

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การพัฒนาระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

System Development for Coating Thickness Measurement

Using Eddy Current



จัดทำโดย

นายอภิณัย ฤกษ์รัตน์

RCH
TK
2271
095๗๗

สงวนลิขสิทธิ์
เลขทะเบียน 115580
วัน,เดือน,ปี 21 ส.ค. 2554

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12318526
b.....
1.....

โครงการวิจัย (ภาษาไทย) “การพัฒนาระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน”
(ภาษาอังกฤษ) “System Development for Coating Thickness Measurement
Using Eddy Current”

ชื่อผู้วิจัย (ภาษาไทย) นายอภิไนย์ ฤกษ์รัตน์
(ภาษาอังกฤษ) Mr.Apinai Rerkratn

หน่วยงานที่รับผิดชอบงานวิจัย และที่อยู่

แผนก/ภาควิชา วิศวกรรมการวัดและควบคุม กอง/คณะ คณะวิศวกรรมศาสตร์
กรม/มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กระทรวง/ทบวง กระทรวงศึกษาธิการ
ที่อยู่ ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 02-739-0758 โทรสาร 02-739-0758

บทคัดย่อ

รายงานโครงการวิจัยนี้กล่าวถึงการพัฒนาแบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน โดยระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบที่พัฒนาขึ้นจะประกอบด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ดังนี้ วงจรกำเนิดคลื่นไซน์ วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน วงจรขยายสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี วงจรประมวลผลและแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และหัววัดกระแสไหลวน โดยการทำงานวงจรที่ออกแบบขึ้นนี้จะอาศัยหลักการของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นโลหะที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการวัดจะถูกส่งเข้าสู่วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อคำนวณและแสดงผลการวัดบนจอแอลซีดี

ABSTRACT

This research project presents the system development for coating thickness measurement based on eddy current. The proposed system consists of sine-wave generator circuit, voltage controlled current source, voltage amplifier, RMS-to-DC converter, microcontroller, and eddy current probe. The system is based on eddy current inspection technique. Eddy current between eddy current probe and coating metal object was measured by the proposed circuit. The voltage of circuit was sent to microcontroller for calculated and display on LCD panel.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความช่วยเหลือเป็นอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ ตลอดจนคำแนะนำและข้อมูลต่างๆจากบุคคลต่อไปนี้

1. ดร. วรณดี เพชรมณีล้ำค่า ที่ช่วยให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับเขียนรายงานโครงการวิจัย
2. นาย สิริชัย ชรรमारักษ์วัฒน์ ที่ช่วยเหลือในการทดลองและเก็บข้อมูล

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

อภิรักษ์ ฤกษ์รัตน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ระยะเวลาดำเนินโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย.....	2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
บทที่ 2 การตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบ.....	3
2.1 วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำ.....	3
2.2 วิธีการกระแสไหลวน(Eddy Current).....	4
2.3 วิธีการ Coulometric.....	5
2.4 วิธีการสะท้อนกลับของเบต้า.....	6
2.5 วิธีการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์.....	7
2.6 เกจวัดความหนาของชั้นเคลือบแบบพกพา.....	7
2.7 บทสรุป.....	8
บทที่ 3 การทดสอบโดยวิธีใช้กระแสไหลวน.....	9
3.1 ชนิดของการทดสอบ โดยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	10
3.1.1 การตรวจหารอยร้าว (Magnetic Flaw Detector)	10
3.1.2 การตรวจสอบวัสดุเพื่อคัดแยกหาวัสดุที่ต่างชนิดกัน.....	11
3.1.3 การวัดความหนาของชั้นฟิล์ม.....	12
3.1.4 การตรวจสอบระยะ รูปร่าง.....	12
3.2 ลักษณะพิเศษของการตรวจสอบ โดยใช้ความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
3.3 ที่ส่งผลกระทบต่อผลการของกระแสไหลวน.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยน. 13
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

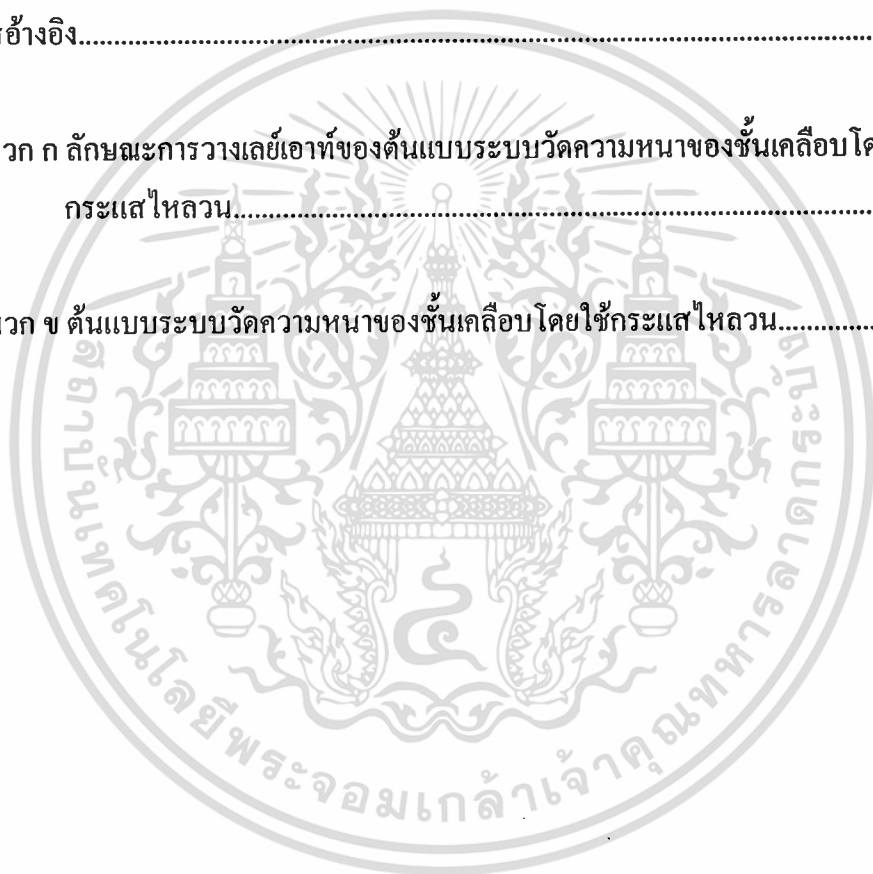
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การเกิดกระแสไหลวน.....	13
3.3.2 ปฏิกิริยาที่ผิวกับความลึกที่ผ่านเข้า (Skin Effect & Penetration).....	14
3.3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด.....	17
3.3.4 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด.....	20
3.4 วิธีการตรวจสอบ.....	21
3.4.1 ขดลวดที่ใช้ตรวจสอบและวิธีการ.....	21
บทที่ 4 ระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน.....	23
4.1 วงจรกำเนิดคลื่นไซน์ (Sine wave Generator Circuit).....	24
4.2 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source).....	26
4.3 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit)	30
4.4 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี(RMS-TO-DC Converter Circuit).....	31
4.5 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้ กระแสไหลวน.....	31
4.6 วงจรประมวลผลและแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
4.7 โปรแกรมสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน.....	34
4.8 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้ กระแสไหลวน.....	42
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	43
5.1 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้ กระแสไหลวน.....	43
5.1.1 การทดสอบสัญญาณของวงจรกำเนิดคลื่นไซน์ (Sine wave Generator Circuit)	43
5.1.2 การทดสอบสัญญาณของวงจขยายสัญญาณไซน์.....	48
5.1.3 การทดสอบสัญญาณของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	49
5.1.4 การทดสอบสัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวน.....	50
5.1.5 การทดสอบสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 การทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนา ขึ้นมา กับแผ่นโลหะทดสอบ.....	52
บทที่ 6 บทสรุป.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก ก ลักษณะการวางเลย์เอาท์ของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้ กระแสไหลวน.....	55
ภาคผนวก ข ต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การใช้วิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบวัสดุในลักษณะต่างๆ.....	12
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์นิงาโอคา.....	19
4.1 ค่าความต้านทานของ Rselector และกระแสเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแส.....	29
4.2 ปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ.....	38
4.3 ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ.....	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำ).....	4
2.2 วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำ).....	5
2.3 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิธีการกระแสไหลวน.....	5
2.4 วิธีการ Coulometric Method.....	6
2.5 วิธีการสะท้อนกลับของเบต้า.....	7
3.1 ปฏิกิริยาการเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า.....	9
3.2 ลักษณะการเกิดกระแสไหลวน.....	9
3.3 การเกิดกระแสไหลวน.....	13
3.4 รอยบกพร่องกับกระแสไหลวน.....	14
3.5 ปฏิกิริยาที่ผิว.....	15
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสกับความลึกในการผ่านเข้าไปของสนามแม่เหล็ก.....	16
3.7 ปริมาณกระแสไหลวนและความหนาของชั้นเคลือบ.....	16
3.8 ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนและความหนาของชั้นเคลือบ.....	17
3.9 ขดลวดที่ใช้ตรวจสอบ โดยการเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง.....	18
3.10 ภาพกระแสไหลวนเปลี่ยนแปลงไปตามรอยร้าว.....	19
3.11 ขดลวดตรวจสอบด้วยวิธีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกัน.....	20
3.12 ขดลวดทดสอบแบบต่าง ๆ.....	21
3.13 การใช้ขดลวดแบบมีแกนเหล็กในลักษณะหมุนรอบท่อ.....	22
3.14 แบบของขดลวดทดสอบ.....	22
4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน.....	23
4.2 วงจรกำเนิดคลื่นไซน์ที่พัฒนาขึ้นมา.....	24
4.3 ขาที่ใช้ควบคุมความถี่สัญญาณเอาท์พุท.....	24
4.4 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันที่ใช้ในระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ.....	28
4.5 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	29
4.6 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขยายสัญญาณจากขดลวดตัวรับ.....	30
4.7 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี.....	31
4.8 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขับขดลวดตัวส่ง.....	32
4.9 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขดลวดตัวรับ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	วงจรสำหรับใช้ในการประมวลผลและการแสดงผล.....	34
4.11	การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่ความหนาของชั้นเคลือบต่างกัน.....	35
4.12	ปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ.....	37
4.13	ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ.....	39
4.14	บล็อกไดอะแกรมของ โปรแกรมที่ใช้ในการวัด คำนวณความหนาของชั้นเคลือบตลอดจนการแสดงผล.....	41
4.15	วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน.....	42
5.1	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 0 โวลต์.....	43
5.2	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 0.5 โวลต์.....	44
5.3	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 1 โวลต์.....	44
5.4	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 1.5 โวลต์.....	45
5.5	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 2 โวลต์.....	45
5.6	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 2.5 โวลต์.....	46
5.7	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 3 โวลต์.....	46
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันควมคุมและความถี่เอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่ออกแบบขึ้นมา.....	47
5.9	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควมคุม 2.401 โวลต์.....	47
5.10	สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ไซน์ที่ความถี่ 110 กิโลเฮิร์ต.....	48
5.11	สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ไซน์ที่ความถี่ 110 กิโลเฮิร์ต.....	48
5.12	สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแสควมคุมด้วยแรงดันขณะที่ยังไม่ต่อกับหัววัดกระแสไหลวน.....	49
5.13	สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแสควมคุมด้วยแรงดันขณะที่ยังไม่ต่อกับหัววัดกระแสไหลวน.....	49
5.14	สัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวนขณะที่ยังไม่ทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ.....	50
5.15	สัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวนขณะทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ.....	50
5.16	สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีขณะที่ยังไม่ทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17	สัญญาณอินพุทและเอาต์พุทของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดิซีซิม ทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ.....51
5.18	การทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมา กับแผ่นโลหะทดสอบ.....52
5.19	ค่าแรงดันเอาต์พุทของวงจรเมื่อเทียบกับค่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่น อลูมิเนียม.....52
ก1	แสดงการวางเลย์เอาต์ด้านหน้าของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้ กระแสไหลวน.....55
ก2	แสดงการวางเลย์เอาต์ด้านบนของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแส ไหลวน.....55
ก3	แสดงการวางเลย์เอาต์ด้านหลังของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแส ไหลวน.....55
ข1	ด้านหน้าของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน.....56
ข2	ด้านบนของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน.....56
ข3	ด้านหลังของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน.....57
ข4	หัววัดกระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมา.....57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานในทางอุตสาหกรรมมากมาย ไม่ว่าจะเป็นเทคโนโลยีในด้านการผลิต หรือการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งล้วนแล้วแต่มีการนำเอาเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์ไปประยุกต์ใช้ทั้งสิ้น

เทคโนโลยีด้านการทดสอบแบบไม่ทำลาย(Non Destructive Testing : NDT) นับว่าเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการทดสอบวัสดุต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบแบบไม่ทำลายจะไม่ส่งผลกระทบต่อเสียหายให้เกิดกับชิ้นงานหรือวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีการวิจัยเทคโนโลยีด้านการทดสอบแบบไม่ทำลายเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

การทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current Testing : ET) เป็นเทคโนโลยีหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมอย่างสูง ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจวัดวัสดุที่ไม่มีสภาพความเป็นแม่เหล็ก เช่น อลูมิเนียม ทองแดง เป็นต้น สำหรับการวัดความหนาของชั้นเคลือบของวัสดุต่างๆ นับว่าเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความสำคัญต่อวงการอุตสาหกรรม เนื่องจากวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันล้วนแล้วแต่ผ่านการเคลือบผิวมาแล้วทั้งสิ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนขึ้นมา

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนาต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน
2. พัฒนาเทคนิคในการออกแบบ และสร้างหัววัดกระแสไหลวน (Eddy Current Probe) สำหรับวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน
3. สร้างบุคลากรทางเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์
4. พัฒนาเทคนิคในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

พัฒนาต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนเพื่อนำระบบที่สร้างขึ้นไปใช้ในการตรวจวัดความหนาของชั้นสารเคลือบที่ไม่เป็นตัวนำ(Non-Conductive Coating Film) ที่เคลือบอยู่บนซับสเตรตที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก(Non-magnetic Substrate)

1.3 ระยะเวลาดำเนินโครงการ

สำหรับการทำวิจัยการพัฒนาระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนจะเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม 2551 จนถึงเดือนกันยายน 2552

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของโครงการวิจัย

ได้ต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

เพื่อให้การวิจัยการพัฒนาระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนสำเร็จรวดเร็วภายในระยะเวลาที่กำหนดประมาณ 12 เดือน จึงขอแบ่งวิธีการวิจัยดังขั้นตอนต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลทั่วไปของระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน
2. ศึกษาข้อมูลและวิธีการออกแบบหัววัดกระแสไหลวน (Eddy Current Probe)
3. ออกแบบและสร้างระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน
4. ทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา
5. ปรับปรุงคุณภาพของระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน
6. สร้างต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน
7. สรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

บทที่ 2

การตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบ

Coating Thickness Measurement

วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้งานอยู่ในทุกวันนี้ล้วนแล้วแต่ผ่านการเคลือบแทบทั้งสิ้น ความหนาของชั้นเคลือบจะต้องทำการตรวจวัดอย่างแม่นยำ และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการเพิ่มมูลค่าหลายปีที่ผ่านมาวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบได้ถูกทำการพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายชิ้นงาน และยังคงครอบคลุมการตรวจวัดของชั้นเคลือบและวัสดุประเภทต่างๆ

สำหรับในบทนี้จะอธิบายถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบ[1-2] และการประยุกต์ใช้งานเพียงบางส่วน ซึ่งการใช้งานเฉพาะทางก็จำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่เฉพาะทางด้วยเช่นกัน เช่น การเคลือบของเหลวและผงลงบนชิ้นส่วนของตัวถังรถยนต์ การเคลือบอะลูมิเนียมด้วยออกไซด์ การเคลือบทองลงบนแผงวงจรไฟฟ้า หรือความหนาของสีที่ทาภายนอกอาคาร เช่น สะพานหรือแท่งค้ำน้ำ เป็นต้น ดังนั้น การเข้าใจพื้นฐานของวิธีการจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้และออกแบบให้เหมาะสมกับงานที่จะทำการวัด

2.1 วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

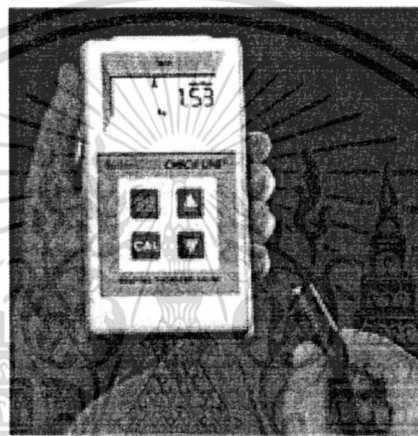
วิธีการนี้ใช้ในการตรวจวัดสารเคลือบที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กซึ่งเคลือบอยู่บนเหล็กและมีชั้นของสารที่มีความเป็นแม่เหล็กเคลือบอยู่ด้านบนสุดอีกชั้นหนึ่งเมื่อหัววัดอยู่ในตำแหน่งด้านบนของตัวอย่างจะทำการตรวจวัดระยะห่างระหว่างปลายของหัววัดที่สัมผัสกับผิวหน้าของตัวอย่างและฐานของขั้วสเตเรต

ภายในหัววัดจะประกอบด้วยขดลวดที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กสลับ เมื่อหัววัดอยู่บนตัวอย่าง ความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเป็นแม่เหล็กของชั้นเคลือบหรือขั้วสเตเรตการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำจะถูกตรวจวัดด้วยตัวชุดขดลวดชุดที่สองที่อยู่ในหัววัด ผลลัพธ์ที่ได้จากขดลวดที่สองนี้จะถูกนำมาแปรผลผ่านทางระบบดิจิทัล

วิธีการนี้ทำได้อย่างรวดเร็วด้วยเครื่องมือขนาดตั้งโต๊ะหรือแบบพกพา โดยส่วนใหญ่งานที่ใช้วิธีการนี้ได้แก่ การเคลือบเหล็กหรือเหล็กกล้าด้วยของเหลวหรือผง เช่น โครเมียม สังกะสี แคดเมียม หรือฟอสเฟต เป็นต้น สารเคลือบจะต้องมีปริมาณมากกว่า 0.1 มิลลิเมตรจึงจะสามารถใช้วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำได้ นอกจากนี้ผู้ใช้งานต้องพึงระลึกอยู่เสมอว่าผลลัพธ์ที่ได้อาจเกิดความผิดพลาดได้เมื่อนำไปใช้ตรวจวัดเหล็กที่เคลือบด้วยนิกเกิล เพราะนิกเกิลมีความเป็นแม่เหล็กเพียง

บางส่วนทำให้หัววัดไม่สามารถอ่านค่าได้อย่างถูกต้องดังนั้นวิธีการ phase-sensitive eddy current จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากกว่าสำหรับการการเคลือบเหล็กกล้าด้วยสังกะสี หัววัดจะอ่านค่าความหนาของสารเคลือบทั้งหมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นที่สามารถตรวจวัดความหนาของสารแต่ละชั้นได้

เครื่องมือที่ใช้วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำจำเป็นต้องได้รับการทดสอบและสอบเทียบบ่อยครั้งด้วยข้อผิดพลาดที่ยังไม่ผ่านการเคลือบ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือรุ่นใหม่ ๆ สามารถทำการตรวจวัดข้อผิดพลาดและทำการสอบเทียบได้ด้วยตัวเอง ซึ่งเหมาะสำหรับการตรวจวัดที่ไม่ทราบว่าเป็นข้อผิดพลาดเป็นวัสดุชนิดใดและไม่สามารถหาข้อผิดพลาดที่ไม่ผ่านการเคลือบได้



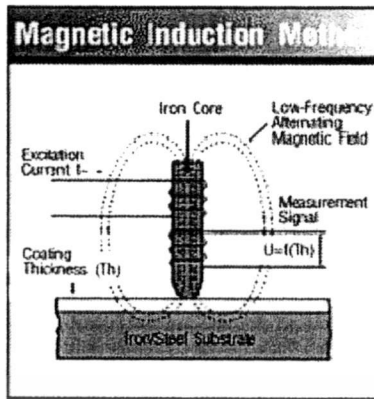
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

2.2 วิธีการกระแสไหลวน(Eddy Current)

วิธีการนี้ใช้ตรวจวัดสารเคลือบที่ไม่เป็นตัวนำที่อยู่บนชั้นสเตรตที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กหรือสารเคลือบที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กบนชั้นสเตรตที่ไม่เป็นตัวนำการตรวจวัดด้วยวิธีการ Eddy Current คล้ายคลึงกับวิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำและหัววัดที่ใช้ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน

หัววัดของวิธีการนี้ประกอบด้วยขดลวดที่ทำงาน 2 ลักษณะ คือ กระตุ้น และตรวจวัด หัววัดจะถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสลับความถี่สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าความถี่สูง เมื่อหัววัดอยู่ใกล้กับตัวนำไฟฟ้าจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า eddy current ขึ้นในตัวนำ เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของขดลวดในหัววัด ระยะระหว่างขดลวดหัววัดกับ ชั้นสเตรต ใช้คำนวณปริมาณของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานซึ่งสัมพันธ์กับความหนาของชั้นเคลือบ โดยทั่วไปงานที่ใช้วิธีการนี้ ได้แก่ การเคลือบ อะลูมิเนียมหรือสแตนเลส ที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กด้วยของเหลวหรือผงและการเคลือบอะลูมิเนียมด้วยออกไซด์

หัววัดของวิธีการ Eddy Current ไม่สามารถนำไปใช้ตรวจวัดความหนาของสารเคลือบที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็กซึ่งเคลือบอยู่บนชั้นสเตรตที่มีความเป็นแม่เหล็กได้



รูปที่ 2.2 วิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำ



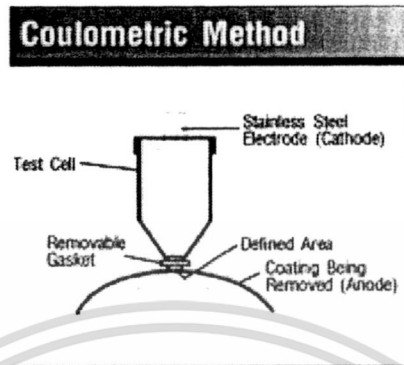
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วิธีการกระแสไหลวน

2.3 วิธีการ Coulometric

เทคโนโลยีการตรวจวัดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีการตรวจวัดโดยทำสายชิ้นงาน มีการนำไปใช้ในหลายๆงาน โดยการตรวจวัดความหนาของนิกเกิลที่เคลือบอยู่บนชิ้นส่วนของรถยนต์ก็เป็นหนึ่งในงานเหล่านั้นด้วยวิธีการนี้น้ำหนักของพื้นที่สารเคลือบที่ทราบขนาดที่แน่นอนจะถูกตรวจวัดผ่าน localized anodic stripping ของสารเคลือบ แล้วทำการคำนวณมวลต่อพื้นที่ของความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้ electrolysis cell ซึ่งเติมด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ชนิดพิเศษในการ strip เฉพาะสารเคลือบ กระแสไฟฟ้าคงที่จะไหลผ่านเซลล์ และเนื่องจากสารเคลือบถูกทำให้มีลักษณะเป็นแอนโอด ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน เมื่อความหนาแน่นกระแสและพื้นที่ผิวมีค่าคงที่ ค่าความหนาของชั้นเคลือบจะแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการstripสารเคลือบ

วิธีการนี้สามารถตรวจวัดได้เฉพาะกับสารเคลือบและชั้นสเตอริทที่เป็นตัวนำไฟฟ้า โดยสามารถใช้วัดความหนาชั้นเคลือบของวัสดุที่ผ่านการเคลือบหลายๆชั้นได้ เช่น วัดความหนาของ

นิกเกิลและทองแดงที่เคลือบอยู่บนเหล็ก หรือ โครเมียม /นิกเกิล/ทองแดงที่เคลือบอยู่บนพลาสติก เป็นต้น



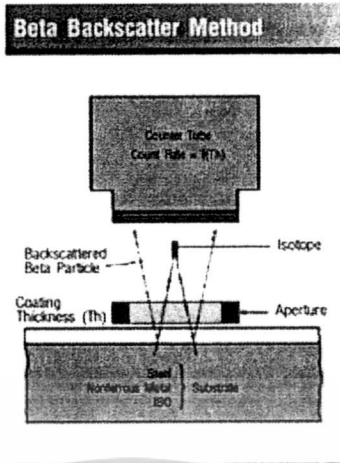
รูปที่ 2.4 วิธีการ Coulometric Method

2.4 วิธีการสะท้อนกลับของเบต้า

วิธีการนี้ตัวอย่างจะถูกกระทำด้วยอนุภาคเบต้าจากไอโซโทปที่มีกรมปลดปล่อยอนุภาคเบต้า โดยลำของเบต้าจะผ่านไปยังสารเคลือบแล้วเกิดการสะท้อนกลับไปยังช่องเล็กๆ ของท่อไกเกอร์มูลเลอร์ (Geiger Muller tube; GM tube) แก๊สที่อยู่ในท่อ GM เกิดการแตกตัวทำให้เกิดการคายประจุระหว่างอิเล็กโทรดทันที ประจุที่คายออกมาอยู่ในรูปของสัญญาณซึ่งจะถูกตรวจวัดและแปลงผลเป็นค่าความหนาของชั้นเคลือบ

วัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำจะให้อัตราการสะท้อนกลับของอนุภาคเบต้าต่ำกว่าวัสดุที่มีเลขอะตอมมากกว่า ตัวอย่างเช่น ทองแดงที่มีทองเป็นสารเคลือบซึ่งมีความหนา 40 ไมครอน อนุภาคเบต้า จะกระเจิงโดยทั้งตัว ซับสเตรต เองและสารเคลือบ ถ้าทองมีความหนาเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้อัตราการสะท้อนกลับเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอัตราการกระเจิงจึงถูกนำมาใช้ในการวัดความหนาของชั้นเคลือบ ผลที่ได้จากวิธีการนี้จะเชื่อถือได้ก็คือเมื่อเลขอะตอมของสารเคลือบและซับสเตรต มีค่าต่างกัน 20 เปอร์เซนต์ ตัวอย่างของชิ้นงานที่ใช้วิธีการนี้ได้แก่ การเคลือบทองเงินหรือดีบุกบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องจักร การชุบเคลือบท่อโลหะต่างๆ การเคลือบ vapor-deposited ลงบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซรามิกส์หรือแก้ว เป็นต้น

วิธีการนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีชั้นเคลือบหนาหรือสารเคลือบและซับสเตรตมีการรวมตัวกัน ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยวิธีการแม่เหล็กเหนี่ยวนำหรือวิธีการ Eddy Current และมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์แต่วิธีการที่เหมาะสมสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะผสม เช่น ดีบุก/ตะกั่วที่เคลือบบนทองแดงหรือดีบุกที่เคลือบบนฟอสฟอรัส/ทองสัมฤทธิ์คือวิธีการเรืองแสงของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.5 วิธีการสะท้อนกลับของเบต้า

2.5 วิธีการเรียงแสงของรังสีเอ็กซ์

วิธีการนี้สามารถใช้ตรวจวัดวัสดุได้หลายประเภท เช่น ตรวจวัดสารเคลือบชั้นบางๆ หลายชั้นที่เป็นโลหะผสมบนชิ้นส่วนขนาดเล็กหรือมีรูปร่างที่ซับซ้อนและไม่ต้องสัมผัสกับตัวอย่างหรือชิ้นงาน การใช้งานสามารถทำได้โดยการแผ่รังสีเอ็กซ์ collimator ทำหน้าที่รวมรังสีเอ็กซ์ให้ไปตก ณ ตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัดได้อย่างแม่นยำการแผ่รังสีเอ็กซ์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ เช่น การเรียงแสงจากตัวอย่างทั้งสารเคลือบและชั้นสเตรต ซึ่งสามารถตรวจจับได้ด้วย energy dispersive detector การเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถวัดค่าการแผ่รังสีเอ็กซ์ได้เฉพาะจากสารเคลือบหรือชั้นสเตรตเท่านั้นจึงเหมาะสำหรับวัสดุที่ผ่านการเคลือบหลายชั้นโดยทั่วไปงานที่ใช้วิธีการตรวจวัดนี้ได้แก่ แผงวงจรไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อณูมณี และอุปกรณ์เชิงแสง

แต่วิธีการเรียงแสงของรังสีเอ็กซ์ นี้ไม่สามารถใช้ได้กับสารเคลือบที่เป็นออร์แกนิกส์ เพราะมีการจำกัดความหนาให้มีค่าไม่เกิน 0.5-0.8 มิลลิเมตร แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้สามารถใช้ตรวจวัดความหนาของสารเคลือบและชั้นสเตรตที่มีเลอะซ้อนกันหรือใกล้เคียงกันได้ เช่น นิกเกิลที่เคลือบอยู่บนทองแดง ความแตกต่างของโลหะผสมจะมีผลต่อการสอบเทียบเครื่องมือ เพราะการวิเคราะห์พื้นฐานของวัสดุ เช่น การตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบจะต้องให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำด้วยความเจริญก้าวหน้าของระบบรังสีเอ็กซ์และโปรแกรมซอฟต์แวร์ช่วยให้ลดภาระด้านการสอบเทียบหลายเท่าตัวประหยัดเวลาและช่วยปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น

2.6 เกจวัดความหนาของชั้นเคลือบแบบพกพา

โดยทั่วไปแล้วเกจเหล่านี้จะมีการทำงานแบบแม่เหล็กเหนี่ยวนำและแบบ Eddy Current หรือรวมการทำงานของทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ทุกวันนี้บริษัทต่างๆ มีงานประยุกต์มากขึ้นการเลือกใช้ เกจวัดให้เหมาะสมกับงานจึงเป็นสิ่งที่เพิ่มความยุ่งยากให้แก่ผู้ใช้เกจวัดแบบพกพาทั้งแบบมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 7

หัววัดภายในตัวหรือแบบต่อสายเคเบิลจึงกลายมาเป็นสิ่งที่จะคอยอำนวยความสะดวกในการวัดพื้นผิวตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์หรือเครื่องบิน ได้ด้วยมือเพียงข้างเดียว อุปกรณ์ที่สามารถถอดหัววัดได้จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่าแบบที่มีหัววัดในตัว อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนหัววัดได้เมื่อมีการเปลี่ยนงานที่ทำ

เกจวัดแบบพกพาหลายๆ ตัวมีความสามารถในการเชิงสถิติอย่างครบถ้วนสมบูรณ์ ไม่ว่าจะเป็นค่าเฉลี่ยที่คงที่ ค่าความคลาดเคลื่อนในระดับต่ำ สูง หรือมาตรฐาน ซึ่งสามารถดาวน์โหลดเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะบอกรายละเอียดต่างๆ ของขั้นตอนในการควบคุม บางชนิดสามารถส่งข้อมูลต่างๆ ผ่านเครื่องแปลงสัญญาณคลื่นวิทยุแบบไร้สายได้ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องรอให้การตรวจวัดเสร็จสิ้นสมบูรณ์ก็สามารถทราบผลได้ทันที

การตรวจวัดความหนาของชั้นเคลือบจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพราะจะส่งผลกระทบต่อค่าที่อ่านได้ ตัวอย่างของสิ่งที่มีผลต่อการตรวจวัด ได้แก่ ระยะห่างของหัววัดและชิ้นงาน ผิวหน้าชิ้นงานที่มีความโค้ง ความหนาและความเป็นแม่เหล็กของซับสเตรตการใช้ความร้อนอนุภาคที่มีความเป็นแม่เหล็กในสารเคลือบ สนามแม่เหล็กภายนอกและกำลังแม่เหล็กที่ตกค้าง ความขรุขระของผิวหน้า และแรงที่มากระทำ เช่น แรงดันจากหัววัด

การสอบเทียบเครื่องมือสามารถทำได้โดยการตรวจวัดแผ่นฟอยล์ที่ผ่านการรับรองซึ่งเคลือบอยู่บนซับสเตรตที่ต้องการใช้งานจริงการสอบเทียบแบบนี้สามารถเก็บผลและค่าที่ได้ไว้ทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์บางส่วนใหม่เสมอ

การวัดพื้นผิวที่มีความโค้งต่างกันทำให้ต้องมีการสอบเทียบหัววัดอยู่เสมอ แต่หัววัดบางประเภทมีการออกแบบพิเศษให้เสมือนสามารถกำจัดค่าความโค้งและให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานกับพื้นผิวใดๆ ได้โดยไม่ต้องทำการสอบเทียบใหม่

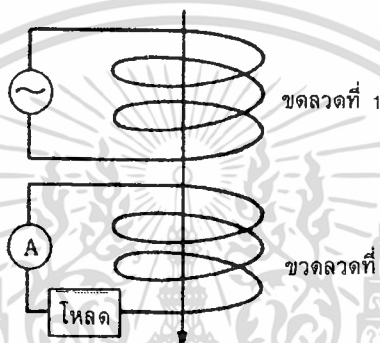
2.7 บทสรุป

วิธีการวัดความหนาของชั้นเคลือบนั้นมีด้วยกันหลายวิธีอุปกรณ์หรือเกจที่ใช้ในการตรวจวัดอีกทั้งขนาดนั้นก็ยังมีหลากหลายประเภท ข้อควรรู้สำหรับพื้นฐานข้อดี ข้อจำกัดของทั้งวิธีการและอุปกรณ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญสำหรับการตัดสินใจในการเลือกวิธีการและเครื่องมือให้เหมาะสมตามความต้องการใช้งาน

บทที่ 3

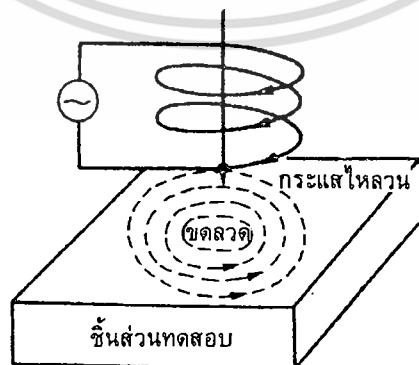
การทดสอบโดยวิธีใช้กระแสไหลวน (Eddy Current Testing)

การทดสอบโดยวิธีใช้กระแสไหลวนเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมน้อยมาก[3-7] เพราะการทดสอบแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่มากนัก สำหรับหลักการทำงานเบื้องต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1 ปรากฏการณ์การเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 เมื่อให้กระแสไฟสลับไหลผ่านขดลวด 1 แล้วนำเข้าไปใกล้ขดลวดที่ 2 ก็จะเกิดปรากฏการณ์เหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 และมีกระแสไฟฟ้าสลับไหลในวงจรไฟฟ้านั้น ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ในรูปที่ 3.2 เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไฟสลับไหลเข้าไปใกล้ชิ้นส่วนทดสอบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไหลวนรอบ ๆ ชิ้นส่วนทดสอบ



รูป 3.2 ลักษณะการเกิดกระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบโดยใช้คุณสมบัติการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านี้เป็นการใช้สนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อนำสนามแม่เหล็กเข้าไปใส่สารตัวนำ เช่น พลาสติกที่เป็นแผ่นโลหะ แล้วใช้ผลของการเกิดกระแสเหนี่ยวนำหรือความเป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสารตัวนำ เพื่อการทดสอบวัสดุ เนื่องจากหลักการทดสอบนี้ใช้กระบวนการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในความหมายกว้าง ๆ แล้วจึงเรียกวิธีการทดสอบนี้ว่า การทดสอบโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการใช้ผลของการเกิดกระแสไหลวนขึ้นในวัสดุตัวนำจากการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีการเรียกอีกชื่อว่าการทดสอบโดยใช้กระแสไหลวน วิธีการทดสอบโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า

ส่วนมากในการใช้การทดสอบโดยวิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะให้กระแสสลับความถี่หลายเมกะเฮิรตซ์(MHz) ไหลผ่านขดลวดแล้วนำขดลวดเข้าไปใส่วัสดุตัวนำ ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของขดลวดหรือวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด บางครั้งแทนที่จะใช้กระแสสลับอาจใช้กระแสพัลส์หรือในบางกรณีโพรบที่ใช้เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอาจใช้เป็นแบบที่อาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall's effect)

3.1 ชนิดของการทดสอบโดยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ลักษณะการเกิดกระแสไหลวน หรือสภาพสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำหรือชิ้นส่วนทดสอบ จะมีค่าหรือลักษณะแตกต่างกันไปตามสภาพหรือองค์ประกอบต่างๆ ของคุณสมบัติของตัวนำ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า(Conductivity) , ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability) ลักษณะ รูปร่าง ตลอดจนขนาดของชิ้นส่วนการมีรูหรือรอยแตก นอกจากนี้ระยะระหว่างขดลวดกับชิ้นส่วนทดสอบก็มีผลอีกด้วย ซึ่งค่าแปรเปลี่ยนต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวดัชนีแสดงผลต่าง ๆ ในการทดลองจึงได้มีการนำผลจากการทดสอบการเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาใช้เป็นกรรมวิธีในการตรวจหาคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การหารอยแตกร้าวในวัสดุ การหาคุณสมบัติของวัสดุ(การตรวจหาวัตถุแปลกปลอม) การวัดความหนาของชั้นฟิล์ม การตรวจหาขนาด ซึ่งจะสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายประการ

3.1.1 การตรวจหารอยร้าว (Magnetic Flaw Detector)

รอยร้าวตลอดจนรอยบกพร่องอื่น ๆ จะเป็นตัวขัดขวางการไหลของกระแสมีผลกระทบต่อการกระจายของกระแสไหลวน ตลอดจนขนาดของกระแสไหลวนด้วย การทดลองตรวจสอบจึงเป็นการหาเพื่อแสดงลักษณะของรอยบกพร่อง ซึ่งจากกรรมวิธีในการตรวจหารอยบกพร่องนี้ได้นำมาใช้ในการตรวจสอบสินค้า ตรวจสอบชิ้นงานระหว่างผลิต ตลอดจนตรวจสอบเพื่องานซ่อมบำรุง นอกจากนี้จะต้องมีการเลือกอุปกรณ์ วิธีการและลักษณะขดลวดทดสอบให้เหมาะกับขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนทดสอบด้วย

(ก) การตรวจสอบชิ้นงาน หรือผลิตภัณฑ์

เหล็ก, ท่อที่ทำจากเหล็ก หรือเหล็กกล้า และวัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเป็นแท่ง ตลอดจนเส้นลวดนั้น ลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถจัดให้มีการตรวจสอบชิ้นงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ทุกชิ้นที่กำลังผลิตอยู่ โดยใช้ดูว่ามีรอยบกพร่องบริเวณผิวหรือใกล้ ๆ กับผิวหรือไม่ (ใช้คู่มือในผิวนอกหรือบริเวณเนื้อในของท่อที่ไม่หนามากนัก). โดยทั่วไปใช้วิธีให้ชิ้นงานผ่านขวดรด วิธีนี้จะตรวจเห็นขนาดของรอยบกพร่องเป็นสัดส่วนสัมพันธ์กับขนาดของชิ้นงาน สำหรับรอยบกพร่องที่มีขนาดเล็กเทียบเท่ากับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ ในปัจจุบันใช้โพรบที่หมุนได้รอบ ซึ่งแม้ว่าถ้าเทียบความละเอียดในการตรวจหารอยบกพร่องแล้วแบบโพรบดีกว่าแบบขวดรดก็จริง แต่การทำงานช้ากว่า นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ ตลอดจนค่าความละเอียด โดยใช้ชิ้นส่วนที่มีรอยบกพร่อง ที่ทำขึ้นเทียบกับขนาดของชิ้นงานทดสอบ

(ข) การตรวจสอบในกระบวนการผลิต (Intermediate Inspection)

ใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกระบวนการผลิต ซึ่งก็เหมือนกับการตรวจผลิตภัณฑ์สำเร็จเป็นการตรวจชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อหรือแท่งต่างๆ เพื่อให้พบจุดบกพร่องได้เร็วเพื่อใช้ในการควบคุมขั้นตอนการแปรรูป โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ผลการวัดมักแจ้งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อป้อนข้อมูลกลับ (Feed Back) ได้อย่างรวดเร็ว วิธีนี้มักใช้ประกอบกับการตรวจผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเพื่อควบคุมคุณภาพ

(ค) การตรวจเพื่อการบำรุงรักษา

ในโรงงานเคมี หรือ โรงกลั่นน้ำมัน ชิ้นส่วนพวกท่อตลอดจนชิ้นส่วนท่อขนาดเล็กๆ ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) จำเป็นต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะ การตรวจสอบชิ้นส่วนของเครื่องชนิดในเครื่องบิ่นก็เช่นกัน การตรวจสอบภายในท่อนั้น ใช้ขวดรดสอดเข้าด้านในของท่อ ส่วนการตรวจสอบชิ้นส่วนของเครื่องจักร มักใช้โพรบเป็นส่วนใหญ่

3.1.2 การตรวจสอบวัสดุเพื่อคัดแยกหาวัสดุที่ต่างชนิดกัน

การใช้วิธีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าตรวจสอบวัสดุ สำหรับการตรวจสอบส่วนผสม (Components) ของวัสดุประเภท โลหะนั้น ใช้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้า (หรือความต้านทานไฟฟ้า) ที่แปรเปลี่ยนหลังจากการจัดการทางความร้อน (Heat Treatment) นอกจากนี้ยังใช้การดูค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนอีกด้วย

ส่วนวัสดุประเภทที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก เช่น สารประเภท ทองแดง, อลูมิเนียม ใช้การวัดค่าตัวนำไฟฟ้าถ้าเป็นสารพวกเหล็ก มักใช้ค่าแตกต่างของความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก ตลอดจนลักษณะแตกต่างของฮิสเตอร์ซิสแม่เหล็ก การใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านั้น เนื่องจากกระแสไหลวนเกิดขึ้นที่ผิวจึงต้องระมัดระวังผลกระทบจากคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ไฟฟ้าของผิวนอกของวัสดุด้วย

นอกจากนี้ ยังใช้วิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจหาสาร โลหะในเนื้อของสารโลหะได้อีกด้วย

3.1.3 การวัดความหนาของชั้นฟิล์ม

เมื่อระยะระหว่างขดลวดทดสอบกับตัวนำเปลี่ยนไปค่าที่อ่านได้ก็จะเปลี่ยนไปปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Lift Off Effect ซึ่งนำมาใช้ในการวัดความหนาของชั้นฟิล์มของสารที่ไม่เป็นตัวนำที่เคลือบชั้นวัสดุอยู่ วิธีนี้มีการนำมาใช้เพื่อการวัดความหนาของฟิล์ม อัลไมท์ นอกจากนี้ ก็ยังนำมาใช้วัดความหนาของชั้นฟิล์ม โลหะบาง ๆ ด้วย

3.1.4 การตรวจสอบระยะ รูปร่าง

เนื่องจากระยะระหว่างขดลวดทดสอบกับวัสดุทดสอบที่แตกต่างกัน จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้เปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถใช้ในการวัดระยะ และวัดขนาดหรือรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ตาราง 3.1 แสดงการใช้การตรวจชิ้นงานด้วยวิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ตาราง 3.1 การใช้วิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบวัสดุในลักษณะต่างๆ

ชนิดของการตรวจสอบ	องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไหลวน	ขดลวดตรวจสอบ	วัสดุที่นำมาทดสอบ
การตรวจสอบหารอยร้าว	รอยบกพร่อง รูปร่าง, ขนาด, ตำแหน่ง)	ขดลวดแบบขดวงกลม กลวง(Annular Coil)	ท่อ, เส้น, แท่งกลม
		โพรบคอยล์ (Probe Coil)	แท่งกลม, บิลเลท, แผ่น, ท่อ
		ขดลวดแบบสอดใน (Inside Coil)	ท่อ, รู
การตรวจสอบวัสดุ	การนำไฟฟ้า	โพรบคอยล์ ขดลวดแบบขดวงกลมกลวง	วัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก
	ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก	ขดลวดแบบขดวงกลม กลวง	วัสดุเหล็กหรือเหล็กกล้า
การตรวจวัดความหนาของชั้นฟิล์ม	ระยะระหว่างขดลวดกับตัวนำ	โพรบคอยล์	ความหนาของชั้นของสารอโลหะบนผิวของโลหะ
	ค่าเปลี่ยนของความหนาของชั้นฟิล์ม		ความหนาของโลหะ
การตรวจวัดระยะและรูปร่าง	ระยะ, รูปร่าง, ขนาด	โพรบคอยล์	โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ลักษณะพิเศษของการตรวจสอบโดยใช้ความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จุดเด่นหรือลักษณะพิเศษของการตรวจสอบโดยใช้ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่แตกต่างจากการตรวจสอบแบบไม่ทำลายแบบอื่น ๆ มีดังนี้

(1) ของที่มีลักษณะท่อ เส้น ท่อนกลม จะสามารถตรวจได้อย่างรวดเร็วและทำการตรวจทุกชิ้น โดยเครื่องอัตโนมัติได้

(2) สามารถตรวจวัด แม้มันที่อุณหภูมิสูง ชิ้นงานเส้นเล็ก ๆ หรือภายในรู ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีอื่นทำแทบไม่ได้

(3) ค่าที่วัดได้สามารถรับเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ ทำให้สามารถนำมาใช้ในการประมาณขนาดรอยบกพร่อง,และนำไปใช้ในการควบคุมการผลิตได้ง่าย

(4) การตรวจหารอยร้าว ตลอดจนตรวจเนื้อวัสดุ สามารถให้ข้อมูลจำนวนมากในเวลาเดียวกันได้

(5) สามารถเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้ ทำให้มีประโยชน์ต่อการตรวจเพื่อบำรุงรักษาจุดค้อย หรือข้อเสียของการตรวจวัด โดยวิธีใช้การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็มีดังนี้

(1) การตรวจหาจุดบกพร่องบริเวณผิว ทำให้ผลดีมาก แต่บริเวณที่ลึกลงไปจะตรวจได้ยาก

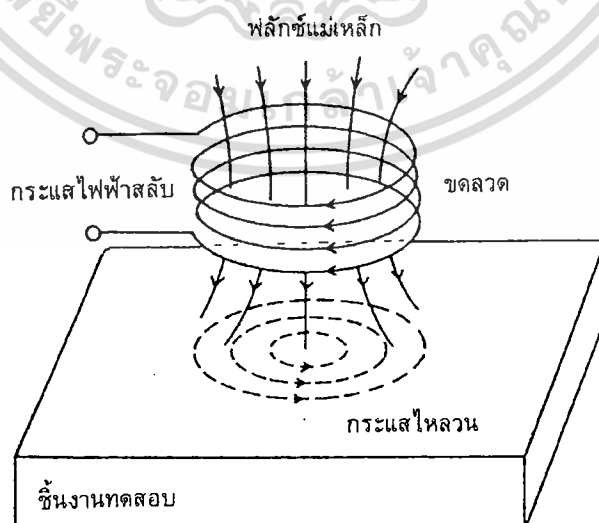
(2) ค่าที่วัดได้จะได้รับอิทธิพลจากการสั่นสะเทือน, ชนิดของวัสดุ ขนาดของวัสดุและสัญญาณรบกวน(Noise) อื่น ๆ ได้ง่าย

(3) การจะตรวจเพื่อแยกแยะชนิด รูปร่าง ขนาดของรอยบกพร่องให้แน่นอนและละเอียดทำได้ยาก

(4) มีประสิทธิภาพต่ำในการจะตรวจหารอยร้าวทั้งหมดของชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน

3.3 หลักการของกระแสไหลวน

3.3.1 การเกิดกระแสไหลวน



รูปที่ 3.3 การเกิดกระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไฟผ่านเข้าใกล้ชิ้นตัวนำ (ชิ้นงานทดสอบ) บริเวณรอบ ๆ ขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กกระทำต่อชิ้นตัวนำ เนื่องจากสนามแม่เหล็กของขดลวดนั้นเกิดจาก กระแสสลับ ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อชิ้นตัวนำจะมีทิศทางและขนาดแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่ง ในกรณีเช่นนี้จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อชิ้นตัวนำ จึง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนของฟลักซ์ แม่เหล็กบนตัวนำนี้ในรูป 3.3 จะแสดงเป็นเส้นประไปรอบ ๆ เส้นแรงบนตัวนำ ซึ่งลักษณะของกระแสที่ เกิดขึ้นบนตัวนำนี้เรียกว่า กระแสไหลวน ขนาดของกระแสไหลวนที่เกิดบนชิ้นตัวนำ ตลอดจนลักษณะการ กระจายขึ้นอยู่กับจำนวนความถี่ ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นตัวนำ ค่าแม่เหล็ก รูปร่างและขนาดของชิ้นตัวนำ กระแสในขดลวด ระยะที่ห่างจากชิ้นตัวนำ และแปรเปลี่ยนตามลักษณะของรอยบกพร่อง เช่น รอยแตกบน ชิ้นตัวนำดังที่แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รอยบกพร่องกับกระแสไหลวน

ดังนั้น จากการดูลักษณะการแปรเปลี่ยนการไหลของกระแสไหลวนบนชิ้นส่วนทดสอบก็จะ ทราบได้ว่ามีรอยบกพร่องบนชิ้นงานหรือไม่

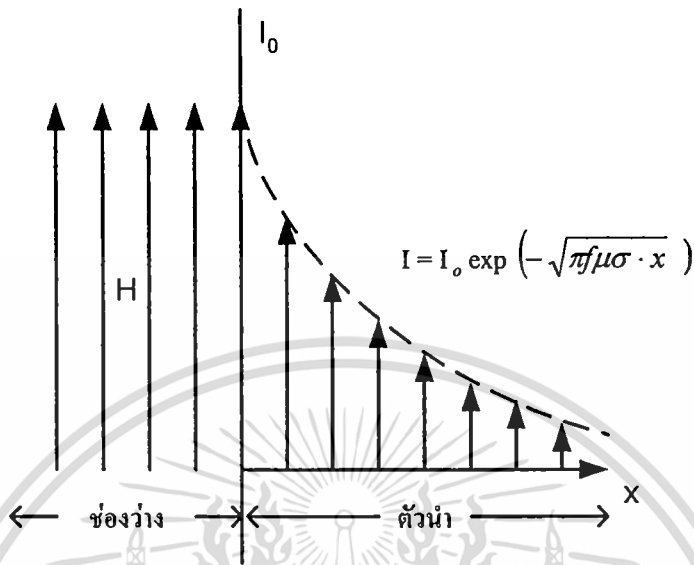
3.3.2 ปรากฏการณ์ที่ผิวกับความลึกที่ผ่านเข้า (Skin Effect & Penetration)

เมื่อผ่านกระแสสลับที่มีความถี่สูงเข้าไปในเส้นลวดตัวนำ กระแสจะรวมกันไหลอยู่ตาม บริเวณใกล้ ๆ ผิวหน้า และไหลในบริเวณศูนย์กลางในปริมาณน้อย ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ ที่ผิว (Skin Effect) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็ก การตรวจสอบโดยใช้การ เหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นภายในสารตัวนำ จึงจำเป็นต้องนำปรากฏการณ์ที่ผิวนี้มาพิจารณาด้วย

ในรูปที่ 3.5 ถ้าให้สารตัวนำมีลักษณะกว้างถึงไม่รู้จบ และมีสนามแม่เหล็ก H จาก กระแสสลับมากระทำกระแสไหลวน I ที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงไปตามสัดส่วนกับระยะทางจากผิว X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = I_0 \exp(-\sqrt{\pi f \mu \sigma} \cdot x) \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.5 ปรากฏการณ์ที่ผิว

ในที่นี้ I_0 เป็น ค่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวนำ ($x=0$)

f เป็น ค่าความถี่ของกระแสสลับ

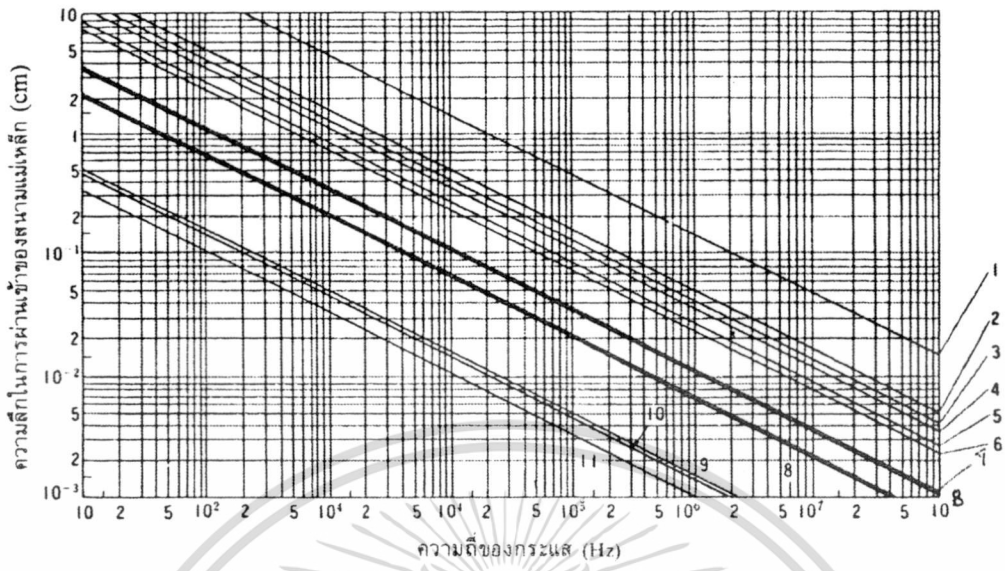
μ เป็น ค่าความซาบซึ่มได้ทางแม่เหล็ก

σ เป็น ค่าการนำไฟฟ้า

ตามสูตรที่ 3.1 ถ้าให้ค่าในวงเล็บ $= -1$ กล่าวคือให้ $\sqrt{\pi f \mu \sigma} \cdot x = 1$ และ $x = \delta$ แล้วจะได้ว่า

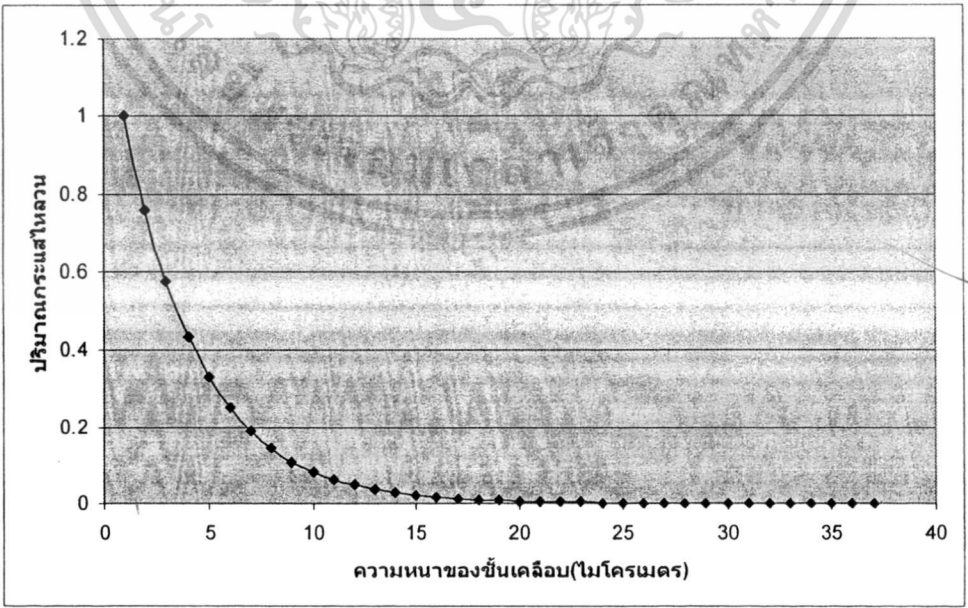
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3.2)$$

δ จะเป็นค่า x ซึ่ง I ที่ตำแหน่งนั้นมีค่า $1/e$ ของ I_0 δ เป็นค่าที่ใช้แสดงควมลึกของการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็กประมาณ 37 % ของค่า I_0 จากสูตรนี้จะเห็นได้ว่า ถ้าค่า f, μ หรือ σ มีค่ามากขึ้น ค่าควมลึกในการผ่านเข้าก็จะลดลง ดังนั้นการใช้การตรวจสอบโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะตรวจหาค่าควมลึกให้มากขึ้นไปจากค่าควมลึกดังกล่าวเป็นหลาย ๆ เท่าย่อมเป็นไปได้ยาก ซึ่งจากสูตรที่ 3.2 จำเป็นจะต้องกำหนดค่าของควมถี่เพื่อใช้ในการตรวจให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะต่างๆ ด้วย ในรูปที่ 3.6 แสดงค่าควมลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่าควมถี่



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสกับความลึกในการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็ก

สำหรับในโครงการวิจัยระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนนี้เราจะใช้ปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin Effect) นี้ในการประยุกต์ใช้ในการวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบ นั่นคือระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวน (Eddy current probe) และแผ่นโลหะที่ถูกเคลือบ โดยลักษณะของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะจะน้อยลงไปตามสัดส่วนกับระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวน (Eddy current probe) และแผ่นโลหะที่ถูกเคลือบ ดังรูปที่ 3.7

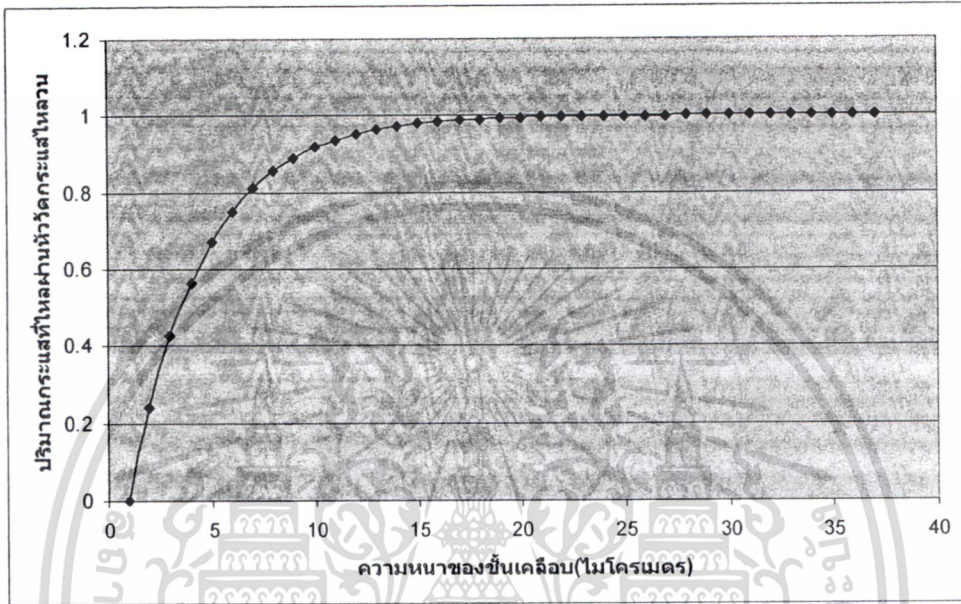


รูปที่ 3.7 ปริมาณกระแสไหลวนและความหนาของชั้นเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

จากรูปที่ 3.7 ปริมาณของกระแสไหลวนที่เกิดบนพื้นผิวของโลหะที่ทำการเคลือบผิวจะมีปริมาณมากขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบ ปริมาณกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบนโลหะนี้จะไปหักล้างกับปริมาณกระแสที่ไหลในหัววัดกระแสไหลวนทำให้กระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นเคลือบดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนและความหนาของชั้นเคลือบ

3.3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด

การตรวจสอบด้วยวิธีใช้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอาศัยขดลวดทำให้เกิดกระแสไหลวน ภายในชิ้นงาน แล้วตรวจหารอยบกพร่องในชิ้นงานโดยดูค่าแปรเปลี่ยนของกระแสไหลวน นั้น เนื่องจากข้อมูลที่วัดออกมาได้นั้นมาจากขดลวด จึงจำเป็นต้องรู้จักคุณสมบัติของอุปกรณ์ส่วนนี้ให้ดี ในวงจรกระแสสลับ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า I กับแรงดันไฟฟ้า V จะแสดงในรูปอิมพีแดนซ์ Z ดังนี้ คือ

$$Z = \frac{V}{I} \tag{3.3}$$

หน่วยที่ใช้เช่นเดียวกับหน่วยความต้านทานคือ โอห์ม (Ω) ค่าอินดักแตนซ์ (Inductance) เป็น L_o (H : Henry) ค่าความถี่ของกระแสสลับคือ f (Hz) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด

$$z_o = R_o + j\omega L_o \quad (\omega = 2\pi f ; j = \sqrt{-1}) \tag{3.4}$$

โดยที่

ค่า ωL_o นี้เรียกว่า ค่ารีแอกแตนซ์
ค่า L_o ของขดลวดชั้นเดียวหาได้ดังนี้

$$L_o = K \cdot \frac{\mu \pi a_o^2 N^2}{\ell} \quad [H] \quad (3.5)$$

โดยที่ μ_o (H/m) เป็นค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กในสูญญากาศ

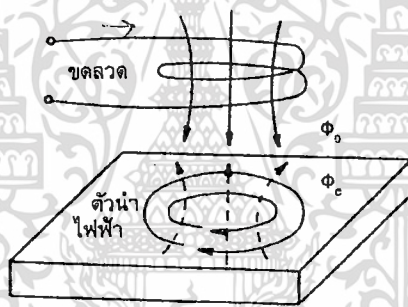
a_o (m) เป็นค่ารัศมีของขดลวด

ℓ (m) เป็นค่าความยาวของขดลวด

N เป็นค่าจำนวนรอบของขดลวด

K เป็นค่าสัมประสิทธิ์นิงาโอกา (Nagaoka's Coefficient), ซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่า

$2a/\ell$ ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.9 ขดลวดที่ใช้ตรวจสอบ โดยการเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง

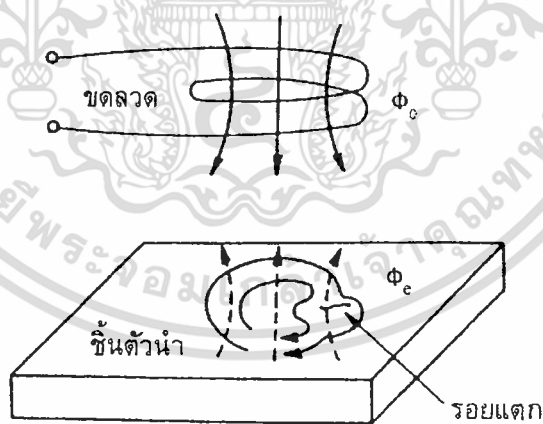
จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำขดลวดเข้าใกล้ชิ้นตัวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลวนภายในชิ้นตัวนำจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดนั้นเปรียบเทียบกับได้กับรูปแบบของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะเข้าใจได้ง่าย นั่นคือ ในการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงทางขดลวดทุติยภูมิ มีกระแสไหลมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เมื่อนำมาพิจารณาเทียบกับขดลวดที่มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ เมื่อนำเข้าใกล้ชิ้นตัวนำ จากผลของกระแสไหลวนทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดมีมากขึ้น นั่นคือ ในสภาพที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ เมื่อค่า I เพิ่มขึ้นจากสูตรที่ 3.3 แสดงว่าค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง นอกจากนี้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำในชิ้นตัวนำไฟฟ้า และค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กอีกด้วย ซึ่งในทำนองเดียวกันค่าของอิมพีแดนซ์ของขดลวดก็จะแปรเปลี่ยนไปตามตัวแปรเหล่านี้ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ชั้นตัวนำเป็นสารแม่เหล็กอยู่ด้วย คือมีค่า μ ใหญ่ จากสูตรที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าอินดักแตนซ์ที่เกิดจากกระแสไหลวนจะสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_0 ของขดลวด

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์นังกาโอกา

$\frac{2a}{l}$	K	$\frac{2a}{l}$	K	$\frac{2a}{l}$	K	$\frac{2a}{l}$	K
0	1.000	0.6	1.000	1.8	0.551	6	0.302
0.05	0.979	0.7	0.979	2.0	0.526	7	0.258
0.10	0.959	0.8	0.959	2.5	0.472	8	0.237
0.15	0.939	0.8	0.939	3.0	0.429	9	0.219
0.20	0.920	1.0	0.920	3.5	0.394	10	0.203
0.30	0.884	1.2	0.884	4.0	0.365	20	0.124
0.40	0.850	1.4	0.850	4.5	0.341	30	0.091
0.50	0.818	1.6	0.818	5.0	0.319	50	0.061



รูปที่ 3.10 ภาพกระแสไหลวนเปลี่ยนแปลงไปตามรอยร้าว

จากรูปที่ 3.10 ที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวของชิ้นงานถ้ามีรอยแตกร้ายที่ทำไม่ให้เกิดการต่อเนื่องจะทำให้กระแสไหลวนมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสนามแม่เหล็กจากกระแสไหลวนจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดที่เข้าใกล้ชั้นตัวนำแล้วตรวจพบว่าค่าอิมพีแดนซ์แปรเปลี่ยนไป ก็จะหาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวณไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยร้าวหรือรอยบกพร่องได้ ซึ่งลักษณะการตรวจสอบโดยหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในขดลวดนี้ เรียกว่า ขดลวดตรวจสอบแบบเหนี่ยวนำด้วยตนเอง ในการตรวจสอบโดยวิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านั้น การรู้ค่าการแปรเปลี่ยนของอิมพีแดนซ์สำคัญกว่าการรู้ค่าอิมพีแดนซ์จริงๆ ดังนั้น เวลาคิดค่าอิมพีแดนซ์จึงตัดส่วนค่าความต้านทานกระแสตรง R_o ของขดลวดซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับกระแสไหลวนออก ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเป็น ωL_o ถ้า Z เป็นอิมพีแดนซ์จริง และ Z_n เป็นอิมพีแดนซ์สัมพัทธ์ จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$Z = R + j\omega L \quad (3.6)$$

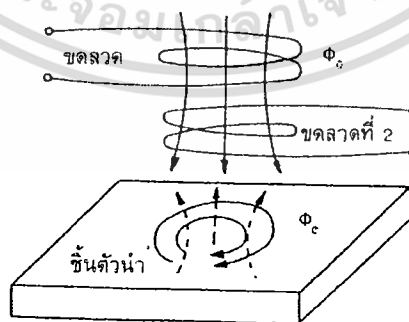
และ

$$Z = \frac{R - R_o}{\omega L_o} + j \frac{\omega L}{\omega L_o} \quad (3.7)$$

ในการแสดงรูปกราฟนั้นจะเขียน $(R - R_o) / \omega L_o$ ในแนวนอน $\omega L / \omega L_o$ ในแนวตั้ง

3.3.4 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด

จากรูปที่ 3.11 เมื่อให้ขดลวดที่ 1 เข้าใกล้ขดลวดที่ 2 จะเกิดกระแสแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 เมื่อนำขดลวดทั้ง 2 เข้าใกล้ขึ้นตัวนำกระแสไหลวนบนชิ้นตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 แปรเปลี่ยนไป นั่นคือ ถ้าทำการตรวจหาค่าแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 ได้ ก็จะทำให้รู้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางกระแสไหลวน ซึ่งจะใช้วิธีใดก็ตาม ผลทางการตรวจสอบไม่แตกต่างกัน ในวิธีการหาค่าโดยใช้การเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบร่วมกันนี้มีจุดดีคือ มีความยืดหยุ่นในการออกแบบขดลวดได้มากกว่า

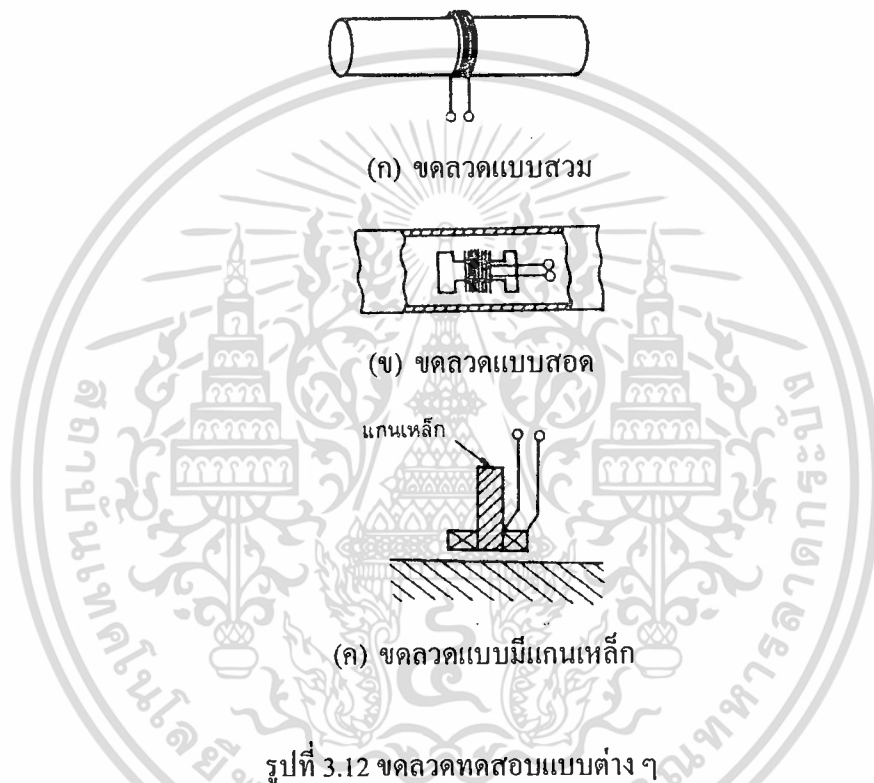


รูปที่ 3.11 ขดลวดตรวจสอบด้วยวิธีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกัน

3.4 วิธีการตรวจสอบ

3.4.1 ขดลวดที่ใช้ตรวจสอบและวิธีการ

ขดลวดที่ใช้ในการตรวจสอบนั้น ทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในชิ้นงานทดสอบและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนในชิ้นงานทดสอบนั้น ขดลวดทดสอบจะมีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน แต่เมื่อแยกออกไปเป็นประเภทใหญ่ ๆ แล้ว จะได้แสดงดังรูปที่ 3.12 คือขดลวดแบบสวม ขดลวดแบบสอด และขดลวดแบบมีแกนเหล็ก

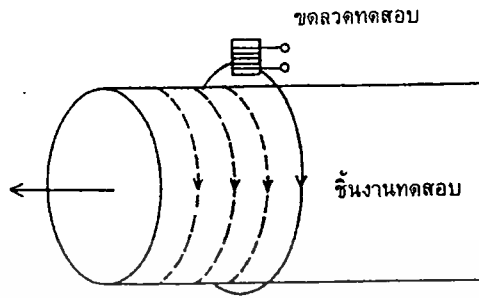


จากรูปที่ 3.12 (ก) นี้จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทดสอบจะใส่สอดผ่านขดลวด ชิ้นงานประเภทท่อ แท่งกลม หรือเส้นจะนำมาตรวจสอบได้ ซึ่งแบบนี้มีข้อดีที่ไม่ต้องแตะต้องกับชิ้นงาน หรือจุ่มรอยร้าวทำให้ตรวจได้เร็ว และมีประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 3.12 (ข) เป็นแบบขดลวดสำหรับสอดเข้าไปภายในท่อจะมีรูปแบบขดลวดคล้าย ๆ กับ (ก) ซึ่งใช้ในการบำรุงรักษาในการตรวจหาจุดบกพร่องของผิวภายในท่อ ประเภทอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchance) หรือท่อถ่ายเทความร้อน

จากรูปที่ 3.12 (ค) ซึ่งเป็นขดลวดแบบแกนเหล็กนั้น แกนของขดลวดจะตั้งฉากกับผิวของชิ้นงานทดสอบ ใช้ตรวจวัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อนกลม, ท่อและแผ่นตลอดจนก้อน โลหะดิบ (Ingot) ได้โดยการแตะกับผิววัสดุ นอกจากนี้จะใช้ตรวจหารอยร้าวหรือแผลแล้ว ยังใช้ตรวจชนิดของเนื้อวัสดุ ตลอดจนวัดความหนา

ของชั้นฟิล์มได้ รูปที่ 3.13 แสดงการใช้ขดลวดแบบมีแกนเหล็กในการตรวจหาแผลหรือรอยร้าวรอบ ๆ ผิวของท่อ โดยใช้วิธีแบบหมุนรอบขึ้นงาน

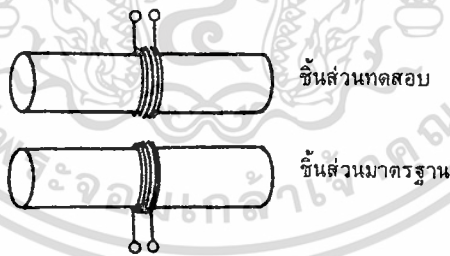


รูปที่ 3.13 การใช้ขดลวดแบบมีแกนเหล็กในลักษณะหมุนรอบท่อ

รูปที่ 3.14(ก) แสดงการวัดโดยใช้ขดลวด 2 ขด วางขนานกัน แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากขดลวดทั้งสอง แบบนี้จะใช้ในการตรวจหารอยร้าว สำหรับรูป 3.14(ข) นั้นเป็นการเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนมาตรฐาน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตรวจชนิดของเนื้อวัสดุ



(ก) แบบเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง



(ข) แบบเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนมาตรฐาน

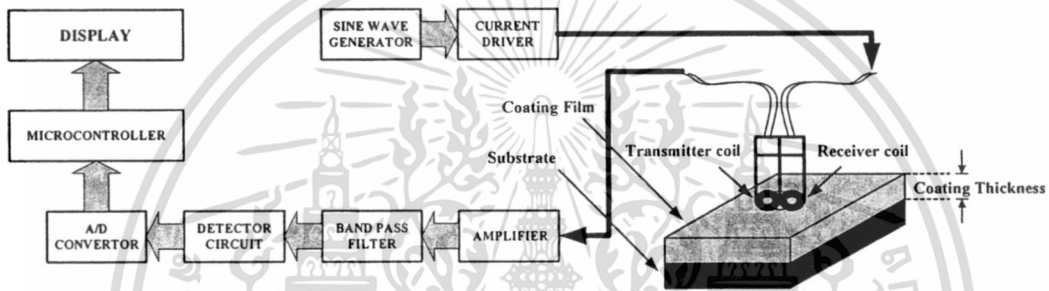
รูปที่ 3.14 แบบของขดลวดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนเพื่อนำระบบที่สร้างขึ้นไปใช้ในการตรวจวัดความหนาของชั้นสารเคลือบที่ไม่เป็นตัวนำ(Non-Conductive Coating Film) ที่เคลือบอยู่บนฉาบสเตรตที่ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก(Non-magnetic Substrate) เช่น การเคลือบอลูมิเนียม หรือ สแตนเลส ด้วยสารหรือฟิล์มการเคลือบอลูมิเนียมด้วยออกไซด์ เป็นต้น สำหรับส่วนประกอบทั้งหมดของระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่จะทำการพัฒนาขึ้นมาสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

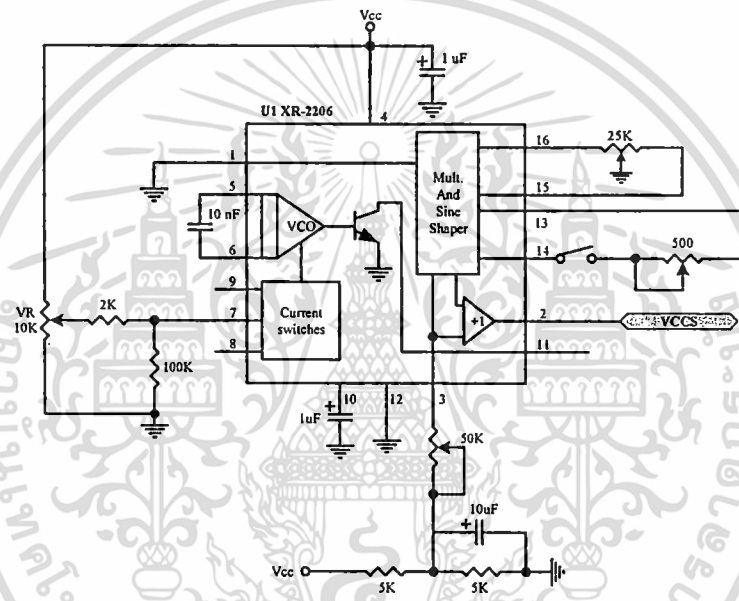
จากรูปที่ 4.1 หัววัดกระแสไหลวน (Eddy Current Probe) จะประกอบด้วยขดลวดตัวส่ง (Transmitter coil : Tx) และขดลวดตัวรับ (Receiver coil : Rx) เมื่อเราจ่ายแรงดันให้กับขดลวดตัวส่งก็จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวดตัวส่ง สนามแม่เหล็กนี้จะไปเหนี่ยวนำขดลวดตัวรับทำให้เกิดแรงดันค่าหนึ่งขึ้นที่ขดลวดตัวรับ เมื่อเรานำหัววัดกระแสไหลวน (ซึ่งประกอบด้วยขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ) ไปเข้าใกล้แผ่นโลหะที่นำมาทดสอบจะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ขึ้นบนแผ่นโลหะนั้น กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบนแผ่นโลหะจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดตัวส่ง ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำกับขดลวดตัวรับจึงลดลง ส่งผลให้แรงดันที่ขดลวดตัวรับมีค่าลดลง แต่หากแผ่นโลหะที่นำมาทดสอบมีสารหรือฟิล์มที่ไม่เป็นตัวนำเคลือบอยู่ก็จะส่งผลให้กระแสไหลวนบนแผ่นโลหะเกิดการลดลงเนื่องจากระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นโลหะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลวนนั้นเกิดการลดลง สนามแม่เหล็กที่ไปเหนี่ยวนำขดลวดตัวรับจึงเกิดเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงดันที่วัดได้จากขดลวดตัวรับจึงเกิดเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาของสารหรือฟิล์มที่เคลือบอยู่ จากหลักการดังกล่าวมาจะเห็นว่าค่าระดับแรงดันที่ขดลวดตัวรับจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาของสารหรือฟิล์มที่เคลือบอยู่บนฉาบสเตรต โดยค่าระดับแรงดันที่ได้นี้จะนำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนที่จะแสดงผลค่าความหนาของสารหรือฟิล์มที่เคลือบไว้บนฉาบสเตรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรายละเอียดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละส่วนที่ใช้ในระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวนสามารถอธิบายได้ดังนี้

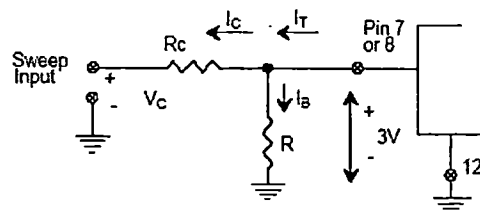
4.1 วงจรกำเนิดคลื่นไซน์ (Sine wave Generator Circuit)

สำหรับวงจรนี้จะใช้ IC XR-2206 โดย IC XR-2206 เป็น IC ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ที่สามารถใช้ผลิตสัญญาณรูปคลื่นไซน์(Sine wave), สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม(Square wave), สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม(Triangle wave) และสัญญาณพัลส์(pulse) โดยสามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 0.01 เฮิรต ถึง 1 เมกกะเฮิรต โดยลักษณะของวงจรกำเนิดคลื่นไซน์ที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรกำเนิดคลื่นไซน์ที่พัฒนาขึ้นมา

จากวงจรในรูปที่ 4.2 IC XR-2206 จะถูกต่อเป็นวงจรแปรค่าความถี่(Frequency Sweep Circuit) โดยในการทำงานในโหมดนี้ ความถี่ในการออสซิลเลชัน (Frequency Oscillation) จะเป็นสัดส่วนกับค่า Timing Current (I_T) ที่ไหลจากขา 7 หรือขา 8 ของ IC XR-2206 ดังรูปที่ 4.3 โดยสามารถแสดงค่าความถี่ของการออสซิลเลชันได้ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.3 ขาที่ใช้ควบคุมความถี่สัญญาณเอาต์พุต

$$f = \frac{320I_T(\text{mA})}{C(\mu\text{F})} \quad \text{Hz} \quad (4.1)$$

สำหรับขา Timin (ขา 7 หรือ ขา 8) จะเป็นขาที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ โดยมีการไบอัสจากภายในของ IC XR-2206 ด้วยแรงดันประมาณ +3 โวลต์ เมื่อเทียบกับขา 12 ความถี่เอาต์พุทของวงจรจะเป็นสัดส่วนกับค่ากระแส I_T โดย I_T จะสามารถแปรค่าได้ในช่วง 1 μA – 3mA จากรูปที่ 4.2 ความถี่ของสัญญาณจาก IC XR-2206 จะถูกควบคุมโดยแรงดันควบคุม (V_c) ที่ต่อเข้ากับขา 7 หรือ ขา 8 โดยความถี่เอาต์พุทของวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2

$$f = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{V_c}{3} \right) \right) \quad \text{Hz} \quad (4.2)$$

เมื่อ V_c = แรงดันที่ใช้ควบคุมความถี่เอาต์พุทของวงจร (V)

*ค่า R ควรอยู่ในช่วง $4\text{K}\Omega < R < 200\text{K}\Omega$ และค่า C ควรอยู่ในช่วง 1000 pF – 100 μF

สำหรับความถี่ของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่จะใช้ในระบยวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวนในโครงการวิจัยนี้ จะใช้ความถี่ในช่วงประมาณ 50,000 – 150,000 Hz โดยในการออกแบบวงจรเราจะออกแบบให้วงจรสามารถผลิตความถี่ในช่วง ประมาณ 10,000 – 500,000 Hz จากสมการที่ 4.2 ที่ความถี่ต่ำสุด $V_c = 3$ โวลต์

$$f = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{0}{3} \right) \right) = \frac{1}{RC} \quad (4.3)$$

∴ จากวงจรในรูปที่ 4.2 จะกำหนดให้ความถี่เริ่มต้นเท่ากับ 10,000 Hz และกำหนดค่า R = 100 K Ω ดังนั้นเราจะหาค่า C ได้โดยอาศัยสมการที่ (4.3) จะได้

$$C = \frac{1}{1000 * 100 * 10^3} = 1 \text{ nF}$$

จากสมการที่ (4.2) ที่ความถี่สูงสุด $V_c = 0$ โวลต์ จะได้สมการที่ (4.4)

$$f = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} \left(1 - \frac{0}{3} \right) \right) = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} (1-1) \right) = \frac{1}{RC} \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \quad (4.4)$$

∴ จากวงจรในรูปที่ 4.2 เรากำหนดให้ความถี่สูงสุดเท่ากับ 500,000 Hz ดังนั้นเราจะหาค่า R_c ได้โดยอาศัยสมการที่ (4.4) โดยจะได้

$$500,000 = \frac{1}{100 * 10^3 * 10^{-9}} \left(1 + \frac{100 * 10^3}{R_c} \right)$$

$$500,000 * 100 * 10^3 * 10^{-9} = \left(1 + \frac{100 * 10^3}{R_c} \right)$$

$$\left(500,000 * 100 * 10^3 * 10^{-9} \right) - 1 = \left(\frac{100 * 10^3}{R_c} \right)$$

$$R_c = \frac{100 * 10^3}{\left(500,000 * 100 * 10^3 * 10^{-9} \right) - 1}$$

$$R_c = \frac{100 * 10^3}{49} = 2040.816 \quad \Omega$$

*แต่เนื่องจากค่าความต้านทาน 2040 Ω ไม่มีดังนั้นจึงใช้ค่า $R_c = 2000 \Omega$ แทน ดังนั้นสามารถคำนวณความถี่สูงสุดได้ใหม่ที่ค่าความต้านทาน $R_c = 2000 \Omega$ คือ

$$f = \frac{1}{100 * 10^3 * 10^{-9}} \left(1 + \frac{100 * 10^3}{2000} \right) = 10,000 * 51 = 510,000 \text{ Hz}$$

ดังนั้น โดยสรุปแล้ววงจรในรูปที่ 4.2 จะสามารถผลิตความถี่ได้ในช่วง 10,000- 510,000 Hz ที่แรงดันควบคุม 3 – 0 โวลต์

สำหรับแรงดันที่ใช้ในการควบคุมความถี่เอาต์พุทของวงจรจะได้อาจปรับแรงดันควบคุมตั้งวงจรรูปที่ 4.3

4.2 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source)

วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันทำหน้าที่ในการกำหนดกระแสคงที่ที่จะจ่ายให้กับขดลวดเซนเซอร์ของระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน โดยวงจรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 4.4

โดยการทำงานของวงจรจากรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นวงจรจ่ายกระแสคงที่ควบคุมด้วยแรงดันมีดังนี้ สัญญาณอินพุทซึ่งเป็นสัญญาณไซน์ความถี่ 10,000-510,000 เฮิร์ต แอมป์ลิจูด 2 V_{p-p} ซึ่งได้จากวงจรผลิตสัญญาณไซน์จะถูกป้อนให้กับ U_2 ซึ่งต่อเป็นวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมป์โดยมี R_1 , R_2 และ V_{R_1} เป็นตัวกำหนดเกณฑ์การขยายโดยจากวงจรรูปที่ 4.4 จะปรับอัตราขยายให้เท่ากับ ≈ 10 เท่าเพื่อให้ได้แรงดันที่เอาต์พุทของ U_2 เท่ากับ 20 V_{p-p} เพื่อป้อนให้กับ U_3 และ U_4 ซึ่งต่อเป็นวงจรจ่าย

กระแสที่ควบคุมด้วยแรงดัน โดยเราสามารถกำหนดค่ากระแสที่จะทำการจ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยการเปลี่ยนค่าความต้านทานของ R_{selector} ซึ่งเราสามารถที่จะคำนวณหาค่าความต้านทานที่จะใช้เป็น R_{selector} ได้โดยอ้างอิงวงจรรูปที่ 4.5 โดยจากรูปที่ 4.5 เราจะได้

$$V_{O1} = A(V_{O2} - V_{in}) \quad (4.5)$$

เมื่อให้ ความต้านทานในวงจรมีค่าเท่ากันหมดจะได้

$$A = R/R = 1 \quad (4.6)$$

∴ สมการที่ 4.5 สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.7)

$$V_{O1} = (V_{O2} - V_{in}) \quad (4.7)$$

$$-V_{in} = V_{O1} - V_{O2} \quad (4.8)$$

$$V_{in} = V_{O2} - V_{O1} \quad (4.9)$$

$$V_{O2} - V_{O1} = V_{in} \quad (4.10)$$

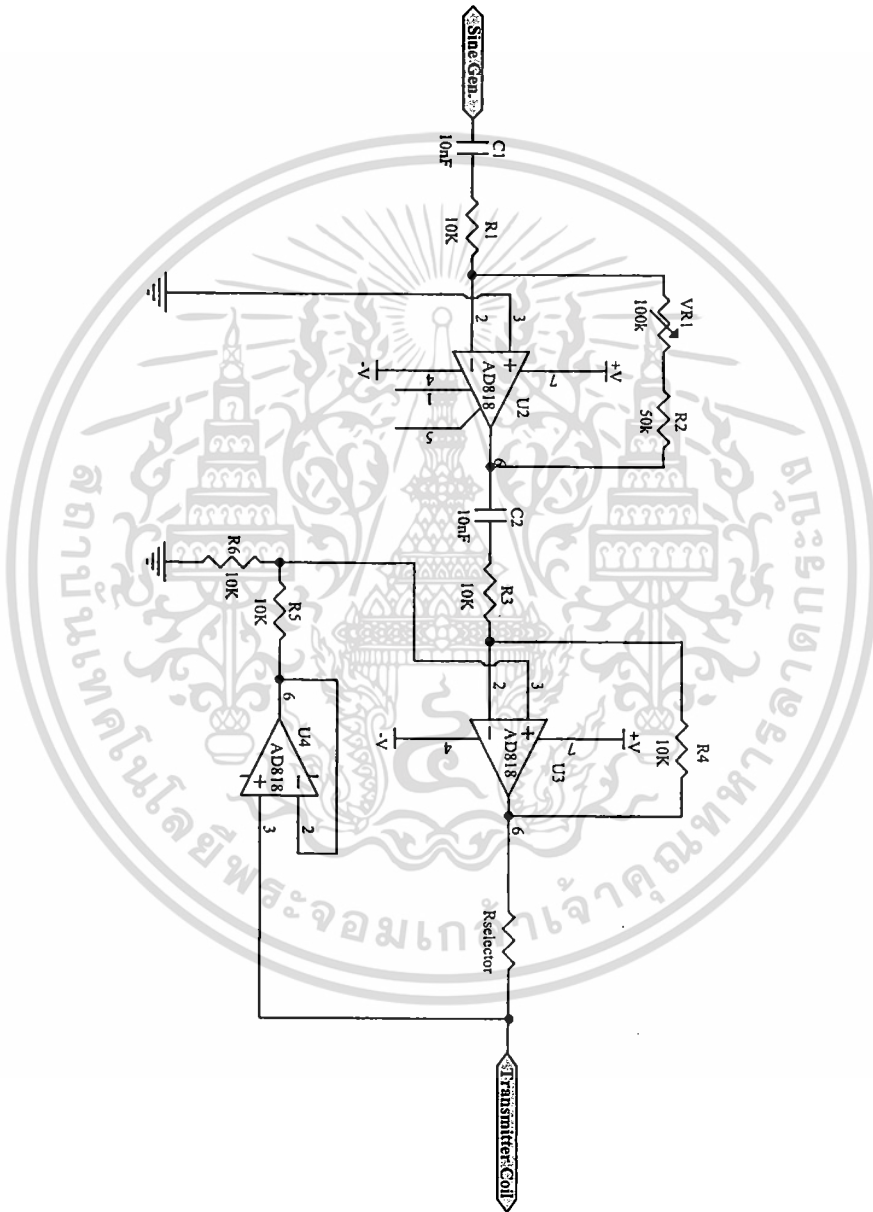
จากสมการที่ 4.10 ค่าแรงดัน V_{in} ก็คือค่าแรงดันตกคร่อม R_{selector} ∴ เราสามารถกำหนดค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลดได้ดังสมการที่ (4.11)

$$I_O = V_{O2} - V_{O1} / R_{\text{selector}} \quad (4.11)$$

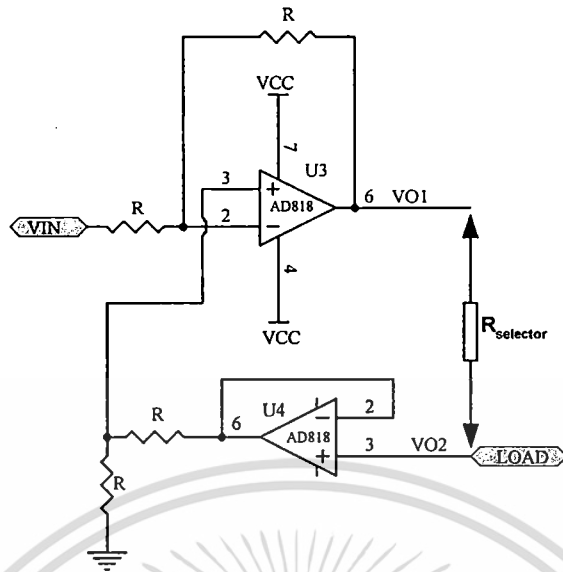
$$R_{\text{selector}} = V_{in} / I_O \quad (4.12)$$

เมื่อ R_{selector} = ค่าความต้านทานสำหรับกำหนดค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลด
 V_{in} = ค่าแรงดันอินพุทของวงจรรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน
 I_O = ค่ากระแสที่จ่ายให้กับโหลด

จากสมการที่ (4.12) เราสามารถหาค่าความต้านทานที่จะใช้เป็น $R_{selector}$ ได้จากค่าแรงดันอินพุต ($V_{in} = 20 V_{p-p}$) และค่ากระแสเอาต์พุตที่ต้องการ โดยระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้กระแสอยู่ในช่วง 0.1-10 mA-p-p โดยที่กระแส 0.1 mA-p-p, 0.5 mA-p-p, 1 mA-p-p, 2 mA-p-p, 4 mA-p-p, 4 mA-p-p, 5 mA-p-p, 6 mA-p-p, 7 mA-p-p, 8 mA-p-p, 9 mA-p-p และ 10 mA-p-p เราสามารถหาค่าความต้านทานของ $R_{selector}$ ได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันที่ใช้ในระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ



รูปที่ 4.5 วงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน

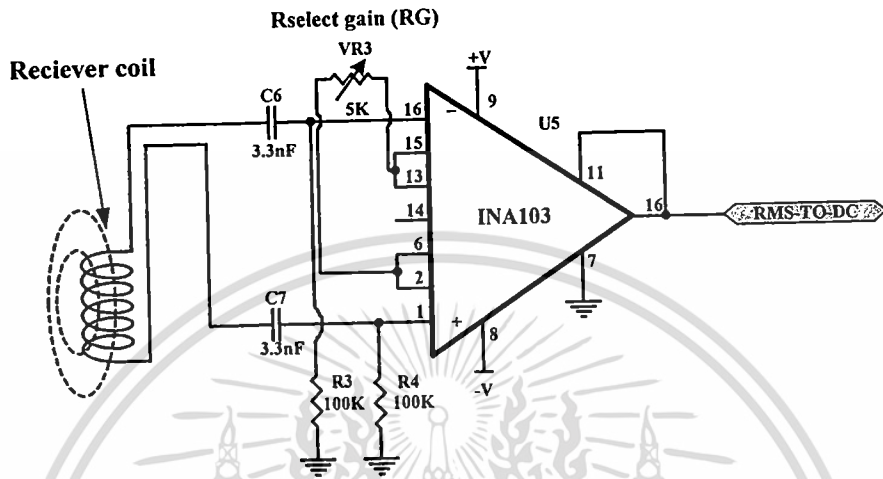
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของ Rselector และกระแสเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแส

ตารางแสดงค่าความต้านทานที่ใช้กำหนดกระแส	
ความต้านทาน (โอห์ม)	กระแส (แอมป์)
200 K	100 u
40 K	500 u
20 K	1 m
10 K	2 m
6.67 K	4 m
5 K	4 m
4 K	5 m
4.44 K	6 m
2.857 K	7 m
2.5 K	8 m
2.22 K	9 m
2 K	10 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 29 ใช้

4.3 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier Circuit)

สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขยายสัญญาณจากขดลวดตัวรับสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขยายสัญญาณจากขดลวดตัวรับ

วงจรในส่วนนี้จะประกอบด้วย U5 (INA 103) ซึ่งเป็นไอซีอินทรูเมนเตชันแอมพลิไฟเออร์ (Instrumentation Amplifier) ของบริษัท BURR-BROWN เพื่อทำการขยายสัญญาณที่ได้รับจากขดลวดตัวรับให้มีแอมพลิจูดของสัญญาณสูงขึ้น โดยจากวงจรรูปที่ 4.6 เราสามารถปรับอัตราขยายของ U5 โดยเปลี่ยนค่าความต้านทานของ Rselect Gain (RG) ซึ่งเราสามารถคำนวณค่าความต้านทานสำหรับนำมาต่อเพื่อปรับค่าอัตราขยายของ U5 ได้จากสมการที่ (4.13) และสมการที่ (4.14)

$$G = 1 + 6K\Omega / RG \quad (4.13)$$

∴ จากสมการที่ (4.13) จะได้ว่า

$$RG = 6K\Omega / (G - 1) \quad (4.14)$$

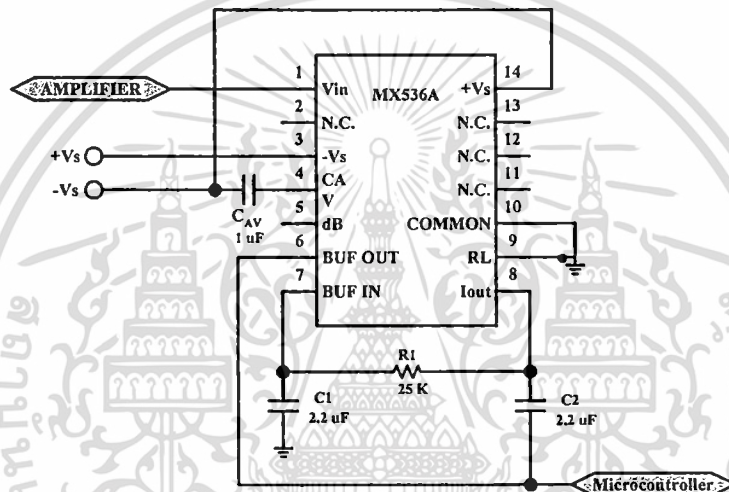
เมื่อ G = อัตราขยายของอินทรูเมนเตชัน แอมพลิไฟเออร์

RG = ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่นำมาต่อเพื่อปรับอัตราขยาย

วงจรรูปที่ 4.6 จะปรับอัตราขยายของ U_5 ได้โดย VR_4 ซึ่งจะปรับอัตราขยายของ U_5 ได้ในช่วงตั้งแต่ 2 เท่า จนถึง 1000 เท่า โดยสัญญาณที่ถูกขยายโดย U_5 จะถูกป้อนให้กับวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีและวงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลต่อไป

4.4 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี (RMS-TO-DC Converter Circuit)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี ในระบบนี้จะใช้ไอซีสำเร็จรูปของบริษัท MAXIM เบอร์ MX546A ซึ่งรองรับแรงดันอินพุตได้ในช่วง $0 - 7 V_{RMS}$ สำหรับลักษณะของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีโดย MX546A จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.7

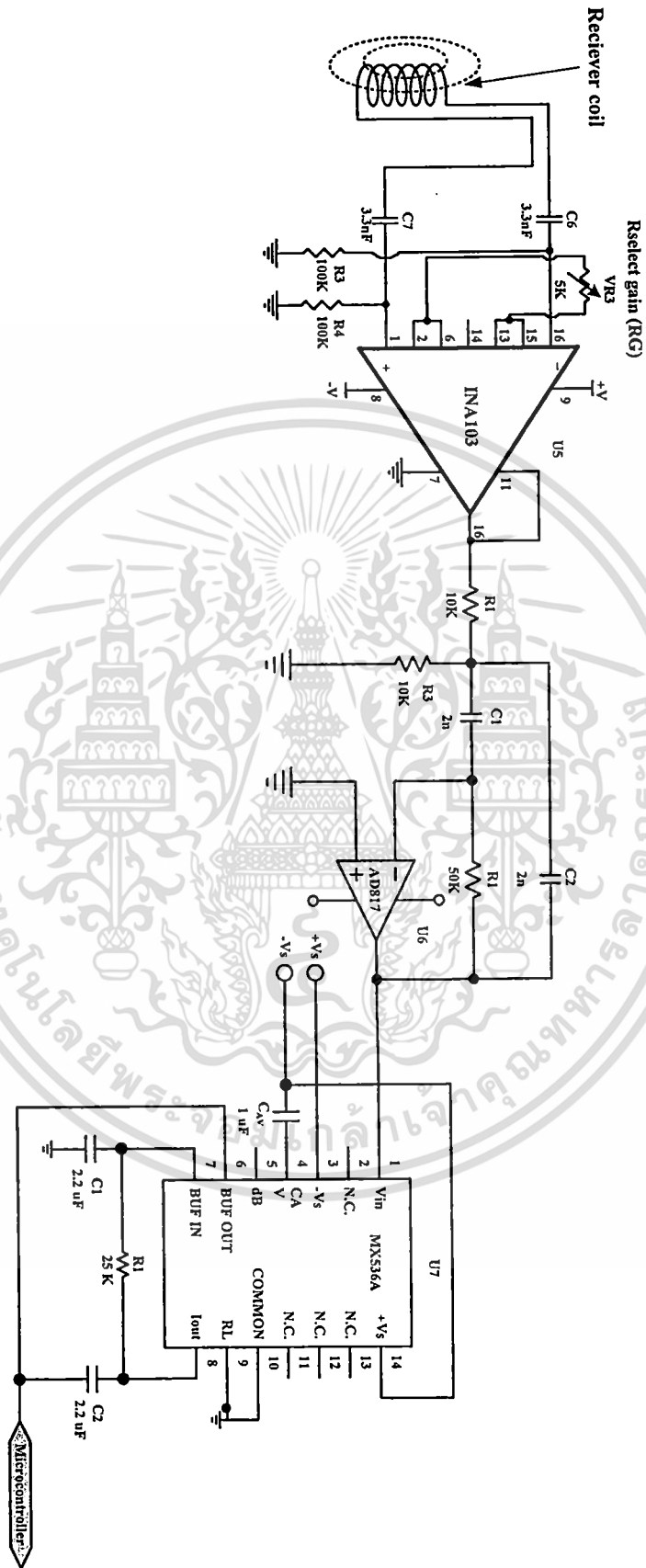


รูปที่ 4.7 วงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี

สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีจะถูกส่งไปยังวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการบันทึกข้อมูลและประมวลผลการวัดตลอดจนแสดงผลของการวัดทางจอแอลซีดีต่อไป

4.5 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

จากรายละเอียดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนต่างๆสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปเป็นวงจรทั้งหมดได้ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

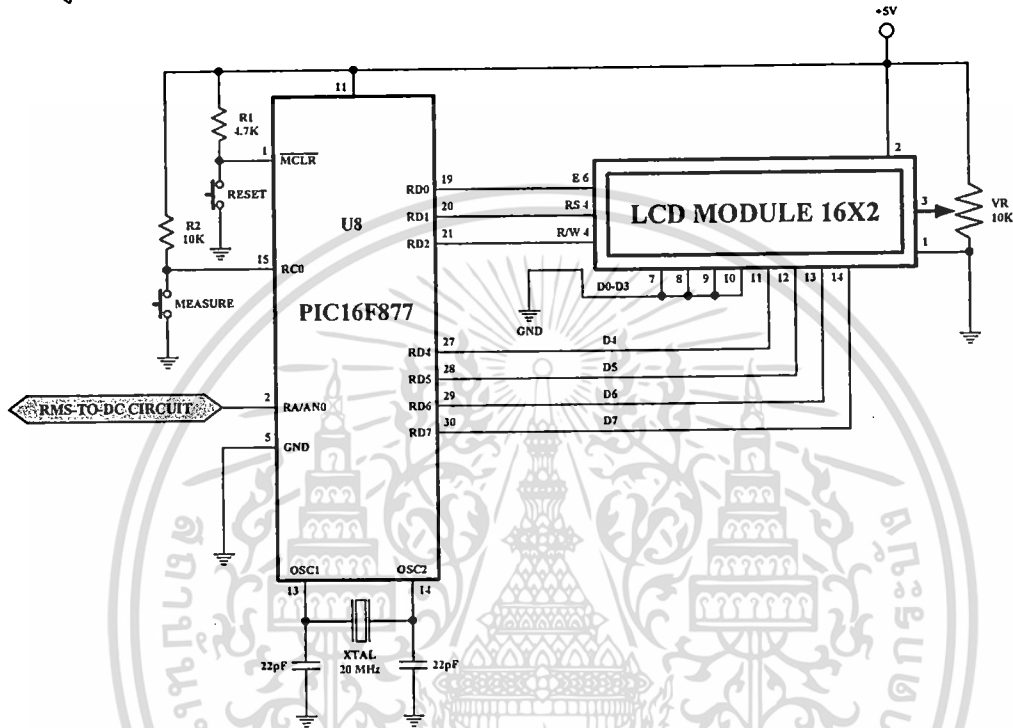


รูปที่ 4.9 วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับขดลวดตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 33

4.6 วงจรประมวลผลและแสดงผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับวงจรที่ใช้ในการประมวลผลและการแสดงผลจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เบอร์ PIC16F877 ร่วมกับโมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD Module 16x2) โดยมีลักษณะของวงจรที่ใช้สำหรับการประมวลผลและแสดงผลที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



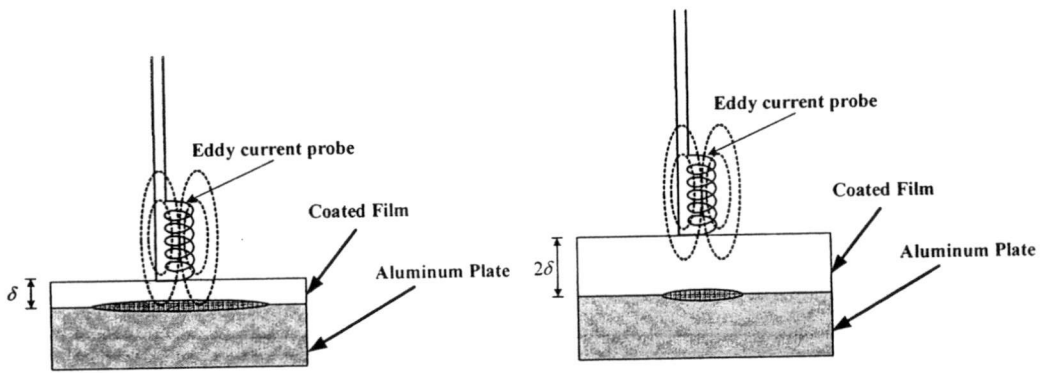
รูปที่ 4.10 วงจรที่ใช้ในการประมวลผลและการแสดงผล

จากวงจรที่ใช้ในการประมวลผลและการแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 เราจะทำการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้ในการประมวลผลและแสดงผลโดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.7 โปรแกรมสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

ค่าระดับแรงดันคิซีซีที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นคิซีซีจะถูกส่งผ่านวงจรแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิตอลเพื่อส่งค่าที่ได้มาประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์และแสดงผลค่าความหนาของชั้นเคลือบออกมาทางจอแอลซีดี (LCD Panel) โดยลักษณะการทำงานของโปรแกรมประมวลผลจะอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ที่ผิวกับความลึกที่ผ่านเข้า (Skin Effect & Depth penetration) [3] โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนและค่าแรงดันที่วัดได้จะเปลี่ยนไปตามความหนาของชั้นเคลือบดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 34



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่ความหนาของชั้นเคลือบต่างกัน

จากรูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนและแผ่นอลูมิเนียมซึ่งก็คือความหนาของชั้นเคลือบที่ถูกเคลือบบนแผ่นอลูมิเนียมนั่นเอง โดยปกติแล้วค่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจะถูกเปรียบเทียบจากค่าปรากฏการณ์ที่ผิวกับความลึกที่ผ่านเข้า (Skin Effect & Depth penetration) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ งาน วัสดุฐานรองที่ใช้ (Substrate) โดยค่าความลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กมาตรฐาน (Standard depth of penetration : δ) จะคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.15

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.15)$$

เมื่อ

δ = Standard depth of penetration (m)

π = 3.1416

f = Test frequency (Hz)

μ = Magnetic permeability (H/m)

σ = Electrical Conductivity ($S \cdot m^{-1}$)

โดยค่า δ ในที่นี้ก็คือ ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม (ความหนาของชั้นเคลือบ) ที่ทำให้กระแสไหลวนลดลงเท่ากับ $1/e$ หรือประมาณ 37% ซึ่งการลดลงของกระแสไหลวนจะเปรียบเทียบกับระยะ δ โดยเราสามารถคำนวณหาปริมาณการลดลงของค่ากระแสไหลวนที่เกิดบนแผ่นอลูมิเนียมได้จากสมการที่ (4.16)

$$I = I_0 * \left(\frac{1}{e^{(d/\delta)}} \right) \quad (4.16)$$

I = ปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่าง d

I_0 = ปริมาณกระแสไหลวนขณะที่หัววัดกระแสไหลวนสัมผัสกับแผ่นอลูมิเนียม

δ = Standard depth of penetration (mm)

จากสมการที่(4.15) และสมการที่(4.16) เราสามารถยกตัวอย่างการคำนวณโดยการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆอ้างอิงกับลักษณะของระบบที่สร้างขึ้นมาดังนี้

ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ(f) = 110 กิโลเฮิร์ต

ฐานรอง(Substrate) เป็นแผ่นอลูมิเนียม Electrical Conductivity = $37.8 * 10^6$ (S·m⁻¹)

จากค่าพารามิเตอร์ดังที่กล่าวมาเราสามารถคำนวณหาค่าความลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กมาตรฐาน : δ ได้ดังนี้

จากสมการที่ (4.15) จะได้

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi * 110 * 10^3 * 1.2567 * 10^{-6} * 37.8 * 10^6}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi * 110 * 10^3 * 1.2567 * 37.8}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\pi * 110 * 10^3 * 1.2567 * 37.8}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{16415986.578}} \\ &= \frac{1}{4054.665} = 2.468 * 10^{-8} = 246.8 * 10^{-6} \text{ เมตร} \end{aligned}$$

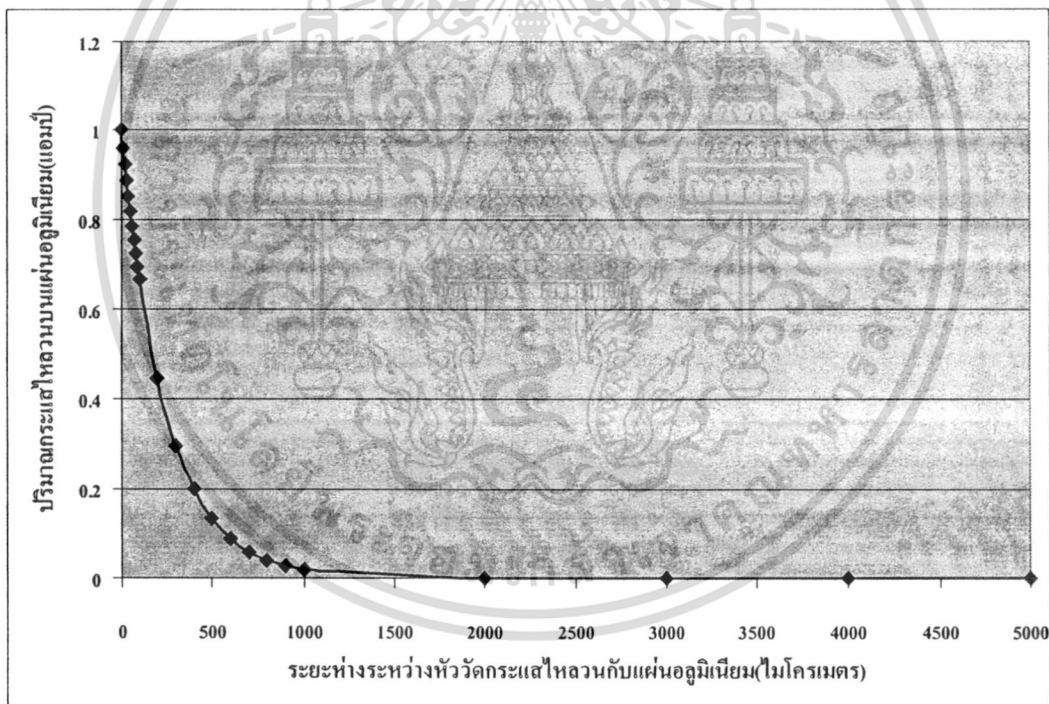
∴ จะได้ค่าความลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กมาตรฐาน : $\delta = 246.8$ ไมโครเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ที่ทำให้กระแสไหลวนลดลงเท่ากับ $1/e$ หรือประมาณ 37%

จากค่าความลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กมาตรฐานที่คำนวณหาปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ ได้จากสมการที่ (4.16) ดังนี้

จากสมการที่ (4.16) แทนค่าความลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กมาตรฐาน : $\delta = 246.8$ ไมโครเมตร ลงในสมการจะได้สมการที่ (4.17)

$$I = I_0 * \left(\frac{1}{e^{(d/\delta)}} \right) = I_0 * \left(\frac{1}{e^{(d/246.8 * 10^{-6})}} \right) \quad (4.17)$$

จากสมการที่(4.17) เราสามารถแสดงค่าปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.12 ปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ

ปริมาณกระแสไหลวน		
d (ไมโครเมตร)	d/246.8	I
0	0	1
10	0.040519	0.960295
20	0.081037	0.922167
30	0.121556	0.885553
40	0.162075	0.850392
50	0.202593	0.816628
60	0.243112	0.784204
70	0.28363	0.753067
80	0.324149	0.723167
90	0.364668	0.694454
100	0.405186	0.666881
200	0.810373	0.44473
300	1.215559	0.296582
400	1.620746	0.197784
500	2.025932	0.131899
600	2.431118	0.087961
700	2.836305	0.058659
800	3.241491	0.039119
900	3.646677	0.026087
1000	4.051864	0.017397
2000	8.103728	0.000303
3000	12.15559	5.27E-06
4000	16.20746	9.16E-08
5000	20.25932	1.59E-09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ 38

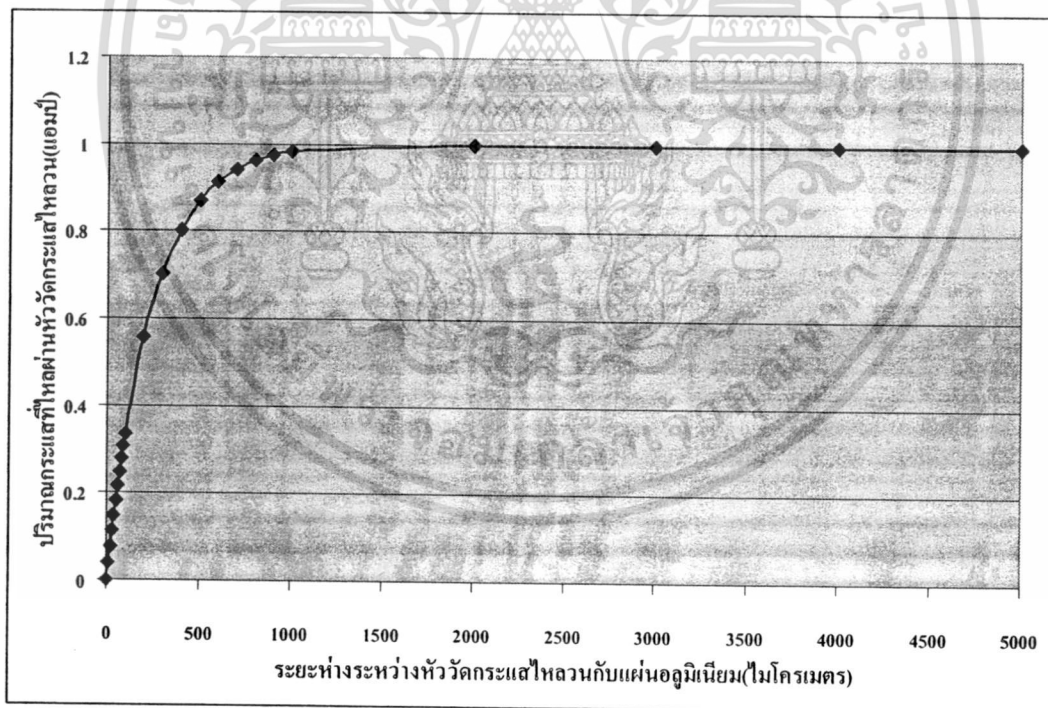
จากค่าปริมาณกระแสไหลวนปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆที่คำนวณได้ดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.2 เราสามารถคำนวณหาค่าปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนได้จากสมการที่ 4.18

$$I_c = 1 - I \quad (4.18)$$

เมื่อ I_c = ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวน

I = ปริมาณกระแสไหลวนบนแผ่นอลูมิเนียมที่ระยะห่าง d

จากสมการที่ (4.18) เราสามารถแสดงค่าปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ ได้ดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.13 ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ

ตาราง 4.3 ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวนที่ระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวน
กับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ) ต่างๆ

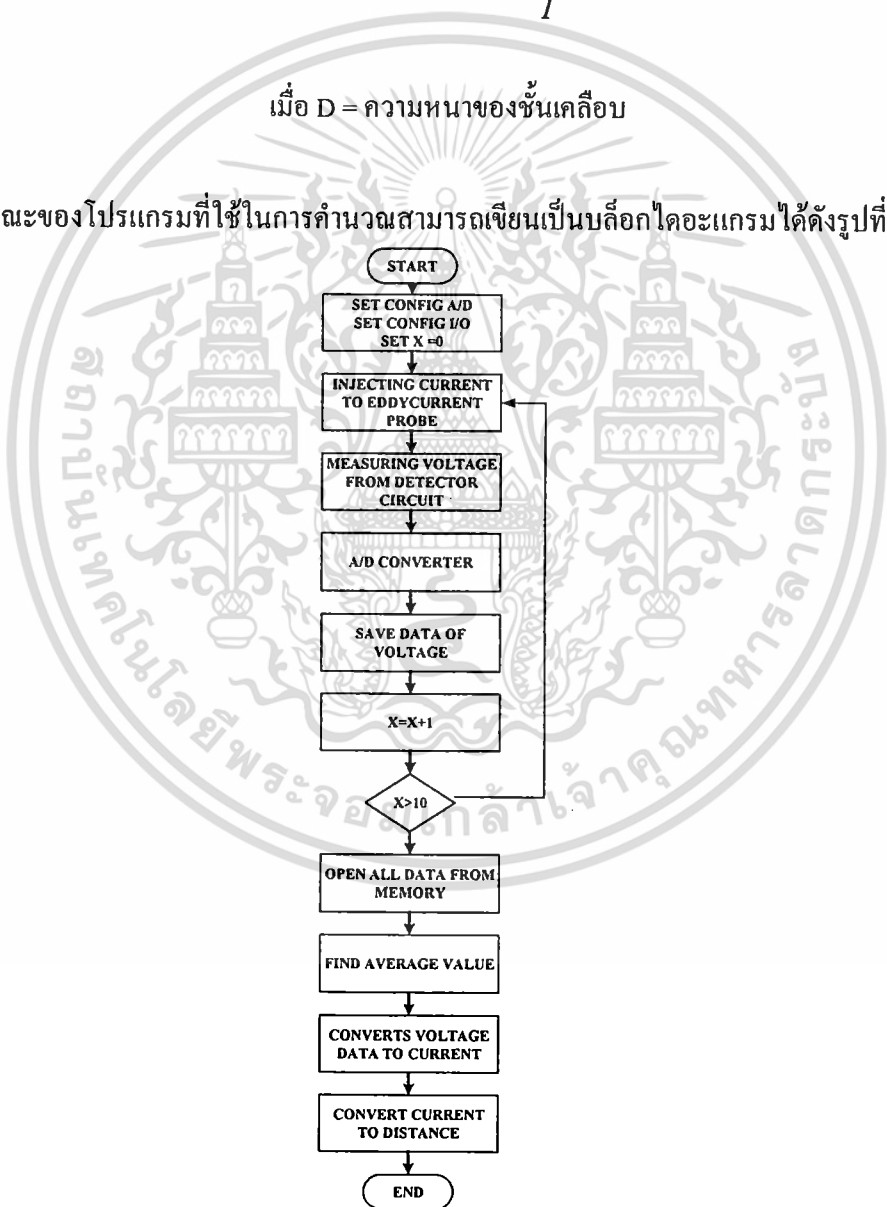
ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านหัววัดกระแสไหลวน	
Ic	I
0	0
10	0.0397047
20	0.077832936
30	0.114447303
40	0.149607907
50	0.18337247
60	0.21579642
70	0.246932988
80	0.276833288
90	0.305546405
100	0.333119476
200	0.555270367
300	0.70341847
400	0.802215554
500	0.868101405
600	0.912039396
700	0.941340786
800	0.960881313
900	0.973912509
1000	0.982602761
2000	0.999697336
3000	0.999994734
4000	0.999999908
5000	0.999999998

จากผลการคำนวณที่กล่าวมาทั้งหมดจะใช้อ้างอิงกับสัญญาณที่วัดได้จริงจากระบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมา โดยในการวัดจริงเราจะใช้การวัดระดับแรงดันของสัญญาณเป็นหลัก จากนั้นจึงนำระดับแรงดันของสัญญาณที่ได้มาแปลงเป็นค่าปริมาณกระแสไหลวนที่แผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะคำนวณกลับเป็นระยะห่างระหว่างหัววัดกระแสไหลวนกับแผ่นอลูมิเนียม(ความหนาของชั้นเคลือบ)ต่อไป โดยอาศัยพื้นฐานจากสมการที่ (4.15) และ (4.16) จะได้

$$D = 246.8 * 10^{-6} * \ln \frac{I_0}{I} \quad (4.19)$$

เมื่อ D = ความหนาของชั้นเคลือบ

โดยลักษณะของ โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.14

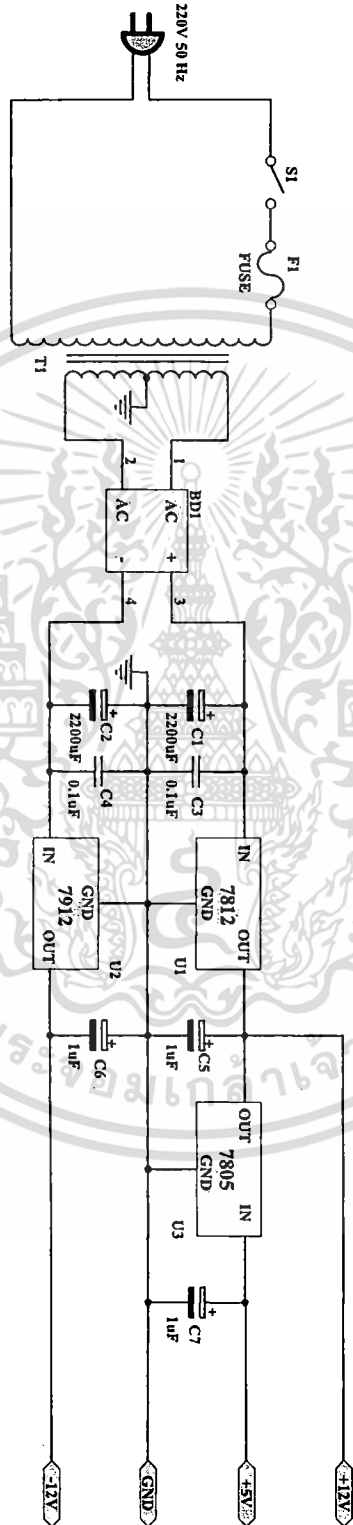


รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมที่ใช้ในการวัด คำนวณความหนาของชั้นเคลือบ

ตลอดจนการแสดงผล

3.8 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนสามารถแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรแหล่งจ่ายไฟสำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

บทที่ 5

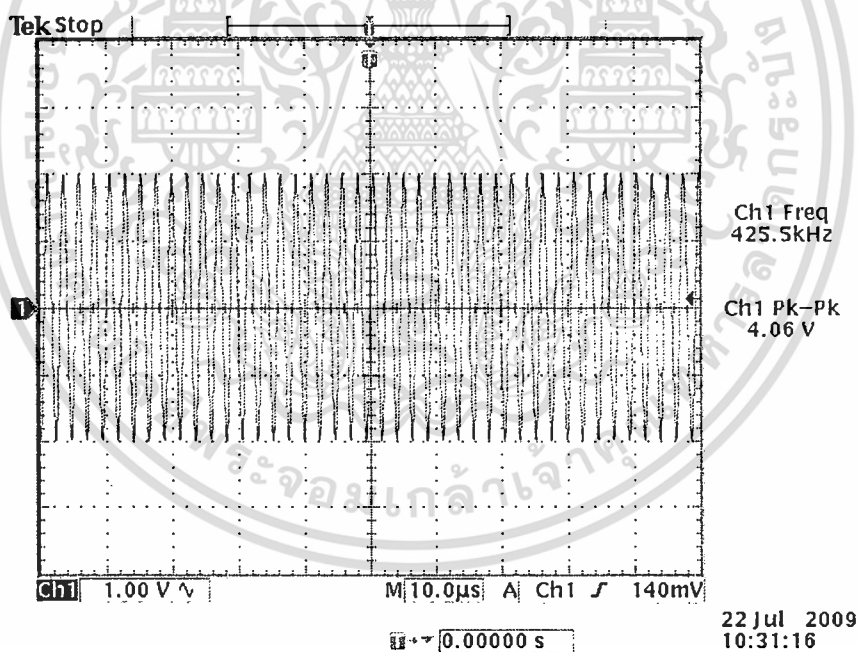
การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวนที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมา โดยการทดสอบจะมีรายละเอียดดังหัวข้อต่างๆดังนี้

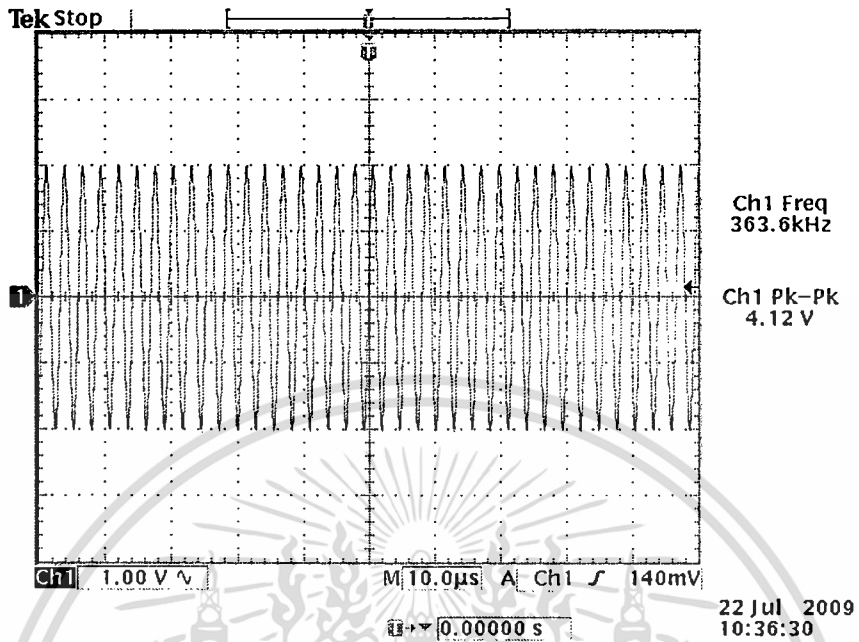
5.1 การทดสอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

5.1.1 การทดสอบสัญญาณของวงจรถ่ายสัญญาณไซน์ (Sine wave Generator Circuit)

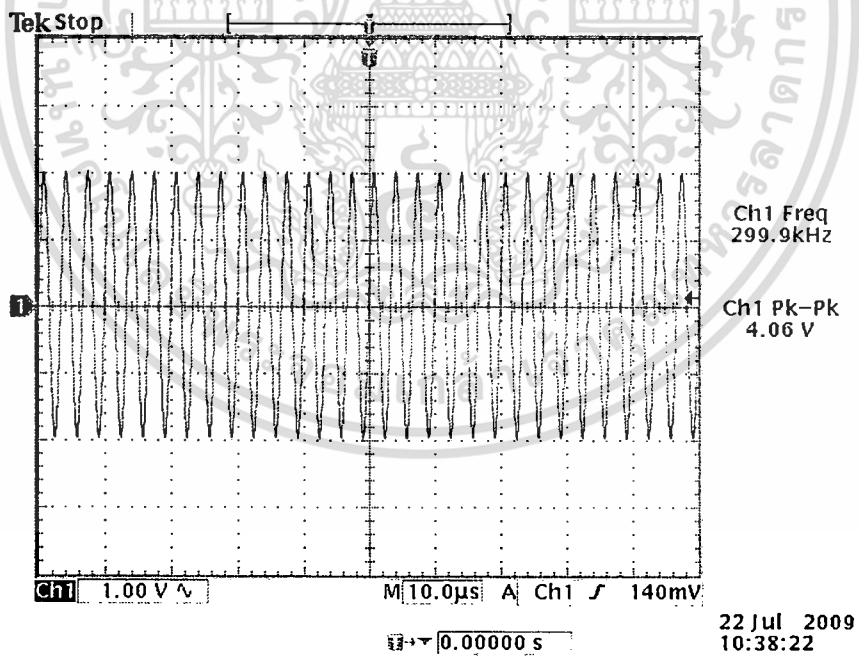
สำหรับวงจรถ่ายสัญญาณไซน์ที่ออกแบบขึ้นจะผลิตความถี่ในช่วง 10,000-500,000 เฮิรตซ์ แต่ความถี่ที่ผลิตได้จริงจะอยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 25,000- 425,000 เฮิรตซ์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณที่ได้จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ถึง รูปที่ 5.7



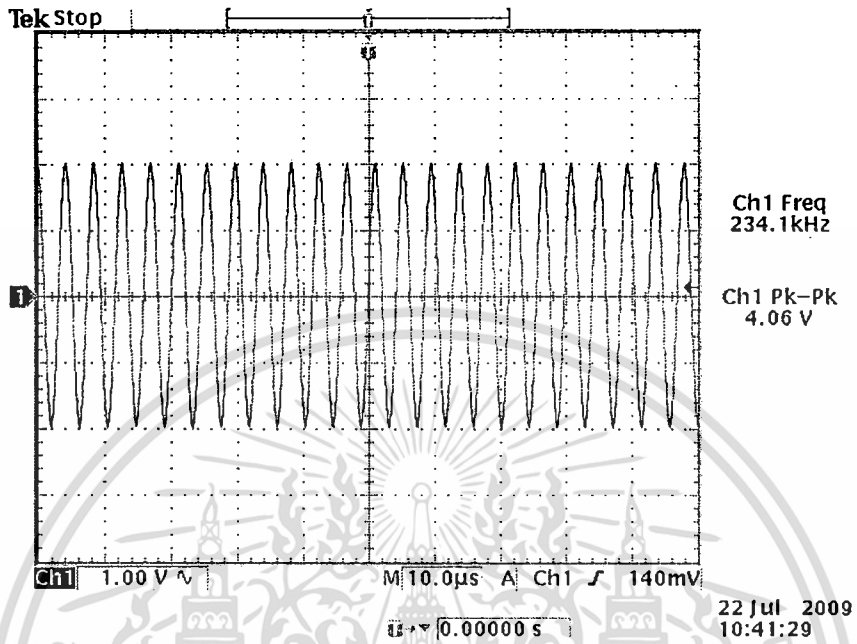
รูปที่ 5.1 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่ายสัญญาณไซน์ที่แรงดันควบคุม 0 โวลต์



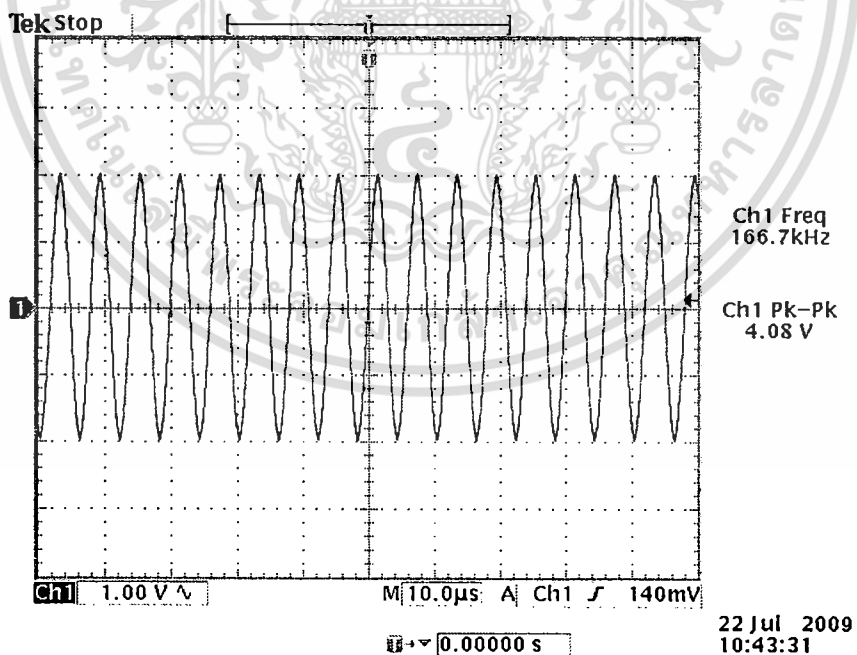
รูปที่ 5.2 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่แรงดันควม 0.5 โวลต์



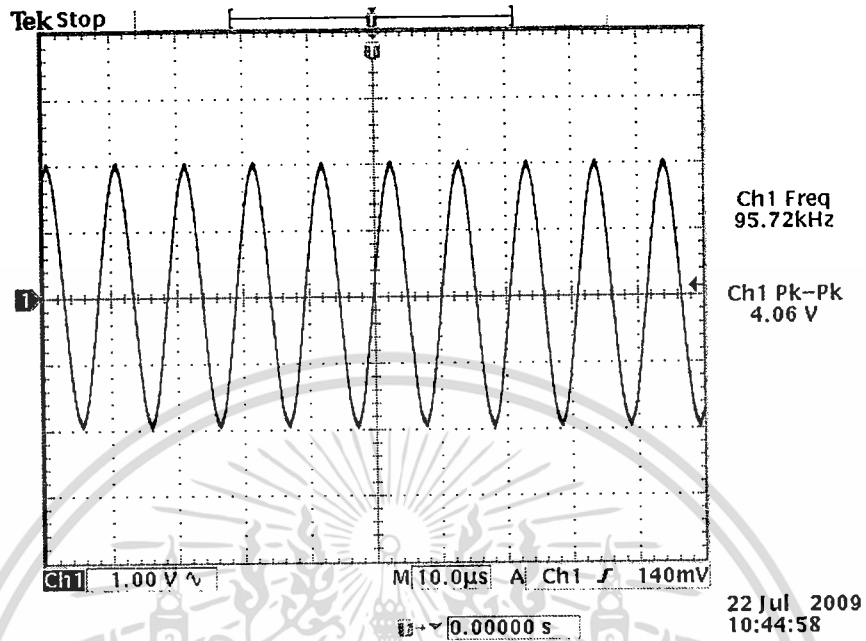
รูปที่ 5.3 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่แรงดันควม 1 โวลต์



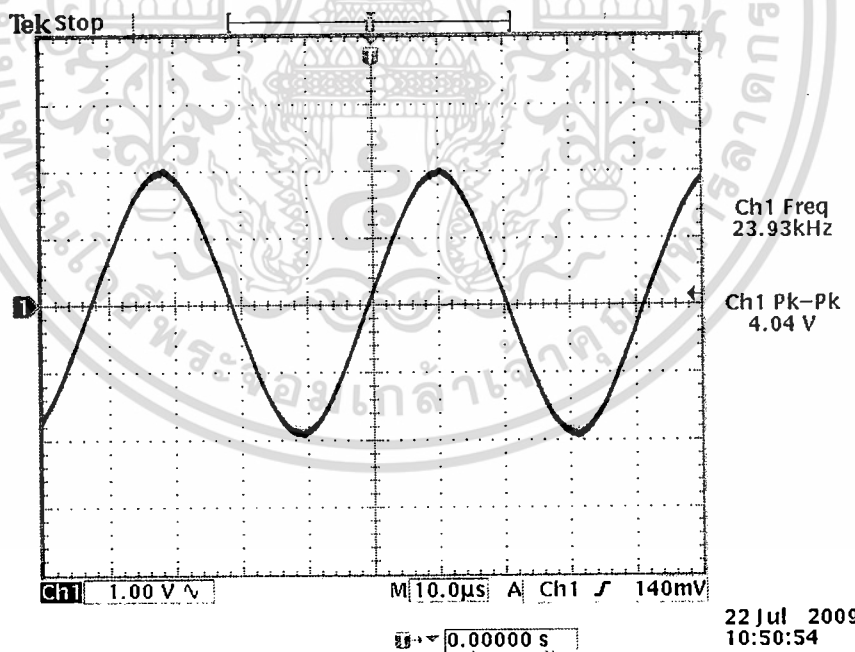
รูปที่ 5.4 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่แรงดันควม 1.5 โวลท์



รูปที่ 5.5 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่แรงดันควม 2 โวลท์

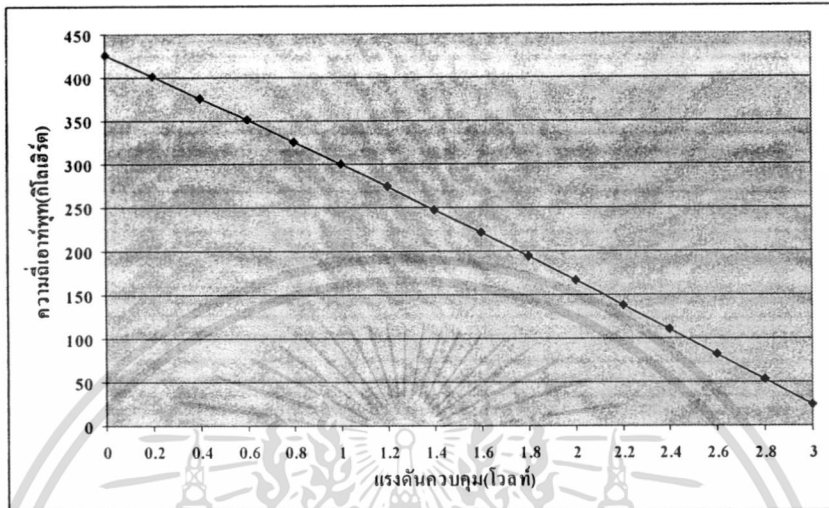


รูปที่ 5.6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่แรงดันควบคุม 2.5 โวลต์



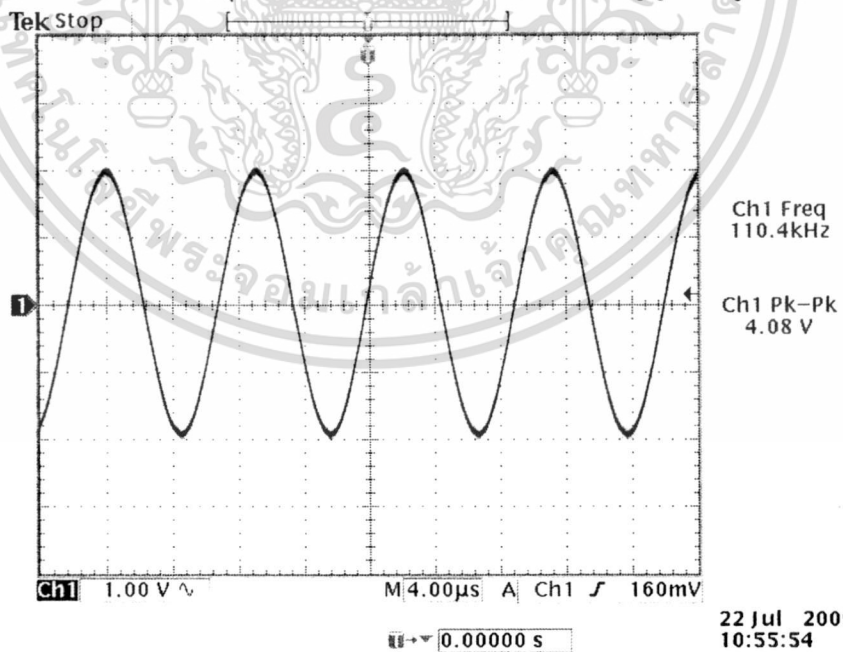
รูปที่ 5.7 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ที่แรงดันควบคุม 3 โวลต์

สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันควบคุมและความถี่เอาต์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณ
 ไซน์ที่ออกแบบขึ้นมาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันควบคุมและความถี่เอาต์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่
 ออกแบบขึ้นมา

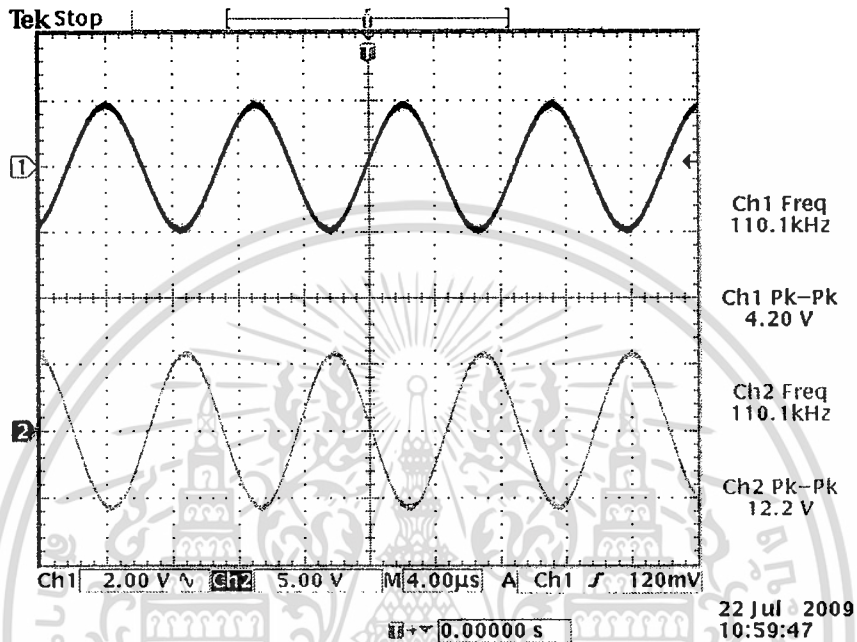
สำหรับในโครงการวิจัยระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวนนี้จะใช้ความถี่
 ประมาณ 110 กิโลเฮิร์ต ที่แรงดันควบคุมประมาณ 2.401 โวลต์ซึ่งมีลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 5.9



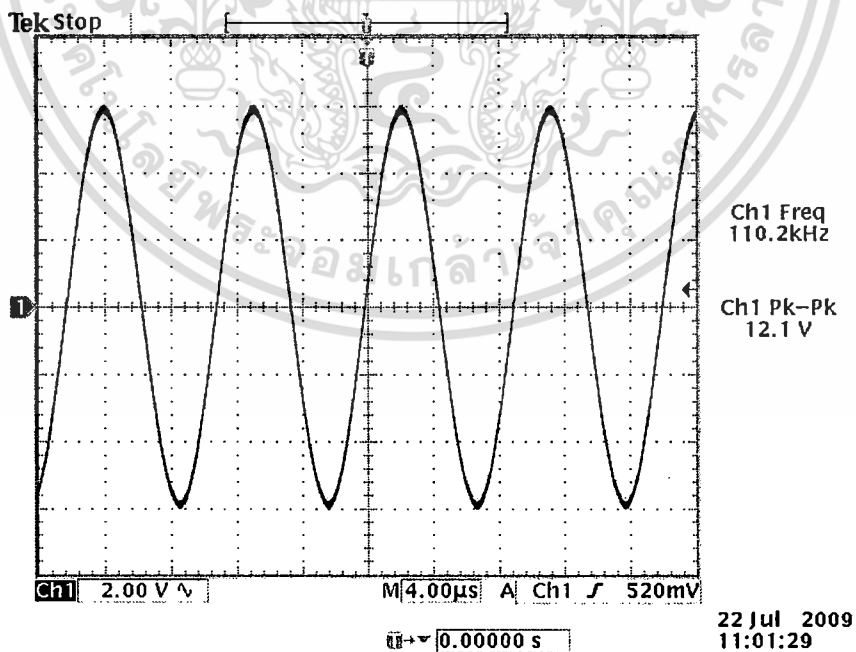
รูปที่ 5.9 สัญญาณเอาต์พุทของวงจรกำเนิดสัญญาณ ไซน์ที่แรงดันควบคุม 2.401 โวลต์

5.1.2 การทดสอบสัญญาณของวงจรขยายสัญญาณไซน์

สำหรับลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรขยายสัญญาณไซน์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 110 กิโลเฮิร์ต

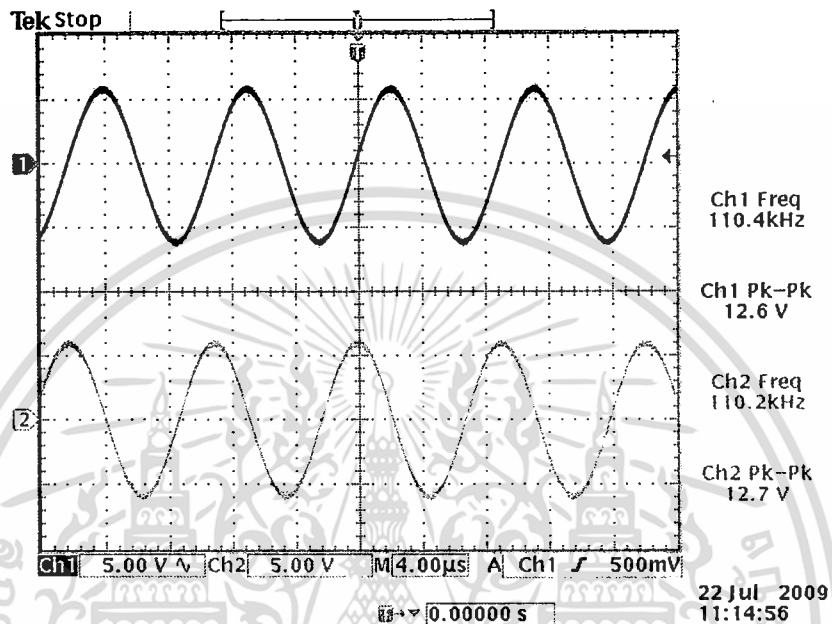


รูปที่ 5.11 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ 110 กิโลเฮิร์ต

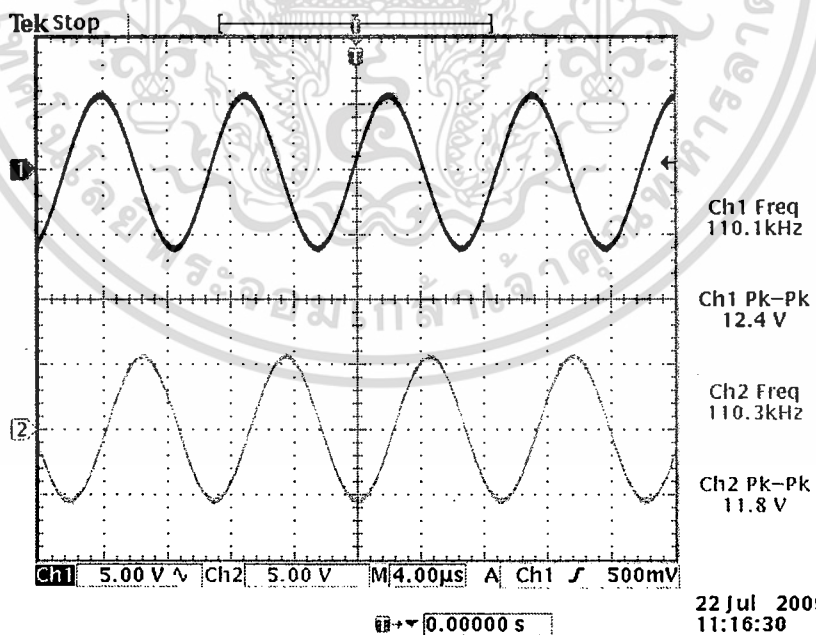
5.1.3 การทดสอบสัญญาณของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน

สำหรับลักษณะของสัญญาณที่ได้จากวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่

5.12 และ 5.13



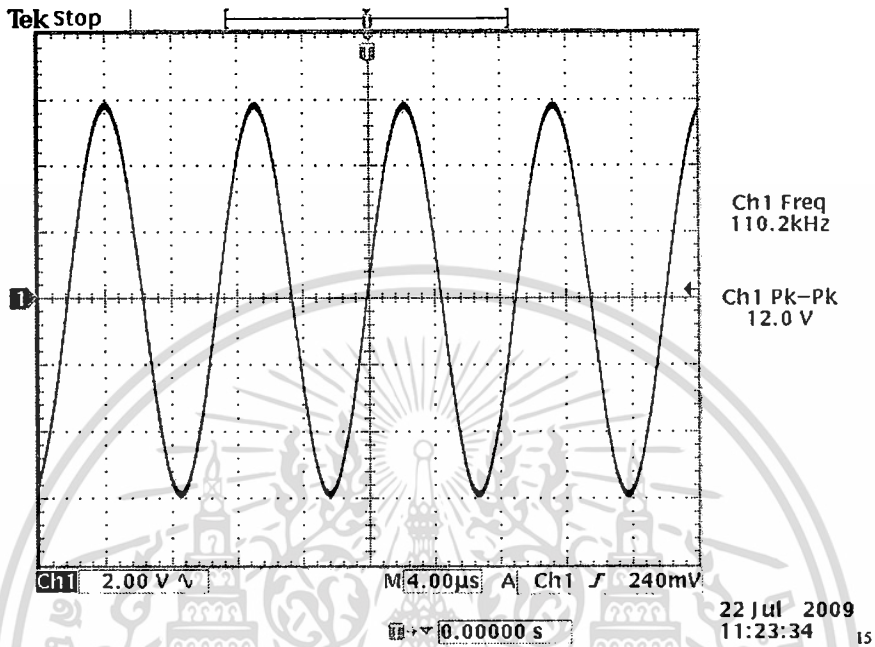
รูปที่ 5.12 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันขณะที่ยังไม่ต่อกับ หัววัดกระแสไหลวน



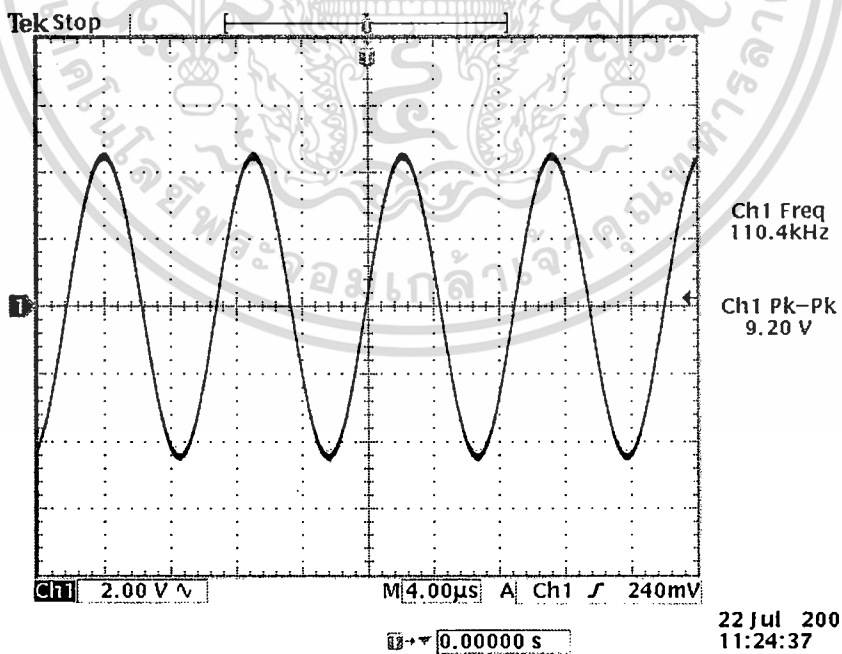
รูปที่ 5.13 สัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของวงจรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันขณะที่ต่อกับหัววัด กระแสไหลวน

5.1.4 การทดสอบสัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวน

สำหรับลักษณะของสัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และ 5.15



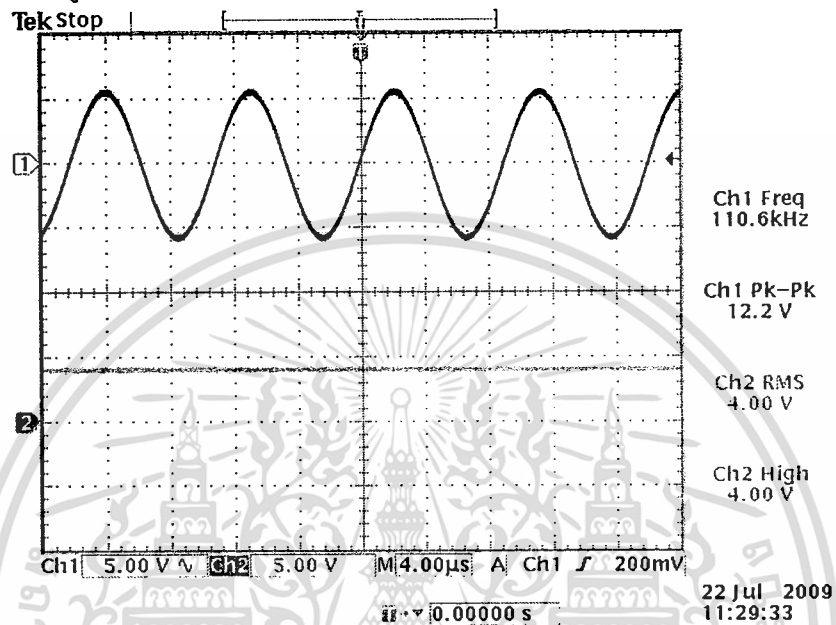
รูปที่ 5.14 สัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวนขณะที่ยังไม่ทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ



รูปที่ 5.15 สัญญาณจากหัววัดกระแสไหลวนขณะทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ

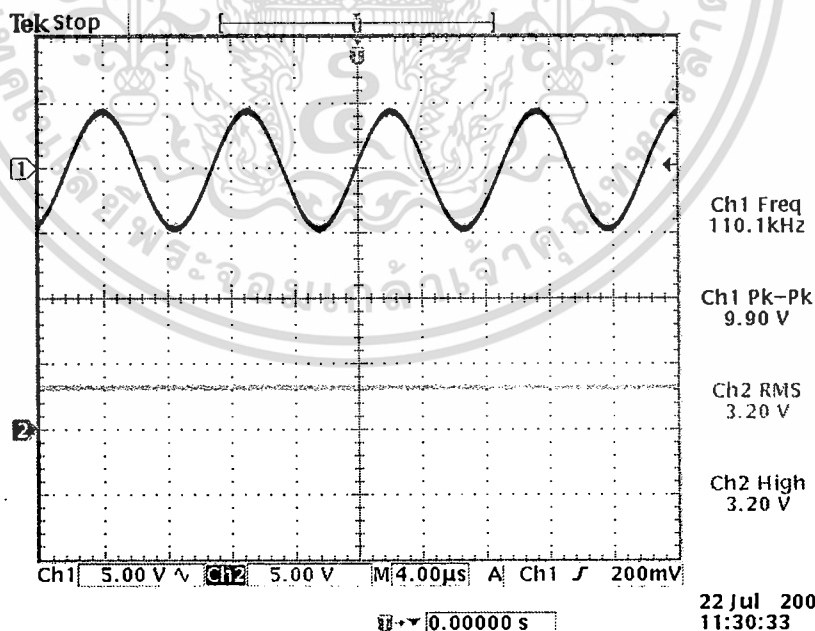
5.1.5 การทดสอบสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซี

สำหรับลักษณะของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 และ 5.17



รูปที่ 5.16 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีขณะที่ยังไม่ทำการวัด

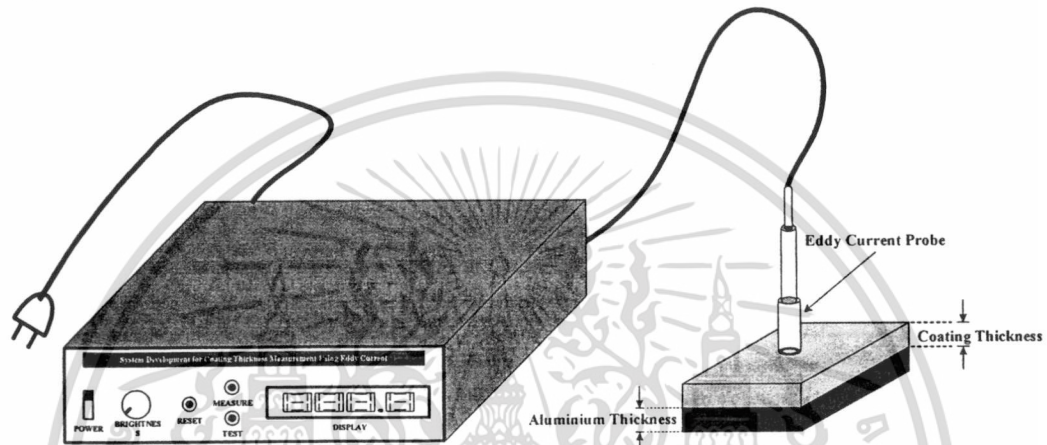
ความหนาของชั้นเคลือบ



รูปที่ 5.17 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอาร์เอ็มเอสเป็นดีซีซึ่งทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ

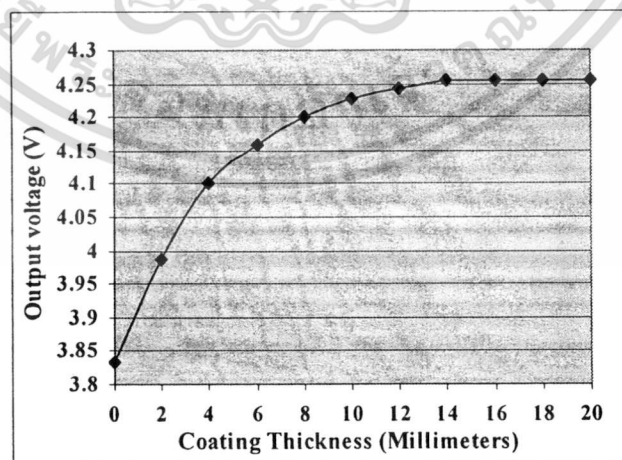
5.2 การทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมากับแผ่นโลหะทดสอบ

สำหรับในการทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมากับแผ่นโลหะทดสอบ (อลูมิเนียม) โดยในการทดสอบนั้นเราจะทำการเคลือบฟิล์มพลาสติกลงบนแผ่นอลูมิเนียมที่ความหนาของฟิล์มพลาสติกขนาดต่างๆ จากนั้นจึงนำเอาระบบที่พัฒนาขึ้นมาทำการวัดดังแสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 การทดสอบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมากับแผ่นโลหะทดสอบ

จากรูปที่ 5.18 เราจะทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบที่ระดับความหนาต่างๆ จากนั้นจึงนำค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรมาทำการพล็อตค่าเทียบกับค่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเมื่อเทียบกับค่าความหนาของฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม

บทที่ 6

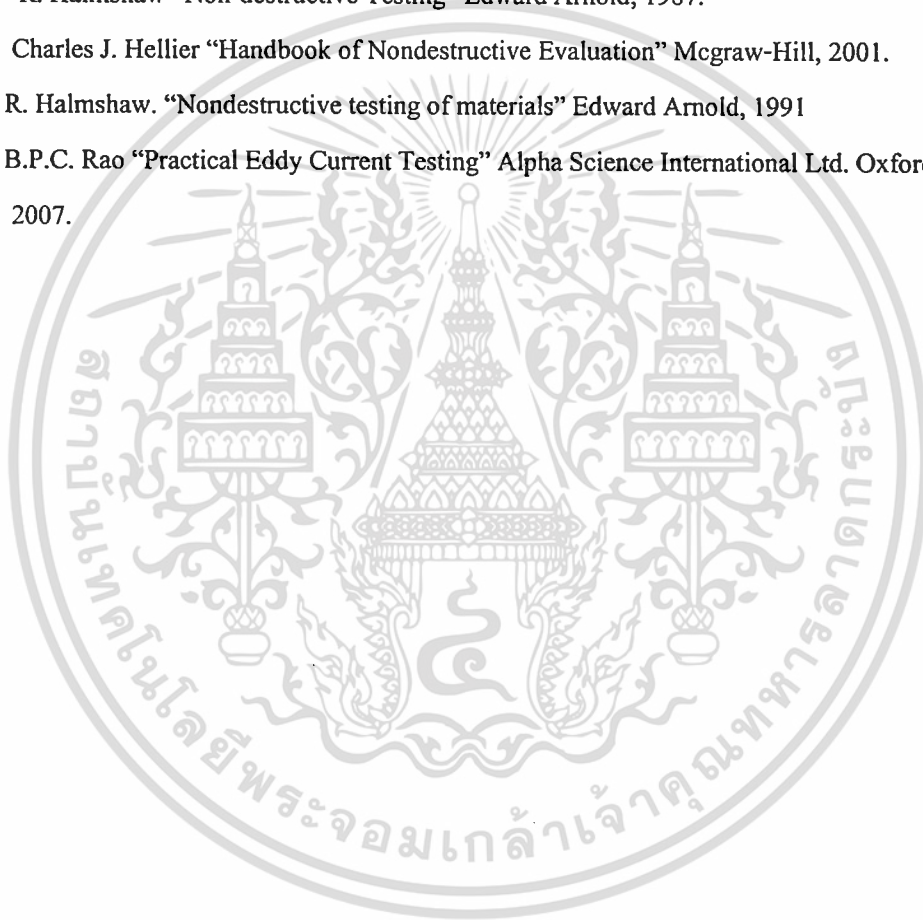
บทสรุป

จากการทดสอบวงจรต่างๆที่ใช้ในการพัฒนาระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวนผลปรากฏว่าวงจรต่างๆสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ และสามารถใช้ในการระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบของโลหะที่นำมาทดสอบได้ แต่อย่างไรก็ตามระบบที่พัฒนาขึ้นยังคงมีค่าความผิดพลาดของความหนาที่วัดได้อยู่บ้าง โดยเฉพาะที่ความหนาของชั้นเคลือบที่มีขนาดน้อยๆ ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่อลดค่าความผิดพลาดของความหนาที่วัดได้ โดยข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจที่จะนำระบบที่พัฒนาขึ้นมาไปพัฒนาต่อมีดังนี้

- ระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบที่พัฒนาขึ้นมาจะใช้มือในการวัด(Manual system) ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในการวัดได้ ถ้าหากมีการพัฒนาให้มีอุปกรณ์จับยึดในการวัดให้สามารถวัดโดยอัตโนมัติจะทำให้ผลของค่าความผิดพลาดจากผู้วัดลดลง
- จากผลการทดลองพบว่า ที่ค่าความหนาของชั้นเคลือบมากกว่า 10 มิลลิเมตรแรงดันเอาท์พุทที่วัดได้จะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทำให้ยากต่อการตรวจจับสัญญาณ ดังนั้นจะต้องมีการพัฒนางจรตรวจจับสัญญาณให้มีค่าความไวในการตรวจจับสัญญาณให้สูงกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

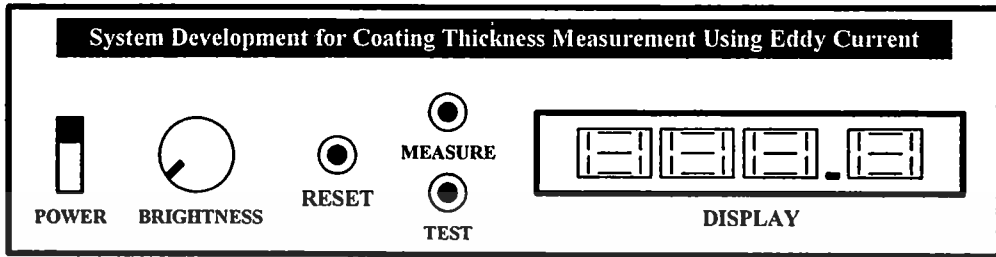
- [1] Paul Lomax , Trends in Coating and Thickness Measurement,
http://www.qualitydigest.com/aug04/articles/03_article.shtml
- [2] CMI International INC., Measuring Coating Thickness,
http://www.pfonlone.com/articles/article_print1.cfm
- [3] พูจิอิ ซาโตะ. “การทดสอบแบบไม่ทำลาย” สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [4] R. Halmshaw “Non-destructive Testing” Edward Arnold, 1987.
- [5] Charles J. Hellier “Handbook of Nondestructive Evaluation” Mcgraw-Hill, 2001.
- [6] R. Halmshaw. “Nondestructive testing of materials” Edward Arnold, 1991
- [7] B.P.C. Rao “Practical Eddy Current Testing” Alpha Science International Ltd. Oxford, U.K.
2007.



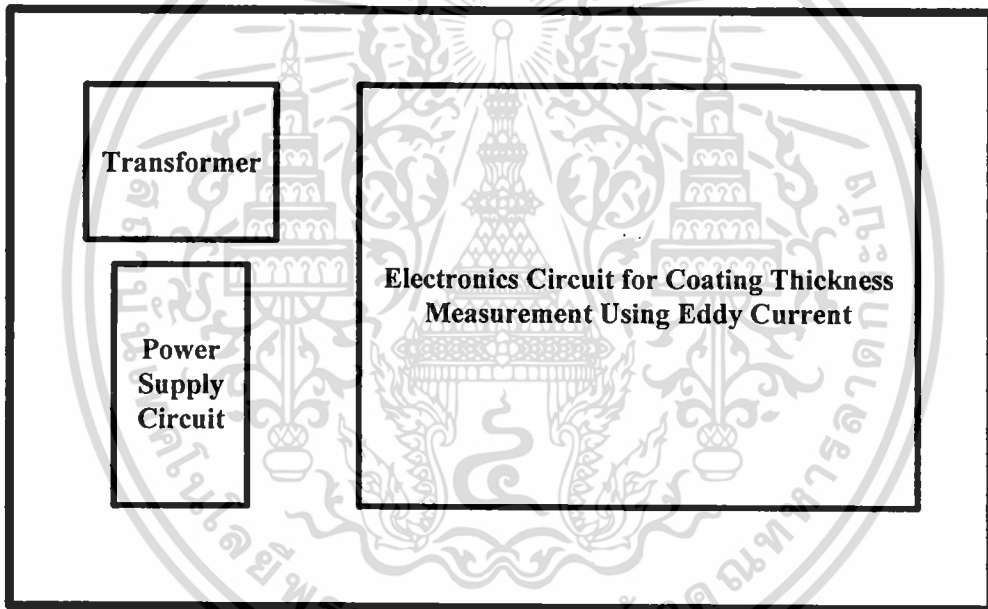
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

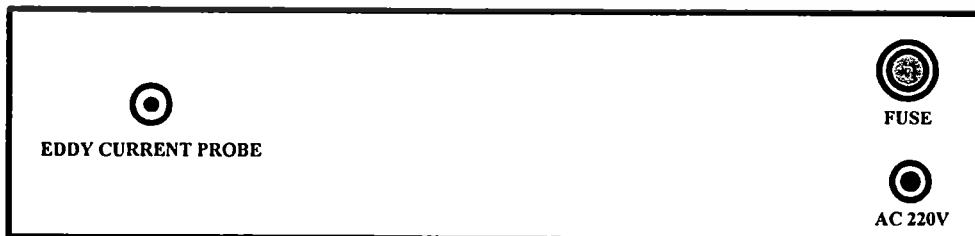
ลักษณะการวางเลย์เอาต์ของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน



รูปที่ ก1 แสดงการวางเลย์เอาต์ด้านหน้าของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน



รูปที่ ก2 แสดงการวางเลย์เอาต์ด้านบนของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน



รูปที่ ก3 แสดงการวางเลย์เอาต์ด้านหลังของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบ โดยใช้กระแสไหลวน

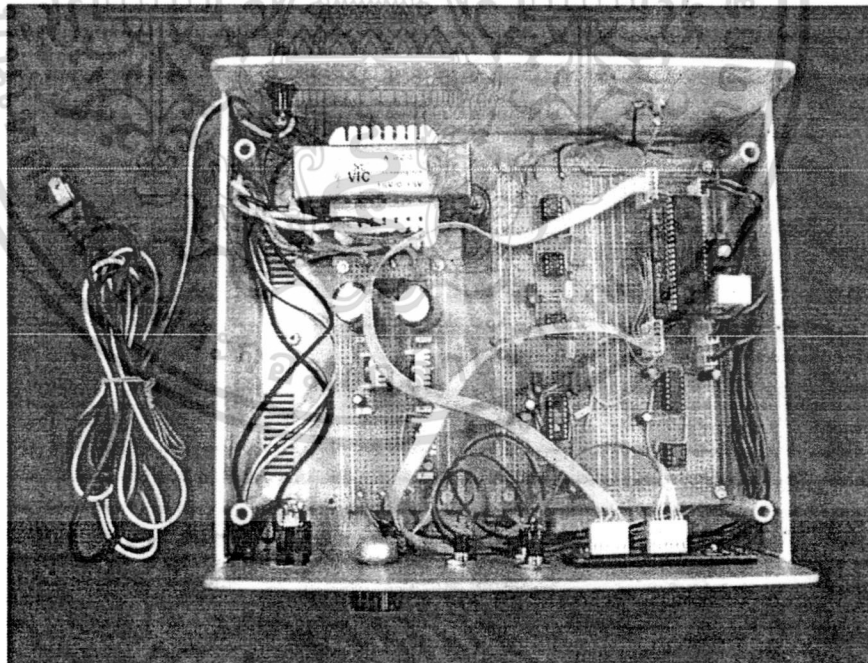
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน



รูปที่ ข1 ด้านหน้าของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

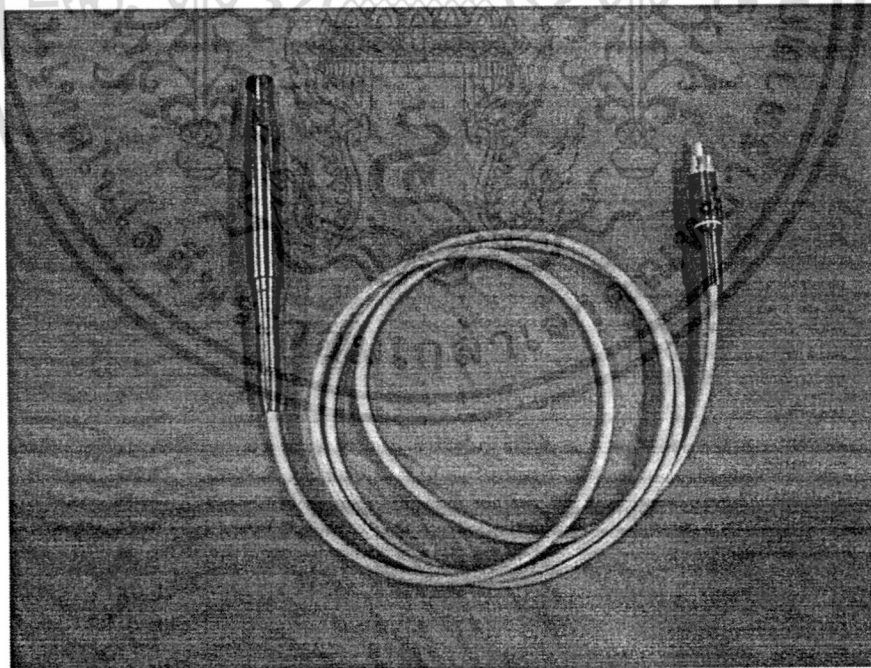


รูปที่ ข2 ด้านบนของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข3 ด้านหลังของต้นแบบระบบวัดความหนาของชั้นเคลือบโดยใช้กระแสไหลวน



รูปที่ ข4 หัววัดกระแสไหลวนที่พัฒนาขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้