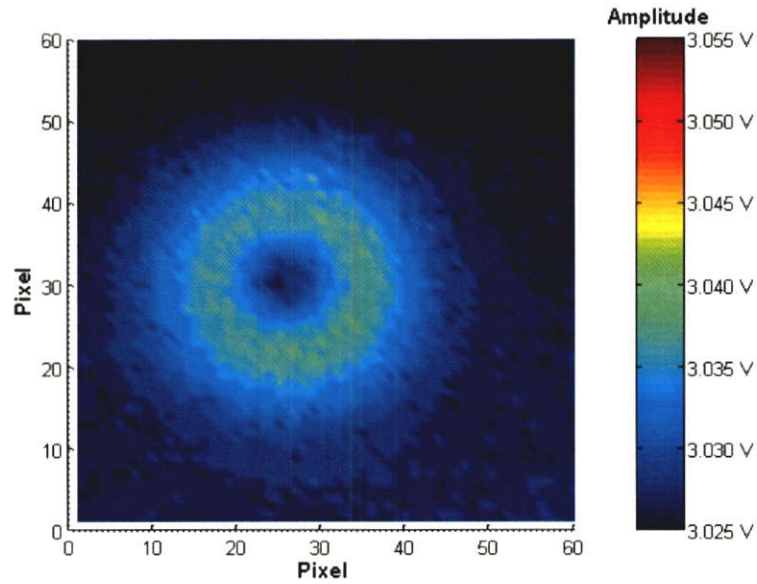
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

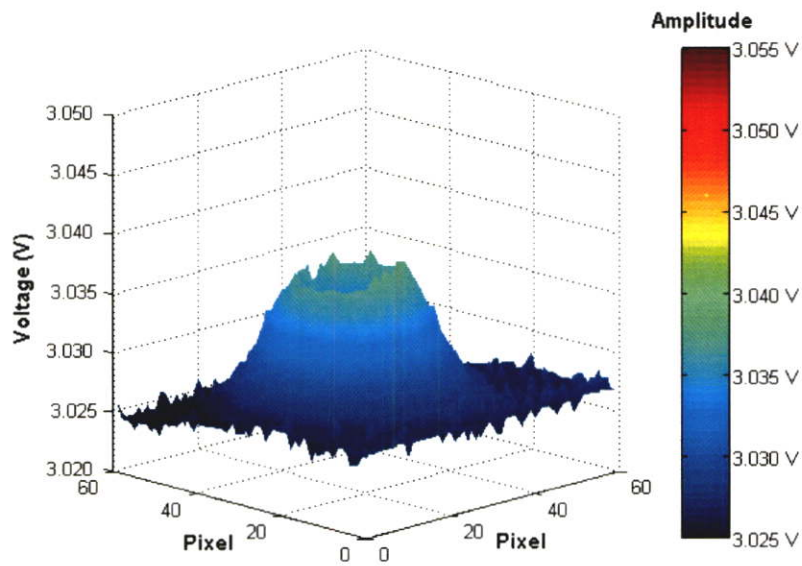
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.53 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียม โดยมีระยะความลึกที่พบรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 1.5 มม.

(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.51 ถึง 4.53 เป็นข้อมูลภาพที่วัดจากด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง โดยมีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในเนื้ออลูมิเนียมเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 มม. ซึ่งภาพที่ได้สามารถบ่งบอกถึงระดับความลึกของรอยบกพร่องจำลองได้ โดยพิจารณาจากระดับสีที่หมายถึงขนาดของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงตามระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศ ซึ่งแสดงในสเกลค่าแรงดันไฟฟ้า โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศเท่ากับ 0.5 มม. และค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะความลึก 1.5 มม.

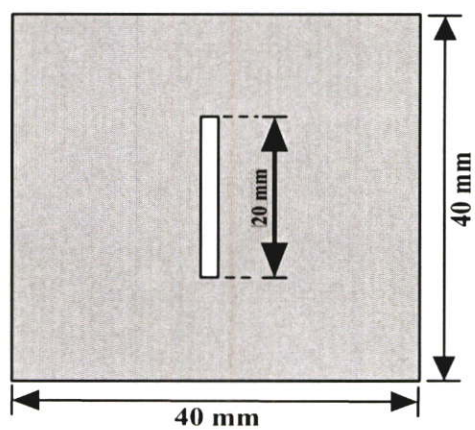
4.43 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน

ลำดับขั้นตอนการทดลอง

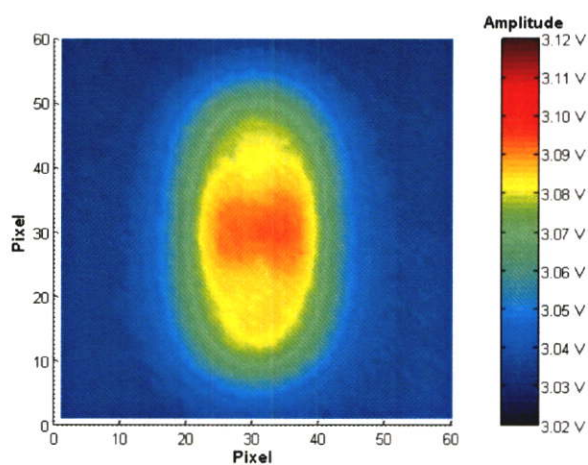
1. ทำการทดลองและสร้างภาพกระแสไหลวนจากข้อมูลจำลองโดยต่อวงจรตามรูปที่ 4.44
2. ป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ความถี่ 1 KHz. ขนาด 150 mA_{p-p} ที่อินพุตของหัวโพรบ
3. ตั้งค่าอัตราขยายของวงจรรขยายกระแสสลับเท่ากับ 2 เท่า
4. นำหัวโพรบไปวางบนชิ้นงานทดสอบซึ่งมีระยะ Lift off เท่ากับ 1 มม. โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบกำหนดค่าความลึกของช่องว่างอากาศภายในเนื้ออลูมิเนียมเท่ากับ 1 มม. ซึ่งรอยบกพร่องที่จำลองมีขนาดความกว้างเท่ากับ 2 มม. และทำการทดสอบตามเงื่อนไขตาราง 4.8
5. ทำการเรียกโปรแกรม Borland C โดยแสดงโปรแกรมไว้ที่ภาคผนวก ข จากนั้นทำการ Run โปรแกรม
6. เมื่อเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจำนวน 3,600 จุดครบ นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาสร้างเป็นข้อมูลภาพ โดยใช้โปรแกรมแมตแลป (Matlab) ช่วยคำนวณข้อมูลในแต่ละจุด

ตาราง 4.8 การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลองที่มีลักษณะรูปร่างของรอยบกพร่องที่แตกต่างกัน

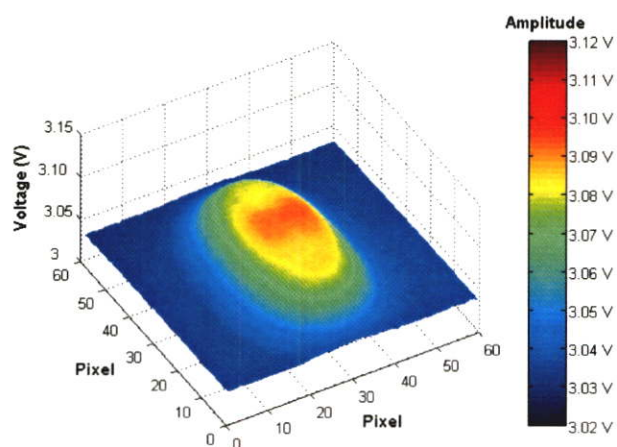
วัสดุ	การวิเคราะห์ชิ้นงาน	รูปร่างของรอยบกพร่อง
แผ่นอะลูมิเนียมหนา 3 มม.	ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานบริเวณพื้นผิวด้านที่ไม่มีรอยบกพร่อง	1. อักษรไอ 2. อักษรเอ็กซ์ 3. อักษรที 4. อักษรแอล



(ก)



(ข)



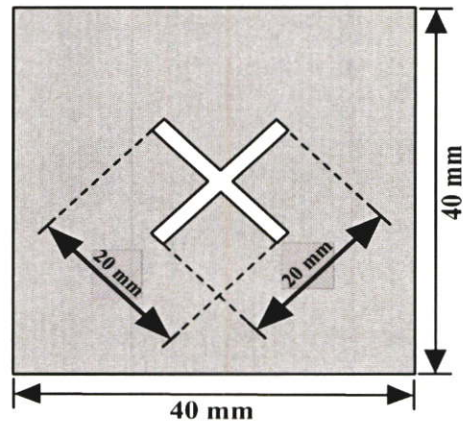
(ค)

รูปที่ 4.54 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมซึ่งมีรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรไอ

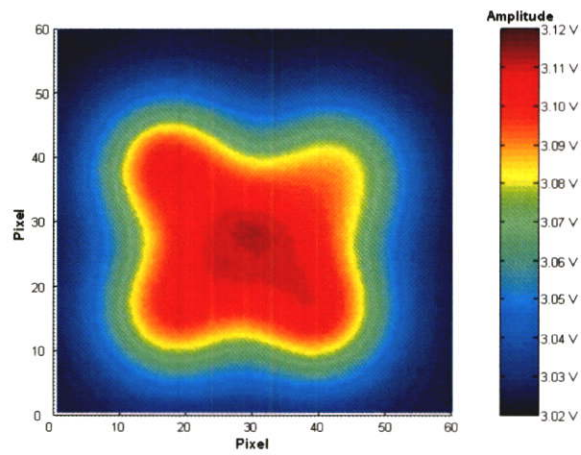
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

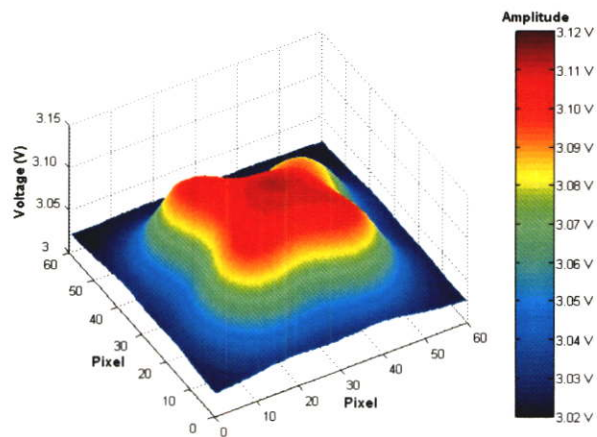
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



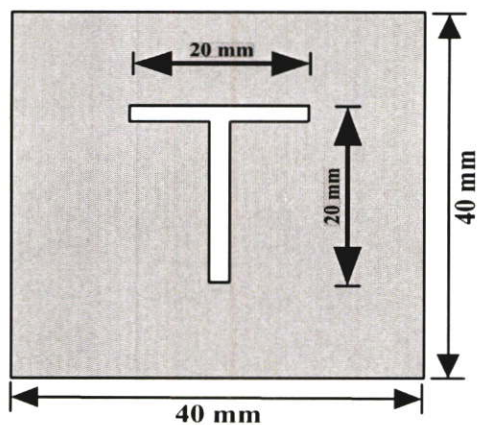
(ค)

รูปที่ 4.55 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมซึ่งมีรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรเอ็กซ์

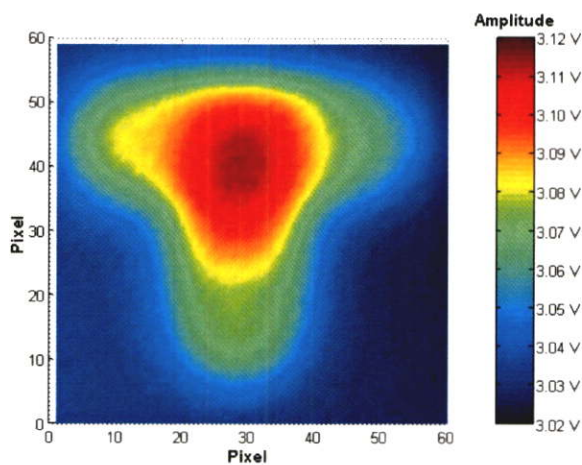
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

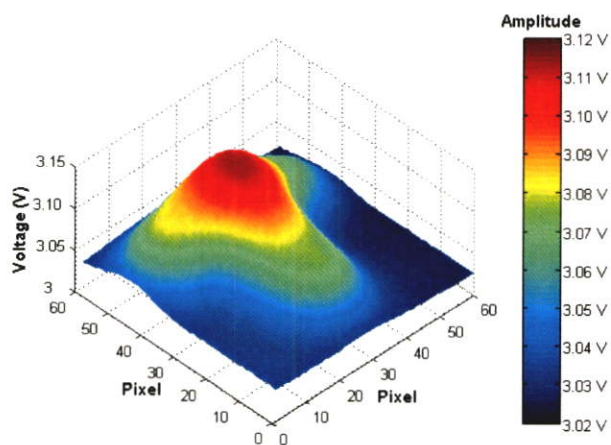
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



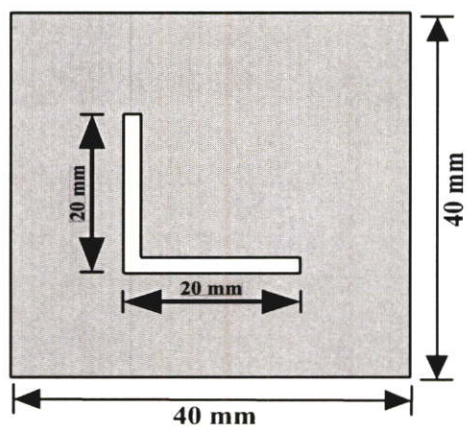
(ค)

รูปที่ 4.56 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมซึ่งมีรูปร่างของ
รอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรที

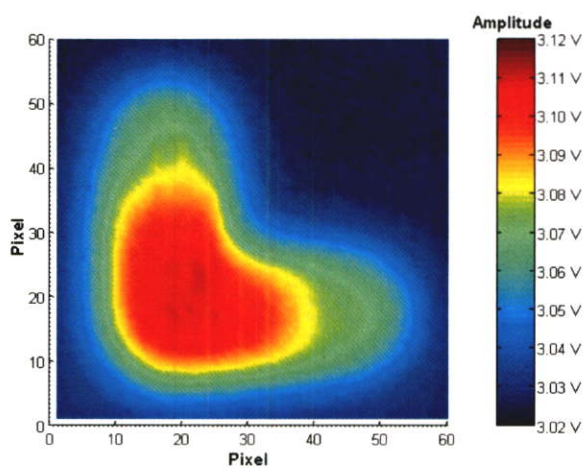
(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

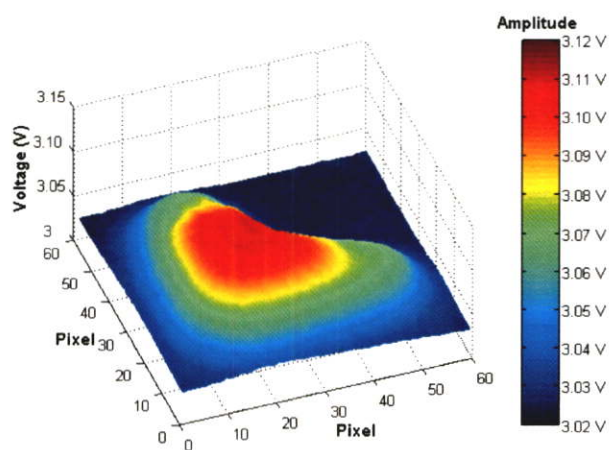
(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.57 ข้อมูลภาพที่ได้จากการตรวจพบรอยบกพร่องภายในแผ่นอลูมิเนียมซึ่งมีรูปร่างของ รอยบกพร่องจำลองเป็นอักษรแอล

(ก) ลักษณะของรอยบกพร่องบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 3 มม.

(ข) ภาพ 2 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

(ค) ภาพ 3 มิติ ซึ่งใช้ระดับสีแสดงความแตกต่างของภาพในสเกลค่าศักดาไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.54 ถึง 4.57 เป็นข้อมูลภาพที่ได้จากรอยบกพร่องจำลองที่มีรูปร่างตัวอักษรไอ, ตัวอักษรเอ็กซ์, ตัวอักษรที และตัวอักษรแอล จะเห็นว่าข้อมูลภาพที่ได้สามารถบอกลักษณะรูปร่างของรอยบกพร่องจำลองได้อย่างชัดเจน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 บทสรุป

จากผลการทดสอบระบบสร้างภาพกระแสไหลวน พบว่าที่ความถี่ 1 KHz กระแสไหลวนสามารถแทรกกลงไปในเนื้ออลูมิเนียม โดยมีความลึกเท่ากับ 2.0 มม. ที่ความถี่ 5 KHz กระแสไหลวนแทรกกลงไปในเนื้ออลูมิเนียมมีความลึกเท่ากับ 1.0 มม. และสุดท้ายที่ความถี่ 10 KHz กระแสไหลวนไม่สามารถแทรกกลงไปในเนื้ออลูมิเนียมได้ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ Skin Depth Effect โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งทดสอบกับวัสดุอลูมิเนียมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบกร่องเท่ากับ 2 มม. โดยแผ่นอลูมิเนียมมีความหนา 6 มม. และจากกราฟรูปที่ 2.8 เป็นกราฟแสดงผลความถี่ต่อระยะความลึกของค่ากระแสไหลวนที่สามารถแทรกเข้าไปในเนื้อของวัสดุทดสอบ โดยที่ความถี่ 1 KHz, 5 KHz และ 10 KHz ของวัสดุอลูมิเนียม กระแสไหลวนสามารถแทรกกลงไปในเนื้ออลูมิเนียมประมาณ 3.2 , 1.4 และ 1.0 มม. ตามลำดับ จะเห็นว่าระยะความลึกที่กระแสไหลวนสามารถแทรกเข้าไปในเนื้ออลูมิเนียมที่ได้จากผลการทดลองได้ระยะความลึกน้อยกว่าที่ได้จากกราฟรูปที่ 2.8 ซึ่งมีสาเหตุจากการพันเส้นลวดของขดลวดโพรบที่มีการเรียงตัวของแต่ละเส้นที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอ และอาจมีสาเหตุจากระยะ Lift off ซึ่งจากการทดลองตั้งค่า Lift off เท่ากับ 1 มม. ซึ่งความแตกต่างของระยะ Lift off จะมีผลต่อการเชื่อมต่อสนามแม่เหล็กของขดลวดโพรบกับวัสดุอลูมิเนียม จากนั้นเป็นผลทดลองการจ่ายกระแสคงที่ 100, 150 และ 200 mA_{p-p} ให้กับหัวโพรบ โดยมีระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศภายในแผ่นอลูมิเนียมตั้งแต่ 0.5 มม. ถึง 2.0 มม. และป้อนความถี่เท่ากับ 1 KHz. พบว่ายิ่งจ่ายกระแสคงที่ให้กับหัวโพรบมากความแตกต่างของระดับแรงดันจะเห็นชัดมากขึ้น จนถึงค่าหนึ่งคือ 150 mA_{p-p} พอจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 200 mA_{p-p} ระดับแรงดันจะเปลี่ยนไม่มากนัก เพราะฉะนั้นระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกร่องจำลองที่อยู่ภายในแผ่นโลหะอลูมิเนียมของระบบที่ออกแบบขึ้นนี้จะใช้ความถี่ 1 KHz. และจ่ายกระแสคงที่ให้กับหัวโพรบเท่ากับ 150 mA_{p-p}

จากพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้า เช่นระยะ Lift off ความหนาของวัสดุทดสอบ ความลึกของรอยบกร่องที่ผิวของวัสดุ และระยะความลึกของช่องว่างอากาศภายในเนื้อวัสดุ จึงทำการทดลองเพื่อสังเกตผลกระทบดังกล่าว กับระบบที่สร้างขึ้น โดยใช้วัสดุทดสอบที่เป็นแผ่นโลหะอลูมิเนียมหนา 6 มม. พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อระยะ Lift off มีการเปลี่ยนแปลงให้เห็นอย่างชัดเจนที่ระยะ 0 มม. ถึง 12 มม. แต่พอเพิ่มระยะ Lift off จาก 12 มม. ถึง 20 มม. การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ใน

ที่สุด ซึ่งระยะ Lift off ยังมีผลเกี่ยวเนื่องกับระยะความลึกของรอยบกพร่องจำลองบนวัสดุอลูมิเนียม โดยผลที่ได้จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ระยะความลึกของรอยบกพร่องจากผิวของอลูมิเนียมที่ระยะความลึก 1.0 มม. ถึง 4.0 มม. มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60 mV_{p-p} และระยะความลึก 4.0 มม. ถึง 5.0 มม. มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 mV_{p-p} ผลการทดลองความหนาของแผ่นอลูมิเนียมต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าพบว่า ที่ความหนา 0.5 มม. ถึง 1.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนโดยมีค่าเท่ากับ 180 mV_{p-p} พอเพิ่มความหนาของแผ่นอลูมิเนียมจาก 1.0 มม. ถึง 2.5 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วโดยมีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 70 mV_{p-p} และสุดท้ายเพิ่มความหนาจาก 2.5 มม. ถึง 6.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและคงที่ในที่สุด ผลการทดลองหาระยะความลึกที่พบช่องว่างอากาศซึ่งอยู่ภายในเนื้ออลูมิเนียมพบว่า ที่ระยะความลึกของช่องว่างอากาศ 1.0 มม. ถึง 2.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง 80 mV_{p-p} และหากช่องว่างอากาศอยู่ลึกจากผิวอลูมิเนียมจาก 2.0 มม. ถึง 5.0 มม. ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 mV_{p-p} และสุดท้ายทดลองหาขนาดความกว้างของรอยบกพร่องจำลองที่อยู่บนแผ่นอลูมิเนียมและช่องว่างอากาศจำลองที่อยู่ภายในแผ่นอลูมิเนียมพบว่า เมื่อความกว้างของรอยบกพร่องหรือช่องว่างอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้นตามและสามารถเห็นความแตกต่างของรอยบกพร่องจำลองที่อยู่บนผิวอลูมิเนียม และช่องว่างอากาศที่อยู่ภายในเนื้ออลูมิเนียมได้อย่างชัดเจน

การทดสอบสร้างภาพกระแสไหลวนโดยวัดจากด้านที่มีรอยบกพร่องซึ่งระยะความลึกของรอยบกพร่องจำลองเท่ากับ 1.0 มม. พบว่าขนาดของรอยบกพร่องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม. จะสังเกตเห็นลักษณะของรอยบกพร่องได้ไม่ชัดเจนนัก แต่พอเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบกพร่องจำลองเป็น 2.0 มม. ถึง 4.0 มม. สามารถเห็นรอยบกพร่องอย่างชัดเจนและยังสามารถเห็นความแตกต่างของขนาดรอยบกพร่องได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองสร้างภาพกระแสไหลวนจากรอยบกพร่องจำลอง ซึ่งจะวัดด้านที่ไม่มีรอยบกพร่องเพื่อดูการแยกแยะรายละเอียดของรอยบกพร่องจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้ ระบบสร้างภาพกระแสไหลวนที่สร้างขึ้นสามารถแยกแยะระยะห่างระหว่างรอยบกพร่องจำลองที่ระยะใกล้สุด 12.5 มม. และมีความชัดเจนมากขึ้นที่ระยะ 15 มม. ถึง 25 มม. อีกทั้งระบบที่สร้างขึ้นยังสามารถแบ่งระดับความลึกของรอยบกพร่องจำลองจาก 0.5 มม. ถึง 1.5 มม. ให้เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนโดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของระดับสีที่อยู่ในสเกลของค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งบ่งบอกถึงระดับความลึก และยังสามารถแยกแยะรอยบกพร่องจำลองที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆ กัน เช่น รูปตัวอักษร ไอ รูปตัวอักษร เอ็กซ์ รูปตัวอักษร ที และรูปตัวอักษรแอล ให้เห็นได้อย่างชัดเจน

5.2 บทวิจารณ์

จากการทดลองระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องจำลองที่อยู่ภายในแผ่นโลหะ โดยทำการทดสอบกับวัสดุโลหะอลูมิเนียมที่มีรอยบกพร่องจำลองลักษณะต่างๆ กันนั้น พบว่าระบบการสร้างภาพกระแสไหลวนมีขีดความสามารถในการจำแนกรอยบกพร่องและสามารถจำลองภาพที่ได้จากการตรวจวัดรอยบกพร่องจำลองได้เป็นอย่างดี โดยไม่ทำลายผิวหน้าหรือเนื้อวัสดุที่ทำการทดสอบ และจากการนำระบบการสร้างภาพกระแสไหลวนไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจหารอยบกพร่องจำลองดังกล่าว พบว่าง่ายต่อการใช้งาน มีประสิทธิภาพดี และสามารถนำไปพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เนื่องจากใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อย และต้นแบบนี้มีราคาต้นทุนในการผลิตต่ำ

5.3 ข้อเสนอแนะ

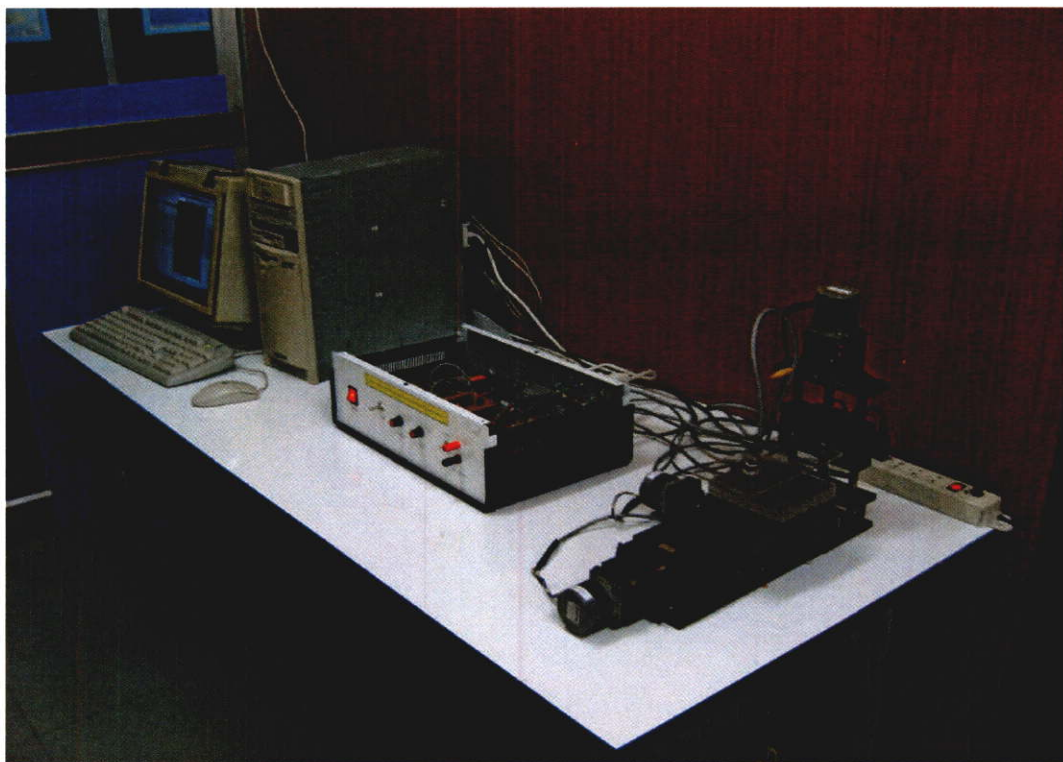
ระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องจำลองที่อยู่ภายในแผ่นโลหะ หากได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลงจนสามารถพกพาได้ เพื่อเพิ่มความคล่องตัวในการตรวจวัด และหากลดขนาดของหัวโพรบให้มีขนาดเล็กลงซึ่งจะส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจพบรอยบกพร่องที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ เพื่อเพิ่มความหลากหลายในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

บรรณานุกรม

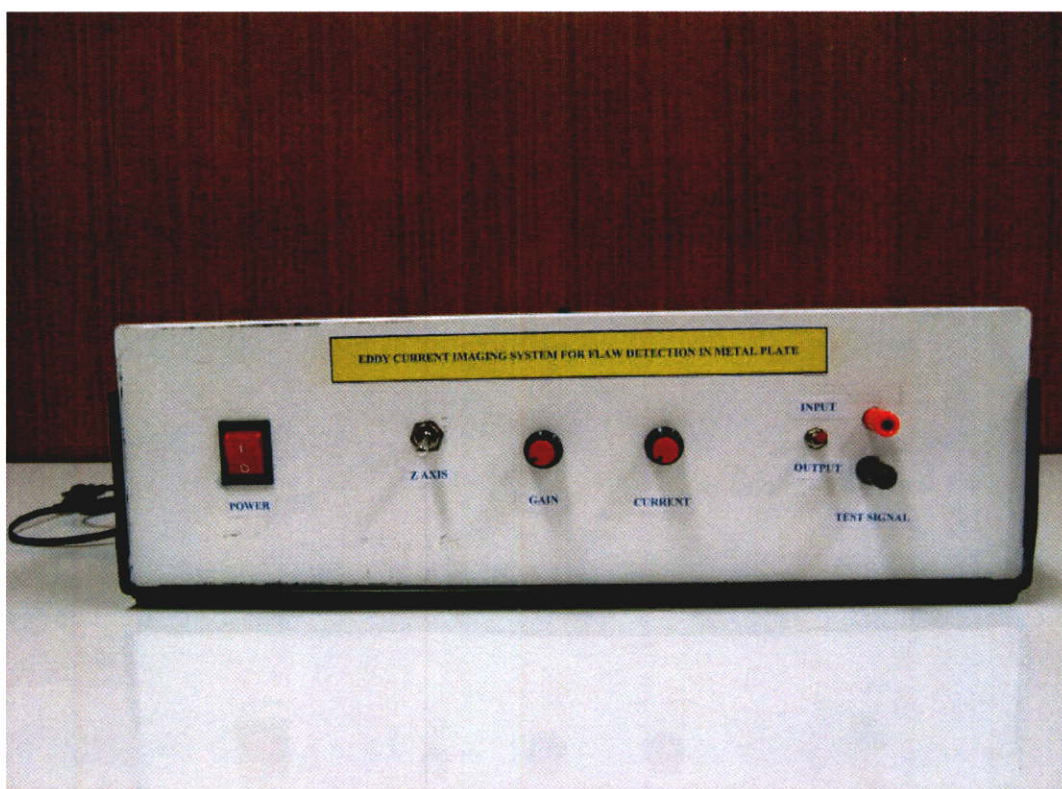
- [1] R. Halmshaw. “Nondestructive testing of materials” Edward Arnold, 1991
- [2] Capt B.A. Lepine “Pulsed Eddy Current Method Developments for Hidden Corrosion Detection in Aircraft Structures” Research and Development Officer, Air Vehicle Research Detachment, DND
- [3] A.A. Diaz, R.A. Mathew, J. Hixon, S.R. Doctor “Assessment of Eddy Current Testing for the Detection of Crack in Cast Stainless Steel Reactor Piping Component” Pacific Northwest National Laboratory Richland, WA 99352
- [4] Joseph M. Buckley “An introduction to Eddy Current Testing theory and technology” formerly of Hocking NDT.
- [5] Ebrahim Iravani “Laser and Eddy Current Measuring Techniques for Agile Manufacturing” Dissertation Chair of Production Engineering Department of Production Engineering The Royal Institute of Technology Stockholm, 2002
- [6] Veera Raghavan.S “Monitoring of Water jet Peening Using Eddy Current Sensor” Bachelor of Technology and Master of Technology, Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Madras, April 2003.
- [7] Kriezis E. E., et al., 1992 Eddy currents: theory and applications, Proceedings of the IEEE, Volume: 80 10, Oct. 1992, Page(s): 1559–1589.
- [8] Howard M. Berlin, Design of OP-AMP Circuits with Experiments, Macmillan, Carmel, IN., 1989
- [9] Ramakant A. and Gayakwad, OP-AMP and Linear integrated circuits, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1987.
- [10] Jirayut Pulkham, Apinai Rerkrath, Kitipol Chitsakul, and Manas Sangworasil “An Eddy Current Imaging System for Crack Detection in Aluminum Plates” ROVISP 2005 Saint University in Malaysia, July 2005.

ภาคผนวก ก
เครื่องต้นแบบ

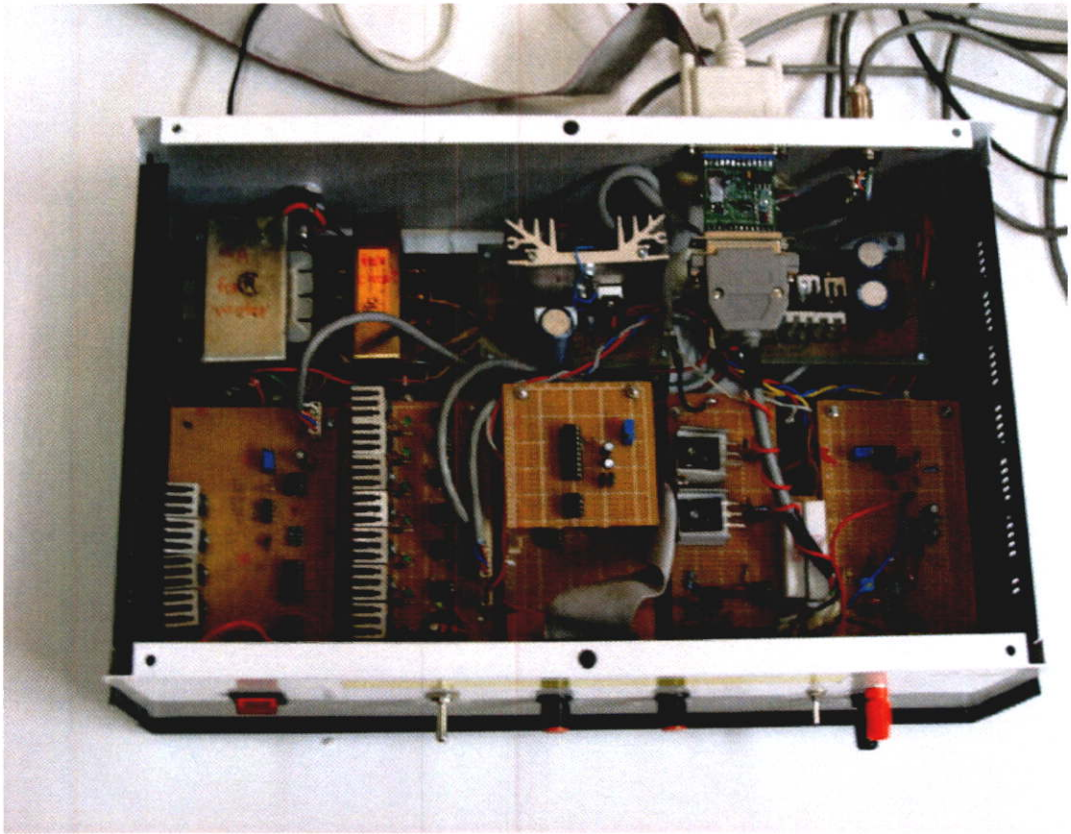
ระบบสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยร้าวจำลองในแผ่นโลหะ



รูปที่ ก1 เครื่องสร้างภาพกระแสไหลวนสำหรับตรวจหารอยบกพร่องจำลองในแผ่นอลูมิเนียม



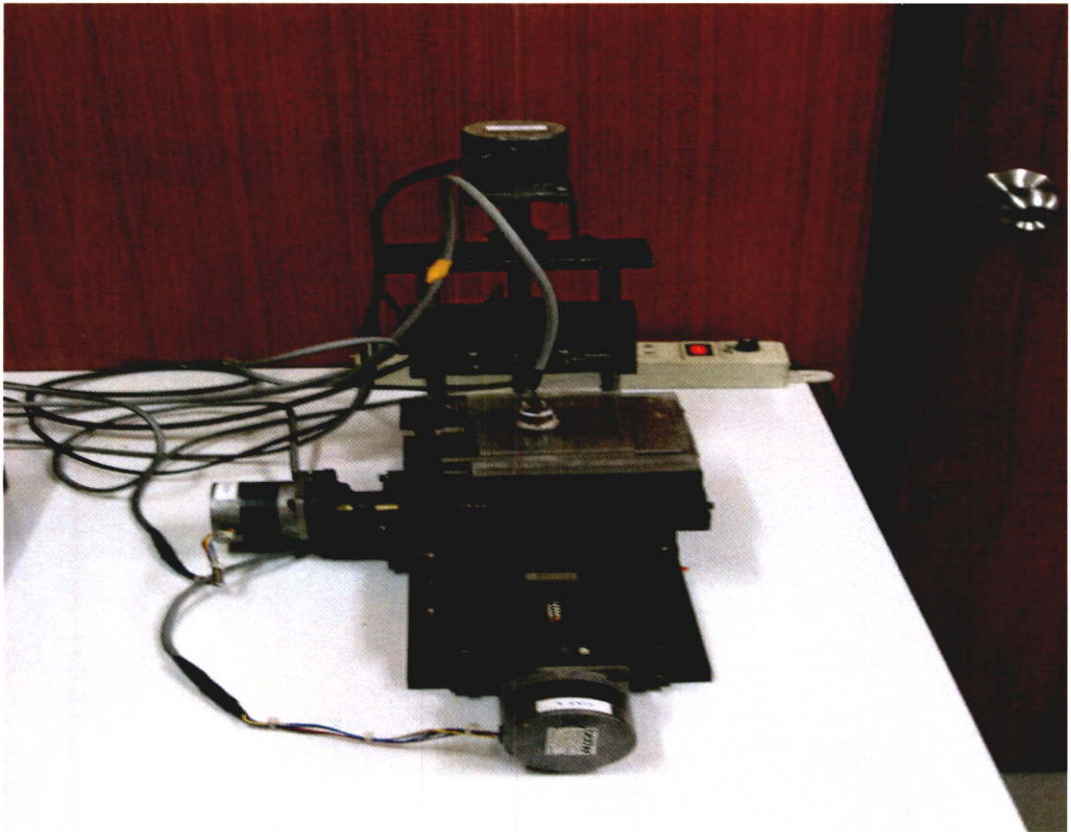
รูปที่ ก2 สวิตช์ควบคุมการทำงานของวงจรที่อยู่ภายในระบบสร้างภาพกระแสไหลวน(ด้านหน้า)



รูปที่ ก3 วงจรต่างๆ ที่อยู่ภายในระบบสร้างภาพกระแสไหลวน



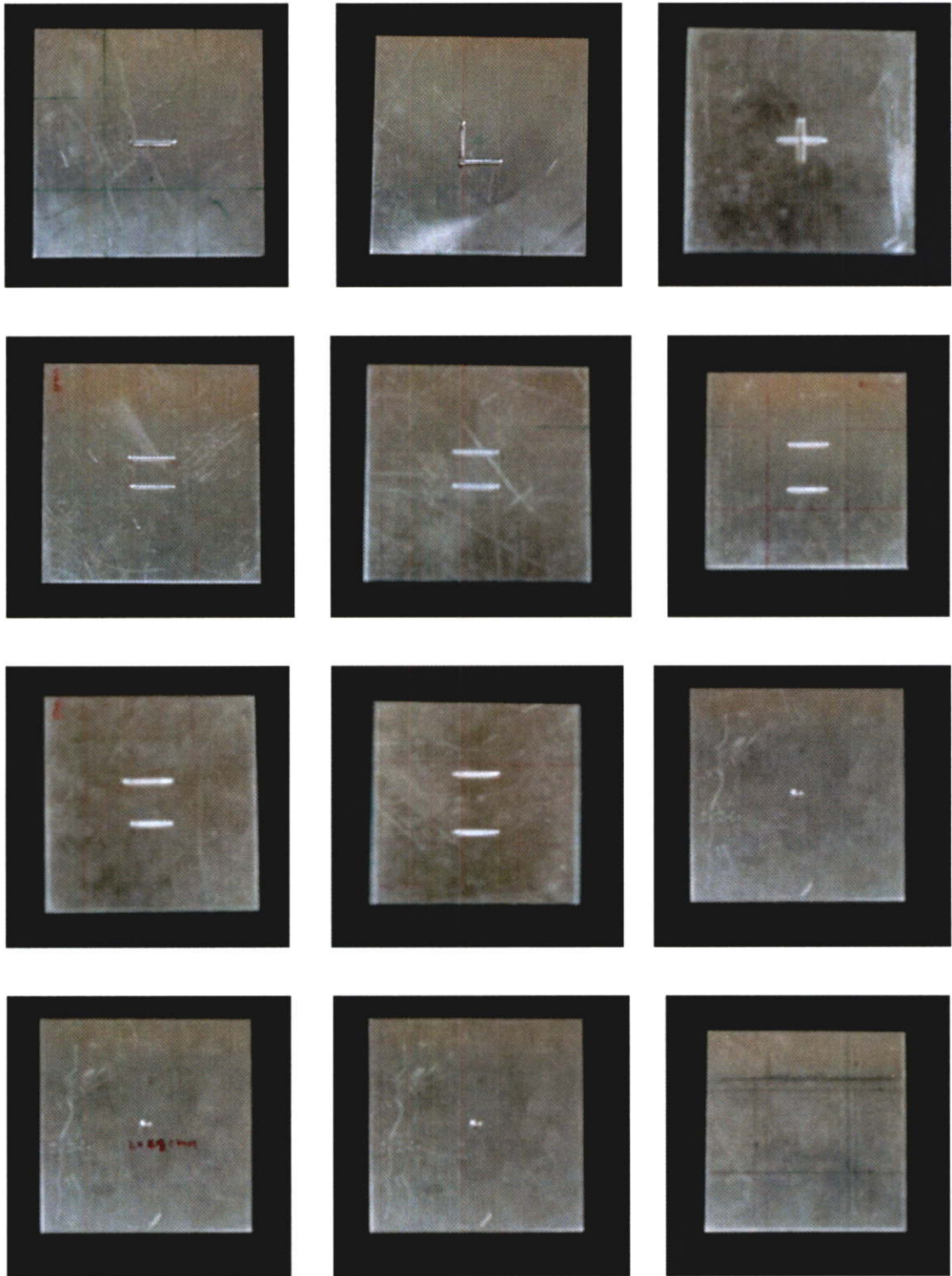
รูปที่ ก4 จุดเชื่อมต่อต่างๆ สำหรับควบคุมแกน X-Y-Z และจุดเชื่อมต่อควบคุมการรับส่งข้อมูล



รูปที่ ก5 แกน X-Y-Z สำหรับเคลื่อนแผ่น โลหะอลูมิเนียมทดสอบและปรับระยะ Lift off



รูปที่ ก6 หน้าจอที่ใช้ควบคุมการทำงานและแสดงผลรอยบกพร่องจำลอง



รูปที่ ก7 แผ่นอลูมิเนียมที่มีรอยขบกร่อนจำลองลักษณะต่างๆ ที่ใช้สำหรับทดสอบ

ภาคผนวก ข
แผนผังการทำงานและโปรแกรม

Borland C

```
#include <stdio.h>
#include <bios.h>
#include <dos.h>
#define ComBase 0x378
#define porta1 0x300
#define portb1 0x301
#define portc1 0x302
#define portd1 0xF30C
#define porta2 0x304
#define portb2 0x305
#define portc2 0x306
#define portd2 0x307
#define porta3 0x308
#define portb3 0x309
#define portc3 0x30A
#define portd3 0x30B
#define time 10
#define BasePortAtoD 0x270
void adc(void);
char key;
long i=1,j=1,iii,jjj,kkk,lll,mmm,nnn;
//float vout[32][32];
float Vin1[60][60];
void measure1(void);
void measure2(void);
void clear(void);
void main(void)
{
    clrscr();
    // printf("-----<< Test Program >>-----\n\r");
```

```

outport(portd1,0x080);
outport(portd2,0x080);
outport(portd3,0x080);
measure1();

                FILE *stream;
                /* open a file for update */
stream = fopen("c:\\test1\\emt1.m", "w+");
// if(stream == 0) error("Write Error in file Vin.dat!!!!!!" );
/* write some data to the file */
fprintf(stream, "U=[\n");
for(iii=0;iii<60;iii++)
{
    for(jjj=0;jjj<60;jjj++)
    {
        fprintf(stream, " %f ",Vin1[iii][jjj]);
    }
    // fprintf(stream, "\n");
    fprintf(stream, ";");
    fprintf(stream, "\n");
}
fprintf(stream, "[ ]");

/* close the file */
// delay(5000);
fclose(stream);

do{

sound(5000);
delay(500);
sound(2500);

```

```
delay(500);
nosound();

// }
key = bioskey(1);

} while (key != 0x1b);

// return 0;

/*
//loop for print output
int c,d;
for (c=1;c<33;c++)
{
    for(d=1;d<33;d++)
    {
        printf("vout[%d][%d] =..... %e\n",c,d,vout[c][d]);
        delay(100);
    }
}
*/
/* outport(0x302,0x100);
delay(1000);
*/
}

void measure1(void)
{
    /*-----loop 1-----*/
    for(iii=0;iii<60;iii++)
    {
```

```
for(jjj=0;jjj<60;jjj++)
{
    outport(0xF300,0x001);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF300,0x002);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF300,0x004);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF300,0x008);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    outport(0xF300,0x001);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF300,0x002);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF300,0x004);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF300,0x008);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    outport(0xF300,0x001);
    delay(time);
```

```
// adc();
    output(0xF300,0x002);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x004);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x008);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    output(0xF300,0x001);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x002);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x004);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x008);
    delay(time);
// adc();
    clear();
}

for(kkk=0;kkk<60;kkk++)
{
    output(0xF300,0x008);
    delay(time);
// adc();
```

```
    output(0xF300,0x004);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x002);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x001);
    delay(time);
    // adc();
    clear();

    output(0xF300,0x008);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x004);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x002);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x001);
    delay(time);
    // adc();
    clear();

    output(0xF300,0x008);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x004);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF300,0x002);
```

```
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x001);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    output(0xF300,0x008);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x004);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x002);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF300,0x001);
    delay(time);
// adc();
    clear();
}
```

//Move stage Y.....

```
    output(0xF304,0x008);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF304,0x004);
    delay(time);
// adc();
    output(0xF304,0x002);
    delay(time);
```

```
// adc();
    outport(0xF304,0x001);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    outport(0xF304,0x008);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x004);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x002);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x001);
    delay(time);
// adc()

    outport(0xF304,0x008);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x004);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x002);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x001);
    delay(time);
// adc();
    clear()
```

```
        output(0xF304,0x008);
        delay(time);
        // adc();
        output(0xF304,0x004);
        delay(time);
        // adc();
        output(0xF304,0x002);
        delay(time);
        // adc();
        output(0xF304,0x001);
        delay(time);
        // adc()
    }

for(III=0;III<60;III++)
{
    output(0xF304,0x001);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF304,0x002);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF304,0x004);
    delay(time);
    // adc();
    output(0xF304,0x008);
    delay(time);
    // adc();
    clear();

    output(0xF304,0x001);
    delay(time);
```

```
// adc();
    outport(0xF304,0x002);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x004);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x008);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    outport(0xF304,0x001);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x002);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x004);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x008);
    delay(time);
// adc();
    clear();

    outport(0xF304,0x001);
    delay(time);
// adc();
    outport(0xF304,0x002);
    delay(time);
// adc();
```

```
        output(0xF304,0x004);
        delay(time);
        // adc();
        output(0xF304,0x008);
        delay(time);
        // adc();
        clear();
    }
    /*
        output(0xF300,0x008);
        delay(50);
        // adc();
        output(0xF300,0x004);
        delay(50);
        // adc();
        output(0xF300,0x002);
        delay(50);
        // adc();
        output(0xF300,0x001);
        delay(50);
        // adc();
        clear();

for(nnn=0;nnn<60;nnn++)
{
    output(0x301,0x005);
    delay(time);
    // adc();
    output(0x301,0x003);
    delay(time);
    // adc();
    output(0x301,0x00D);
```

```
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x009);  
    delay(time);  
  
    outport(0x301,0x005);  
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x003);  
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x00D);  
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x009);  
    delay(time);  
  
    outport(0x301,0x005);  
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x003);  
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x00D);  
    delay(time);  
    // adc();  
    outport(0x301,0x009);  
    delay(time);  
  
    adc();  
  
    clear();
```

```
    }  
  
for(mmm=0;mmm<60;mmm++)  
  
    {  
  
        outport(0x301,0x009);  
        delay(time);  
        // adc();  
        outport(0x301,0x00D);  
        delay(time);  
        // adc();  
        outport(0x301,0x003);  
        delay(time);  
        // adc();  
        outport(0x301,0x005);  
        delay(time);  
        // adc();  
  
        outport(0x301,0x009);  
        delay(time);  
        // adc();  
        outport(0x301,0x00D);  
        delay(time);  
        // adc();  
        outport(0x301,0x003);  
        delay(time);  
        // adc();  
        outport(0x301,0x005);  
        delay(time);  
        // adc();
```

```
        outport(0x301,0x009);
        delay(time);
        // adc();
        outport(0x301,0x00D);
        delay(time);
        // adc();
        outport(0x301,0x003);
        delay(time);
        // adc();
        outport(0x301,0x005);
        delay(time);
        // adc();

        clear();

    }

} //end kkk

for (lll=0;lll<60;lll++)
{
    outport(0xF300,0x001);
    delay(50);
    // adc();
    outport(0xF300,0x002);
    delay(50);
    // adc();
    outport(0xF300,0x004);
    delay(50);
    // adc();
    outport(0xF300,0x008);
    delay(50);
```

```

        // adc();
        outport(0xF300,0x001);
        delay(50);
        // adc();
        outport(0xF300,0x002);
        delay(50);
        // adc();
        outport(0xF300,0x004);
        delay(50);
        // adc();
        outport(0xF300,0x008);
        delay(50);
        // adc();
        clear();

    } //end III

    clear();

    */
}

void adc(void)
{
    char key;
    long DataADC,i,ADCbuf;
    float voltage;
    delay(1);
    // do {          // ???x?xx
        outport(ComBase,0x0b); // initiale cs = "1", clk = "1", di="1"
        outport(ComBase,0x01);
        outport(ComBase,0x03);
    }
}

```

```

outport(ComBase,0x01);
outport(ComBase,0x03);
outport(ComBase,0x00);
outport(ComBase,0x02);
outport(ComBase,0x01);
outport(ComBase,0x03);

DataADC = 0;
outport(ComBase,0x00);
for(i=1;i<=13;i++) {
    ADCbuf = (~inportb(ComBase+1)&0x80)<<6;
    ADCbuf = ADCbuf >> i;
    DataADC = DataADC | ADCbuf;

//   ADCbuf = inport(ComBase+1)&0x80;
//   if(!ADCbuf)
//       printf("1");
//   else printf("0");
    outport(ComBase,0x02);
    outport(ComBase,0x00);
}
DataADC = DataADC&0x0fff;
outport(ComBase,0x0b); // initiale cs = "1", clk = "1", di="1"
voltage = (float)DataADC*5/4095;
// printf("%e V.\n",voltage);
// printf("\n");
delay(1);

// key = bioskey(1);
// } while (key != 0x1b);

    Vin1[iii][jjj] = voltage;
printf("data i= %ld %ld %e\n",iii,jjj,Vin1[iii][jjj]);

```

```

/*
if (jjj > 78)
    {
        iii++;
        jjj=0;
    }
else
    jjj++;
*/
// printf("data i= %d  j= %d  %e\n",iii,jjj,voltage);
    //printf("Vin1 =.....%d    %e\n",data2,Vin1);
}
/*

void adc(void)
    {
        // float vout[100][100];
        char          key;
        unsigned char temp1,temp2;
        int  DataADC, ChannelADC,a;
        // float vout;
        clrscr();
        printf("-----<< Test Program >>-----\n\r");
        ChannelADC=15;
        outportb(BasePortAtoD+3, 0x0); // clear register A/D convertor
        delay(10); // wait 100 mS.
        outportb(BasePortAtoD+0, ChannelADC); // select channel input A/D convertor
        delay(10); // wait 100 mS.
        // tiger for start conversion A/D convertor
        for(a=0;a<6;a++)
            {
                delay(5);

```

```

        temp1 = inportb(BasePortAtoD+4);
    }
    for(a=0;a<6;a++)
    {
        delay(5);
        temp2 = inportb(BasePortAtoD+5);
    }
//    delay(10);
// read data 12 bits to DataADC
    temp1 = inportb(BasePortAtoD+2); // 4 bit high  ???xxxx
    temp2 = inportb(BasePortAtoD+1); // 8 bit low  xxxxxxxx
    DataADC = ( temp1*256 ) + temp2;
    vout[i][j] = (DataADC/4096)*9;
    // display output
//    gotoxy(10,5+ChannelADC);
//    printf("ReadData from Channel %d = 0x%X data= %e\n", ChannelADC,
DataADC,vout);
    delay(10);
    if (j > 31)
    {
        i++;
        j=1;
    }
    else
        j++;
    printf("vout[%d][%d] =..... %e\n",i,j,vout[i][j]);
    // printf("data i= %d  j= %d \n",i,j);
}
/* int port
    outport(portd, 0x080);
    for ( i=0;i<255;i++)
    {

```

```
    outport(porta, i);
    printf("Value sent to port number %d\n",i);
    delay(50);
}

key = bioskey(1);
} while (key != 0x1b);

*/

void clear(void)
{
    outport(portd1,0x080);
    outport(portd2,0x080);
    outport(portd3,0x080);
}
```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจิรายุส พูลขำ
วัน เดือน ปีเกิด	11 สิงหาคม 2519
ที่อยู่	165/42 ถ.พระยาสุรเสนา ม.3 ต.เสม็ด อ.เมือง จ.ชลบุรี 20000
ประวัติการศึกษา	ปี 2542 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ประสบการณ์ทำงาน	ปัจจุบัน พนักงานองค์การของรัฐ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์
ผลงานวิจัย	An Eddy Current Imaging System for Crack Detection in Aluminum Plates, ROVISP 2005 Saint University in Malaysia, July 2005.