ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)

ปริญญา

มาตรวิทยา | ฟิสิกส์

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน

The Study and Design of Non-destructive Testing Based on Eddy Current

นามผู้วิจัย นายปัญญา พาสิงห์ศรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร จันทรัตน์, ปร.ด.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน

The Study and Design of Non-destructive Testing Based on Eddy Current

โดย

นายปัญญา พาสิงห์ศรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาตรวิทยา)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปัญญา พาสิงห์ศรี 2555: การศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (มาตรวิทยา) สาขามาตรวิทยา ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศกร จันทรัตน์, ปร.ด. 78 หน้า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษา การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน ได้ให้ความสำหรับกับเครื่องมือวัดสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่องที่มีราคาถูก ซึ่งระบบของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ชุดหัววัด การ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก และวงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดมุมเฟสของสัญญาณ โดยระบบของเครื่องมือวัดถูกควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz ที่แอมพลิจูด 1 Vp-p ที่กำเนิดจากช่องสัญญาณเอาต์พุตของการ์ดเสียงถูกจ่ายให้กับชุดหัววัด โดยชุดหัววัดที่ได้ทำการออกแบบไว้ได้จากการพันเส้นลวดทองแดงเบอร์ 40 รอบแกนเฟอร์ไรท์ จำนวน 900 รอบ การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของสัญญาณ และความต่างศักย์ที่ตกคร่อมชุดหัววัดจะใช้หลักการของสามความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Three Voltage) ในการคำนวณ ซึ่งสัญญาณที่ได้จากหัววัดถูกตรวจวัดด้วยช่องอินพุตของการ์ดเสียง โปรแกรม LabVIEW ถูกใช้เพื่อควบคุมระบบเครื่องมือวัดให้สามารถแสดงผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์วัด โดยนำมุมเฟสของสัญญาณที่ขึ้นกับระดับความลึกรอยบกพร่องมาหาสมการเชิงเส้นที่ความถี่ต่างๆ เพื่อคำนวณกลับเป็นระดับความลึกของรอยบกพร่อง ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดถูกทดสอบโดยการตรวจหารอยบกพร่องของแผ่นอลูมิเนียม (เลขอนุกรม 2.165-551 รหัส 2941) ที่ระดับความลึกต่างๆ จากพื้นผิว และถูกรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งค่าความเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 0.01 mm ที่ความไม่แน่นอน ± 0.01 mm ถูกพิจารณาผลการวัดที่ระดับความลึกของรอยบกพร่อง 0.2 mm

_______________ _______________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Panya Phasingsri 2012: The Study and Design of Non-destructive Testing Based on Eddy Current. Master of Science (Metrology), Major Field: Metrology, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Pongsakorn Juntarut, Ph.D. 78 pages.

In this study, presented the study and design of non-destructive testing based on eddy current. Attention has been focused on the low-cost tool for detecting a crack or flaw on the surface of conducting material. This instrument system consists of 3 parts: a probe, a notebook with soundcard, the phase detector circuit and program for system adjusting and monitoring. The probe was fabricated by winding 900 turn of 40 AWG copper wires around a ferrite core. The instrument system was controlled by a LabVIEW program. The sine wave with frequency of 10 kHz-20 kHz and amplitude of 1 Vp-p from line-out of sound card was supplied to the probe. The variation of phase and voltage across the probe based on AC Three Voltage of Theory was detected by line-in of the sound card. The phase angle dependency on the flaw depth is linear and can be fitted with linear function. The obtained transfer function used to convert the voltage measuring to depth of flaw in real measurement by using LabVIEW program. The performance of the eddy current probe system was tested by detecting crack of reference aluminum sheet at different depths from the surface (Serial Number 2.165-551 Code 2941) and reported uncertainty of measurement at confident level 95%. The maximum error of 0.2 mm with uncertainty of ± 0.01 mm was determined from measuring 0.2 mm depth flaws.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร. พงศกร จันทรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และนาวาเอก เชฏฐ์ ศัลยพงษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะรวมทั้งความรู้ที่เป็นประโยชน์ และกรุณาให้ความอนุเคราะห์มาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ไชยยะ แช่มช้อย และเรืออากาศเอก ปรัชญา กิตติศักดิ์กุล ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตอบข้อซักถามและฝึกทักษะในการทำการทดลองครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเหล่าพี่ๆ ทหาร จากกรมช่างอากาศบำรุง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้แผ่นอลูมิเนียมอ้างอิงเพื่อทดสอบหารอยบกพร่อง

ขอขอบคุณ คุณชัยฤทธิ์ ศรีดาวงษ์ จากสถาบันนวัตกรรม ทีโอที ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้มาตรฐานทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ร่วมชั้นเรียนที่คอยช่วยเหลือ เกื้อหนุนในยามที่มีปัญหา และเป็นกำลังใจให้

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจสำคัญเสมอมา

ปัญญา พาสิงห์ศรี
เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	20
อุปกรณ์	20
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	29
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ความไม่แน่นอนจากการวัด	65
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 7 ของสมาคมฟิสิกส์ไทย Siam Physic Congress 2012 (SPC2012)	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	78

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	ค่าสภาพการนำไฟฟ้าและสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์	12
2	ความถี่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่กำเนิดจากการ์ดเสียงวัดที่ด้านเอาต์พุต	30
3	แอมพลิจูดที่วัดได้จากการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ผ่านการ์ดเสียงด้านเอาต์พุต	30
4	แอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านทางการ์ดเสียงอินพุตด้านซ้ายเมื่อจ่ายสัญญาณจากภายนอก 1 Vp-p	31
5	แอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านทางการ์ดเสียงอินพุตด้านขวาเมื่อจ่ายสัญญาณจากภายนอก 1 Vp-p	32
6	ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดหัววัดที่ความถี่ต่างๆ	34
7	ความจุที่จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ต่างๆ	35
8	ความจุของตัวเก็บประจุที่ถูกวัดด้วย LCR มิเตอร์ในย่าน pF	36
9	ความจุของตัวเก็บประจุที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัด LCR ในย่าน nF	37
10	วัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดอยู่ในอากาศเทียบกับเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียม	38
11	การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องลึก 1.0 mm	39
12	การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องลึก 0.5 mm	39
13	การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องลึก 0.2 mm	40
14	ความต้านทานที่วัดได้จากตัวต้านทานอ้างอิงสัญญาณ	45
15	ความต้านทานที่วัดได้จากตัวต้านทานไฟฟ้ามาตรฐาน 10 kΩ	47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
16	ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาตรฐาน 1.0 μF	48
17	ความเหนี่ยวนำที่วัดได้จากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐานทาง 10 mH	49
18	มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 1.0 mm	51
19	มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.5 mm	52
20	มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.2 mm	52
21	มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องที่ระดับแตกต่างกันเพื่อนำมาหาสมการเชิงเส้น	54
22	ระดับความลึกของรอยบกพร่องที่ความถี่ต่างๆ จากการวัดเฉลี่ยจำนวน 30 ครั้ง	56
23	คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดที่ความถี่ 20 kHz รอยบกพร่องลึก 1.0 mm	58
24	การรายงานค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระดับความลึกของรอยบกพร่องที่ความถี่ต่างๆ	59

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่		หน้า
1	อุปกรณ์พื้นฐานของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	6
2	การเหนี่ยวนำวัสดุตัวนำที่มีพื้นผิวราบเรียบ	7
3	การเหนี่ยวนำวัสดุตัวนำที่มีรอยบกพร่องบริเวณพื้นผิว	7
4	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไหลวนในวัสดุ	10
5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความลึกในการซึมผ่านของกระแสไหลวน	11
6	ชนิดของขดลวดหัววัดที่ใช้งานต่างๆ	13
7	แผ่นวัสดุอ้างอิงสำหรับเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน	14
8	วงจรพื้นฐานสำหรับวัดผลต่างเฟส	15
9	เวคเตอร์ไดอะแกรมที่เกิดจากวงจรตรวจวัดผลต่างเฟส	15
10	การ์ดเสียงที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์	17
11	โครงสร้างภายในการ์ดเสียงที่ใช้งานโดยทั่วไป	18
12	ลักษณะของแผ่นอลูมิเนียมเซาะร่องตลอดแนว	20
13	แผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยรอยบกพร่องอ้างอิงที่ใช้งาน	20
14	ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 220	21
15	ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น U3402A	21
16	LCR มิเตอร์ ยี่ห้อ Protek รุ่น Z9218	22
17	เครื่องกำเนิดสัญญาณ ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 33120A	22
18	ตัวต้านทานมาตรฐาน 10 kΩ ยี่ห้อ TEGAM	23
19	ตัวเก็บประจุมาตรฐาน 1.0 μF ยี่ห้อ GENERAL RADIO COMPANY	23
20	ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 10 mH ยี่ห้อ GENERAL RADIO COMPANY	24
21	คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่ใช้ในการทดลอง	24
22	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	25
23	โปรแกรม LabVIEW สำหรับกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์และรับค่าสัญญาณ	29

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

ภาพที่		หน้า
24	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของเครื่องวัดเข้ากับโน้ตบุกและออกจากโน้ตบุก	29
25	บล็อกไดอะแกรมในส่วนของโปรแกรมควบคุมการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ออกจากการ์ดเสียงด้านเอาต์พุต	33
26	บล็อกไดอะแกรมในส่วนของโปรแกรมควบคุมการรับค่าจากสัญญาณภายนอกผ่านทางการ์ดเสียงทางด้านอินพุต	33
27	ขดลวดหัววัดสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่อง	34
28	ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าสำหรับทำงานร่วมกับขดลวดหัววัด	36
29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่	41
30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่ที่ใช้งานของรอยบกพร่องที่ระดับความลึก 1.0 mm	42
31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่ที่ใช้งานของรอยบกพร่องที่ระดับความลึก 0.5 mm	42
32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่ที่ใช้งานของรอยบกพร่องที่ระดับความลึก 0.2 mm	43
33	แผนภาพวงจรตรวจวัดเฟสและการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์โน้ตบุก	44
34	บอร์ดวงจรสำเร็จสำหรับตรวจวัดเฟสของสัญญาณ	45
35	หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัดค่าของ LCR	46
36	การเชื่อมต่อสำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ามาตรฐาน 10 kΩ	46
37	การเชื่อมต่อสำหรับวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 1.0 μF	47
38	การเชื่อมต่อสำหรับวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 10 mH	48
39	การวัดมุมเฟสที่เชื่อมต่อเครื่องวัดเข้ากับเครื่องโน้ตบุกผ่านโปรแกรม LabVIEW	50
40	โปรแกรมสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยกระแสไหลวน	51
41	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสที่ความถี่ต่างๆ เทียบกับรอยบกพร่องอ้างอิงระดับความลึกต่างๆ	53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ตรวจวัดรอยบกพร่องที่ความลึก 1.0 mm ด้วยโปรแกรม LabVIEW	55
43	ตรวจวัดรอยบกพร่องที่ความลึก 0.5 mm ด้วยโปรแกรม LabVIEW	55
44	ตรวจวัดรอยบกพร่องที่ความลึก 0.2 mm ด้วยโปรแกรม LabVIEW	56

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน

The Study and Design of Non-destructive Testing Based on Eddy Current

คำนำ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางด้านอุตสาหกรรมจำเป็นต้องพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีสำหรับใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ควบคู่กันไป ทั้งนี้เพื่อควบคุมคุณภาพมาตรฐานของผลิตภัณฑ์และมาตรฐานในกระบวนการผลิต โดยการตรวจสอบดังกล่าวสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การตรวจสอบแบบทำลาย (Destructive Testing: DT) และการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing: NDT) ซึ่งวิธีการตรวจสอบแบบ NDT เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลาย เนื่องจากไม่ทำให้วัสดุหรือชิ้นงานที่นำมาทดสอบได้รับความเสียหาย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ กล่าวถึงการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยกระแสไหลวน ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้มากในงานด้านอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุจำพวกโลหะ

เครื่องตรวจสอบสภาพวัสดุแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวนเป็นเครื่องมือที่อาศัยสมบัติทางไฟฟ้าแม่เหล็กและการเหนี่ยวนำกระแสที่เกิดขึ้นในวัสดุ เมื่อฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวัสดุซึ่งเป็นตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นเพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นมาต้านการเปลี่ยนฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวัสดุดังกล่าว โดยกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบนวัสดุจะขึ้นกับสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กของวัสดุ รวมถึงความไม่ต่อเนื่องและความบกพร่องในวัสดุ ซึ่งความบกพร่องจะเป็นตัวขัดขวางการไหลของกระแสมีผลกระทบต่อการกระจายของกระแสไหลวนทำให้สามารถตรวจหารอยบกพร่องได้ เนื่องจากสามารถวัดได้รวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่ายในการวัดและใช้งานได้ง่าย แต่ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันราคาค่อนข้างสูง โดยจะอยู่ที่หลักหลายล้านบาท ด้วยราคาที่สูงมากอีกทั้งการบำรุงรักษาเครื่องมือ และปัญหาที่เกิดจากจอของเครื่องวัดที่เสียหายได้ง่ายจึงเป็นอุปสรรคสำคัญในการตัดสินใจซื้อเครื่องมือวัดดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากขาดเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพดังกล่าวแล้วการศึกษาวิจัยและตรวจสอบสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุตัวนำก็คงไม่สามารถกระทำได้เช่นกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา การออกแบบและสร้างชุดเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน เพื่อเป็นเครื่องต้นแบบในด้านการศึกษาปรากฏการณ์ขั้นพื้นฐานของการเกิดกระแสไหลวนในวัสดุตัวนำและเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาชุดเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวนทำให้มีต้นทุนในการสั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์ถูกลงเพื่อพัฒนาเป็นเครื่องวัดต่อไป โดยเครื่องวัดที่สร้างขึ้นประกอบด้วย ชุดหัววัดแบบขดลวดเดี่ยว วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดมุมเฟสของสัญญาณ และโปรแกรมสำหรับควบคุมระบบเครื่องวัดผ่านการแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถกำเนิดความถี่ผ่านทางการ์ดเสียงด้านเอาต์พุตเพื่อใช้เหนี่ยวนำให้กับชุดหัววัด และสามารถตรวจวัดมุมเฟสผ่านทางการ์ดเสียงด้านอินพุต ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องวัด LCR มิเตอร์ โดยมุมเฟสที่ตรวจวัดสามารถนำมาคำนวณหาระดับความลึกของรอยบกพร่องได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวนสามารถตรวจพบและประเมินระดับความลึกรอยบกพร่องที่พื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมได้

2. เพื่อศึกษาการนำเอาการ์ดเสียงมาใช้ให้เกิดประโยชน์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและตัวตรวจรับสัญญาณ

3. เพื่อออกแบบโปรแกรมให้สามารถควบคุมการ์ดเสียงได้

4. เพื่อออกแบบและสร้างวงจรที่สามารถตรวจวัดเฟสของสัญญาณได้

5. เพื่อใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศมาทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน

6. เพื่อสามารถประเมินความลึกของรอยบกพร่องที่ระดับความลึกต่างๆ ได้

ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษา การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวนซึ่งประกอบไปด้วย ชุดหัววัดให้สามารถแยกแยะรอยบกพร่องที่ระดับความลึกแตกต่างกันของแผ่นอลูมิเนียม วงจรที่ใช้สำหรับตรวจวัดมุมเฟสของสัญญาณ โดยอาศัยหลักการของทฤษฎีสามความต่างศักย์ (AC Three Voltage) และโปรแกรมสำหรับควบคุมระบบเครื่องตรวจวัดผ่านการแสดงผลที่ทำงานร่วมกับการ์ดเสียงที่อยู่ภายในคอมพิวเตอร์โน้ตบุก ให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์และรับสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากภายนอกได้ตั้งแต่ความถี่ 10 kHz ถึง 20 kHz โดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ เครื่องตรวจหารอยบกพร่องที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นสามารถคำนวณหาระดับความลึกความลึกของรอยบกพร่องที่ระดับความลึกต่างๆ ผ่านทางคอมพิวเตอร์โน้ตบุก และประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

การเกิดกระแสไหลวนถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1831 โดย ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) และ โจเซฟ เฮนรี่ (Joseph Henry) พบว่าการเคลื่อนที่ของแท่งแม่เหล็กถาวรก่อให้เกิดกระแสในขดลวดที่อยู่ใกล้ๆ เรียกว่า เกิดการเหนี่ยวนำ ต่อมาในปี 1834 เฮนริช เลนซ์ (Heinrich Lenz) ได้อธิบายเกี่ยวกับการไหลของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในวัตถุซึ่งมีทิศทางที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก จนกระทั่งในปี 1879 การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนถูกใช้ครั้งแรกเมื่อ ดี อี ฮิวส์ (D.E. Hughes) ได้ทำการตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวนในการจำแนกชนิดของโลหะ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าของขดลวด เมื่อวางขดลวดเข้าใกล้โลหะที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างกัน ต่อมาในปี 1940 ไฟรด์ริช โฟสเตอร์ (Friedreich Foester) ได้นำเอาปรากฏการณ์การเกิดกระแสไหลวนมาพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดเพื่อตรวจสอบสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุตัวนำ

ต่อมาเมื่อการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนเริ่มเป็นที่สนสนใจแต่ยากที่จะทำความเข้าใจ V.S. Cecco et al., 1986 ได้อธิบายหลักการของการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน เมื่อนำเอาขดลวดมาทำเป็นหัววัดตรวจสอบที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยกระแสไฟฟ้าสลับสัญญาณรูปไซน์เข้าใกล้กับแผ่นโลหะจะทำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นบนพื้นผิวโลหะ ต่อมาจึงได้มีการนำเอาปรากฏการณ์การเกิดกระแสไหลวนมาประยุกต์ในการตรวจสอบชิ้นงานด้านอุตสาหกรรม เช่น A. B. Doyum et al., 1997 ใช้ในการตรวจสอบรอยบกพร่องที่มีลักษณะเป็นรูในชิ้นงาน H. Fukutomi et al., 1997 ใช้สำหรับอธิบายคุณลักษณะของรอยบกพร่อง Takagi et al., 1998 ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์หาความสัมพันธ์ระหว่างความบกพร่องของโลหะ R. Hohmann et al., 2001 ใช้สำหรับทดสอบล้อของเครื่องบิน X. M. Pei et al., 2002 ใช้สำหรับการวิเคราะห์ช่วงความถี่ในการตรวจสอบว่าส่งผลกับรอยบกพร่อง M. I. Gonzalez et al., 2004 ใช้เป็นระบบเบรกของรถไฟเหาะ X. Ma et al., 2006 ใช้สำหรับวัดค่าสภาพนำทางไฟฟ้าและความพรุนในโลหะ เป็นต้น การตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนมีวัตถุประสงค์เพื่อ รับประกันหรือควบคุมคุณภาพ การตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐาน และการซ่อมบำรุงรักษา ดังนั้นจึงนับว่ามีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเป็นอย่างยิ่ง

เครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวนประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ ขดลวดหัววัด เครื่องกำเนิดสัญญาณ วงจรตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ และส่วนแสดงผล ได้ถูกอธิบายโดย X. L. Chen et al., 2011 จึงก่อให้เกิดแนวความคิดมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประยุกต์ใช้สำหรับ ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน โดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาถูกและสามารถหาซื้อได้ภายในประเทศ จึงได้ศึกษาจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อรวบรวมเป็นความรู้วิทยาทานพื้นฐานในการศึกษา ได้แก่

ในส่วนของขดลวดหัววัดจะทำการสร้างขดลวดหัววัดเพื่อใช้ตรวจสอบรอยบกพร่องขึ้นใช้งาน เช่น P. May et al., 2007 ใช้หลักการการเกิดกระแสไหลวนในวัสดุมาทำการวัดความหนาของชั้นสีที่เคลือบผิวของโลหะ ซึ่งนำแกนเฟอร์ไรท์มาเพิ่มประสิทธิภาพให้กับขดลวดหัววัดให้สามารถตรวจวัดได้ดียิ่งขึ้น

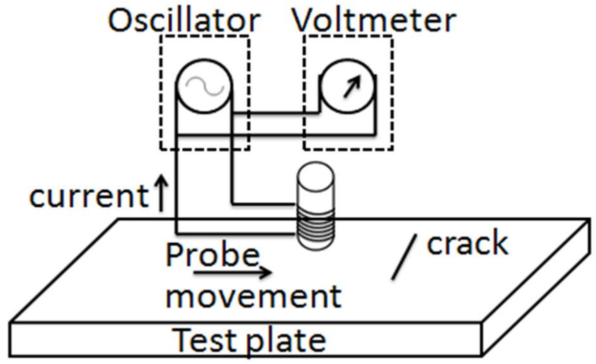
ในส่วนวงจรตรวจจับมุมเฟสนั้นจะใช้หลักการของเครื่องวัดค่า LCR ที่อาศัยหลักการวัดค่าความต่างศักย์ของสัญญาณมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่ามุมเฟส เช่น M. A. Atmanand et al., 1996 ได้ทำการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาทำเป็นเครื่องวัดค่า LCR เพื่อหาค่าของอิมพีแดนซ์ โดยใช้หลักการของวงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Bridge), G. R Steber et al., 2005 และ K. A. Kuhn et al., 2008 ได้นำเอาหลักการของทฤษฎีสามความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับมาคำนวณหาค่าของอิมพีแดนซ์ ซึ่งทฤษฎีนี้จำเป็นต้องทราบความต่างศักย์ของสองสัญญาณเพื่อมาเปรียบเทียบหาค่ามุมเฟสแล้วจึงคำนวณกลับเป็นค่าอิมพีแดนซ์

ในส่วนของเครื่องกำเนิดความถี่สัญญาณรูปคลื่นไซน์และตรวจวัดสัญญาณจะใช้การ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุก เช่น M. J. H. Puts et al., 2005, Z. X. Ling et al., 2010, T. S. Gunawan et al., 2010 และ B. Yang et al., 2011 ได้นำการ์ดเสียงของเครื่องคอมพิวเตอร์นำมาประยุกต์ใช้ เพื่อเก็บข้อมูล โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลักการการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

เครื่องมือตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ขดลวดหัววัด และโวลต์มิเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 อุปกรณ์พื้นฐานของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

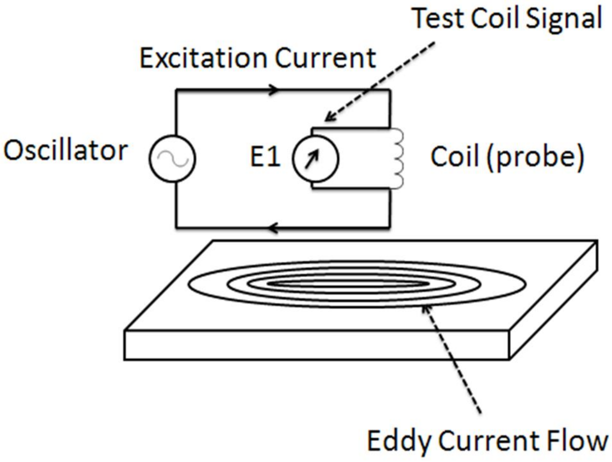
-แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำหน้าที่จ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในช่วงความถี่กิโลเฮิรตซ์ ถึงเมกกะเฮิรตซ์ให้กับขดลวดหัววัด

-ขดลวดหัววัดประกอบด้วยขดลวดเพียงขดเดียว หรือขดลวดกระตุ้นแยกกับขดลวดตรวจวัดหรือมีขดลวดกระตุ้นกับตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ (hall effect)

-โวลต์มิเตอร์ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดหัววัด

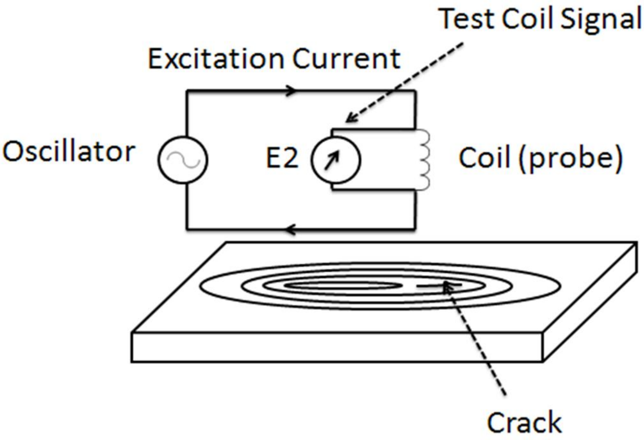
เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดหัววัดจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กปฐมภูมิ (primary field) ขึ้นที่ขดลวด และเมื่อเคลื่อนขดลวดหัววัดเข้าใกล้ชิ้นงานตัวนำที่มีความราบเรียบ จะก่อให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในชิ้นงาน โดยกระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทุติยภูมิ (secondary field) ขึ้นที่ผิวของวัสดุตัวนำ ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปฐมภูมิ ส่งผลให้เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า E1 ขึ้นที่ขดลวดหัววัด ดังภาพที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 การเหนี่ยวนำวัสดุตัวนำที่มีพื้นผิวราบเรียบ

ถ้าหากชิ้นงานตัวนำมีรอยบกพร่องที่พื้นผิว จะทำให้การไหลของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากรอยบกพร่องเป็นตัวขัดขวางการไหลของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นที่ผิว ดังภาพที่ 3 ทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า E2 ขึ้นที่ขดลวดหัววัด



ภาพที่ 3 การเหนี่ยวนำวัสดุตัวนำที่มีรอยบกพร่องบริเวณพื้นผิว

จากวงจรภาพที่ 2 และภาพที่ 3 สามารถเขียนได้ในเทอมของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าปฐมภูมิ (Primary Voltage:V_P) และค่าอิมพีแดนซ์ (Primary Impedance:Z_P) ของวงจรได้ ดังสมการ

$$I_P = V_P/Z_P \tag{1}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรประกอบด้วยค่าความต้านทาน (Ohm Resistance: R) และค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance:X_L) ดังสมการที่ 2 ซึ่งเกิดจากความเหนี่ยวนำของขดลวดหัววัดดังสมการ 3

$$Z_P = R + jX_L \tag{2}$$

$$X_L = 2\pi f L \tag{3}$$

โดย f คือความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับมีหน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz) และ L คือค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) มีหน่วยเป็นเฮนรี่ (Henry: H)

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดหัววัด จะมีลักษณะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine wave) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ดังสมการ

$$I_P = I_0 sin(\omega t) \tag{4}$$

โดยที่ I_0 คือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere: A) และ ω คือความเร็วเชิงมุม มีค่าเท่ากับ 2πf มีหน่วยเป็น เรเดียน/วินาที (Radian/second)

กระแสไฟฟ้าดังกล่าวสร้างฟลักซ์แม่เหล็ก$\emptyset_P$ ขึ้นรอบๆ ขดลวดหัววัด ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่ากระแสไฟฟ้า I_P และจำนวนรอบของขดลวดหัววัด N_P

$$\emptyset_P \propto I_P N_P \tag{5}$$

เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าสลับI_Pมีการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชันของเวลา ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าทุติยภูมิขึ้นที่ผิวชิ้นวัสดุตัวนำเพื่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผิววัสดุ

$$V_s = -N_P d\emptyset_P/dt \tag{6}$$

เมื่อ $d\emptyset_P/dt$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้า $\emptyset_P$ เทียบกับเวลา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อกระแสไฟฟ้า I_P ที่จ่ายให้แก่ขดลวดหัววัดคือกระแสไฟฟ้าที่สร้างฟลักซ์แม่เหล็กขึ้นมา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันเวลาดังสมการ

$$\emptyset_p = \emptyset_0 sin\omega t \tag{7}$$

เมื่อ $\emptyset_0$ คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ควบคู่กับค่ากระแสไฟฟ้า I_0 ดังนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุจึงมีค่าดังสมการ

$$V_s = -N_P \omega \emptyset_0 cos\omega t \tag{8}$$

เมื่อนำขดลวดหัววัดเคลื่อนที่ผ่านไปตามผิวของวัสดุตัวนำที่ต้องการตรวจสอบ จะเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในวัสดุตัวนำและเกิดกระแสด้านทุติยภูมิ I_s ดังสมการ

$$I_s = V_s/Z_s \tag{9}$$

เมื่อ Z_s คือค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุกระแสไฟฟ้าI_sที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำมีลักษณะไหลวน ซึ่งกระแสไหลวนนี้จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กทุติยภูมิซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปฐมภูมิ

ดังนั้นสภาวะสมดุลที่ฟลักซ์แม่เหล็กยังผลเกิดขึ้นรอบๆ ขดลวดเมื่อมีวัสดุตัวนำเคลื่อนที่เข้าใกล้ๆ ขดลวด มีค่าดังสมการ

$$\emptyset_e = \emptyset_P - \emptyset_s \tag{10}$$

ซึ่งการไหลของกระแสไหลวนนี้ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความต้านทานไฟฟ้าและทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีผลลัพธ์ลดลง

$$Z_P \propto \emptyset_e \tag{11}$$

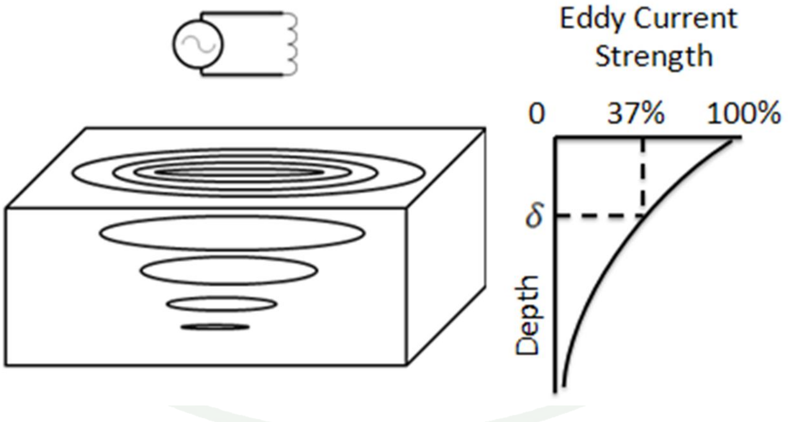
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$V_P = Z_P I_P \qquad (12)$$

ซึ่งจากสมการที่ 12 แสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดหัววัดเป็นฟังก์ชันกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารอบๆ ขดลวดหัววัดและสนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้ถูกควบคุมโดยกระแสไฟฟ้าสลับที่เหนี่ยวนำขึ้นในวัสดุตัวนำ

ปรากฏการณ์ที่ผิวและความลึกในการซึมผ่านของกระแสไหลวน

กระแสไหลวนเป็นกระแสไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำให้ไหลเป็นวงกลมในระนาบตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก ซึ่งโดยปกติมักจะไหลวนขนานกับขดลวดและพื้นผิวภายในขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงให้แก่ขดลวดหัววัด โดยกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้ๆ พื้นผิวของวัสดุตัวนำและลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียลตามความลึกของชิ้นงาน โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสตามความลึกจากผิวจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ในการตรวจสอบ และสมบัติทางไฟฟ้ารวมทั้งคุณสมบัติความนำไฟฟ้า เรียกว่าปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin Effect) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไหลวนในวัสดุ

ที่ระยะความลึกในการซึมผ่าน (depth of penetration: δ) ของกระแสไหลวน โดยความหนาแน่นของกระแสไหลวนจะลดลงเหลือเพียง $1/e$ หรือประมาณ 37% ของค่าความหนาแน่นกระแสไหลวนที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งค่าความลึกในการซึมผ่านของกระแสไหลวนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

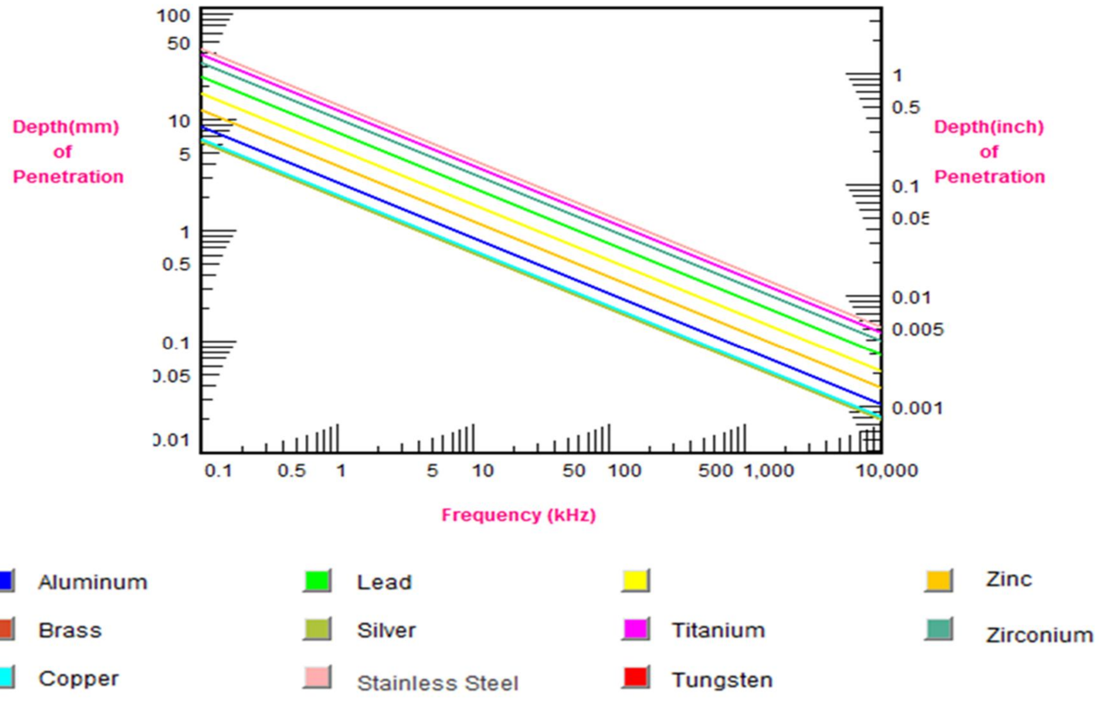
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{16}$$

โดย σ คือสภาพการนำไฟฟ้าหน่วยโมห์ (S/m)

μ คือสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของวัสดุหน่วยเป็นเฮนรี่ต่อเมตร (H/m)

f คือความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ หน่วยเป็นเฮิร์ต (Hz)

ที่ความลึกมากกว่า 3δ จะถือได้ว่ากระแสไหลวนมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ดังนั้นจึงใช้การปรับความถี่เพื่อกำหนดความลึกให้เหมาะกับชนิดของโลหะต่างๆ ดังภาพที่ 5 แสดงค่าความลึกในการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็กซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่าความถี่ของวัสดุชนิดต่างๆ ส่วนสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าสภาพความต้านทาน (ρ) และค่าซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r) ของวัสดุชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความลึกในการซึมผ่านของกระแสไหลวน

ที่มา: NDT Resource Center (2001)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าและสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์

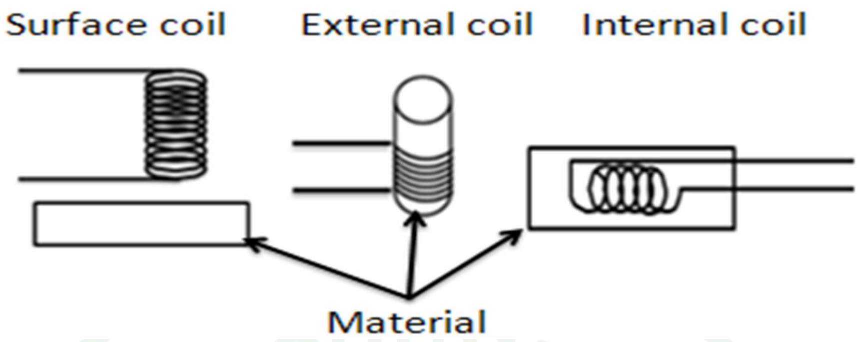
ชนิดวัสดุตัวนำ	สภาพการนำไฟฟ้า (S/m)	สภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์
ทองเหลือง	17.5	1
ไททาเนียม	1.8	1
ตะกั่ว	4.375	1
เซอร์โคเนียม	2.5	1
เงิน	66.2	1
ทังสเตน	18.0625	1
อลูมิเนียม	35.4	1
ทองแดง	58	1
สังกะสี	17.625	1
เหล็กสแตนเลส	1.4	1
เหล็กกล้า	18.5	200

ที่มา: NDT Resource Center (2001)

ลักษณะขดลวดหัววัดที่ใช้ตรวจสอบ

ขดลวดหัววัดที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนมีหน้าที่สำคัญสองประการคือ เหนี่ยวนำกระแสไหลวนขึ้นในชิ้นวัสดุตัวนำ และตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของการไหลของกระแสไหลวนซึ่งเกิดจากรอยบกพร่องต่างๆ โดยสามารถแบ่งขดลวดหัววัดออกเป็น 2 แบบ คือขดลวดหัววัดแบบสัมบูรณ์ (Absolute Probe) ซึ่งมีขดลวดหัววัดแบบขดเดี่ยวเป็นตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ และขดลวดหัววัดแบบผลต่าง (Differential Probe) ซึ่งใช้ขดลวดหัววัดสองขดตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความต่างของสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำเป็นการอ้างอิงซึ่งกันและกันซึ่งขดลวดหัววัดตรวจสอบทั้ง 2 แบบนี้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยการใช้แกนเฟอร์ไรท์เป็นแกนขดลวดหัววัดเพื่อให้มีความเหนี่ยวนำสูงขึ้นและมีพื้นที่ในการสัมผัสน้อยลง ขดลวดหัววัดจะมีรูปร่างและขนาดต่างๆ กัน ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ดังภาพที่ 6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 ชนิดของขดลวดหัววัดที่ใช้งานต่างๆ

ขดลวดหัววัดสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

-ขดลวดหัววัดแบบตรวจวัดที่พื้นผิว (Surface coil Probe) เป็นขดลวดหัววัดสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่องที่พื้นผิวของชิ้นงานประเภทวัดความหนาของชั้นฟิล์ม

-ขดลวดหัววัดแบบตรวจวัดที่ผิวภายนอก (External Coil Probe) เป็นขดลวดหัววัดสำหรับตรวจสอบที่ผิวของชิ้นงานประเภท ท่อ และแท่งกลม โดยนำชิ้นงานลอดผ่านขดลวดหัววัด

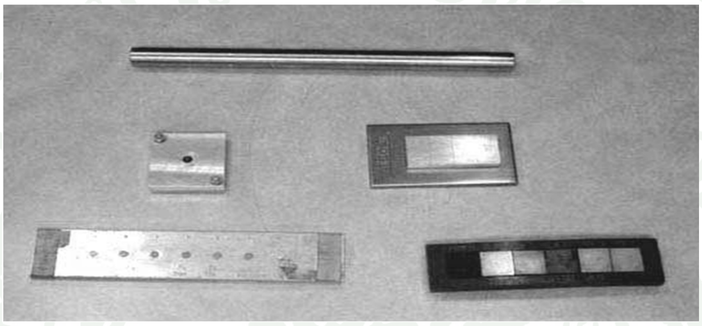
-ขดลวดหัววัดแบบตรวจวัดภายใน (Internal Coil Probe) เป็นขดลวดหัววัดสำหรับตรวจสอบงานประเภท ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสอดขดลวดหัววัดเข้าไปในท่อ

นอกจากนี้ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความไวในการตรวจจับความบกพร่องได้แก่ ระยะห่างในการตรวจสอบระหว่างขดลวดหัววัดกับชิ้นงานที่เป็นวัสดุตัวนำ ถ้าขดลวดหัววัดมีระยะห่างจากชิ้นงานมากๆ ความไวจะลดลง เนื่องจากการเชื่อมต่อของฟลักซ์แม่เหล็กลดลง และระดับความลึกของรอยบกพร่องภายในชิ้นงานทดสอบยิ่งมีความลึกจากผิวมาก ความไวก็จะลดลงตาม เนื่องจากผลของ Skin Effect ที่ทำให้กระแสไหลวนมีความหนาแน่นลดลงตามความลึก ตลอดจนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดหัววัดควรมีขนาดเท่ากับหรือเล็กกว่าความกว้างของรอยบกพร่อง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รอยบกพร่องสำหรับเทียบมาตรฐาน

การตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวนเป็นเทคนิคที่อาศัยการเปรียบเทียบ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวมาตรฐานอ้างอิงหรือวัสดุอ้างอิง (Calibration Standard หรือ Reference Standard) เพื่อใช้เปรียบเทียบแอมพลิจูดและมุมเฟสของรอยบกพร่องที่นำมาทดสอบกับรอยบกพร่องอ้างอิง ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผ่นวัสดุอ้างอิงสำหรับเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

ที่มา: NDT Resource Center (2001)

ทฤษฎีสามความต่างศักย์ไฟฟ้า

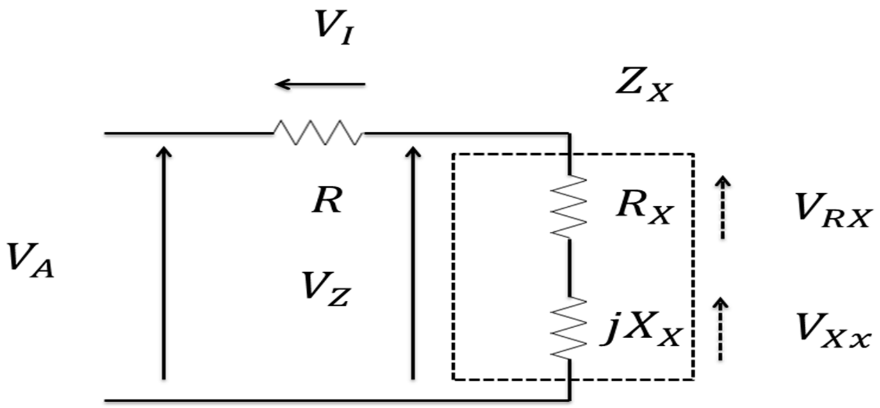
ทฤษฎีสามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับนี้สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้ โดยมีหลักการทำงานคล้ายเครื่องวัด LCR ดังภาพที่ 8 ต้องทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทั้งสามที่ตกคร่อมประกอบไปด้วย

-ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรซึ่งเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทราบค่าและตัวต้านทานไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่าแทนด้วย V_A

-ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้าที่ทราบค่าแทนด้วย V_I

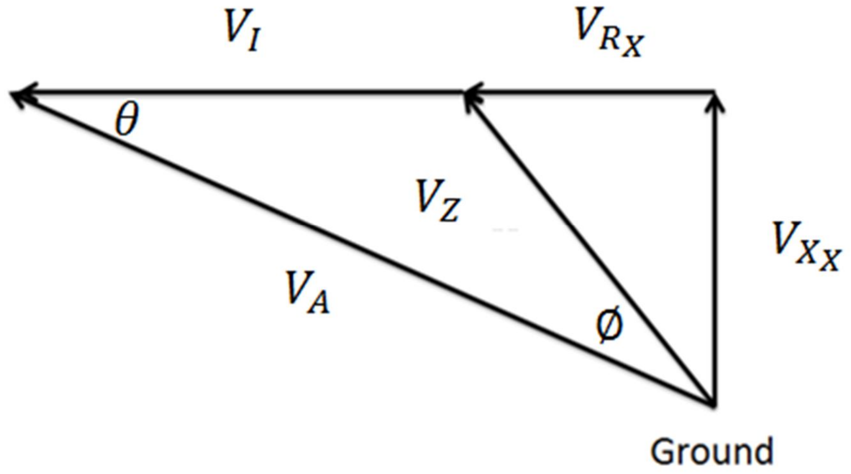
-ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวอุปกรณ์ไม่ทราบค่าในที่นี่เป็นชุดหัววัด แทนด้วย V_Z

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 วงจรพื้นฐานสำหรับวัดผลต่างเฟส

ในการทดลองจะทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดหัววัดซึ่งประกอบไปด้วยค่าความต้านทานไฟฟ้า และค่าอินดักแตนซ์ ดังนั้นในการที่จะทราบค่าอิมพีแดนซ์ได้นั้นจำเป็นที่จะต้องรู้ค่ามุมเฟสของสัญญาณ Ø และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของ V_A และ V_Z ก่อนซึ่งการคำนวณอาศัยไดอะแกรม ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 9 เวคเตอร์ไดอะแกรมที่เกิดจากวงจรตรวจวัดผลต่างเฟส

มุมเฟสของสัญญาณเป็นตัวแปรที่สำคัญในการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนที่ได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง V_A กับ V_Z ที่จะทำให้สามารถประเมินขนาดความลึกของรอยบกพร่องได้ ดังสมการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\emptyset = (2\pi t/T) \tag{17}$$

โดย t คือความต่างของเวลาในหน่วยวินาที และ T คือคาบของสัญญาณ

เมื่อทราบค่ามุมเฟสของสัญญาณจะสามารถหา V_I ได้ ดังสมการ

$$V_I = \sqrt{({V_A}^2 + {V_Z}^2 - 2V_A V_Z cos(\emptyset))} \tag{18}$$

ดังนั้นเมื่อทราบค่า V_I จะทำการหาความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่าง V_I กับ V_Aดังสมการ

$$(V_I/V_A) = \sqrt{(1 + \left(\frac{V_Z}{V_A}\right)^2 - 2\left(\frac{V_Z}{V_A}\right) cos(\emptyset))} \tag{19}$$

โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามกฎโคไซน์สามารถคำนวณหาค่า R_X ได้ดังสมการ

$$cos(\theta) = \frac{(V_A)^2 + (V_I)^2 - (V_Z)^2}{2 \times (V_A V_I)} \tag{20}$$

ขนาดอิมพีแดนซ์รวมทั้งหมดภายในวงจร สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดัง

$$Z_a = R(\frac{V_A}{V_I}) \tag{21}$$

จึงทำให้สามารถหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของอิมพีแดนซ์ได้ดังสมการ

$$R_X = Z_a\, cos(\theta) - R \tag{22}$$

ค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่ทราบค่าสามารถคำนวณได้ดังสมการ

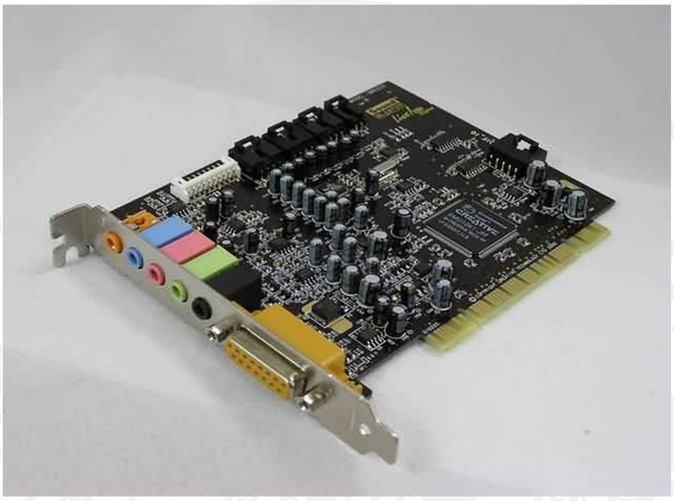
$$Z_X = R(\frac{V_Z}{V_I}) \tag{23}$$

เมื่อทราบค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าอิมพีแดนซ์ก็สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ได้ดังสมการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$X_X = \sqrt{(Z_X{}^2 - R_X{}^2)} \tag{24}$$

การทำงานของการ์ดเสียง



ภาพที่ 10 การ์ดเสียงที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์

ที่มา: www.vcharkarn.com (2011)

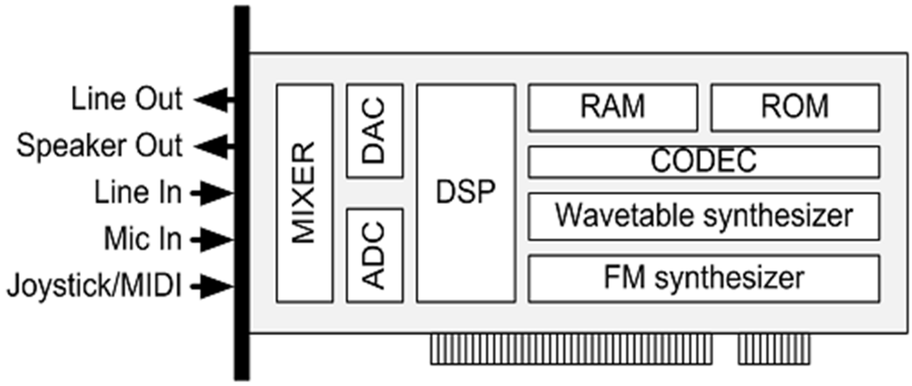
การ์ดเสียง (Sound Card) ดังภาพที่ 10 คืออุปกรณ์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผงวงจรอิเลคทรอนิก ใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ และจำเป็นต่อระบบคอมพิวเตอร์และมัลติมีเดีย แสดงผลออกมาเป็นเสียง โดยส่งเสียงออกมาทางลำโพง โดย Sound Card จะเป็นได้ทั้ง Input และ Output ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Input เมื่อนำสัญญาณเสียง ที่ได้จากภายนอกมาประมวลผล และทำหน้าที่เป็น Output เมื่อนำข้อมูลที่เก็บในรูปไฟล์ซึ่งมีหลาย Format ต่างๆ กันออกไปมาประมวลผล และส่งออกไปเป็นสัญญาณที่ Output ขึ้นกับ Software ที่ใช้ ซึ่งจะมีการแปลงข้อมูลจาก Digital (สัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องกัน เช่น 0, 1 ซึ่งอยู่ในรูปของไฟล์ข้อมูล) ไปเป็นสัญญาณ Analog (สัญญาณที่ต่อเนื่องกัน เช่น สัญญาณเสียง) ส่งสัญญาณผ่าน Out Port เพื่อให้เกิดเสียง ความชัดเจนของเสียงจะมีประสิทธิภาพดีเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ อัตราการสุ่มตัวอย่างและความแม่นยำของตัวอย่างที่ได้ ซึ่งความแม่นยำของตัวอย่างนั้นถูกกำหนดโดยความสามารถของ A/D Converter ว่ามีความละเอียดมากน้อยเพียงใด ทำอย่างไรจึงจะประมาณค่าสัญญาณดิจิตอลได้ใกล้เคียงกับสัญญาณเสียงมากที่สุด ความละเอียดของ A/D Converter นั้นถูกกำหนดโดยจำนวนบิตของสัญญาณดิจิตอลเอาต์พุต เช่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- A/D Converter 8 bit จะสามารถแสดงค่าที่ต่างกันได้ 256 ระดับ

- A/D Converter 16 bit จะสามารถแสดงค่าที่ต่างกันได้ 65,536 ระดับ

หากจำนวนระดับมากขึ้นจะทำให้ความละเอียดยิ่งสูงขึ้นและการผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงยิ่งน้อยลง นั่นคือ ประสิทธิภาพที่ของเสียงที่ได้รับดีขึ้นนั่นเองแต่จำนวนบิตต่อหนึ่งตัวอย่างจะมากขึ้นด้วย



ภาพที่ 11 โครงสร้างภายในการ์ดเสียงที่ใช้งานโดยทั่วไป

ที่มา: Teddy Surya Gunawan (2010)

จากภาพที่ 11 การ์ดเสียงประกอบด้วย ได้แก่

-คอนเน็คเตอร์ CD Audio เป็นส่วนที่อยู่ในเครื่องสำหรับรับสัญญาณเสียงแบบอะนาล็อกจาไดร์ฟซีดีรอมผ่านผ่าสายเชื่อมต่อที่มี 4 ช่อง สำหรับมาเสียบเข้ากับตัวคอนเน็คเตอร์สำหรับเสียบผิดด้านตัวการ์ดจะไม่เสียหาย แต่จะเป็นการสลับช่องสัญญาณที่ออกสู่ลำโพงซ้าย-ขวาเท่านั้น

-ชิปสังเคราะห์เสียงหรือ Synthesizer ในยุคแรกๆ จะเป็นแบบ FM ที่เรียกว่า Frequency Modulation เป็นการสังเคราะห์เสียงแบบผสมความถี่ ซึ่งไม่นิยมใช้กันแล้วในปัจจุบันนี้ เพราะไม่สามารถใช้เสียงที่เป็นธรรมชาติเหมือนเครื่องดนตรีจริงได้ WaveTable เป็นวิธีการสังเคราะห์เสียงที่นิยมใช้กันมากที่สุดในยุคปัจจุบันเนื่องจากสามารถให้เสียงได้ใกล้เคียงกับเครื่องดนตรีจริงมากที่สุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ซึ่งวิธีการคือ บันทึกเสียงเครื่องดนตรีจริงของเครื่องดนตรีแต่ละชนิดไว้เป็นช่วงสั้น ๆ เพื่อเก็บไว้เป็นต้น แบบไปหาจากเสียงต้นแบบในตารางเสียงที่มีความถี่เดียวกันมาการ์ดเสียงที่ใช้วิธีการนี้จึงให้เสียงเหมือนกับมีเครื่องดนตรีบรรเลงอยู่จริง ๆ

-ช่อง Line-in (สีน้ำเงิน) สำหรับรับสัญญาณเสียงจากอุปกรณ์กำเนิดเสียงอื่นๆ เช่น เครื่องเล่นวิทยุเทป เครื่องเล่นซีดี เข้ามาที่การ์ดเพื่อใช้สัญญาณเสียง หรือแสดงผลที่เครื่องของเรา

-ช่อง Line-out (สีชมพู) ช่องต่อนี้จะมีเฉพาะการ์ดเสียงแบบ 4 แชลแนลใช้สำหรับต่อญญาณเสียงไปยังลำโพงแบบ Surround ซ้าย-ขวา

-ช่อง Speaker (สีเขียว) สำหรับส่งสัญญาณเสียงจากการ์ดออกไปยังลำโพงปกติในแบบสเตอริโอ

-ช่องต่อ Microphone (สีแดง) สำหรับรับสัญญาณเสียงแบบอนาล็อกจากไมโครโฟนมาที่ตัวการ์ดเพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นข้อมูลดิจิตอลสำหรับการประมวลผลต่อไป

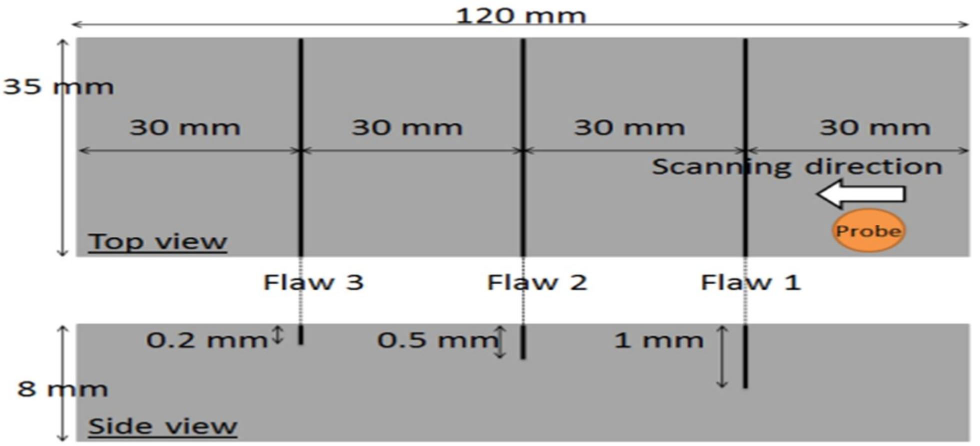
-MIDI/Game Port เป็นคอนเน็ตเตอร์ในรูปตัว "D" สำหรับต่อพ่วงกับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเล่นเกมเช่น จอยสติก คันโยก และพวงมาลัย ฯลฯ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

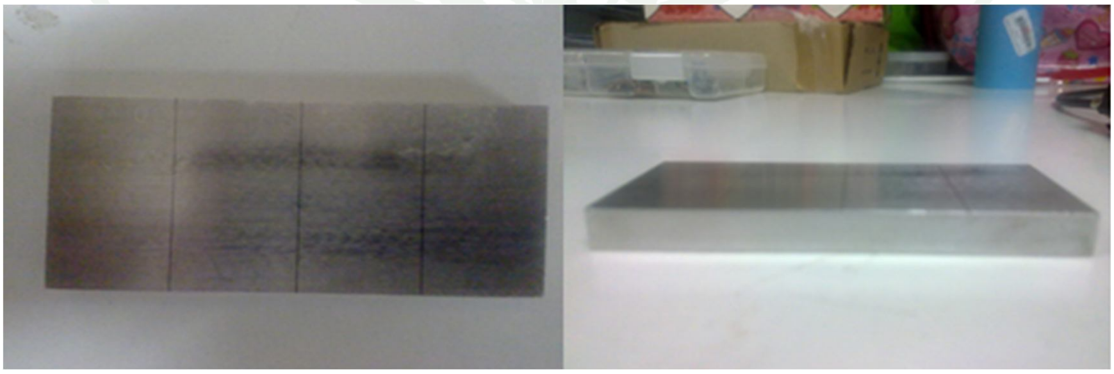
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. รอยบกพร่องอ้างอิงแผ่นอลูมิเนียม ประกอบด้วยรอยบกพร่องชนิดเซาะร่องตลอดแนวที่มีความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับ รอยบกพร่องอ้างอิงของแผ่นอลูมิเนียมนี้ (หมายเลข 2.165-551 รหัส 2941) มีความหนา 8 mm ประกอบด้วยรอยบกพร่องยาว 35 mm กว้าง 0.1 mm. ดังภาพที่ 12 และภาพที่ 13 มีความลึกจากผิวต่างกัน 3 ระดับคือ 1.0 mm, 0.5 mm และ 0.2 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 12 ลักษณะของแผ่นอลูมิเนียมเซาะร่องตลอดแนว



ภาพที่ 13 แผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยรอยบกพร่องอ้างอิงที่ใช้งาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ออสซิลโลสโคป รุ่น TDS 220 ผลิตโดยบริษัท Tektronix ดังภาพที่ 14

ภาพที่ 14 ออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 220

3. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น U3402A ผลิตโดยบริษัท Agilent Technologies ดังภาพที่ 15

ภาพที่ 15 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น U3402A

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. LCR มิเตอร์ รุ่น Z9218 ผลิตโดยบริษัท Protek ดังภาพที่ 16

ภาพที่ 16 LCR มิเตอร์ ยี่ห้อ Protek รุ่น Z9218

5. เครื่องกำเนิดสัญญาณ รุ่น 33120A ผลิตโดยบริษัท Agilent Technologies ดังภาพที่ 17

ภาพที่ 17 เครื่องกำเนิดสัญญาณ ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 33120A

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ตัวต้านทานมาตรฐาน 10 kΩ ยี่ห้อ TEGAM ดังภาพที่ 18

ภาพที่ 18 ตัวต้านทานมาตรฐาน 10 kΩ ยี่ห้อ TEGAM

7. ตัวเก็บประจุมาตรฐาน 1.0 μF ยี่ห้อ GENERAL RADIO COMPANY ดังภาพที่ 19

ภาพที่ 19 ตัวเก็บประจุมาตรฐาน 1.0 μF ยี่ห้อ GENERAL RADIO COMPANY

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. ตัวเหนี่ยวนำมาตรฐาน 10 mH ยี่ห้อ GENERAL RADIO COMPANY ดังภาพที่ 20

ภาพที่ 20 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 10 mH ยี่ห้อ GENERAL RADIO COMPANY

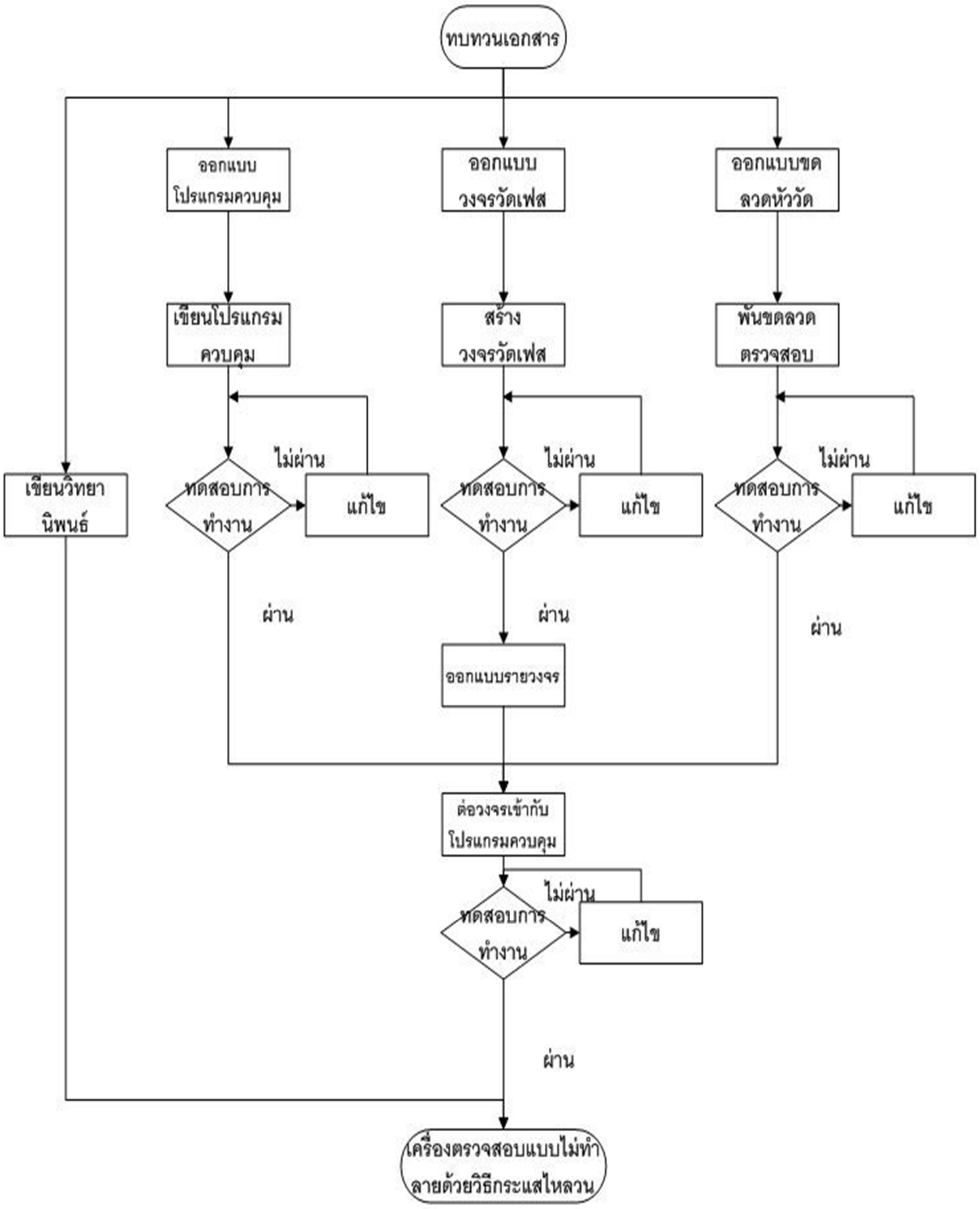
9. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก รุ่น S41ผลิตโดยบริษัท Benq ดังภาพที่ 21

ภาพที่ 21 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กที่ใช้ในการทดลอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

ในการวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์ได้มีการวางแผนการดำเนินงานตามแผนผังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. ออกแบบโปรแกรมควบคุมและแสดงผล

วิทยานิพนธ์จะใช้โปรแกรม LabVIEW เวอร์ชัน 2010 พัฒนาขึ้นโดยบริษัท National Instruments มาใช้ควบคุมการทำงานของการ์ดเสียงให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์เพื่อจ่ายให้แก่ชุดหัววัดและวัดสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากสัญญาณภายนอก ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ได้แก่ การ์ดเสียงที่มีช่องสัญญาณเอาต์พุตและอินพุตเป็นแบบสเตอริโอ (stereo) มีหัวต่อแบบอาซีเอ (RCA) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 mm โดยมีขั้นตอนการออกแบบและทดสอบโปรแกรมควบคุมและแสดงผล ดังนี้

1.1. ออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการ์ดเสียงให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz แล้ววัดสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณการ์ดเสียงด้านเอาต์พุตด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 220

1.2. ออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมการ์ดเสียงให้สามารถตรวจวัดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz โดยการจ่ายสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่ ยี่ห้อ Agilent รุ่น 33120A ซึ่งกำหนดแอมพลิจูดไว้ที่ 1 Vp-p เข้าที่ช่องสัญญาณการ์ดเสียงด้านอินพุต

2. สร้างชุดหัววัด

ในขั้นตอนนี้จะออกแบบและสร้างชุดหัววัดสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่องที่พื้นผิว โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ประกอบด้วย

2.1. ทำการออกแบบขดลวดหัววัดแบบแท่งเดี่ยว โดยพันเส้นลวดทองแดงเบอร์ 40 รอบแท่งแกนเฟอร์ไรท์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 mm ยาว 7.5 mm จากนั้นจึงนำไปใส่ในแท่งทรงกระบอกแล้วปิดทับด้วยเรซินเพื่อความสะดวกในการหยิบจับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2. วัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหัววัดที่ออกแบบไว้ ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz ด้วย LCR มิเตอร์ ยี่ห้อ Protek รุ่น Z9218 เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความจุที่ในช่วงความถี่เรโซแนนซ์ (resonant) ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \tag{25}$$

2.3. ทำการออกแบบและสร้างตัวเก็บประจุแบบปรับค่า โดยการนำค่าความจุมาต่อขนานกัน แล้วแบ่งเป็นช่วงความจุต่างๆ จากนั้นวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าที่สร้างขึ้นด้วย LCR มิเตอร์ ยี่ห้อ Protek รุ่น Z9218 เพื่อประกอบเป็นชุดหัววัด

2.4. นำขดลวดหัววัดกับตัวเก็บประจุแบบปรับค่าประกอบเป็นชุดหัววัด แล้วทำการจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz จนถึง 20 kHz ให้กับชุดหัววัด จากนั้นจึงวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เงื่อนไขต่างๆ เช่น ขณะชุดหัววัดในอากาศเทียบกับที่ผิวของชิ้นงาน และเมื่ออยู่บนผิวของชิ้นงานเทียบกับรอยบกพร่องต่างๆ ที่พื้นผิว ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น U3402A

3. ออกแบบวงจรวัดเฟส

ออกแบบวงจรตรวจวัดเฟสโดยใช้ทฤษฎีสามความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Three Voltage) ที่มีการทำงานคล้าย LCR มิเตอร์ จากนั้นจึงใช้การ์ดเสียงวัดความต่างศักย์ แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่ามุมเฟสด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1. ก่อนทำการออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดเฟส จะทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทานไฟฟ้า (R_f) ด้วยเครื่องวัด LCR เพื่อนำค่าจากตัวต้านทานที่ได้ไปกำหนดลงในโปรแกรม LabVIEW ที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.2. ทำการออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดเฟส หลังจากนั้นทดสอบสามารถในการตรวจวัดค่า LCR ผ่านโปรแกรม LabVIEW ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานไฟฟ้ามาตรฐาน 10 kΩ ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาตรฐาน 1.0 μF ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 10 mH

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจสอบด้วยกระแสไหลวน

หลังจากทดสอบการทำงานของส่วนต่างๆ เสร็จแล้ว จึงนำแต่ละส่วนมาประกอบเป็นเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยกระแสไหลวน จากนั้นจึงทำการทดสอบหาประสิทธิภาพในการตรวจวัดโดยมีขั้นตอนต่อไปนี้

4.1 ก่อนที่จะตรวจวัดหาความลึกของรอยบกพร่องนั้น ต้องทำการหาสมการเชิงเส้นที่ได้จากความสัมพันธ์ในการตรวจหารอยบกพร่องที่ระดับความลึกต่างๆ เทียบกับค่าของมุมเฟสที่เปลี่ยนไปในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz แล้วนำไปสร้างกราฟ นำสมการเชิงเส้นที่ได้ไปกำหนดค่าให้กับโปรแกรม LabVIEW

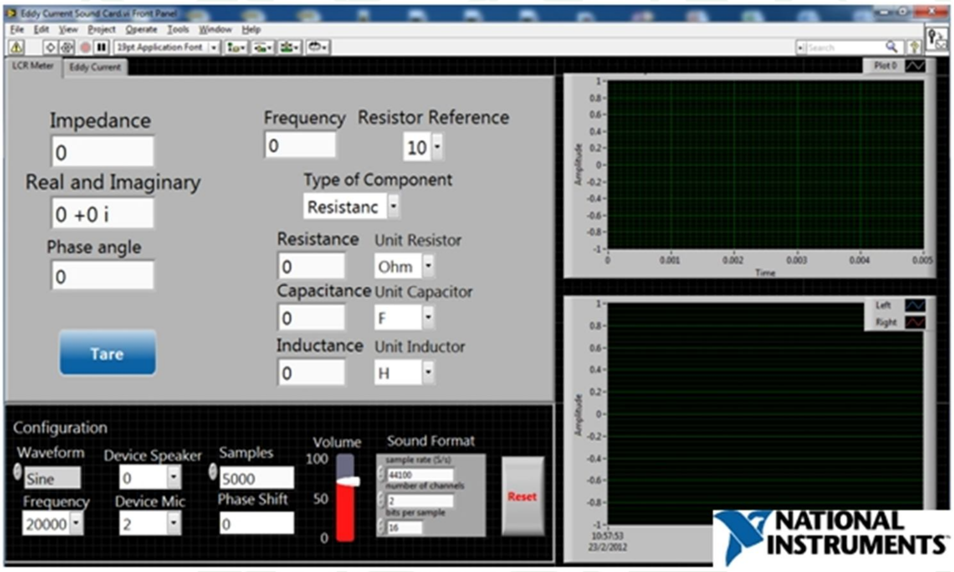
4.2 ทำการตรวจหาความลึกของรอยบกพร่องที่ระดับความลึกต่างๆ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz แล้วนำค่าที่ได้มารายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระดับความเชื่อที่ 95 เปอร์เซ็นต์ (%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

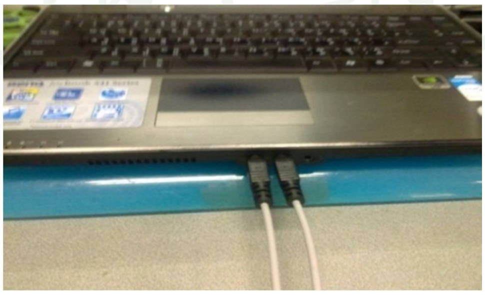
ผลและวิจารณ์

1. โปรแกรมควบคุมและแสดงผล

โปรแกรม LabVIEW ที่ได้ทำออกแบบและสร้างสำหรับควบคุมการ์ดเสียงดังภาพที่ 23 โดยก่อนการใช้งานควรเชื่อมต่ออุปกรณ์และตั้งค่าโปรแกรมกับเครื่องโน้ตบุกที่นำมาใช้งาน โดยเลือก Device Speaker อยู่ที่ 0 และ Devicemic อยู่ที่ 2 (แต่ละเครื่องไม่เหมือนกัน) แล้วเลือกความถี่ใช้งาน



ภาพที่ 23 โปรแกรม LabVIEW สำหรับกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์และรับค่าสัญญาณ



ภาพที่ 24 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของเครื่องวัดเข้ากับโน้ตบุกและออกจากโน้ตบุก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หลังจากเชื่อมต่ออุปกรณ์เครื่องมือวัดด้วยหัวแจ๊ค RCA ขนาด 3.5 mm ผ่านทางช่องสัญญาณการ์ดเสียงด้าน SPEAKER และ MICROPHONE ดังภาพที่ 24 จากนั้นทำการวัดค่าความถี่และแอมพลิจูดด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปจากช่องสัญญาณด้านเอาต์พุตโดยควบคุมการ์ดเสียงด้วยโปรแกรม LabVIEW ให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ผลที่ได้ตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ความถี่สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่กำเนิดจากการ์ดเสียงวัดที่ด้านเอาต์พุต

ความถี่	**ความถี่ (kHz)**					
(kHz)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	10.11	10.22	9.98	9.92	9.96	10.04
11	11.16	11.10	10.96	11.09	10.87	11.04
12	11.98	12.10	12.13	12.02	12.05	12.06
13	13.18	12.95	13.03	13.08	13.07	13.06
14	14.11	13.98	14.13	13.97	14.04	14.05
15	15.08	14.99	14.95	15.06	15.12	15.04
16	16.13	16.05	15.97	15.92	16.10	16.03
17	16.98	17.11	16.95	17.06	17.14	17.05
18	18.12	18.04	18.18	17.99	17.98	18.06
19	18.98	18.95	19.04	19.10	19.12	19.04
20	20.08	19.84	19.96	20.12	20.24	20.05

ตารางที่ 3 แอมพลิจูดที่วัดได้จากการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ผ่านการ์ดเสียงด้านเอาต์พุต

ความถี่	**ขนาดสัญญาณจากยอดถึงยอดที่วัดได้ (Vp-p)**					
(kHz)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	0.98	0.96	0.97	0.96	0.98	0.97
11	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ความถี่ (kHz)	ขนาดสัญญาณจากยอดถึงยอดที่วัดได้ (Vp-p)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
12	0.99	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98
13	0.97	0.99	0.98	0.97	0.97	0.98
14	0.97	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
15	0.98	0.99	0.97	0.98	0.98	0.98
16	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98
17	0.98	0.98	0.98	0.99	0.97	0.98
18	0.99	0.99	0.98	0.99	0.98	0.98
19	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99
20	0.99	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99

เมื่อวัดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่กำเนิดจากช่องสัญญาณเอาต์พุตแล้ว จึงทำการวัดสัญญาณจากแหล่งจ่ายภายนอกผ่านช่องสัญญาณการ์ดเสียงด้านอินพุตโดยแสดงผลเป็นตัวเลขที่หน้าจอโน้ตบุกด้วยโปรแกรม LabVIEW ได้ผลตามตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านทางการ์ดเสียงอินพุตด้านซ้ายเมื่อจ่ายสัญญาณจากภายนอก 1 Vp-p

ความถี่ (kHz)	ค่าความต่างศักย์ทางด้านซ้ายที่วัดได้ (Vp-p)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
10	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
11	0.98	0.97	0.97	0.97	0.94	0.97
12	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
13	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
14	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
15	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 (ต่อ)

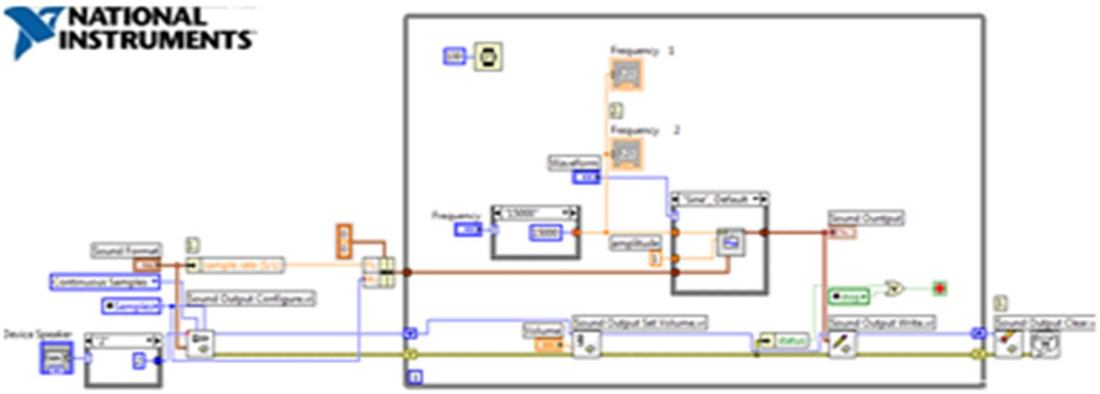
ความถี่	ค่าความต่างศักย์ทางด้านซ้ายที่วัดได้ (Vp-p)					
(kHz)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
16	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00
17	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
18	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.00
19	1.00	0.99	1.00	0.998	1.00	1.00
20	1.02	1.09	1.01	1.09	1.01	1.04

ตารางที่ 5 แอมพลิจูดที่วัดได้ผ่านทางการ์ดเสียงอินพุตด้านขวาเมื่อจ่ายสัญญาณจากภายนอก 1 Vp-p

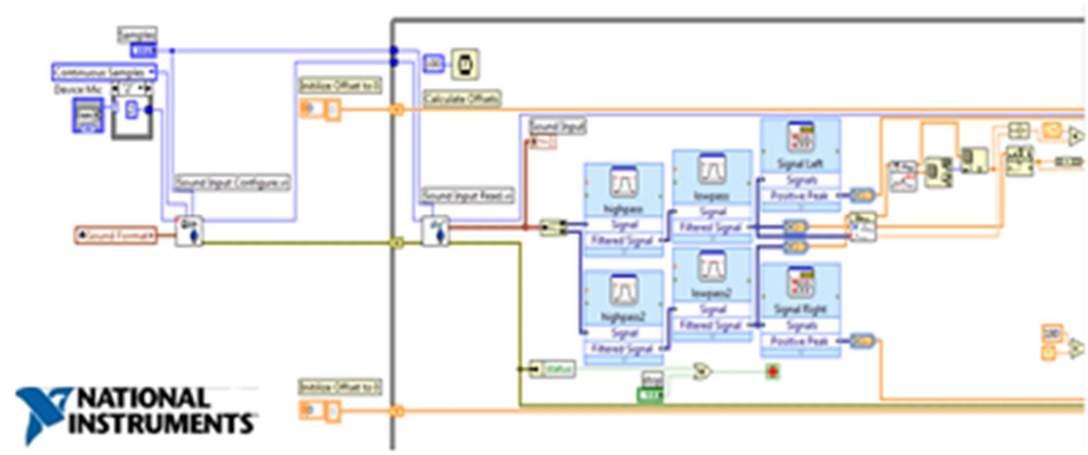
ความถี่	ค่าความต่างศักย์ทางด้านขวาที่วัดได้ (Vp-p)					
(kHz)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98
11	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
12	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.98
13	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
14	0.98	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
15	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
16	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00
17	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
18	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
19	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
20	1.02	1.09	1.01	1.09	1.01	1.04

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการทดสอบความสามารถของโปรแกรมควบคุมการ์ดเสียงด้วยโปรแกรม LabVIEW ผลที่ได้พบว่าโปรแกรม LabVIEW สามารถควบคุมการ์ดเสียงให้สามารถกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz ผ่านทางการ์ดเสียงด้านเอาต์พุตและสามารถตรวจวัดสัญญาณรูปคลื่นไซน์จากแหล่งจ่ายภายนอกผ่านทางการ์ดเสียงด้านอินพุตได้ ซึ่งค่าที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของการ์ดเสียงที่ใช้ โดยค่าต่างๆ จะถูกกำเนิดและประมวลผลเป็นตัวเลขผ่านทางบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรม LabVIEW ดังภาพที่ 25 และภาพที่ 26



ภาพที่ 25 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของโปรแกรมควบคุมการกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ออกจากการ์ดเสียงด้านเอาต์พุต



ภาพที่ 26 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของโปรแกรมควบคุมการรับค่าจากสัญญาณภายนอกผ่านทางการ์ดเสียงทางด้านอินพุต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การสร้างชุดหัววัด

ทำการสร้างขดลวดหัววัดสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่องเสร็จสมบูรณ์ ดังภาพที่ 27 แล้ววัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดหัววัดด้วย LCR มิเตอร์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz ได้ผลตามตารางที่ 6

ภาพที่ 27 ขดลวดหัววัดสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่อง

ตารางที่ 6 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดหัววัดที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)					
(kHz)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
10	2.3110	2.3110	2.3111	2.3111	2.3110	2.3110
11	2.3082	2.3082	2.3082	2.3083	2.3083	2.3082
12	2.3050	2.3050	2.3050	2.3051	2.3050	2.3050
13	2.3041	2.3040	2.3040	2.3041	2.3041	2.3041
14	2.3000	2.3001	2.3001	2.3000	2.3001	2.3000
15	2.2974	2.2975	2.2974	2.2975	2.2975	2.2975
16	2.2951	2.2952	2.2952	2.2951	2.2952	2.2952
17	2.2930	2.2931	2.2931	2.2930	2.2930	2.2930
18	2.2917	2.2917	2.2917	2.2916	2.2917	2.2917
19	2.2885	2.2884	2.2885	2.2884	2.2885	2.2885
20	2.2872	2.2873	2.2873	2.2872	2.2872	2.2872

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากผลการตรวจสอบขดลวดหัววัดดังตารางที่ 6 พบว่าค่าความเหนี่ยวนำของหัววัดจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่จ่ายให้แก่ขดลวดหัววัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์มีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

เมื่อได้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดหัววัดดังตารางที่ 6 แล้ว สามารถนำมาคำนวณหาค่าความจุที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ความจุที่จะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ต่างๆ

ความถี่เรโซแนนซ์ (kHz)	ค่าความเหนี่ยวนำของหัววัด (mH)	ค่าความจุที่ต้องการ (nF)
10	2.311	109.717
11	2.308	90.786
12	2.305	76.391
13	2.304	65.118
14	2.300	56.246
15	2.297	49.051
16	2.295	43.154
17	2.293	38.263
18	2.292	34.149
19	2.289	30.692
20	2.287	27.715

จากตารางที่ 6 พบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์จะมีค่าลดลงเมื่อความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์เพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่าความจุที่คำนวณได้ นำมาสร้างตัวเก็บประจุแบบปรับค่าเพื่อประกอบเป็นชุดหัววัดเพื่อเพิ่มความไวของชุดหัววัดในการตรวจหารอยบกพร่องได้ดียิ่งขึ้น ดังภาพที่ 28 โดยแบ่งเป็นพิสัยที่ 100 pF ถึง 900 pF, 1 nFถึง 9 nF และ 10 nF ถึง 100 nF ผลของค่าความจุที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 8 และ 9

ภาพที่ 28 ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าสำหรับทำงานร่วมกับขดลวดหัววัด

ตารางที่ 8 ความจุของตัวเก็บประจุที่ถูกวัดด้วย LCR มิเตอร์ในย่าน pF

ค่าตัวเก็บประจุ	**ค่าตัวเก็บประจุที่วัดได้ (pF)**					
(pF)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
100	82.400	83.000	82.400	83.000	82.400	82.640
200	192.20	192.80	192.60	192.60	192.50	192.54
300	282.60	282.40	282.30	282.20	282.10	282.32
400	392.10	392.20	392.20	392.30	392.30	392.22
500	480.90	480.90	480.90	481.00	481.00	480.94
600	581.10	581.20	581.20	581.20	581.20	581.18
700	673.70	673.60	673.60	673.70	673.70	673.66
800	781.80	781.80	781.80	781.80	781.90	781.82
900	856.20	856.10	856.30	856.20	856.10	856.18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ความจุของตัวเก็บประจุที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัด LCR ในย่าน nF

ค่าตัวเก็บประจุ	ค่าตัวเก็บประจุที่วัดได้ (nF)					
(nF)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
1	1.0034	1.0032	1.0033	1.0031	1.0032	1.0032
2	1.9926	1.9925	1.9924	1.9923	1.9925	1.9925
3	2.9160	2.9150	2.9160	2.9160	2.9170	2.9160
4	3.8920	3.8920	3.8930	3.8920	3.8920	3.8922
5	4.6710	4.6720	4.6710	4.6710	4.6720	4.6714
6	5.6688	5.6730	5.6730	5.6740	5.6740	5.6726
7	6.5860	6.5870	6.5870	6.5870	6.5840	6.5862
8	8.1220	8.1230	8.1250	8.1230	8.1220	8.1230
9	9.0040	9.0040	9.0030	9.0020	9.0040	9.0034
10	11.002	11.002	11.001	11.004	11.004	11.003
20	23.310	23.300	23.310	23.320	23.310	23.310
30	30.790	30.790	30.800	30.790	30.780	30.790
40	43.530	43.530	43.540	43.530	43.520	43.530
50	52.610	52.600	52.610	52.600	52.610	52.606
60	63.340	63.350	63.360	63.360	63.360	63.354
70	73.520	73.530	73.540	73.530	73.530	73.530
80	79.940	79.940	79.940	79.950	79.930	79.940
90	88.260	88.270	88.270	88.260	88.270	88.266
100	104.14	104.15	104.15	104.14	104.15	104.15

จากการทดสอบตัวเก็บประจุแบบปรับค่าสำหรับประกอบเป็นชุดหัววัดเพื่อเพิ่มความไวในการตรวจหารอยบกพร่องจากตารางที่ 5 พบว่าค่าที่ได้คลาดเคลื่อนจากค่าจริง เกิดจากชนิดของตัวเก็บประจุที่ใช้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำตัวเก็บประจุแบบปรับค่ามาประกอบกับขดลวดหัววัดเป็นชุดหัววัดแล้ว จากนั้นจ่ายสัญญาณรูปคลื่นไซน์ให้กับชุดหัววัดที่ความถี่ต่างๆ เพื่อหาความสามารถในการแยกแยะรอยบกพร่องอ้างอิงของแผ่นอลูมิเนียม แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านช่องสัญญาณอินพุตทางด้านขวาและทางด้านซ้าย โดยวัดสัญญาณที่เงื่อนไขต่างๆ กัน เช่น วัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดอยู่ในอากาศเทียบกับเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียม และวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องของแผ่นอลูมิเนียมที่ระดับความลึกต่างๆ ได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดอยู่ในอากาศเทียบกับเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียม

ความถี่	**ความต่างศักย์ทางขวา (mV)**		**ความต่างศักย์ทางซ้าย (mV)**	
(kHz)	**ปล่อยลอยอากาศ**	**พื้นผิวเรียบ**	**ปล่อยลอยอากาศ**	**พื้นผิวเรียบ**
10	84.502	97.359	65.221	80.397
11	67.412	81.281	43.878	61.672
12	69.992	80.510	44.970	58.131
13	73.522	84.434	49.347	63.005
14	80.467	95.524	58.785	77.325
15	65.746	72.512	41.743	49.110
16	69.048	74.934	45.031	51.002
17	67.131	86.224	67.131	86.224
18	63.915	83.811	63.915	83.811
19	54.060	70.173	33.993	54.354
20	55.669	46.775	46.942	33.283

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องลึก 1.0 mm

ความถี่ (kHz)	**ความต่างศักย์ทางขวา (mV)**		**ความต่างศักย์ทางซ้าย (mV)**	
	พื้นผิวเรียบ	**รอยบกพร่อง**	**พื้นผิวเรียบ**	**รอยบกพร่อง**
10	97.058	96.302	79.427	78.391
11	81.718	80.652	61.158	60.237
12	80.214	79.595	57.136	56.194
13	84.165	83.397	61.892	60.768
14	95.275	95.193	75.844	74.657
15	72.577	71.892	48.779	47.546
16	75.034	74.071	50.759	49.733
17	85.596	84.082	64.927	63.656
18	84.498	82.653	66.334	65.741
19	70.817	70.177	54.017	53.567
20	46.604	46.815	33.120	33.495

ตารางที่ 12 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องลึก 0.5 mm

ความถี่ (kHz)	**ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางขวา (V)**		**ความต่างศักย์ทางซ้าย (V)**	
	พื้นผิวเรียบ	**รอยบกพร่อง**	**พื้นผิวเรียบ**	**รอยบกพร่อง**
10	96.734	96.386	79.151	78.713
11	81.662	81.370	62.161	61.781
12	80.026	79.619	57.167	56.792
13	83.996	83.570	61.933	61.670
14	94.965	94.349	75.817	75.390
15	72.501	72.042	49.145	48.723

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 12 (ต่อ)

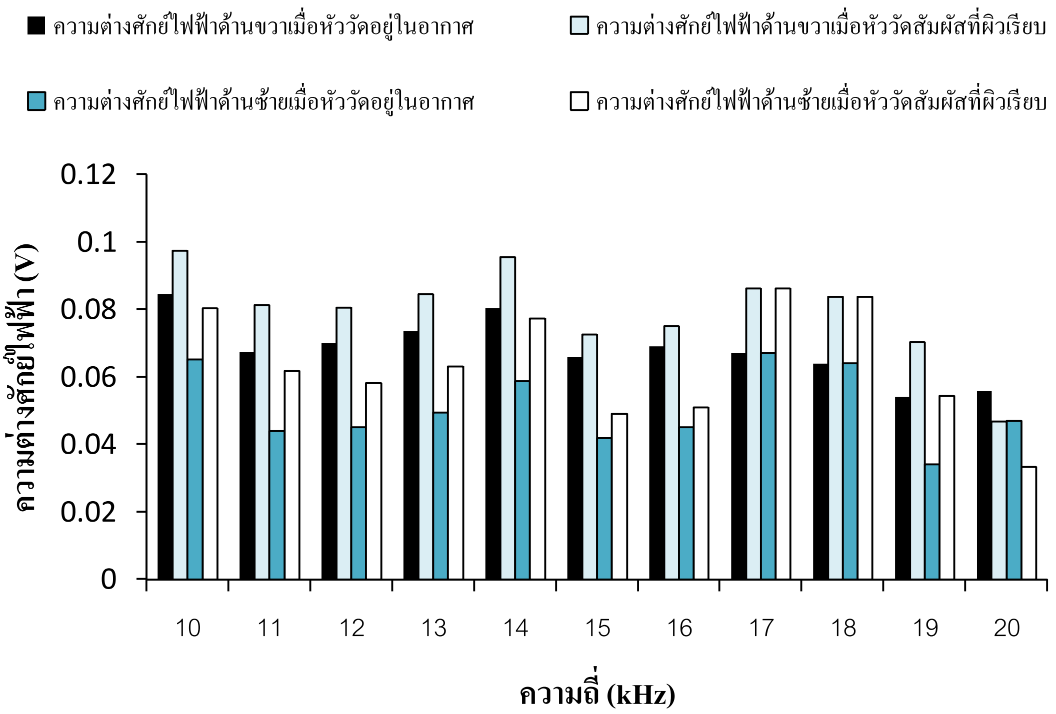
ความถี่ (kHz)	ความต่างศักย์ไฟฟ้าทางขวา (V)		ความต่างศักย์ทางซ้าย (V)	
	พื้นผิวเรียบ	รอยบกพร่อง	พื้นผิวเรียบ	รอยบกพร่อง
16	75.002	74.572	51.025	50.650
17	86.011	85.649	65.889	65.189
18	84.924	84.389	67.218	66.399
19	70.996	70.348	55.720	55.167
20	46.416	46.449	32.954	33.031

ตารางที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องลึก 0.2 mm

ความถี่ (kHz)	ความต่างศักย์ทางขวา (V)		ความต่างศักย์ทางซ้าย (V)	
	พื้นผิวเรียบ	รอยบกพร่อง	พื้นผิวเรียบ	รอยบกพร่อง
10	96.447	96.288	78.396	78.309
11	81.198	81.083	61.207	61.082
12	79.417	79.284	55.051	54.910
13	83.108	82.970	61.609	61.460
14	94.462	94.330	75.043	74.902
15	72.522	72.37	49.459	49.360
16	74.925	74.769	50.370	50.203
17	86.087	85.845	65.248	65.044
18	84.995	84.801	67.687	67.449
19	70.227	70.074	55.543	55.296
20	46.741	46.747	32.860	32.928

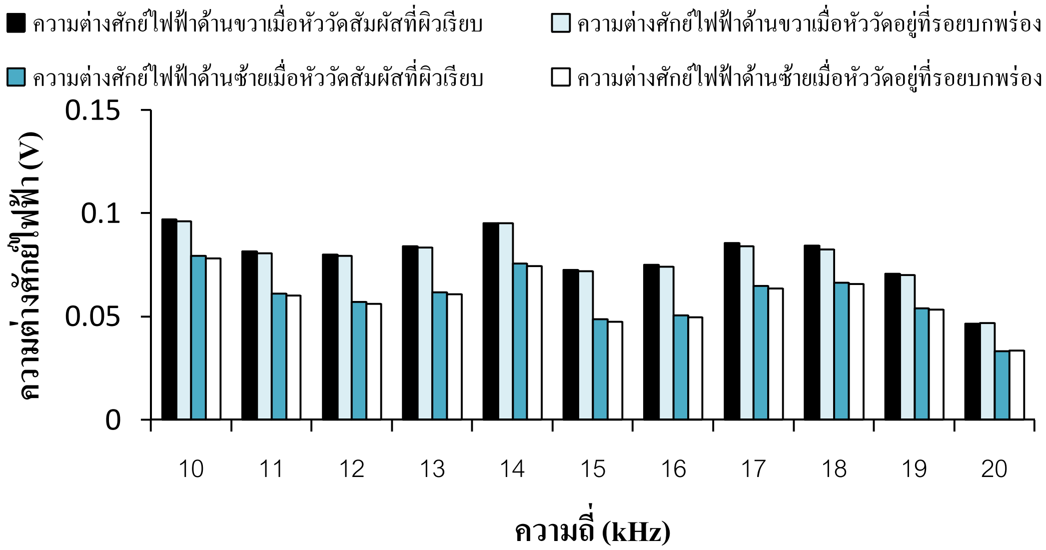
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเมื่อชุดหัววัดอยู่ในอากาศเทียบกับเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมได้ผลดังภาพที่ 29 และกราฟความสัมพันธ์เมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องของแผ่นอลูมิเนียมที่ระดับความลึกต่างๆ ดังภาพที่ 30, 31 และ 32

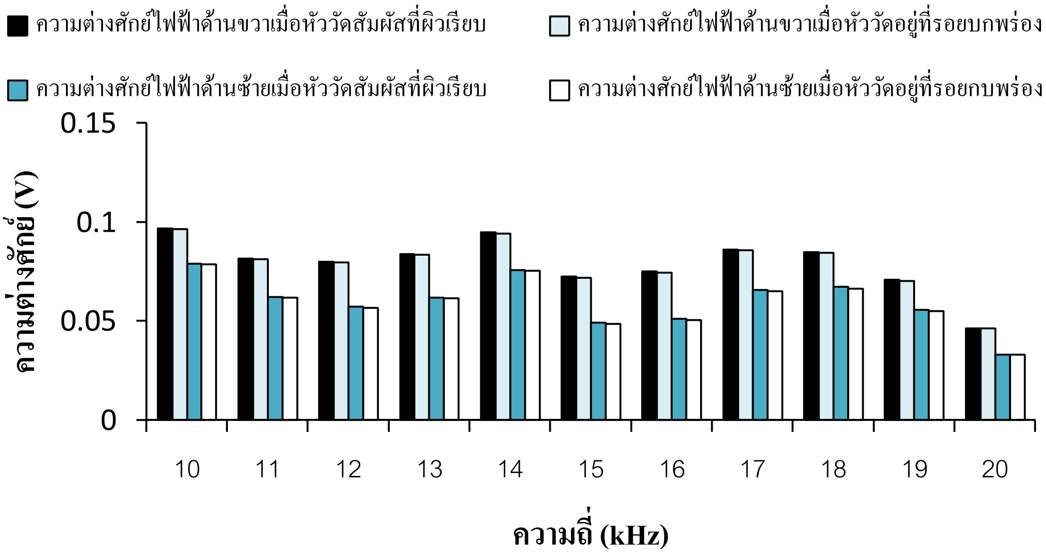


ภาพที่ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

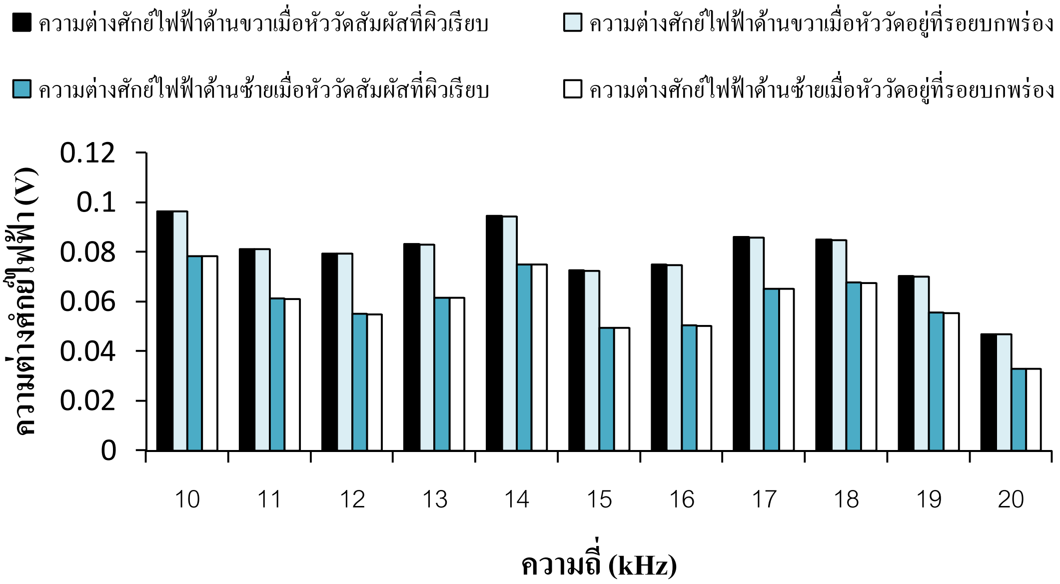


ภาพที่ 30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่ที่ใช้งานของรอยบกพร่องที่ระดับความลึก 1.0 mm



ภาพที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่ที่ใช้งานของรอยบกพร่องที่ระดับความลึก 0.5 mm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความถี่ที่ใช้งานของรอยบกพร่องที่ระดับความลึก 0.2 mm

จากการออกแบบและสร้างชุดหัววัดเพื่อตรวจสอบรอยบกพร่องที่ความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมที่มีรอยบกพร่องอ้างอิงที่มีขนาดความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับ ผลที่ได้พบว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดอยู่ในอากาศเทียบกับเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียม จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าด้านเอาต์พุตเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของวัสดุเป็นผลทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูง ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่มากขึ้น ดังภาพที่ 29 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อชุดหัววัดสัมผัสบนพื้นผิวเรียบของแผ่นอลูมิเนียมเทียบกับเมื่อชุดหัววัดอยู่ที่ตำแหน่งรอยบกพร่องของแผ่นอลูมิเนียมที่ระดับความลึกต่างๆ โดยเมื่อเลื่อนชุดหัววัดตรงตำแหน่งที่เป็นรอยบกพร่อง พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกันตามระดับความลึกของรอยบกพร่องที่พื้นผิวได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะรอยบกพร่องที่มีความลึกที่ 1.0 mm ดังภาพที่ 30 และเมื่อระดับความลึกของรอยบกพร่องลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 31 และ 32 เนื่องจากรอยบกพร่องที่มีขนาดเล็กกว่าศูนย์กลางของชุดหัววัด ก็จะทำให้ความไวลดลงจึงต้องอาศัยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การออกแบบและสร้างวงจรวัดเฟส

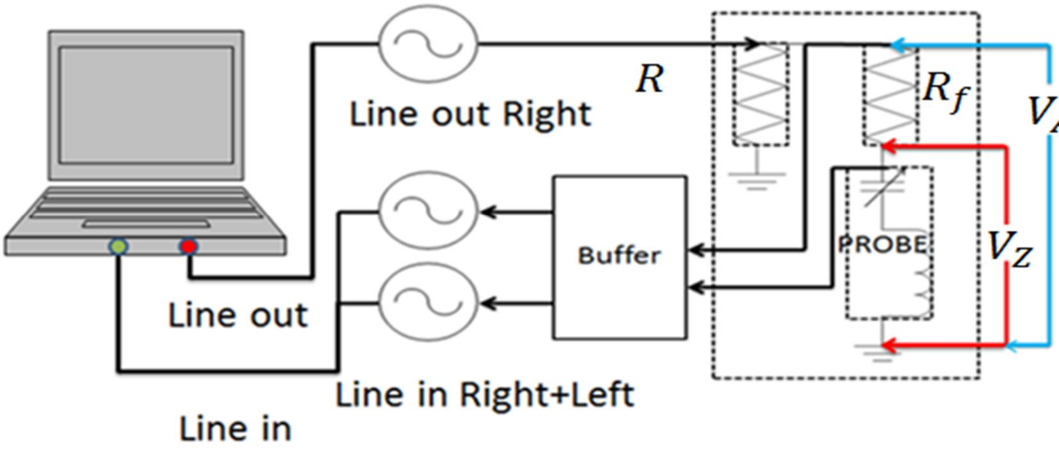
วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวต้านทาน (R_f) ด้วย LCR มิเตอร์ แล้วนำค่าที่ได้ไปกำหนดค่าในโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบไว้ ได้ผลดังตารางที่ 14 ก่อนนำเอาไปสร้างเป็นวงจรตรวจวัดเฟส เพื่อใช้เป็นแหล่งสัญญาณอ้างอิงสำหรับทฤษฎีสามความต่างศักย์กระแสสลับ ซึ่งอาศัยหลักการเปรียบเทียบสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่าง สัญญาณทั้งหมดภายในวงจร (VA) และสัญญาณที่ได้จากขดลวดหัววัด (VZ) ดังภาพที่ 33 โดยอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ได้แก่

- ตัวต้านทานไฟฟ้า R_f ขนาด 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ และ 100 kΩ ที่มีความคลาดเคลื่อน ±1 เปอร์เซ็นต์

-ออปแอมป์ NE5532AP สำหรับใช้เป็นวงจรบัฟเฟอร์เพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นต่อการ์ดเสียง

-ออปแอมป์ 7660 สำหรับแปลงค่าความต่างศักย์ด้านบวกเป็นค่าความต่างศักย์ด้านลบ

-แหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรได้จากช่อง USB ของโน้ตบุก



ภาพที่ 33 แผนภาพวงจรตรวจวัดเฟสและการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์โน้ตบุก

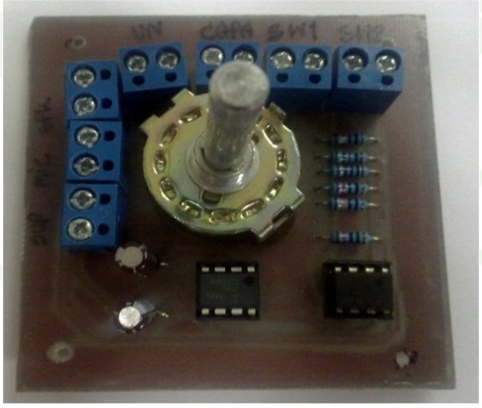
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 14 ความต้านทานที่วัดได้จากตัวต้านทานอ้างอิงสัญญาณ

ค่าความต้านทาน	**ค่าความต้านทานที่วัดได้ (Ω)**					
(Ω)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	10.174	10.174	10.175	10.173	10.173	10.174
100	99.704	99.703	99.702	99.703	99.702	99.703
1000	996.81	996.82	996.81	996.83	996.81	996.82
10000	9881.0	9881.1	9881.1	9881.1	9881.1	9881.1
1000000	98140	98124	98103	98090	98044	98100

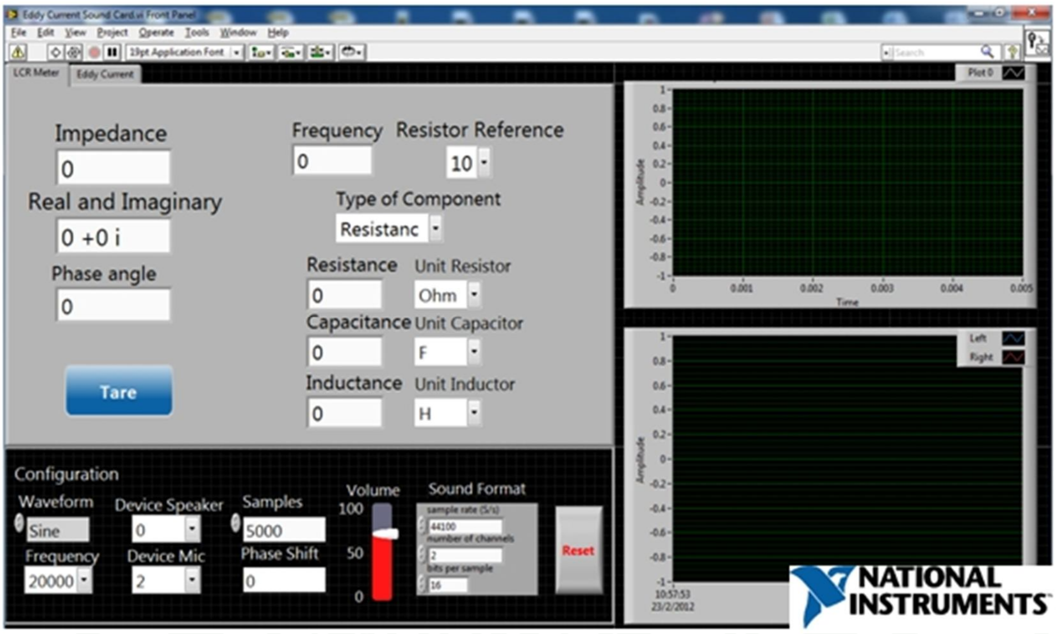
จากตารางที่ 14 พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการวัด มีค่าความผิดพลาดเนื่องจากตัวอุปกรณ์ เกิดจากชนิดของตัวต้านทานที่ใช้ ทำให้ค่าได้ของสัญญาณนั้นผิดพลาดได้

หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดเฟสซึ่งอาศัยหลักการทฤษฎีสามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์ ดังภาพที่ 34 เพื่อนำไปใช้วัดมุมเฟสและวัดค่า LCR ซึ่งทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ที่ได้ออกแบบและสร้างไว้ ดังภาพที่ 35



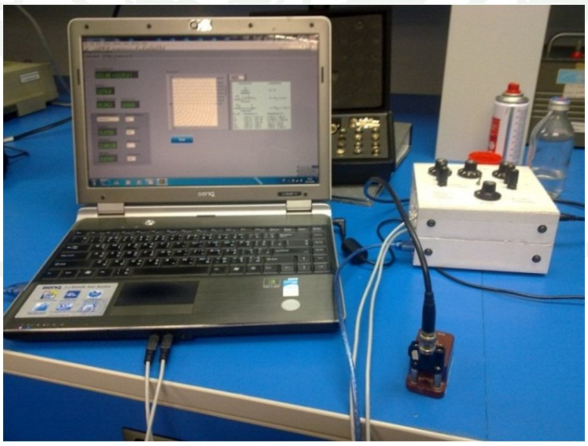
ภาพที่ 34 บอร์ดวงจรสำเร็จสำหรับตรวจวัดเฟสของสัญญาณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัดค่าของ LCR

ก่อนทำการทดสอบควรกำหนดตัวแปรต่างๆ แล้วเลือกฟังก์ชันสำหรับวัดค่า LCR จากนั้นทำการกำหนดค่าสิ่งที่ต้องการจะวัด ซึ่งจะต้องกดปุ่ม Tare เพื่อตั้งค่าเริ่มต้น แล้วทำการวัดค่า LCR ของตัวมาตรฐานแต่ละชนิดที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลดังตาราง

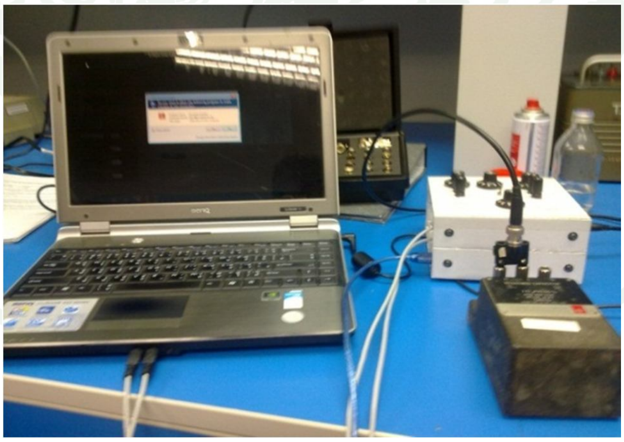


ภาพที่ 36 การเชื่อมต่อสำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ามาตรฐาน 10 kΩ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 ความต้านทานที่วัดได้จากตัวต้านทานไฟฟ้ามาตรฐาน 10 kΩ

ความถี่ (kHz)	**ค่าความต้านทานที่วัดได้ (kΩ)**					
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	9.973	9.973	9.973	9.973	9.973	9.9730
11	9.981	9.981	9.981	9.981	9.981	9.9809
12	9.985	9.985	9.985	9.985	9.985	9.9846
13	9.984	9.984	9.984	9.984	9.984	9.9841
14	9.984	9.984	9.984	9.984	9.984	9.9842
15	9.984	9.984	9.984	9.984	9.984	9.9841
16	9.984	9.984	9.984	9.984	9.984	9.9838
17	9.983	9.983	9.983	9.983	9.983	9.9828
18	9.979	9.979	9.978	9.978	9.979	9.9786
19	9.964	9.964	9.965	9.964	9.967	9.9648
20	9.939	9.942	9.940	9.943	9.943	9.9415

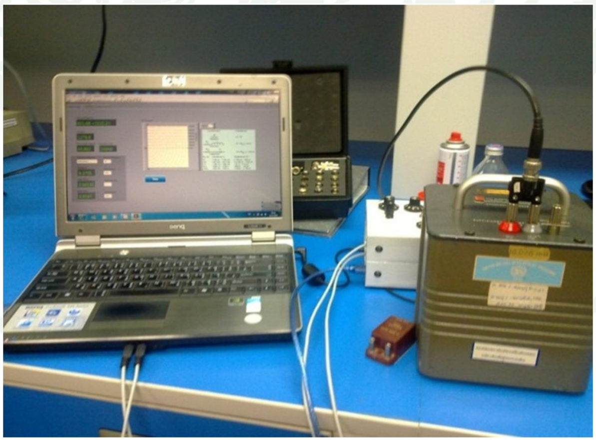


ภาพที่ 37 การเชื่อมต่อสำหรับวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 1.0 μF

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 16 ความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาตรฐาน 1.0 μF

ความถี่ (kHz)	**ค่าตัวเก็บประจุที่วัดได้ (μF)**					
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	0.989	0.980	0.981	0.984	0.989	0.985
11	1.008	1.010	1.008	1.008	1.007	1.008
12	0.976	0.977	0.976	0.976	0.978	0.977
13	0.977	0.970	0.969	0.977	0.972	0.973
14	1.044	1.046	1.041	1.039	1.047	1.043
15	1.016	1.022	1.019	1.020	1.022	1.020
16	1.020	1.025	1.022	1.028	1.027	1.024
17	1.026	1.029	1.027	1.029	1.027	1.027
18	1.047	1.049	1.051	1.047	1.047	1.048
19	0.974	0.974	0.974	0.975	0.973	0.974
20	0.949	0.949	0.951	0.952	0.948	0.950



ภาพที่ 38 การเชื่อมต่อสำหรับวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐาน 10 mH

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 ความเหนี่ยวนำที่วัดได้จากตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐานทาง 10 mH

ความถี่ (kHz)	**ค่าตัวเหนี่ยวนำที่วัดได้ (mH)**					
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	11.281	11.240	11.260	11.262	11.281	11.265
11	11.327	11.312	11.319	11.382	11.309	11.329
14	11.521	11.529	11.526	11.531	11.534	11.528
15	11.542	11.552	11.593	11.573	11.584	11.569
12	11.346	11.384	11.392	11.402	11.382	11.381
13	11.455	11.473	11.473	11.483	11.453	11.467
16	11.583	11.573	11.592	11.582	11.573	11.581
17	11.583	11.594	11.602	11.582	11.603	11.593
18	11.582	11.591	11.592	11.594	11.581	11.588
19	11.601	11.621	11.611	11.621	11.631	11.617
20	11.480	11.500	11.480	11.500	11.490	11.490

จากการสร้างวงจรวัดเฟสโดยอาศัยหลักการสามความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับตรวจวัดมุมเฟส โดยมีการแสดงผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กร่วมกับโปรแกรม LabVIEW พบว่ามีลักษณะการทำงานคล้ายกับ LCR มิเตอร์ เนื่องจากอาศัยหลักการเปรียบเทียบสัญญาณของสองสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ตกคร่อมทั้งวงจรกับสัญญาณที่ตกคร่อมชุดหัววัด เพื่อหาผลต่างมุมเฟส จากนั้นนำผลต่างมุมเฟสที่ได้มาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยค่าของอิมพีแดนซ์ประกอบด้วยค่าจากตัวต้านทาน ค่าความจุหรือค่าความเหนี่ยวนำทำให้สามารถบอกค่าของ LCR ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยกระแสไหล

หลังจากได้ออกแบบและสร้างชุดหัววัด วงจรตรวจวัดมุมเฟส และโปรแกรมสำหรับควบคุมระบบเครื่องวัดผ่านการแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์โน้กบุ๊ก จึงนำมาประกอบเป็นเครื่องมือวัด

ภาพที่ 39 การวัดมุมเฟสที่เชื่อมต่อเครื่องวัดเข้ากับเครื่องโน้ตบุกผ่านโปรแกรม LabVIEW

หลังจากประกอบรวมเป็นเครื่องมือวัดแล้ว ก่อนทำการทดลอง ควรกำหนดตัวแปรต่างๆ แล้วเลือกฟังก์ชันสำหรับตรวจวัดรอยบกพร่องด้วยวิธีกระแสไหลวน ดังภาพที่ 40 ก่อนการวัดจะต้องทำการตั้งค่าเริ่มต้น (initial) ที่พื้นผิวเรียบ ดังภาพที่ 39 จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นระหว่างมุมเฟสกับรอยบกพร่องอ้างอิงในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz ผลดังตารางที่18, 19 และ 20 เพื่อนำสมการที่ได้ไปกำหนดค่าลงในโปรแกรม LabVIEW ที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลตามตารางที่ 21

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 40 โปรแกรมสำหรับตรวจสอบรอยบกพร่องด้วยกระแสไหลวน

ตารางที่ 18 มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 1.0 mm

ความถี่	**มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 1.0 mm (Degree)**					
(kHz)	**ครั้งที่ 1**	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08
11	0.36	0.36	0.35	0.36	0.37	0.36
12	0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
13	0.38	0.42	0.40	0.40	0.40	0.40
14	0.43	0.41	0.40	0.41	0.42	0.41
15	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
16	0.87	0.87	0.88	0.91	0.85	0.88
17	0.92	0.91	0.91	0.92	0.90	0.91
18	0.92	0.90	0.87	0.90	0.91	0.90
19	0.92	0.95	0.99	0.95	0.93	0.95
20	1.01	0.98	1.02	1.07	1.12	1.04

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.5 mm

ความถี่ (kHz)	**มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.5 mm (Degree)**					
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
11	0.17	0.17	0.18	0.18	0.17	0.17
12	0.20	0.20	0.19	0.19	0.17	0.19
13	0.19	0.22	0.20	0.20	0.20	0.20
14	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.20
15	0.23	0.22	0.21	0.22	0.22	0.22
16	0.43	0.39	0.46	0.44	0.41	0.43
17	0.47	0.45	0.45	0.44	0.44	0.45
18	0.42	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44
19	0.46	0.45	0.47	0.46	0.43	0.46
20	0.50	0.55	0.51	0.56	0.55	0.53

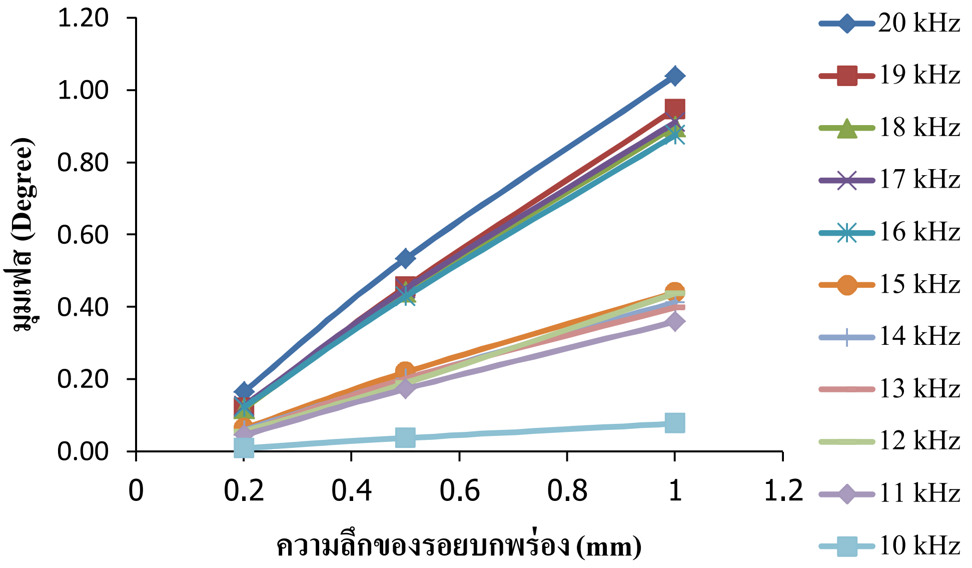
ตารางที่ 20 มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.2 mm

ความถี่ (kHz)	**มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.2 mm (Degree)**					
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	**ครั้งที่ 4**	**ครั้งที่ 5**	**เฉลี่ย**
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
12	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06
13	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05
14	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06
15	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06
16	0.11	0.11	0.15	0.12	0.12	0.12
17	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 (ต่อ)

ความถี่ (kHz)	มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องลึก 0.2 mm (Degree)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
18	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
19	0.15	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12
20	0.16	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17



ภาพที่ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสที่ความถี่ต่างๆ เทียบกับรอยบกพร่องอ้างอิงระดับความลึกต่างๆ

จากการทดลองตรวจวัดมุมเฟสในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz เทียบกับรอยบกพร่องที่ระดับความลึกต่างๆ เพื่อหาสมการเชิงเส้น ดังภาพที่ 41 พบว่า ที่ค่าความถี่ที่ใช้ในการตรวจวัดรอยบกพร่องมีค่าน้อย ทำให้ค่าของผลต่างมุมเฟสระหว่างส่วนที่ไม่เกิดรอยบกพร่องกับบริเวณรอยบกพร่องจะมีค่าความแตกต่างกันน้อยมากหรือแถบจะไม่สามารถตรวจแยกส่วนที่ไม่เกิดรอยบกพร่องกับบริเวณรอยบกพร่องได้เลย แต่หากเพิ่มความถี่ขึ้นทำให้สามารถตรวจจับรอยบกพร่องของวัตถุได้ง่ายขึ้น เนื่องจากค่าความแตกต่างระหว่างส่วนที่ไม่เกิดรอยบกพร่องกับบริเวณรอยบกพร่องมีความแตกต่างของค่าความต่างศักย์อย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากผลของ skin effect

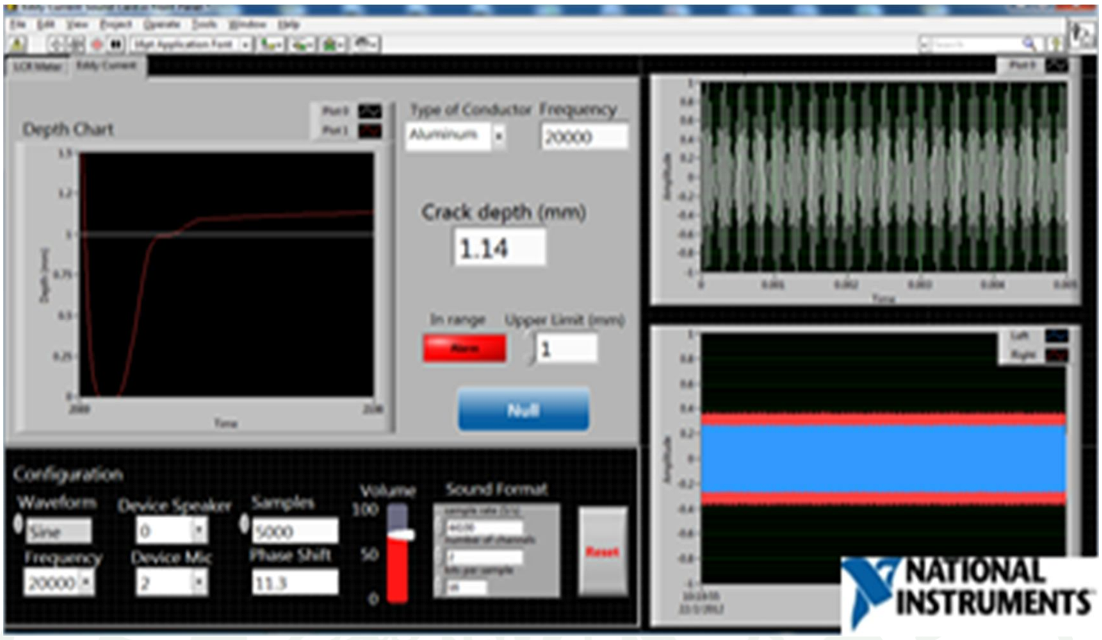
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 21 มุมเฟสที่วัดได้จากรอยบกพร่องที่ระดับแตกต่างกันเพื่อนำมาหาสมการเชิงเส้น

ความถี่ (kHz)	ผลต่างมุมเฟส (Degree)			สมการเชิงเส้น
	ที่ 0.2 mm	**ที่ 0.5 mm**	**ที่ 1.0 mm**	
10	0.01	0.04	0.1	y=0.084x-0.005
11	0.05	0.2	0.4	y=0.390x-0.027
12	0.1	0.2	0.4	y=0.479x-0.043
13	0.1	0.2	0.4	y=0.428x-0.024
14	0.1	0.2	0.4	y=0.440x-0.024
15	0.1	0.2	0.4	y=0.466x-0.023
16	0.1	0.4	0.9	y=0.936x-0.054
17	0.1	0.5	0.9	y=0.975x-0.056
18	0.1	0.4	0.9	y=0.97x-0.062
19	0.1	0.5	0.9	y=1.028x-0.074
20	0.2	0.5	1.0	y=1.083x-0.034

เมื่อทราบคุณสมบัติของระบบที่สร้างขึ้นแล้ว จากสมการความสัมพันธ์จึงได้กำหนดลงโปรแกรม LabVIEW เพื่อคำนวณหาความลึกของรอยบกพร่องที่ 1.0 mm, 0.5 mm และ 0.2 mm โดยทำการทดสอบตรวจหารอยบกพร่องในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 kHz ถึง 20 kHz โดยโปรแกรมแสดงผลการทดสอบที่ระดับความลึกต่างดังภาพที่ 42, 43 และ 44 บันทึกค่าที่ได้จากการวัด 30 ครั้ง ได้ผลดังตารางที่ 22 ซึ่งจะแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย

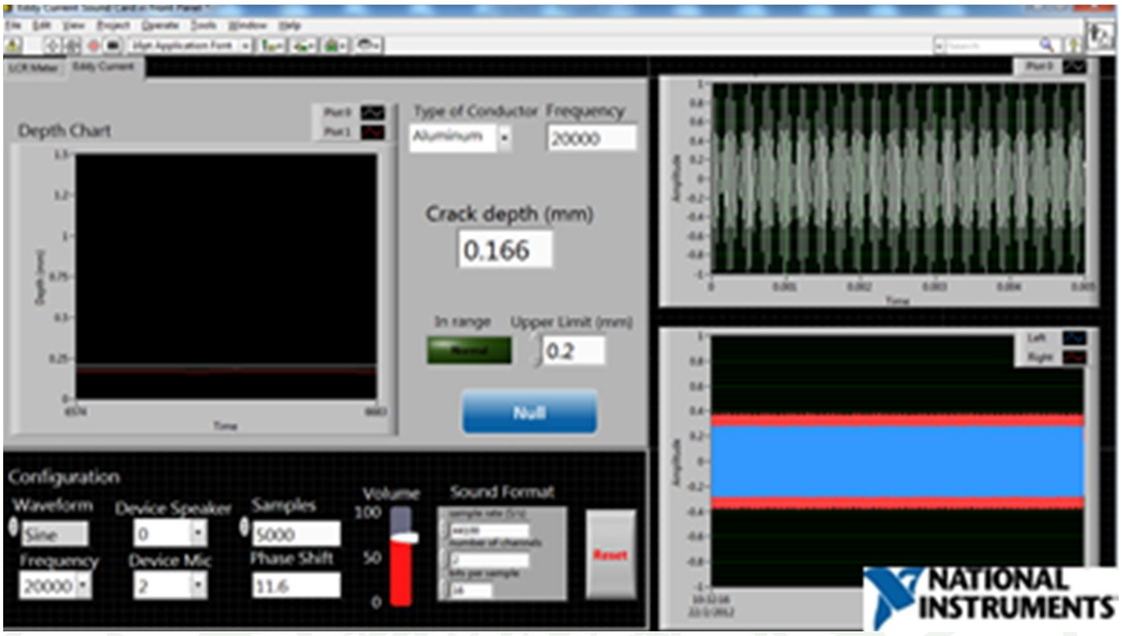
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 42 ตรวจวัดรอยบกพร่องที่ความลึก 1.0 mm ด้วยโปรแกรม LabVIEW

ภาพที่ 43 ตรวจวัดรอยบกพร่องที่ความลึก 0.5 mm ด้วยโปรแกรม LabVIEW

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 44 ตรวจวัดรอยบกพร่องที่ความลึก 0.2 mm ด้วยโปรแกรม LabVIEW

จากการทดลองนำสมการเชิงเส้นไปกำหนดค่าลงในโปรแกรม LabVIEW ดังภาพที่ 42, 43 และ 44 พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณหาระดับความลึกของรอยบกพร่องได้ ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับระดับความลึกจริงแสดงผลผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถกำหนดระดับความลึกรอยบกพร่องเพื่อแจงเตือนแสดงสัญญาณไฟผ่านทาง LED ภายในโปรแกรม กรณีที่ระดับความลึกของรอยกบพร่องเกินจากข้อจำกัดที่ได้กำหนดเอาไว้

ตารางที่ 22 ระดับความลึกของรอยบกพร่องที่ความถี่ต่างๆ จากการวัดเฉลี่ยจำนวน 30 ครั้ง

ความถี่	**ระดับความลึกของรอยบกพร่อง (mm)**		
(kHz)	**0.2 mm**	**0.5 mm**	**1.0 mm**
10	0.15	0.45	0.87
11	0.16	0.44	0.89
12	0.17	0.48	0.90
13	0.17	0.48	0.91
14	0.17	0.47	0.91
15	0.17	0.47	0.91

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 22 (ต่อ)

ความถี่ (kHz)	ระดับความลึกของรอยกบพร่อง (mm)		
	0.2 mm	0.5 mm	1.0 mm
16	0.17	0.49	0.91
17	0.17	0.49	0.97
18	0.18	0.48	0.96
19	0.18	0.48	0.98
20	0.19	0.50	0.99

5. การรายงานค่าความไม่แน่นอนจากการวัด

เพื่อทำการรายงานผลค่าความไม่แน่นอนจากการวัดด้วยเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวนที่ถูกประเมินด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยรอยบกพร่องอ้างอิงที่ระดับความลึกต่างๆ ที่ความถี่ทดสอบตั้งแต่ 10 kHzถึง 20 kHz และแสดงผลออกเป็นตัวเลข โดยทำการคำนวณหาตาราง uncertainty budget ซึ่งได้จากการนำแหล่งความไม่แน่นอนที่ได้จากการวัดมาพิจารณา ซึ่งประกอบด้วย แหล่งความไม่แน่นอนชนิด A และแหล่งความไม่แน่นอนชนิด B แหล่งความไม่แน่นอนชนิด A คือแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างกันของค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง โดยใช้หลักการทางสถิติ

ส่วนแหล่งความไม่แน่นอนชนิด B ซึ่งประกอบด้วย ความไม่แน่นอนจากการเซาะร่องรอยบกพร่องด้วยเครื่อง EDM (Electrical Discharged Machine), ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องมือวัด, แผ่นอลูมิเนียมมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับเกจบล็อกซึ่งจะมีความไม่แน่นอนจากหลักการของเกจบล็อจซึ่งจะมองในแนวระดับความลึกของรอยบกพร่อง ได้แก่ ค่า drif ของเกจบล็อก, ความไม่แน่นอนจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การขยายตัว

โดยการนำค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนรวม จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า Coverage factor ที่ได้จากตาราง t-Distribution ระดับความเชื่อ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อได้ค่า Coverage Factor แล้วสามารถหาค่าความไม่แน่นอนขยายได้ ตามตารางที่ 23 รายงานผลค่าความไม่แน่นอนจากกวัดดังตารางที่ 24

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 23 คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดที่ความถี่ 20 kHz รอยบกพร่องลึก 1.0 mm

Symbols	Source Uncertainty	Measured (mm)	Prob. Dis	Dividor	Coeff Sen	Uncertainty (mm)	DOF
ub1	จากเครื่อง EDM	0.002	N	2.000	1	0.001	∞
ub2	จากค่า Drif	0.000054	R	1.732	1	0.000031	∞
ub3	ค่าจากอุณหภูมิ	0.000184	R	1.732	1	0.000106	∞
ub4	จากสัมประสิทธิ์การขยายตัว	0.000032	R	1.732	1	0.0000189	∞
ub5	จากความละเอียดของเครื่องวัด	0.01	R	3.464	1	0.00289	∞
ua	ค่าทวนซ้ำจากชนิด A	0.017	N	1	1	0.0031	29
uc	ความไม่แน่นอนรวม		Coverage			0.00436	∞
U	ความไม่แน่นอนขยาย		Factor k=	2		0.010	∞

จากตารางที่ 23 เป็นการรวมค่าความไม่แน่นอนต่างๆ ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจากการทดลองและตัวมาตรฐานเข้าด้วยกัน พบว่า จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด โดยแหล่งความไม่แน่นอนของตัวมาตรฐานส่งผลน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งเป็นแหล่งความไม่แน่นอนจากการคำนวณทางสถิติจะส่งผลมากที่สุด รวมทั้งความละเอียดของเครื่องมือวัดที่สามารถอ่านค่าได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 24 การรายงานค่าความไม่แน่นอนจากการวัดระดับความลึกของรอยบกพร่องที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ (kHz)	รอยบกพร่องที่ระดับความลึก 0.2 (mm)			รอยบกพร่องที่ระดับความลึก 0.5 (mm)			รอยบกพร่องที่ระดับความลึก 1.0 (mm)		
	ค่าที่ได้จากวัด	**ความคลาดเคลื่อน**	**ความไม่แน่นอน**	**ค่าที่ได้จากวัด**	**ความคลาดเคลื่อน**	**ความไม่แน่นอน**	**ค่าที่ได้จากวัด**	**ความคลาดเคลื่อน**	**ความไม่แน่นอน**
10	0.15	-0.05	0.008	0.45	-0.05	0.012	0.87	-0.13	0.012
11	0.16	-0.04	0.007	0.44	-0.06	0.009	0.89	-0.11	0.015
12	0.17	-0.03	0.008	0.48	-0.02	0.009	0.90	-0.10	0.012
13	0.17	-0.03	0.007	0.48	-0.02	0.009	0.91	-0.09	0.012
14	0.17	-0.03	0.007	0.47	-0.03	0.007	0.91	-0.09	0.008
15	0.17	-0.03	0.007	0.47	-0.03	0.007	0.91	-0.09	0.011
16	0.17	-0.03	0.006	0.49	-0.01	0.008	0.91	-0.09	0.007
17	0.17	-0.03	0.006	0.49	-0.01	0.006	0.97	-0.03	0.009
18	0.18	-0.02	0.007	0.48	-0.02	0.007	0.96	-0.04	0.009
19	0.18	-0.02	0.007	0.48	-0.02	0.007	0.98	-0.02	0.009
20	0.19	-0.01	0.007	0.50	0.00	0.011	0.99	-0.01	0.010

พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลมีค่ามาก ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่ามากขึ้น และค่าความไม่แน่นอนมีค่ามากด้วย ซึ่งขึ้นกับความถี่ตาม skin effect

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ระบบตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน ซึ่งประกอบด้วย ชุดหัววัด การ์ดเสียง วงจรตรวจวัดมุมเฟสของสัญญาณ และโปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมระบบเครื่องวัดผ่านทางการ์ดเสียงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจากการวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สามารถบ่งชี้ตำแหน่งของรอยบกพร่องที่มีความกว้าง 0.1 mm และลึกจากผิว 0.2 mm ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ และเมื่อตรวจวัดสัญญาณที่ได้ในขณะที่เคลื่อนหัววัดผ่านรอยบกพร่องที่มีความลึก 0.2 mm ถึง 0.1 mm เทียบกับสัญญาณขณะที่หัววัดผ่านผิววัสดุราบเรียบ พบว่าผลต่างของมุมเฟสของสัญญาณจะแปรผันตรงกับความลึกของรอยบกพร่อง โดยผลต่างของมุมเฟสจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ของสัญญาณที่ใช้ หรือกล่าวได้ว่าความไวในการตรวจวัดความลึกจะเพิ่มขึ้นตามความถี่นั่นเอง

จากการเทียบมาตรฐานระบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นโดยอาศัยกระบวนการทางมาตรวิทยา และมีการขยายความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า แหล่งความไม่แน่นอนจากการคำนวณทางสถิติจะส่งผลมากที่สุด เมื่อเทียบกับแหล่งความไม่แน่นอนของตัวมาตรฐาน เนื่องจากวิธีของการวัด ซึ่งขึ้นกับลักษณะการวางหัววัดให้อยู่บริเวณกึ่งกลางของหัววัด, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดควรเท่ากับหรือเล็กกว่าความยาวของรอยบกพร่อง และความเรียบของผิวหัววัดที่สัมผัสกับผิวของชิ้นงานซึ่งทำให้เกิดผลจากlift off ของหัววัด ซึ่งทำให้ระยะห่างระหว่างชุดหัววัดกับพื้นผิวไม่สม่ำเสมอทำให้ความไวลดลง เมื่อความไวลดลงก็จะสามารถตรวจวัดสัญญาณได้ยาก ซึ่งตรงกับหลักของ skin effect ส่งผลต่อการกระจายตัวของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความไม่แน่นอนจากการวัดมีค่ามากขึ้นตาม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจสอบรอยบกพร่องแบบไม่ทำลายด้วยวิธีกระแสไหลวน สำหรับเป็นข้อมูลเบื้องต้นในด้านการศึกษาปรากฏการณ์ขั้นพื้นฐานของการเกิดกระแสไหลวนในวัสดุตัวนำ และพัฒนาชุดเป็นเครื่องมือวัดต่อไป อย่างไรก็ตามระบบที่ได้ออกแบบขึ้นนี้สามารถใช้ได้กับหัววัดเฉพาะที่ออกแบบขึ้นมาเท่านั้น จึงควรมีการพัฒนาให้ระบบสามารถรองรับชุดหัววัดชนิดอื่นๆ ในท้องตลาดที่มีอยู่หลากหลาย และมีการทำงานที่แตกต่างกัน เพื่อให้ระบบตรวจวัดสามารถทำงานได้หลากหลาย และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และควรหาวิธีในการปรับเรโซแนนซ์โดยการใช้อุปกรณ์ประกอบให้น้อยลงเพื่อลดต้นทุน อีกทั้งระบบตรวจวัดแบบไม่ทำลายด้วยกระแสไหลวนนี้จำเป็นต้องอาศัยสัญญาณกระแสสลับในการตรวจสอบ จึงควรใช้อุปกรณ์ที่บัดกรีลงบนแผ่นวงจรโดยตรง (surface mount device) เพื่อลดผลของคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสายตัวนำ และขาต่อวงจรของอุปกรณ์ ในส่วนการ์ดเสียงควรออกแบบและสร้างการ์ดเสียงแยกต่างหาก และใช้การเชื่อต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางช่องเชื่อมต่อแบบ USB แทน ซึ่งจะเป็นมาตรฐานมากกว่า และควรจะต้องพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ให้สามารถนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นๆ ได้ด้วย และควรพัฒนาระบบให้สามารถตรวจสอบรอยกบพร่องของตัวได้หลากหลายชนิดยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จิระวัฒน์ ใจอ่อนน้อม. 2541. **วงจรไฟฟ้าเบื้องต้น (ไฟฟ้ากระแสสลับ) 2**. พิมพ์ครั้งที่1 สำนักพิมพ์สกายบุ๊กส์, น. 34-36 และ น. 89-91. กรุงเทพฯ.

เจริญ เพชรมณี. 2547. **เรียนลัด LabVIEW software for measurement and Automation**. สำนักพิมพ์ ซีเอ็ดยูเคชั่น. กรุงเทพฯ.

ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย. 2545. **สนามแม่เหล็ก.** พิมพ์ครั้งที่ 1,สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), น. 279-309. กรุงเทพฯ.

ฟูจิอิ ซาโตะ, ปริทรรน์ พันธุบรรยงก์, บัญฑิตโรจน์ อารยานนท์, ก่อเกียรติ บุญชู, และ สมยศ ศรีสถิต. 2530. **การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing)**, สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), น. 197-212. กรุงเทพฯ.

Atmanand M. A. and V. J. Kumar. 1996. Microcontroller based LCR meter. **Microprocessors and Microsystems**: 297-301.

Cecco V. S., G. V. Drunen and F. L. Sharp. 1986. **Advanced Manual For: Eddy Current Test Method.** Canadian General Standards Board, pp 5-24.

Doyum A. B. and S. Ertekin. 1998. A practical hole testing technique using a meter display eddy current instrument. **NDT&E international:** 11-15.

Gong P. and W. Zhou. 2012. Design and Implementation of Multifunctional Virtual Oscilloscope Using USB Data-Acquisition Card. **Procedia Engineering**: 3245-3249

Kuhn K. A. 2010. **A simple circuit for measuring complex impedance**
Available source:
http://www.kennethkuhn.com/electronics/impedance_measurement.pdf, July 20, 2010.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Lopes A. et al. 2009. **Using a mouse pointer as a positioning device in eddy current testing.** Available Source: http://www.imeko2009.it.pt/Papers/FP_652.pdf, July 8, 2010.

May P., E. Zhou and D. Morton. 2007. The design of a ferrite-cored probe. **Sensors and Actuators A**: 221-228

Mook G. 2009. **Tools for education in eddy current.** Available Source: www.ndt.net/article/ndt-slovenia2009/PDF/P21.pdf, July 8, 2010.

NAVAIR 01-1A-16. 2007. **Eddy current inspection method.** Available Source: www.ndtsupply.com/assets/techresources/N-PT-TO.pdf, July 20, 2010.

Puts M. J. H., J. Pokorny, J. Quinlan and L. Glennie. 2005. The Soundcard as a Digital to Analog Converter**. Journal of Neuroscience Methods**: 77-81.

Shkatov P., D. Bydanov and S. Kluev. 2008. **Simulator for education of eddy current testing** Available Source: http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/398.pdf, August 12, 2010.

Takagi T. 1998. Numerical Evaluation of Correction between Crack size and Eddy current Testing Signal by a Very Fast Simulator. **IEEE Transaction on Magnetics**: 2581-2587.

Virtins Technology. 2008. **Virtins sound card oscilloscope probe.** Available Source: www.virtins.com/Virtins_Sound_Card_Oscilloscope_Probe_Manual.pdf, August 12, 2010.

Yang B. and YachaoGu. 2011. Design of Gathering system for Audio Signal Based on Labview. **Energy Procedia**: 5402-5407

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

การประมาณค่าความไม่แน่นอน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสำคัญของความไม่แน่นอนในการวัด

ความไม่แน่นอนในการวัดเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบกับผลการวัดเพื่อแสดงถึงความคาดหมายว่าค่าจริง ของปริมาณที่ทำการวัด นั้นอยู่ในช่วงใด ดังนั้นจึงเป็นข้อมูลที่มีความจำเป็นที่ต้องประกอบอยู่กับผลการวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อต้องมีการนำผลการวัดไปประกอบการตัดสินในเกณฑ์คุณภาพต่างๆ ว่าสินค้า หรือปริมาณที่ทำการวัดนั้นมีคุณภาพเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้หรือไม่

ความจำเป็นที่ต้องมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดรวมอยู่กับผลการวัดนั้น มีปรากฏอยู่ในมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐาน ISO/IEC 17025:2005 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อแสดงถึงความสามารถของห้องปฏิบัติการที่จะทำการวัด และแจ้งผลการวัดได้อย่างสมบูรณ์ถูกต้อง ได้ระบุให้ผู้ทำการสอบเทียบต้องแจ้งค่าความไม่แน่นอนในรายงานผลการสอบเทียบด้วย นอกจากนั้นมาตรฐาน ISO 9001:2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ผู้ผลิต และผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบการจัดการคุณภาพรู้จักกันเป็นอย่างดี ได้มีการอ้างอิงระบบการจัดการเครื่องวัดที่ต้องให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO 10012 ซึ่งมาตรฐาน ISO 10012 ได้กำหนดกิจกรรมของการจัดการเครื่องวัดว่า ในการสอบเทียบและการดำเนินการวัดนั้น ต้องดำเนินการในลักษณะที่สามารถทราบค่าความไม่แน่นอนในการวัดได้ เป็นต้น

ความสำคัญของข้อมูลค่าความไม่แน่นอนในการวัดทั้งในด้านวิชาการที่ต้องการความสมบูรณ์ของข้อมูลผลการวัด และในด้านการประยุกต์ใช้ผลการวัดต่อระบบการผลิต และการตรวจสอบสินค้าดังกล่าวแล้ว ทำให้มีความพยายามเชื่อมโยงวิธีคิด และแนวทางการคำนวณเพื่อจะได้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ถูกต้องเข้าสู่ภาคการปฏิบัติงานต่างๆ ทั้งนี้เอกสารที่ถือได้ว่าเป็นต้นแบบของการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ยอมรับกันโดยสากล ได้แก่ เอกสาร Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement ซึ่งจัดทำขึ้นโดย Technical Advisory Group 4 (ISO/TAG 4) ของ International Organization for Standardization: ISO อย่างไรก็ดี เอกสารดังกล่าวมีรายละเอียดในเชิงวิชาการมากจนไม่สะดวกที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติได้โดยง่าย หน่วยงาน United Kingdom Accreditation Service: UKAS ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ให้การรับรองความสามารถในการวัดสำหรับห้องปฏิบัติการของประเทศอังกฤษจึงได้จัดทำเอกสาร UKAS3003 “The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement” ขึ้นโดยมีเนื้อหาสาระที่เท่าเทียมกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความไม่แน่นอนของการวัด

ความไม่แน่นอนของการวัดคือสิ่งที่บอกได้ถึงคุณภาพของผลการวัด ว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงใด การรายงานความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องรายงานพร้อมกับผลของการวัดเสมอ เพื่อที่จะให้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับข้อกำหนดจำเพาะหรือมาตรฐาน หรือเกณฑ์ยอมรับสำหรับสิ่งที่ถูกวัด (measurand)

ปริมาณที่ถูกวัด "Y" ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวัด $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ดังสมการ

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \tag{26}$$

ในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของปริมาณอินพุตเหล่านั้นได้ปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดจะมีความไม่แน่นอนติดมาด้วยเสมอ ดังนั้นผลการวัด "Y" จึงเป็นเพียงค่าประมาณ "y" พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากปริมาณอินพุตเหล่านั้นด้วยในการรายงานผล ปริมาณที่ถูกวัดจะอยู่ในดังสมการที่

$$Y = y \pm U \tag{27}$$

การประมาณค่าความไม่แน่นอนชนิด A

การประมาณค่าความไม่แน่นอนชนิด A (type A standard uncertainty) เป็นการประมาณค่าโดยใช้หลักการทางสถิติ โดยการดำเนินการวัดให้สภาวะต่างๆ อยู่ภายใต้เงื่อนไขของการวัดซ้ำ (repeatability) เพื่อดูถึงความซ้ำค่าเดิม หรือพูดในทางที่กลับกัน คือ ดูถึงการกระจายค่าของค่าเฉลี่ยที่ได้จากแต่ละชุดของการวัด มีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

-หาค่าเฉลี่ยของค่าที่วัด ถ้ามีการวัดปริมาณ x ที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n ครั้งที่ทำการวัด ค่าเฉลี่ยจะประมาณได้จาก

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} \tag{28}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยที่ $\bar{x}$ คือค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด
x_i คือค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง
n คือจำนวนครั้งที่วัด

-หาการกระจายของข้อมูลโดยประมาณจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{29}$$

โดยที่ σ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$\bar{x}$ คือค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด
x_iคือค่าที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง
n คือจำนวนครั้งที่วัด

-หาค่าความเบี่ยงเบนของค่าเฉลี่ย

ถ้าได้มีการดำเนินการวัดซ้ำชุดไปเรื่อยๆ อย่างต่อเนื่อง จะได้ค่าเฉลี่ย และค่าความเบี่ยงเบน (standard deviation) ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถประมาณค่า standard deviation ของค่าเฉลี่ยที่ได้จากชุดข้อมูลต่างๆ จากสูตร ดังนี้

$$S(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{30}$$

ค่า Standard Deviation ของค่าเฉลี่ยที่ประมาณได้นี้เรียกว่า Type A Standard Uncertainty

$$u_A(x) = S(\bar{x}) \tag{31}$$

โดยที่ Type A Standard Uncertainty นี้เป็นข้อมูลที่ได้มาจากสภาวะของการวัดภายใต้เงื่อนไขของ Repeatability จึงมักเรียกค่านี้อย่างง่ายๆ ว่า repeatability

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การประมาณค่าความไม่แน่นอนชนิด B

การประมาณค่า type A standard uncertainty ดังกล่าวแล้วถือว่าเป็นการประเมินโดยใช้วิธีการทางสถิติ สำหรับการประเมิน type B standard uncertainty นั้น เป็นการใช้วิธีอื่นๆ กล่าวคือ เป็นการใช้ข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ที่เชื่อถือได้ทางวิชาการมาพิจารณาประกอบการประเมิน ทั้งนี้ องค์ประกอบของความผิดพลาดจากแหล่งที่เรียกว่าความคลาดเคลื่อนของระบบ (systematic error) นั้น จะนำมาประมาณค่าเป็นความไม่แน่นอนชนิด B (type B standard uncertainty) ดังนั้นการประมาณค่า type B standard uncertainty จึงต้องการความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคในกระบวนการวัดเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะสามารถระบุแหล่งของความไม่แน่นอนที่มาจากแหล่ง Systematic Error ได้ครบถ้วนรวมทั้งสามารถประมาณขนาดของความไม่แน่นอนในเบื้องต้นได้ถูกต้องด้วย

การประเมินความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะให้แผ่นอลูมิเนียมอ้างอิงโดยใช้หลักการคำนวณค่าความไม่แน่นอนเหมือนเกจบล็อก

1. การประเมินความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าคงตัวความคลาดเคลื่อนของเกจบล็อก

เนื่องจากเกจบล็อกเป็นมาตรฐานที่ทำจากโลหะ โดยธรรมชาติของโลหะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความยาวเกจบล็อกที่เปลี่ยนแปลงไปต่อระยะเวลา 1 ปี อ้างอิงจากมาตรฐาน ISO 3650: 1998 กำหนดให้ลักษณะของการกระจายเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความคงตัวของเกจบล็อกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่

$$u_{b2} = \frac{Stability of\, gauge block}{\sqrt{3}} \tag{32}$$

$$u_{b2} = \frac{0.05\ \mu m + (0.5\times10^{-6}\times 8\ mm)}{\sqrt{3}} \tag{33}$$

$$u_{b2} = 0.000031\ mm \tag{34}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดด้วยเกจบล็อก ได้มีการปรับให้อุณหภูมิของเกจบล็อกอยู่ในสภาวะสมดุล โดยเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ (20 ± 2) °C เมื่อพิจารณาวัสดุที่ใช้ทำเกจบล็อกแล้วทำจาก stainless steel มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะ (coefficient of thermal expansion,α) เท่ากับ $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \frac{1}{°\mathrm{C}}$ เทคนิคนี้จะทำให้เกิดการชดเชยค่าความผิดพลาดเป็นไปโดยธรรมชาติ ณ ตำแหน่งที่เดียวกัน ดังนั้นสาเหตุของค่าความคลาดเคลื่อนที่มาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะจากเกจบล็อก อ้างอิง EA-4/02: 1999 หน้า 38 ข้อ S4.13 สมการ S4.5 และหน้า 61 ข้อ S10.4 ประเมินได้ว่าค่าความผิดพลาด

2.1. การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิ

ระหว่างทำการสอบเทียบ พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิห้องให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้อยู่ที่ (20 ± 2) °C เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ความยาวของเกจบล็อกอาจเกิดความผิดพลาดได้ และกำหนดให้มีลักษณะของการกระจายเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$u_{b3} = L_0 \times \bar{\alpha} \times \frac{u(\Delta T)}{\sqrt{3}} \tag{35}$$

$$u_{b3} = 8\,mm \times 11.5 \times 10^{-6} \frac{1}{°C} \times \left(\frac{2\,°C}{\sqrt{3}}\right) \tag{36}$$

$$u_{b3} = 0.000106 \text{ mm} \tag{37}$$

เมื่อ L_0คือความยาวที่ระบุ ณ อุณหภูมิอ้างอิง ($\mathrm{t_0} = 20$◦C)

$\bar{\alpha}$ คือค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะระหว่างเกจบล็อก $(11.5 \times 10^{-6}), \frac{1}{°\mathrm{C}}$

$u(\Delta T)$คือค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิห้อง $\left(\frac{2\,°\mathrm{C}}{\sqrt{3}}\right)$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2. การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะ

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตเกจบล็อกที่ทำให้ พบว่ายังไม่เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ และจากสมบัติเฉพาะจากบริษัทผู้ผลิตที่กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเป็น $11.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$และมีค่าความไม่แน่นอนเป็น $\pm 1 \times 10^{-6}\,\frac{1}{°\mathrm{C}}$ และเมื่อพิจารณาความน่าจะเป็นจากค่าความไม่แน่นอนของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะของเกจบล็อกเป็น และกำหนดให้มีลักษณะของการกระจายเป็นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$u_{b4} = L_0 \times \Delta T \times \frac{u(\bar{\alpha})}{\sqrt{3}} \tag{38}$$

$$u_{b4} = 8\ mm \times 2\ °C \times \left(\frac{2\times10^{-6}}{\sqrt{3}}\frac{1}{°C}\right) \tag{39}$$

$$u_{b4} = 0.000019\ \mu m \tag{40}$$

เมื่อ L_0คือความยาวที่ระบุ ณ อุณหภูมิอ้างอิง $(t_0 = 20\ °C)$

ΔT คือค่าผลต่างของอุณหภูมิห้องระหว่างสอบเทียบ $\pm 2\ °C$

$\mathrm{u}(\bar{\alpha})$ คือค่าความไม่แน่นอนของผลต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะระหว่างเกจบล็อกเนื่องจากค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิห้อง $(2 \times 10^{-6}), \frac{1}{°C}$

การประมาณค่าความไม่แน่นอนรวม

ทั้งค่า type A standard uncertainty และ type B standard uncertainty ล้วนแต่เป็นส่วนของการวัดโดยรวม ซึ่งหมายความว่าจะต้องนำค่า type A standard uncertainty และ type B standard uncertainty ที่ประเมินได้จากที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดมารวมกันได้เป็นการประมาณค่าความไม่แน่นรวม (combine standard uncertainty) ดังนี้

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u_i^2(y)} \tag{41}$$

โดยที่ c_i คือสัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity Coefficient) ซึ่งใช้สำหรับการแปลงอินพุตที่มีหน่วยต่างจากเอาต์พุตให้เป็นหน่วยเดียวกัน หรือใช้ขยายปริมาณของอินพุตให้เหมาะสมกับเอาต์พุต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$u(x_i)$ คือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากปริมาณอินพุตต่างๆ
$u_i(y)$ คือ ความไม่แน่นอนของเอาต์พุตย่อยๆ แต่ละตัว

ตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

ตัวประกอบครอบคลุมของความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ได้มาจากการคำนวณค่าองศาความเป็นอิสระจากสมการ Welch-Satterthwaite

$$\gamma_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{\gamma_i}} \tag{42}$$

ซึ่งค่าของ γ_{eff} ที่ได้จากการคำนวณ จะนำไปคิดเป็นค่าตัวประกอบจากตาราง T-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องรายงาน 95 เปอร์เซ็นต์

ค่าความไม่แน่นอนขยาย

ช่วงของความไม่แน่นอนที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เรียกว่า ความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty) และมีสัญลักษณ์ว่า U ความไม่แน่นอนขยาย U ได้มาจากการคูณความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ด้วยตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor) k

$$U = ku_c(y) \tag{43}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 7 ของสมาคมฟิสิกส์ไทย

Siam Physic Congress 2012 (SPC2012)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

SIAM PHYSICS CONGRESS
Past, Present and Future of Physics 2012

Siam Physics Congress 2012

Participant Letter

May 10, 2012

SPC2012 Conference Comittee

Dear *Mr. Panya Phasingsri,* Kasetsart University

Thank you for attending "*The 7th Annual Conference of the Thai Physics Society* (SPC2012)" running from May 9 to 12, 2012 at Krungsri River Hotel, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand. This letter confirms your kind participation in the SPC2012 on the work titled "The Study and Design of Non-Destructive Testing Based on Eddy Current".

Sincerely yours,

Local organizing Chair
College of Nanotechnology, KMITL

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Siam Physics Congress SPC2012
Past, Present and Future of Physics 9-12 May 2012

The Study and Design of Non-Destructive Testing Based on Eddy Current

P. Phasingsri and P. Jantaratana*

Department of Physics, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand
**Corresponding author. E-mail: fscipsj@ku.ac.th*

Abstract

In this study, non-destructive testing probe based on eddy current has been fabricated and tested. Attention has been focused on the low-cost tool for detecting a crack or flaw on the surface of conducting material. The probe was fabricated by winding 900 turn of 40 AWG copper wires around a ferrite core. The sine wave with frequency of 1 kHz –20 kHz and amplitude of 1Vp-p from line-out of sound card was supplied to the probe. The variation of phase and voltage across the probe was detected by line-in of the sound card. The graphical programming environment (LabVIEW) was use for system adjusting and monitoring. The performance of the eddy current probe system was tested by detecting crack of reference aluminum sheet at different depths from the surface (standard number 2.165-551 S/N 2941). It was found that the position of 0.2 mm depth crack can be detected.

***Keyword*:** Non-Destructive Testing, Eddy Current, LabVIEW

Introduction

Eddy current testing (ECT) is the non-destructive testing (NDT) based on the principle of eddy current induced in conductive materials [1]. When external alternating magnetic field is applied to the conductor, the eddy currents are induced. The direction of the eddy current is such as to oppose the change of magnetic flux through the conductor. The current density is highest at the surface of the conductor, and will gradually decrease into the conductor. The skin depth, the depth at which the current density reduce to 37% of that of the surface can be written as

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \qquad (1)$$

Where f is the frequency of alternating magnetic field, σ is the conductivity, and μ is the permeability of the conductor. Eddy current probe can be applied in many applications such as the detection of cracks [2], determination of coating thickness and material thickness [3], and measurement of conductivity and permeability of material [4]. Defects such as flaws and cracks near the surface of material disrupt the path of eddy current resulting in a decrease of their strength. The change of eddy current at the surface of material results in the variation of impedance of the probe [5]. In this paper, the low-cost eddy current probe is designed and used as nondestructive testing probe for detecting cracks and flaws in material.

Materials and Methods

The eddy current probe was fabricated by winding 900 turn of 40 AWG copper wires around 0.75 mm-diameter and 7.5 mm-long ferrite core. In order to increase the sensitivity of the detection, a variable capacitor was connected in series with the probe to adjust the resonance condition in the circuit. Resistor R=10 kΩ and Rf =10 Ω was also connected to the circuit in fig. 1 to provide a ground reference for the sound card output and adjust range of measurement respectively.

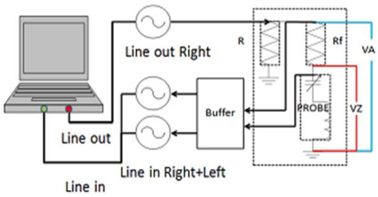


Figure 1. Block diagram of eddy current probe system.

The three AC voltage measurement based LCR meter [6, 7] was used to compare signal from the circuit as shown in fig. 2. The three voltages in fig. 2 that were measure were voltage across R (VA), voltage across Rf (VI) and voltage across the probe and capacitor (VZ). The phase angle (θ) between current and voltage in unknown at the moment but can be calculated from the voltages.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

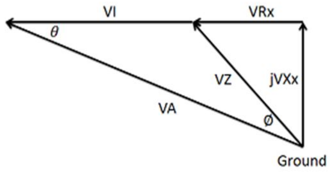


Figure 2. Vector diagrams of three AC voltages.

LabVIEW program was used to control the soundcard to generate sine wave for the circuit and measure voltage drop across each part [8, 9]. In order to find characteristic of the circuit, the sine wave from line out of the sound card was supplied to the circuit and the voltage drop across each part of the circuit was measured by a digital voltmeter (Agilent U3402). Finally, a reference aluminum sheet standard number 2.165-551 S/N 2941 as was used to test the performance of the eddy current probe system. The uncertainty of measurement was expressed at a level of confidence of 95%.

Results and Discussion

Figure 3 show the designed program for eddy current probe system adjusting and monitoring. The program can operate as LCR meter or flaw evaluation. The measurement can be performed at the frequency of 10 kHz to 20 kHz with supply voltage of 1 V_{p-p} and sampling rate of 44.1 kSa/s.

The dependence of voltage VZ and VA on the frequency for normal surface and 1.00 mm-depth flaw of reference aluminum sheet is shown in Fig. 6. The supply voltage was kept constant at 1.0 Vp-p. In frequency regime lower than 20 kHz, voltage across the probe measured at the flaw is smaller than that of measured at normal surface. At the frequency of supply voltage of 20 kHz, voltage across the probe measured at the flaw is higher than that of measured at normal surface due to the strong skin effect.

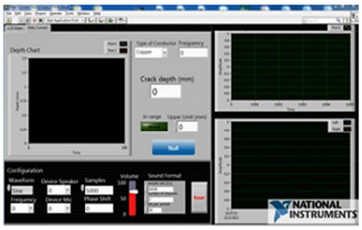


Figure 3. LabVIEW program for adjusting measurement condition and monitoring measurement result.

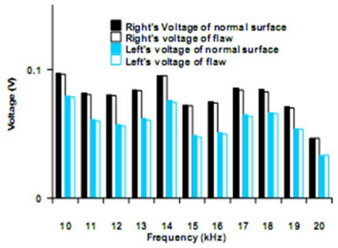


Figure 4. Frequency dependence of voltage measure at line in of sound card.

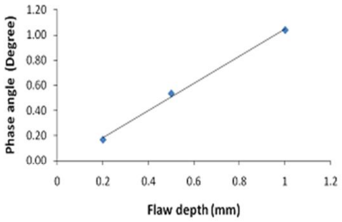


Figure 5. Variation of phase angle as a function of flaw depth.

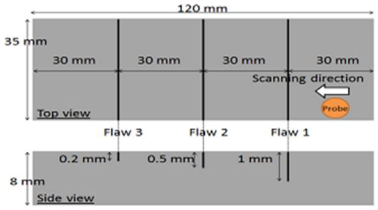


Figure 6. Reference aluminum sheet standard number 2.165-551 S/N 2941.

The phase angle (Ø) at difference flaws was calculate by using the three AC voltage method in Fig. 5. The phase angle dependency on the flaw depth is linear and can be fitted with linear function as $y=1.083x-0.034$. The obtained transfer function used to convert the voltage measuring to depth of flaw in real measurement by using LabVIEW program.

The performance of the system was test by scanning the probe on the reference aluminum sheet at different depths from the surface (standard number 2.165-551 S/N 2941) as shown in Fig. 6. The position of flaw with the depth of 0.20 to 1.00 mm can be detected accurately.

The measured depths were compared to the depth of the reference material in Table 1, where measuring depth was the average of ten reading and uncertainty was calculate accordance with UKAS document M3003 [10].

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Table 1: Performance of the measurement system.

flaw depth (mm)	frequency (kHz)	measured depth (mm)	error measurement (mm)	uncertainty (mm)
1.00	20	1.04	0.04	0.05
0.50	20	0.46	-0.04	0.05
0.20	20	0.15	-0.05	0.05

Conclusions

The non-destructive testing probe system based on eddy current have been studied and developed. A sine wave with amplitude of 1 Vp-p and frequency of 20 kHz from line out of the sound card is sent to the probe and the variation of voltage due to the flaw is detected by line in of the sound card. The probe can detect position of the flaw accurately. The uncertainty of measurement in measuring the depth of 0.2 mm-wide flaw is ±0.05 mm at a level of confidence of 95%. In conjunction with the computer's sound card, the eddy current can be used as low-cost nondestructive testing system for flaw detection on the surface of conductor.

Acknowledgments

This work was supported by Department of Physics and Faculty of Science, Kasetsart University.

References

1. V.S. Cecco, G. Van Drunen, and F.L. Sharp, "Advanced Manual For: Eddy Current Test Method, From Canadian General Standards Board", Canada, 1986.
2. B. Helifa, A. Oulhadj, A. Benbelghit, I.K. Lefkaier, F. Boubenider, and D. Boutassouna, "Detection and Measurement of Surface Cracks in Ferromagnetic Materials using Eddy Current Testing", NDT&E Int **39** (2006) 384–90.
3. F. Roper, "A High-Frequency Eddy Current Method for the Thickness Measurement of Thin Metallic Foils using Ferrite-Core Transmission Systems", NDT&E International **33** (2000) 163–172.
4. H. Geirinhas Ramos, A. Lopes Ribeiro, P. Jezdik, and J. Neskudla, "Eddy Current Testing of Conductive Materials", Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2008.
5. Toshiyuki Takagi, "Numerical Evaluation of Correction between Crack Size and Eddy Current Testing Signal by a Very Fast Simulator", Transaction on Magnetics (1998), 2581-2587.
6. M. Dutta, et al, "An Application of The LMS Adaptive Algorithm for A Digital AC Bridge", Instruments and Measurements (1987) 894-897.
7. Kenneth A. Kuhn, "A Simple Circuit for Measuring Complex Impedance", 2008.
8. Bensheng Yang, and Yachao Gu, "Design of Gathering System for Audio Signal Based on Labview", Energy Procedia **13** (2011) 5402–5407.
9. Ping Gong, and Wei Zhou, "Design and Implementation of Multifunctional Virtual Oscilloscope using USB Data-Acquisition Card", Procedia Engineering **29** (2012) 3245-3249.
10. United Kingdom Accreditation Service, The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, From M3003, 2007.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายปัญญา พาสิงห์ศรี
เกิดวันที่	10 ตุลาคม 2527
สถานที่เกิด	อำเภอพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประวัติการทำงาน	เจ้าหน้าที่วิเคราะห์คุณภาพ บริษัท ดับเบิ้ลเอ ตั้งแต่ พ.ศ. 2551-2552

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์