

การศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่กระตุ้นให้ขดลวดเหนี่ยวนำ
รูปทรงกระบอก 3 แบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์

A STUDY OF CURRENT AND FREQUENCY EXCITING TO 3 TYPES OF
CYLINDRICAL INDUCTION COIL FOR INCREASING EFFICIENCY OF
HALL EFFECT SENSOR

ญาณเดช ขวัญกิจโยธา
YANNADECH KHWANKITYOTHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562
KMITL-2019-EN-M-060-015

การศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่กระตุ้นให้ขดลวดเหนี่ยวนำ
รูปทรงกระบอก 3 แบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์

A STUDY OF CURRENT AND FREQUENCY EXCITING TO 3 TYPES OF
CYLINDRICAL INDUCTION COIL FOR INCREASING EFFICIENCY OF
HALL EFFECT SENSOR

ญาณเดช ขวัญกิจโยธา
YANNADECH KHWANKITYOTHA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-060-015

A STUDY OF CURRENT AND FREQUENCY EXCITING TO 3 TYPES OF
CYLINDRICAL INDUCTION COIL FOR INCREASING EFFICIENCY OF
HALL EFFECT SENSOR

YANNADECH KHWANKITYOTHA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL-2019-EN-M-060-015

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่กระตุ้นให้ขดลวดเหนี่ยวนำรูปทรงกระบอก 3 แบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์

Thesis Title A Study of Current and Frequency Exciting to 3 Types of Cylindrical Induction Coil for Increasing Efficiency of Hall Effect Sensor

นักศึกษา นายญาณเดช ขวัญกิจโยธา

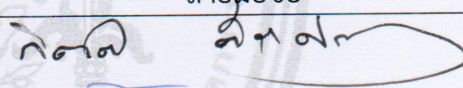
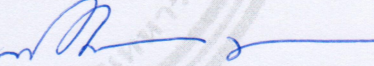
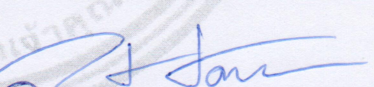
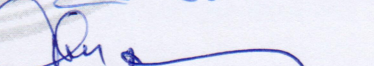
รหัสประจำตัว 59601078

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตน์นะ

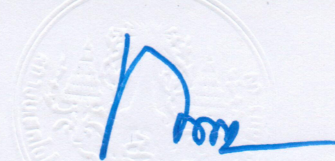
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-M-060-015

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กิตติ	ดีระเศรษฐ์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื้อสตัย	
ผศ.ดร.นรินทร์	ธรรมารักษ์วัฒน์	
รศ.ดร.วิศรุต	ศรีรัตน์นะ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2562 เวลา 8.30-10.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 3 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่กระตุ้นให้ขดลวดเหนี่ยวนำรูปทรงกระบอก 3 แบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์
นักศึกษา	นายญาณเดช ขวัญกิจโยธา
รหัสนักศึกษา	59601078
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่กระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ จำนวนรอบในการพัน 50 รอบ เท่ากัน คือ Type A จำนวนชั้นขดลวด 1 ชั้น, Type B จำนวน 2 ชั้น และ Type C จำนวน 3 พบว่าขดลวด Type C มีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่า Type B ประมาณ 11.9% และมากกว่า Type A ประมาณ 29.3% และพบว่าขดลวด Type C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์มากกว่า Type B และ Type C ประมาณ 12.9% และ 37.4% ตามลำดับ เมื่อกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 1 A ส่งผลให้อุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำของ Type C เกิดความร้อนสูงกว่า Type B ประมาณ 3.5% และสูงกว่า Type A ประมาณ 5.1% ในส่วนการวัดความหนาอะลูมิเนียม พบว่าการกระตุ้นในช่วงความถี่ต่ำกว่า 1,400 Hz เหมาะสมสำหรับใช้วัดความหนา 1, 2 และ 3 mm และส่วนสุดท้ายการวัดชนิดวัสดุโลหะ คือ เหล็ก สแตนเลสเบอร์ 410 และอะลูมิเนียม พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์จากการวัดเหล็กมีค่ามากกว่าสแตนเลส 40.1% และมากกว่าอะลูมิเนียม 58.2% ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์สำหรับจำแนกความหนาอะลูมิเนียมและแยกชนิดวัสดุโลหะเท่ากับ $\pm 0.5\%$.

Thesis Title	A Study of Current and Frequency Exciting to 3 Types of Cylindrical Induction Coil for Increasing Efficiency of Hall Effect Sensor
Student	Mr.Yannadech Khwankityotha
Student ID.	59601078
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Witsarut Sratana

ABSTRACT

This study presents an analysis the parameters to generate electromagnetic fields of the three induction coils with a winding of 50 turns which consist of Type A has one layer, Type B has two layers and Type C has three layers. The electromagnetic field of Type C was found to be 11.9% more intensity than Type B and 29.3% more than Type A, and it was found that Type C increased the output voltage of Hall Effect sensor more than Type B and Type C approximately 12.9% and 37.4% respectively. The temperature of core Type C with an excitation current at 1 A was found to be 3.5% hotter than Type B and 5.1% more than Type A. The measurement of aluminum thickness with an excitation frequency lower than 1.4 kHz is suitable for identifying the thickness of 1, 2 and 3 mm. In terms the measurement of metal which consist of steel, stainless steel and aluminum, it was found that the output voltage of steel more than stainless steel approximately 40.1% and 58.2% more than aluminum. The total error by using Hall Effect sensor is $\pm 0.5\%$.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน ให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหา ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจในการเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ ผศ.สุธรรม สัทธรรมสกุล และ ดร.นภศูล วงษ์วานิช ที่ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขการเสนอผลงานประชุมวิชาการที่จัดขึ้น ณ ประเทศเกาหลีใต้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณ รศ.อนุพงศ์ สรงประภา อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้การสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คำปรึกษา และความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพระคุณหัวหน้า เพื่อน และพี่ๆ ที่บริษัท ไทย-มาฮาล แอ็ดวான்ซ์ เทคโนโลยี จำกัด ทุกคนที่ให้คำปรึกษาทั้งด้านงานและการเรียน

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ นายดำรงค์ ขวัญกิจโยธา ผู้เป็นบิดา นางเบญญาภา ขวัญกิจโยธา ผู้เป็นมารดา และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนช่วยเหลือทั้งเรื่องการเรียนรู้และกำลังใจตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

นายญาณเดช ขวัญกิจโยธา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.2 ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	4
2.2.1 ค่าความเหนี่ยวนำ.....	5
2.2.2 การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.3 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ.....	8
2.3.1 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวต้านเพียงอย่างเดียว.....	8
2.3.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว.....	9
2.4 วงจรขยายสัญญาณ.....	11
2.4.1 วงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำ.....	11
2.4.2 วงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง.....	12
2.4.3 วงจรขยายชนิดคลาสเอบี.....	14
2.5 การวัดความถี่ของวัสดุด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบกระแสไหลวน.....	15
2.6 ทฤษฎีฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์.....	17
2.6.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็ค.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์.....	19
บทที่ 3 การออกแบบและดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
3.1.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
3.1.2 วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	23
3.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	23
3.2.1 ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A (Type A).....	23
3.2.2 ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ B (Type B).....	24
3.2.3 ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C (Type C).....	25
3.3 เครื่องมือในการวัดและตัวอย่างในการทดลอง.....	26
3.3.1 เครื่องมือในการวัด.....	26
3.3.2 วัสดุโลหะที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในการทดลอง.....	27
3.3.2.1 ตัวอย่างความหนาวัสดุโลหะ.....	27
3.3.2.2 ตัวอย่างชนิดวัสดุโลหะ.....	27
3.4 การออกแบบระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ.....	28
3.4.1 ระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ.....	28
3.4.2 การออกแบบระบบตรวจวัด.....	28
3.5 การดำเนินงานวิจัย.....	31
3.5.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	31
3.5.1.1 การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	31
3.5.1.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	32
3.5.1.3 การวิเคราะห์ความร้อนของแกนเหนี่ยวนำ.....	33
3.5.2 การวัดความหนาของอะลูมิเนียม.....	33
3.5.3 การวัดชนิดวัสดุโลหะ.....	34
3.6 สรุปการออกแบบและดำเนินงานวิจัย.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	36
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	36
4.1.1 ค่าความเหนี่ยวนำ.....	36
4.1.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3 ค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำ.....	40
4.1.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	42
4.1.5 อุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำ.....	48
4.2 การวัดความหนาอะลูมิเนียม.....	50
4.3 การวัดชนิดวัสดุโลหะ.....	56
4.4 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.1.1 ค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำ.....	66
5.1.2 การวัดความหนาวัสดุโลหะ.....	67
5.1.3 การวัดชนิดวัสดุโลหะ.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	71
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	72
ประวัติผู้เขียน.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นซาบของวัสดุ.....6
2.2	ค่าความชื้นซาบทางแม่เหล็กและค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ.....17
2.3	ขนาดฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์เบอร์ A1301.....20
4.1	ค่าความเหนียวนำของขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ.....37
4.2	ค่าคำนวณความชื้นซาบทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ.....37
4.3	ความสัมพันธ์ของความถี่กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนียวนำและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ
4.4	ค่าความต้านของขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ จากการคำนวณและการทดลอง.....40
4.5	ความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนียวนำกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ
4.6	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ.....46
	จากการคำนวณและการทดลอง
4.7	ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์
4.8	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ.....50
	พิจารณาความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดเหนียวนำรูปแบบ A
4.9	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ.....51
	พิจารณาความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดเหนียวนำรูปแบบ B
4.10	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ.....52
	พิจารณาความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดเหนียวนำรูปแบบ C
4.11	ค่าคำนวณความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิวอะลูมิเนียม.....54
4.12	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาอะลูมิเนียม.....55
	ที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm จากการวัดทั้งหมด 20 ครั้ง
4.13	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ.....56
	พิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนียวนำรูปแบบ A
4.14	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ.....59
	พิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนียวนำรูปแบบ B
4.15	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ.....61
	พิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนียวนำรูปแบบ C

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16	ค่าคำนวณความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะ.....63
4.17	ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก.....64 สแตนเลสและอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm จากการวัดทั้งหมด 20 ครั้ง

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ขดลวดเหนี่ยวนำ.....5
2.2	สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....7
2.3	วงจรกระแสไฟฟ้าสลับเมื่อผ่านตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว.....8
2.4	วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว.....9
2.5	การเปลี่ยนแปลงของค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์กับความถี่.....10
2.6	วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำ.....11
2.7	อัตรขยายของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำ.....12
2.8	วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง.....12
2.9	อัตรขยายของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง.....13
2.10	วงจรขยายชนิดคลาสเอบี.....14
2.11	การเกิดปรากฏการณ์กระแสไหลวน.....15
2.12	แผนผังความลึกของกระแสไหลวน.....16
2.13	ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็คบนแผ่นตัวนำไฟฟ้า.....17
2.14	ตัวแปรต่าง ๆ จากปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็คบนแผ่นตัวนำไฟฟ้า.....18
2.15	ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์เบอร์ A1301.....19
2.16	ลักษณะฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์.....20
3.1	เครื่องมือสำหรับวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....22
3.2	วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....22
3.3	วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....23
3.4	ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A.....24
3.5	ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ B.....24
3.6	ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C.....25
3.7	การวัดค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่องมือวัดแอลซีอาร์รุ่น LCR-816.....25
3.8	เครื่องมือวัด.....26
3.9	วัสดุโลหะที่ใช้เป็นกรณีศึกษา27
3.10	แผนภาพระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ.....28
3.11	ส่วนด้านหน้าของระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ.....29
3.12	ส่วนด้านหลังของระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ.....30
3.13	แสดงการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของขดลวดเหนี่ยวนำ.....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 การวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	32
3.15 การวัดอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำ.....	33
3.16 แผนภาพระบบจำแนกความหนาอะลูมิเนียม.....	34
3.17 แผนภาพระบบแยกชนิดวัสดุโลหะ.....	35
4.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ.....	39
ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz	
4.2 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ.....	39
ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz	
4.3 ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	42
4.4 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ.....	44
4.5 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำจากการคำนวณและการทดลอง.....	45
4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับตรวจสอบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	48
ขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz	
4.7 อุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ.....	49
4.8 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ สำหรับวัดความหนา.....	53
อะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz	
4.9 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับวัดความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm.....	53
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz	
4.10 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม.....	58
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A	
4.11 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม.....	58
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A	
4.12 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม.....	60
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ B	
4.13 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม.....	60
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ B	
4.14 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม.....	62
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	62

แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม.....
ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิธีการตรวจสอบแบบกระแสไหลวน (Eddy Current Testing) เป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) โดยใช้หลักการสร้างกระแสบนพื้นผิววัสดุตัวนำไฟฟ้าในระนาบตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากหลักการพื้นฐานดังกล่าว ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยหลายเรื่องได้นำวิธีการตรวจสอบแบบกระแสไหลวนมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรมและด้านวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น การนำมาใช้สำหรับตรวจสอบข้อบกพร่องหรือรอยร้าวของอุปกรณ์ [1-3] การนำมาใช้สำหรับวัดความหนาของผิวเคลือบชิ้นงาน [4, 5] การตรวจสอบความหนาของวัสดุโลหะ [6-10] และ นำมาใช้สำหรับวัดความหนาของฟิล์มบาง [11, 12] เป็นต้น จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับการตรวจสอบแบบกระแสไหลวน คือ การกระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งการเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเหมาะสมกับงาน จะช่วยส่งผลให้เกิดความแม่นยำในการตรวจสอบและช่วยลดข้อผิดพลาดในการตรวจสอบได้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ และศึกษาการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ความถี่และกระแสไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ และนำขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ มาใช้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม เป็นกรณีศึกษา จากปรากฏการณ์กระแสไหลวน โดยประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ เนื่องจากฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์มีราคาถูก ใช้งานง่าย ขนาดเล็กกะทัดรัดสามารถติดตั้งได้ง่ายและมีความไวต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ
2. เพื่อศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์
3. เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับวิเคราะห์วัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม เป็นกรณีศึกษา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์และประยุกต์ใช้วิเคราะห์วัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม เป็นกรณีศึกษา จากปรากฏการณ์กระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุตัวนำไฟฟ้า โดยประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับตรวจรู้ผลของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับกระตุ้นการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ
2. ศึกษาการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและตัวแปรที่กระตุ้นการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์
3. ศึกษาทฤษฎีปรากฏการณ์กระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุตัวนำไฟฟ้า
4. ศึกษาการประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับตรวจรู้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากปรากฏการณ์กระแสไหลวน
5. ศึกษาการติดตั้งเซ็นเซอร์และออกแบบระบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับบ่งบอกความหนาอะลูมิเนียมและชนิดวัสดุโลหะได้ รวมทั้งสามารถนำไปใช้งานได้จริงและช่วยลดต้นทุนสำหรับการสร้างระบบดังกล่าว
2. สามารถออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำและเลือกใช้ขดลวดเหนี่ยวนำให้เหมาะสมกับวงจรไฟฟ้าและงานแต่ละประเภทได้
3. สามารถนำงานวิจัยไปพัฒนาและต่อยอดในเชิงพาณิชย์ด้านอุตสาหกรรมหรือนำมาประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยในด้านอื่น ๆ

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

- บทที่ 1. กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำ จุดมุ่งหมายของงานวิจัยและวัตถุประสงค์ในกรณีศึกษาการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สำหรับเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

- บทที่ 2. กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม ปรากฏการณ์กระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะ และฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์
- บทที่ 3. กล่าวถึงกระบวนการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวิธีการออกแบบระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและ อะลูมิเนียม เป็นกรณีศึกษา
- บทที่ 4. กล่าวถึงวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์สำหรับกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
- บทที่ 5. บทสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาสำหรับนำไปใช้พัฒนาต่อยอดในอนาคต

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ส่วนนี้กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมและเอกสารที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยการศึกษามลของความถี่และกระแสไฟฟ้าที่กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์และนำมาใช้เพื่อวัดความหนาอะลูมิเนียมที่ 1, 2 และ 3 mm และชนิดวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม เป็นกรณีศึกษา จากปรากฏการณ์กระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุตัวนำไฟฟ้าโดยเกิดจากการทบทวนวรรณกรรมดังต่อไปนี้

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

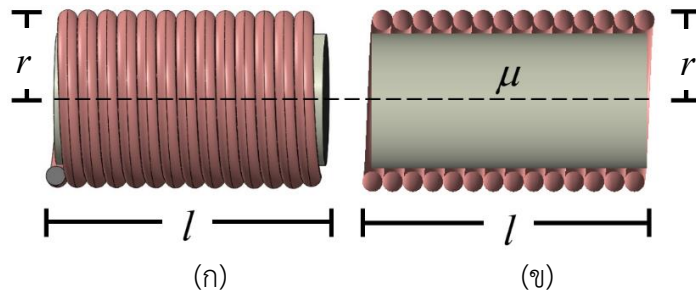
ในการทบทวนวรรณกรรมได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกความหนาวัสดุโลหะ เช่น การจำแนกความหนาของเหล็ก [6] สแตนเลส [8] และ อะลูมิเนียม [10] ซึ่งมีหลายงานวิจัยได้ประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ทางแม่เหล็กสำหรับตรวจสอบวัสดุโลหะด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย จากปรากฏการณ์กระแสไหลวนไหลบนพื้นผิววัสดุโลหะ เช่น Hall sensor [7,8], GMR [9], TMR [13], AMR [14] และ GMI [15] เป็นต้น บางงานวิจัยได้มีการเสนอการออกแบบรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [11-12] สำหรับตรวจสอบวัสดุโลหะ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นจึงเป็นจุดเริ่มต้นของการนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยความสำคัญของงานวิจัย คือ ต้องการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์และนำมาประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส และอะลูมิเนียม เป็นกรณีศึกษา

2.2 ขดลวดเหนี่ยวนำ

ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์พื้นฐานอีกตัวหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานในวงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย บทบาทสำคัญของขดลวดเหนี่ยวนำ คือ ทำให้เกิดการพองตัวและการยุบตัวของสนามแม่เหล็กขึ้นมาเมื่อจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าให้ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนขดลวดเหนี่ยวนำนี้มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน เช่น นำไปสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ หัววัดและเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ เป็นต้น

ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นเส้นลวดตัวนำจำพวกขดลวดทองแดงเป็นวงเรียงกันหลาย ๆ รอบ เรียกว่าขดลวดหรือคอยล์ ลักษณะการพันเส้นลวดตัวนำแตกต่างกันมีผลทำให้ขดลวดเหนี่ยวนำแตกต่างกัน การพันจำนวนรอบของขดลวดเหนี่ยวนำมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในตัวเหนี่ยวนำนั้น ถ้าพันจำนวนรอบน้อยค่าความเหนี่ยวนำน้อย พันจำนวนรอบมากค่าความเหนี่ยวนำมาก จำนวนรอบ

ยังมีผลต่อปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วย จำนวนรอบน้อยความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดน้อย จำนวนรอบมากความเข้มสนามแม่เหล็กเกิดมาก ตัวแปรต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขดลวดเหนี่ยวนำ

(ก) ภาพส่วนนอก

(ข) ภาพตัดขวาง

2.2.1 ค่าความเหนี่ยวนำ [16]

การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับรูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้สำหรับเป็นแกนเหนี่ยวนำและจำนวนรอบในการพันขดลวด การหาค่าความเหนี่ยวนำแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.1)$$

ถ้ารูปร่างของขดลวดเหนี่ยวนำเป็นทรงกระบอก ค่าความเหนี่ยวนำจะแสดงดังสมการที่ (2.2)

$$L = \frac{N^2 \mu \pi r^2}{4l} \quad (2.2)$$

เมื่อ	L	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ (H)
	N	คือ	จำนวนรอบในการพันขดลวด
	r	คือ	รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำ (m)
	l	คือ	ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ (m)
	μ	คือ	ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของวัสดุ (H/m)

ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุ (μ) คือ ความสามารถในการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นภายในตัววัสดุเอง ค่าสภาพให้ซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของวัสดุสามารถแสดงเปรียบเทียบกับค่าความซึมซาบของอากาศ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.3)$$

วัสดุซึ่งมีปริมาณค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบ (μ_r) $\gg 1$ วัสดุพวกนี้จะถูกเรียกว่า วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เนื่องจากว่ามีความสามารถในการประพจน์ตัวเองเป็นแม่เหล็กได้ในทางตรงกันข้ามกับสสารอื่น ๆ วัสดุเฟอร์โรแมกเนติกจะประพจน์ตัวเองเป็นแม่เหล็กได้ง่ายและสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูง และเมื่อวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกถูกการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กจะไม่ประพจน์ตัวกลับเป็นแบบเดิมนอกจากจะไม่มีการเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็ก พฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า ฮิสเตอร์เรซิส ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบของวัสดุแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบของวัสดุ [17]

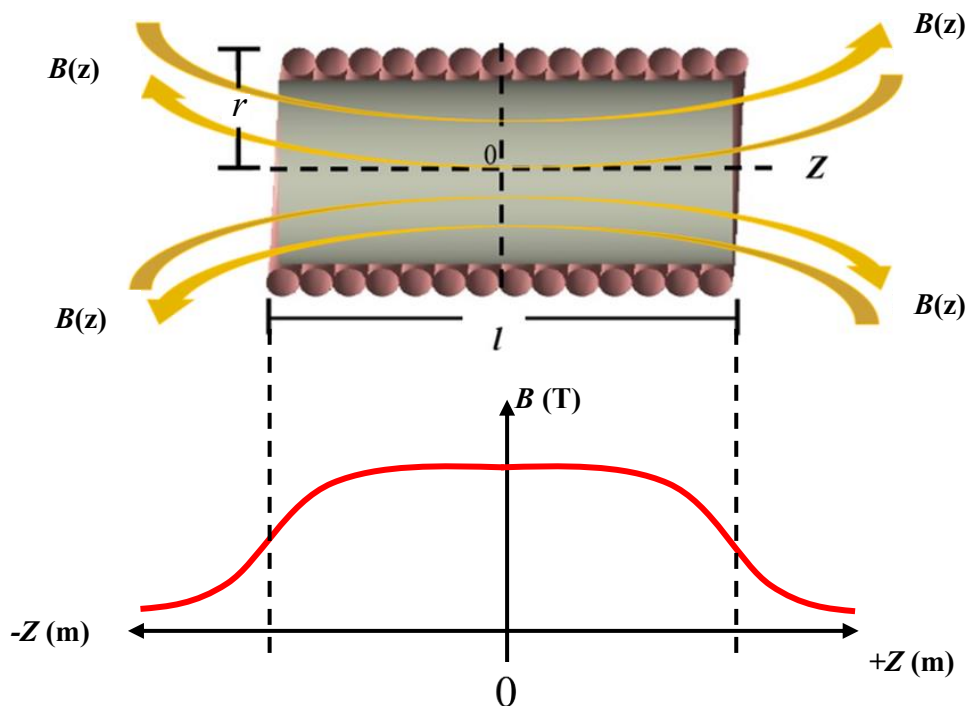
วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบของวัสดุ
สแตนเลสเบอร์ 410	360
อะลูมิเนียม	1
ทองเหลือง / บรอนซ์	1
เหล็กแผ่นเบอร์ SS400	2000

2.2.2 การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า [18]

การคำนวณหาความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนแกนของขดลวดเหนี่ยวนำที่แผ่ออกมาอย่างสม่ำเสมอแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยมีความยาวและจำนวนรอบในการพันเข้ามาเกี่ยวข้องของสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2.4)

$$B(z) = \frac{\mu IN}{2l} \cdot \left(\frac{z + \frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \left(z + \frac{l}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{l}{2}}{\sqrt{r^2 + \left(z - \frac{l}{2}\right)^2}} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ	$B(z)$	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (T)
	z	คือ	ตำแหน่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (m)
	I	คือ	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ (A)



รูปที่ 2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

สำหรับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางขดลวดเหนี่ยวนำ, $z=0$ จากสมการที่ (2.4) จะถูกแสดงดังสมการที่ (2.5)

$$B(0) = \frac{\mu IN}{2l} \cdot \frac{l}{\sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}}} \quad (2.5)$$

และสำหรับขดลวดที่ยาว ($l \gg R$) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.6)

$$B(0) = \frac{\mu IN}{l} \quad (2.6)$$

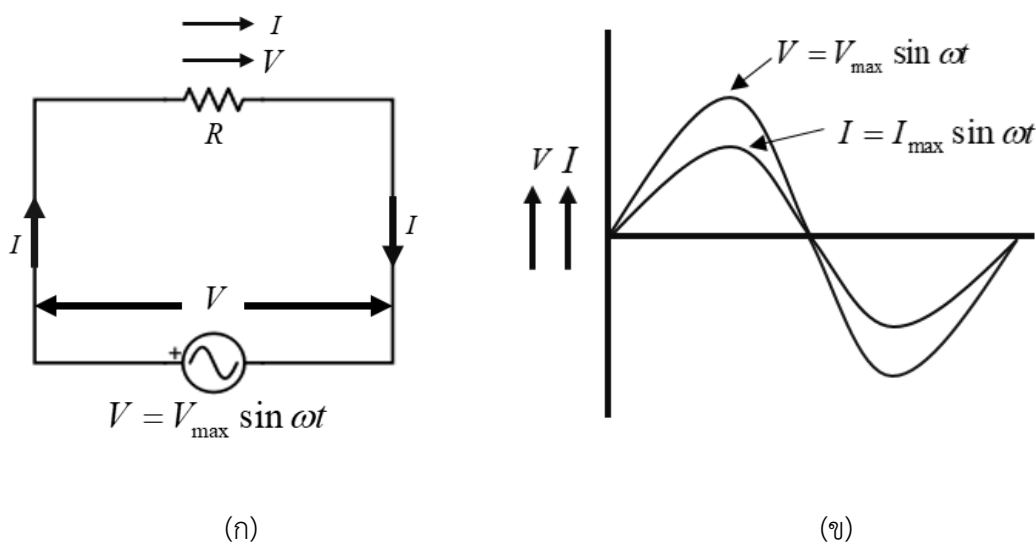
2.3 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ [19]

ในส่วนนี้อธิบายถึงที่มาและสมการที่เกี่ยวข้องของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวต้านทานและขดลวดเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวถูกแสดงดังนี้

2.3.1 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว

วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวแสดงดังรูปที่ 2.3 (ก) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งแสดงในสมการที่ (2.7)

$$V = V_{\max} \sin \theta = V_{\max} \sin \omega t \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.3 วงจรกระแสไฟฟ้าสลับเมื่อผ่านตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว

จากนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะถูกแสดงดังสมการที่ (2.8)

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_{\max} \sin \omega t}{R} \quad (2.8)$$

ค่าของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุด เมื่อ $\sin \omega t = 1$ หรือ $(\omega t = 90^\circ)$ แสดงสมการที่ (2.9)

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R} \quad (2.9)$$

เมื่อแทนค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดจากสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้สมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านแสดงดังสมการที่ (2.10)

$$I = I_{\max} \sin \omega t \quad (2.10)$$

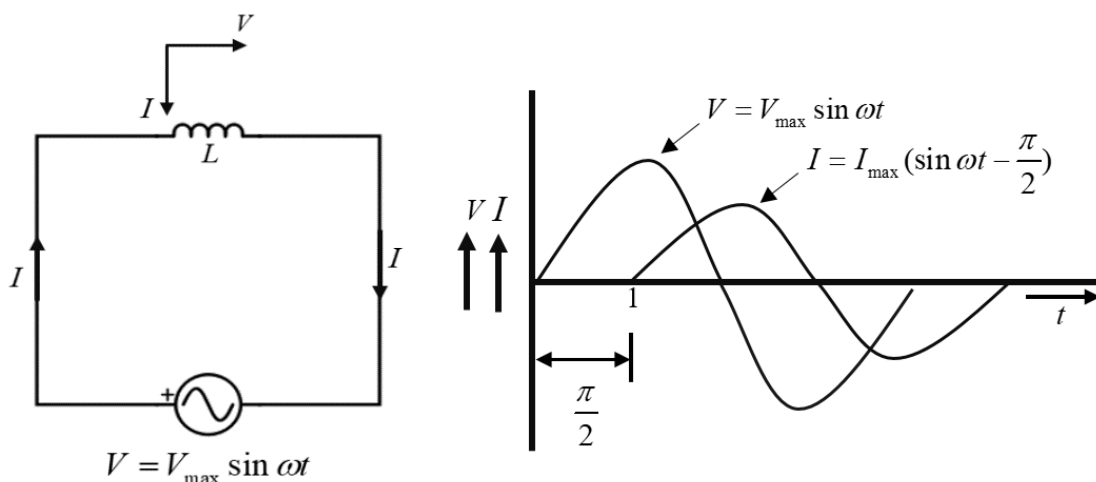
สรุปผลของวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะมีเฟสเดียวกัน
2. ผลของกระแสไฟฟ้า $I = \frac{V}{R}$ เมื่อ I และ V คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

2.3.2 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว

รูปที่ 2.4 (ก) แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว โดยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งแสดงในสมการที่ (2.7)

อย่างไรก็ตามวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดเหนี่ยวนำจะเกิดการเหนี่ยวนำและสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวเอง ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่ามากหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ ในกรณีนี้ไม่มีการตกคร่อมของตัวต้านทาน ดังนั้นจึงใช้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งสมการวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อมีตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดเหนี่ยวนำดังแสดงในสมการที่ (2.11)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.4 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียว

$$I = \frac{V_{\max}}{X_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.11)$$

เมื่อ $X_L = 2\pi fL$ (เป็นค่าความต้านทานในการไหลของกระแสไฟฟ้าสลับสำหรับขดลวดเหนี่ยวนำในกรณีนี้) ซึ่งถูกเรียกว่า ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ (Inductive reactance) และ ω คือ $2\pi f$ หน่วยเป็น rad/s และเมื่อค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อ $\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = 1$ จะได้สมการที่ (2.12)

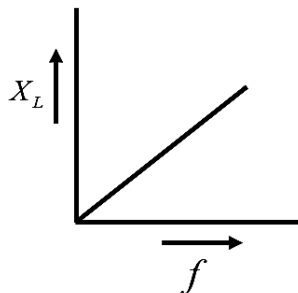
$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{X_L} \quad (2.12)$$

แทนสมการที่ (2.12) ในสมการที่ (2.11) จะได้สมการที่ (2.13) ว่า

$$I = I_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.13)$$

สรุปวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวมีดังนี้

1. สมการกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ $I = \frac{V}{X_L} = \frac{V}{\omega L} = \frac{V}{2\pi fL}$ หน่วย แอมป์แปร์
2. กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะมีเฟสต่างกัน 90 องศา
3. เนื่องจาก $X_L = \omega L = 2\pi fL$ ดังนั้น $X_L \propto f$ หรือ ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์แปรผันตรงกับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นทรงผลให้ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย



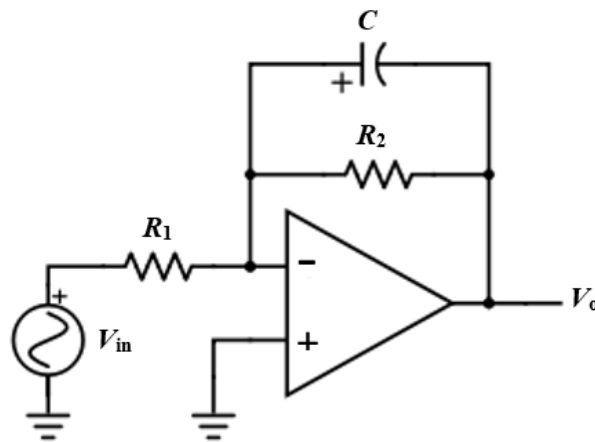
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์กับความถี่

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นทรงผลให้ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงเนื่องจากมีเฟสต่างกัน 90 องศา

2.4 วงจรขยายสัญญาณ [20]

2.4.1 วงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำ

การต่อวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำโดยให้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำ

สมการที่ (2.14) แสดงค่าอิมพีแดนซ์ในวงจร คือ

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{(1/sC)} = \frac{(R_2sC + 1)}{R_2} \quad (2.14)$$

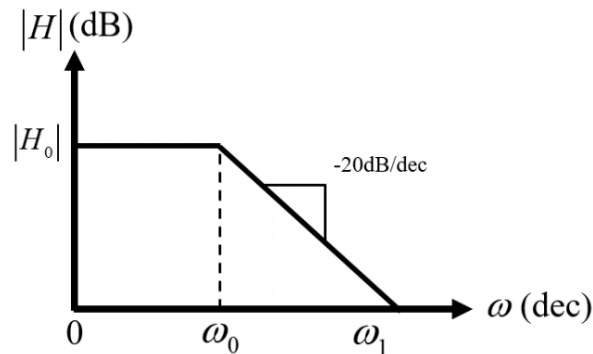
ให้กำลังขยาย $H(s) = -Z_2 / R_1$ แสดงดังสมการที่ (2.15)

$$H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{R_2sC + 1} \quad (2.15)$$

เมื่อ $s = j\omega$, $H_0 = -\frac{R_2}{R_1}$ และ $\omega_0 = \frac{1}{R_2C}$ สามารถเขียนสมการที่ (2.15) ในรูปแบบทั่วไปได้ดังสมการที่ (2.16)

$$H(j\omega) = H_0 \frac{1}{1 + j\omega / \omega_0} \quad (2.16)$$

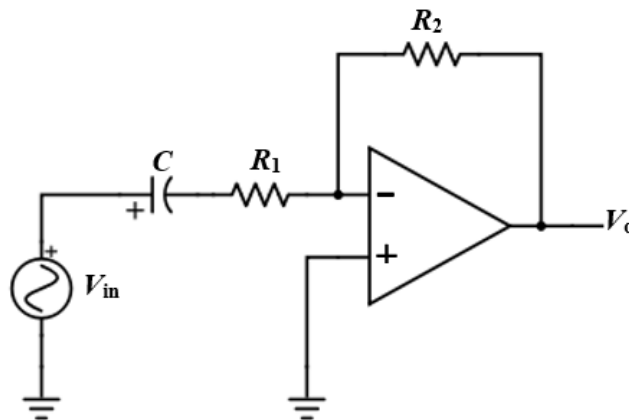
รูปที่ 2.7 แสดงอัตรายายของวงจรรขยายแบบกลับเฟส H_0 คือ อัตรายายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งค่าที่ $0 \rightarrow \omega_0$ คือ ช่วงความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าถูกเลือกสำหรับมาใช้งาน และ $\omega_0 \rightarrow \omega_1$ คือ ช่วงที่วงจรมียอมให้ความถี่ในช่วงนี้ผ่านไปได้



รูปที่ 2.7 อัตรายายของวงจรรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่ต่ำ

2.4.2 วงจรรขยายแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง

การต่อวงจรรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูงโดยให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่อเข้ากับตัวเก็บประจุและอนุกรมกับตัวต้านทานดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง

สมการที่ (2.17) แสดงค่าอิมพีแดนซ์ในวงจร คือ

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{sC} = \frac{(R_1sC + 1)}{sC} \quad (2.17)$$

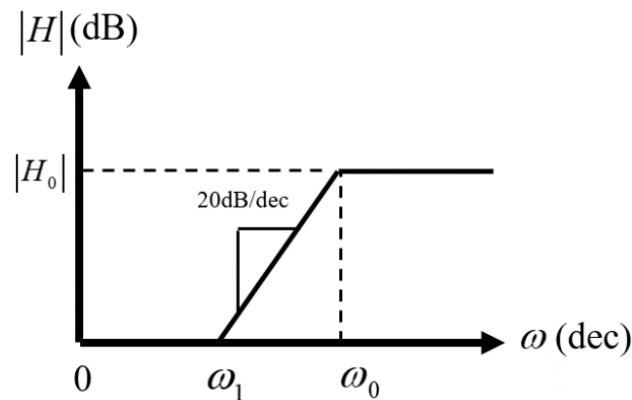
และ กำลังขยายของวงจร คือ $H(s) = -R_2 / Z_1$ แสดงดังสมการที่ (2.18)

$$H(s) = -\frac{R_2}{R_1} \left(\frac{R_1Cs}{R_1Cs + 1} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ $s = j\omega$, $H_0 = -\frac{R_2}{R_1}$ และ $\omega_0 = \frac{1}{R_1C}$ สามารถเขียนสมการที่ (2.18) ในรูปทั่วไปได้ว่า

$$H(j\omega) = H_0 \frac{j\omega / j\omega_0}{1 + j\omega / \omega_0} \quad (2.19)$$

รูปที่ 2.9 แสดงอัตราขยายของวงจรขยายแบบกลับเฟส H_0 คือ อัตราขยายแรงดันไฟฟ้า ซึ่งช่วงที่ $\omega_0 \rightarrow \omega_\infty$ เป็นช่วงความถี่ที่แรงดันไฟฟ้าถูกเลือกสำหรับมาใช้งาน และ ช่วง $0 \rightarrow \omega_1$ คือ ช่วงที่วงจรไม่ยอมให้ความถี่ในช่วงนี้ผ่านไปหรือไม่มีแรงดันไฟฟ้าในช่วงนี้



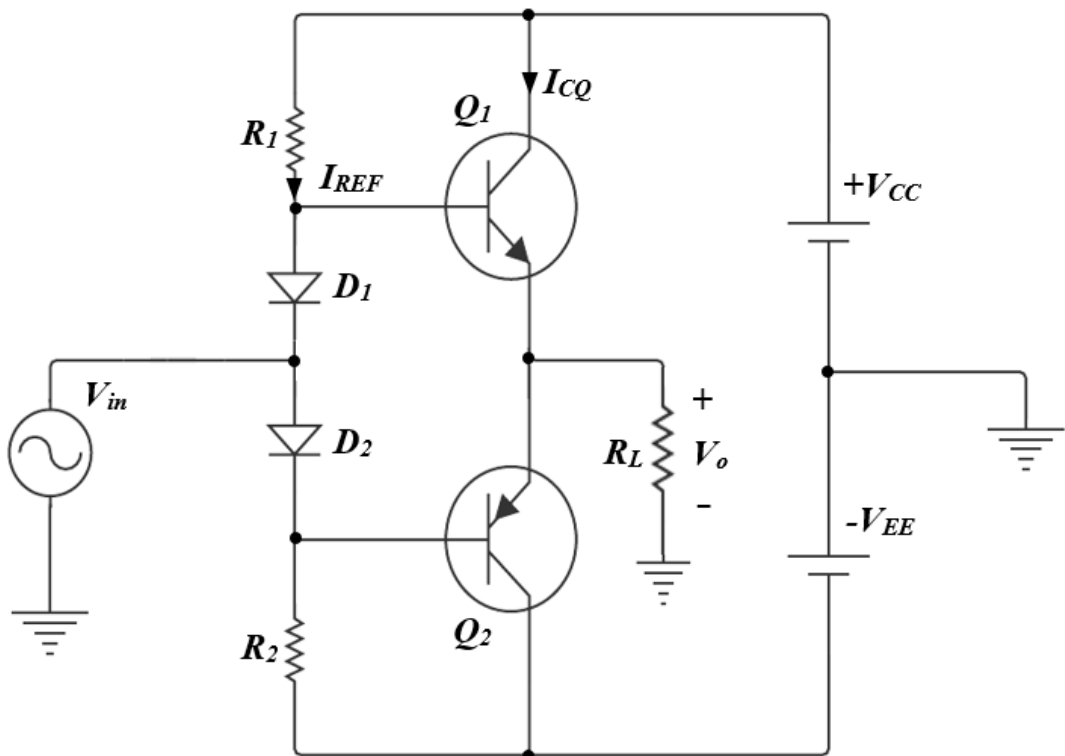
รูปที่ 2.9 อัตราขยายของวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง

2.4.3 วงจรขยายชนิดคลาสเอบี [21]

วงจขยายด้วยทรานซิสเตอร์ที่ใช้ตัวต้านสำหรับไบแอสในการทำงานปัญหาที่ตามมา คือ ผลของอุณหภูมิที่สูง วิธีหนึ่งในการชดเชยการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขาเบส-อีมีเตอร์ (V_{BE}) คือ การใช้คู่ของไดโอดในการไบแอส กระแสไฟฟ้าคงที่ขนาดเล็กที่ไหลผ่านวงจรถนุกรมของ $R_1 - D_1 - D_2 - R_2$ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกซึ่งมีความสมมาตรทั้งสองด้านของอินพุต เมื่อไม่มีการใช้แรงดันสัญญาณอินพุตจุดระหว่างไดโอดทั้งสองจะมีค่า 0 V เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีแรงดันไบแอสตรงตกคร่อมประมาณ 0.7 V ซึ่งจะถูกนำไปใช้เปิดสวิตซ์ทรานซิสเตอร์ ($V_{BE(ON)}$) ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดจึงทำให้การไบแอสของทรานซิสเตอร์ Q_1 มีค่าประมาณ 0.7 V และ การไบแอสของทรานซิสเตอร์ Q_2 มีค่าประมาณ -0.7 V ดังนั้นไดโอดซิลิคอนสองตัวจึงให้แรงดันตกที่คงที่ประมาณ 1.4 V

เมื่อ $I_{B_1} = I_{B_2} \cong 0$ และ $R_1 = R_2 = R$ ซึ่ง $I_{CQ} \cong I_{REF}$ ดังนั้นสมมติฐานของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแสดงดังสมการที่ (2.20)

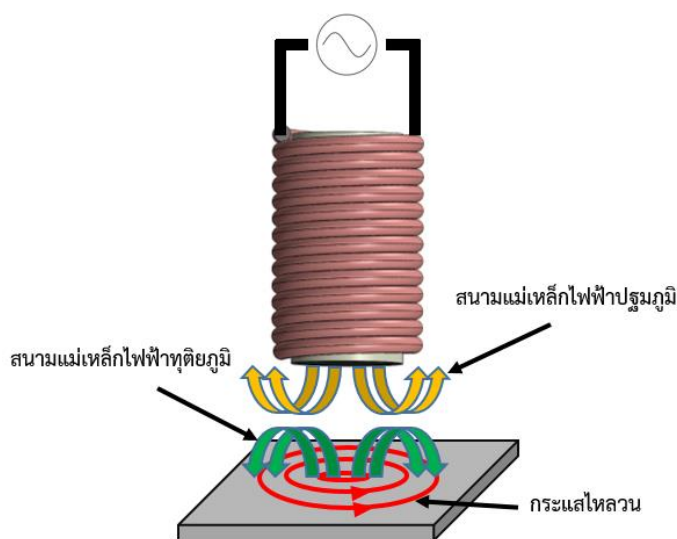
$$I_{CQ} \cong I_{REF} = \frac{V_{CC} + V_{EE} - 2V_{BE}}{2R} \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.10 วงจขยายชนิดคลาสเอบี

2.5 การวัดความลึกของวัสดุด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบกระแสไหลวน [22]

การตรวจสอบแบบกระแสไหลวนเป็นหนึ่งในหลาย ๆ วิธีของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย การตรวจสอบแบบกระแสไหลวนใช้หลักการพื้นฐานทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเกิดจากการเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุตัวนำไฟฟ้าและมีการสร้างกระแสไฟฟ้าบนวัสดุ ถ้าวัสดุมีการนำไฟฟ้าที่ไม่ใช่ศูนย์ กระแสไฟฟ้าเหล่านี้ เรียกว่า กระแสไหลวน และจะไม่มีเกิดการเกิดกระแสไหลวนถ้าความต้านทานของวัสดุสูงมากหรือเป็นฉนวนทางไฟฟ้า กระแสไหลวนเหล่านี้จะมีการสร้างสนามแม่เหล็กทุติยภูมิขึ้นมาซึ่งจะต่อต้านทิศทางของสนามแม่เหล็กปฐมภูมิที่ถูกสร้างจากขดลวดเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 2.11

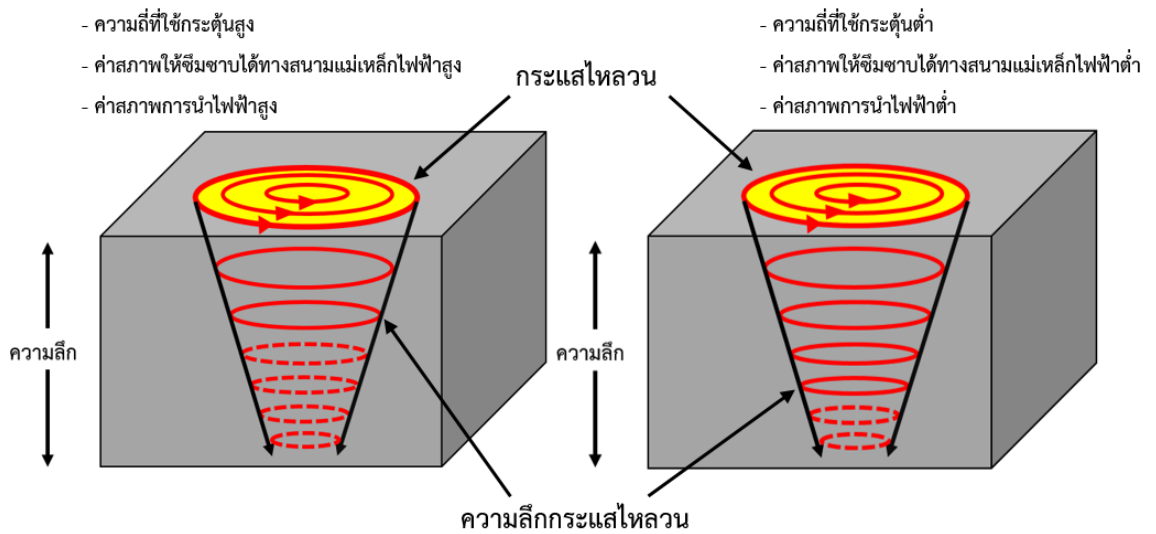


รูปที่ 2.11 การเกิดปรากฏการณ์กระแสไหลวน

โดยปกติของกระแสไหลวนจะขึ้นกับค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ ถ้ามีความไม่ต่อเนื่อง (ไม่มีค่าการนำไฟฟ้า) กระแสไหลวนจะมีการเบี่ยงเบนและมีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก เทคนิคการตรวจสอบแบบกระแสไหลวนจึงใช้หลักการวัดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจจับความผิดปกติที่เกิดจากรอยแตกและความไม่ต่อเนื่องอื่น ๆ ในวัสดุโลหะ

โดยทั่วไปแล้วกระแสไหลวนจะมีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอภายในของวัสดุตัวนำไฟฟ้าเมื่อมองแบบภาพตัดขวาง เนื่องจากการใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบกระแสไหลวน หมายถึง การกระตุ้นให้เกิดกระแสไฟฟ้าภายในพื้นที่ของวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่จะนำมาวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องทราบว่าการกระจายของกระแสไฟฟ้าเหล่านี้ในวัสดุตัวอย่างเป็นอย่างไรร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะกระจายตัวอยู่บนพื้นผิววัสดุและผ่านความลึกของวัสดุ ในการกระจายของกระแสไหลวนจะมีค่ามากที่สุดเมื่อหัววัดอยู่ใกล้พื้นผิวของวัสดุและจะมีค่าน้อยลงเมื่อหัววัดอยู่ห่างจากวัสดุ ในทำนองเดียวกัน

การกระจายของกระแสไหลวนจะแตกต่างกันไปตามการเอียงของวัต ซึ่งการเอียงของหัววัตก็เป็นปัญหาทั่วไปในการวัดแบบกระแสไหลวน



รูปที่ 2.12 แผนผังความลึกของกระแสไหลวน

รูปที่ 2.12 แสดงการไหลของกระแสไหลวนภายในแผ่นวัสดุตัวนำไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่กระตุ้นเชิงมุม (ω) ซึ่งสัมพันธ์กับความถี่ของกระแสไฟฟ้าสลับที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ การเหนี่ยวนำกระแสไหลวนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทะลุทะลวงผ่านวัสดุตัวนำไฟฟ้าจะมีการลดทอนสูงสุดที่ผิวของวัสดุตัวนำไฟฟ้า การทะลุทะลวงผ่านจะมีค่าลดลงเมื่อ ความถี่ที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าสภาพให้ซึมซาบได้ทางแม่เหล็กและค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุมีค่าสูงขึ้น การคำนวณหาความลึกของกระแสไหลวน (δ) ที่สามารถทะลุทะลวงผ่านภายในวัสดุตัวนำไฟฟ้าแสดงดังสมการที่ (2.21)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) เมื่อ $\omega = 2\pi f$ แสดงดังสมการที่ (2.22)

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \quad (2.22)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ (Hz)
 σ คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

จากสมการดังกล่าวที่อธิบายมาแสดงให้เห็นว่าความถี่ที่ใช้กระตุ้นการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าสภาพให้ซึมซาบได้ทางแม่เหล็กและค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุเป็นตัวแปรสำหรับกำหนดความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะ ซึ่งค่าสภาพให้ซึมซาบได้ทางแม่เหล็กและค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.2

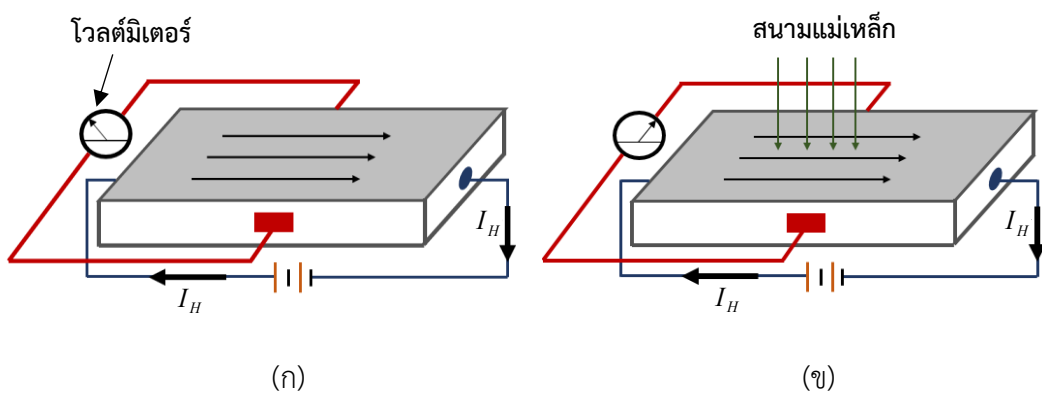
ตารางที่ 2.2 ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กและค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ [23]

วัสดุ	ค่าสภาพให้ซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (H/m)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (S/m)
อะลูมิเนียม	1.26×10^6	3.77×10^7
สแตนเลสเบอร์ 410	4.52×10^4	1.75×10^6
เหล็กแผ่น SS400	2.51×10^3	1.00×10^7

2.6 ทฤษฎีฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ [24]

2.6.1 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็ค

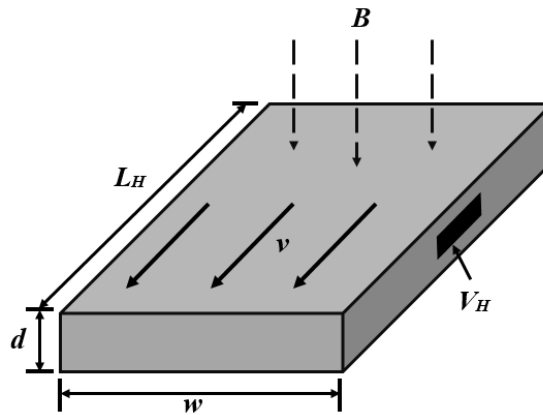
แนวคิดพื้นฐานของฮอลล์เอฟเฟ็คถูกอธิบายดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยในรูปที่ 2.13 (ก) แสดงแผ่นวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่มีขนาดบาง เช่น ทองแดง เป็นต้น ในกรณีนี้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยต่อเข้ากับวัสดุตัวนำไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุตัวนำไฟฟ้า เมื่อนำโวลต์มิเตอร์วัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัสดุตัวนำไฟฟ้า ผลของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็คบนแผ่นตัวนำไฟฟ้า

รูปที่ 2.13 (ข) แสดงการกระตุนสนามแม่เหล็กลงไปบนพื้นผิวของวัสดุตัวนำไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน เมื่อทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัสดุตัวนำไฟฟ้าจะมีการปรากฏของค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขึ้นมาเล็กน้อย ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ฮอลล์เอฟเฟ็ค”

ตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดจากปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็คบนแผ่นตัวนำไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.14 และสมการที่เกี่ยวข้องถูกแสดงดังสมการที่ (2.23) - (2.26)



รูปที่ 2.14 ตัวแปรต่าง ๆ จากปรากฏการณ์ฮอลล์เอฟเฟ็คบนแผ่นตัวนำไฟฟ้า

เมื่อ E_H คือ สนามไฟฟ้าของฮอลล์ที่ข้ามผ่านทรานสเวิร์ส แสดงสมการของ E_H ดังสมการที่ (2.23)

$$E_H = v \times B \quad (2.23)$$

จากสมการข้างต้นหมายความว่าสนามไฟฟ้าของฮอลล์ คือ ฟังก์ชันของความเร็วพาหะประจุ (v) และ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) และ เมื่อมีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (w) ของทรานสเวิร์ส รวมกับสนามไฟฟ้าของฮอลล์ จะได้สมการความต่างศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ (V_H) ดังสมการที่ (2.24)

$$V_H = wvB \quad (2.24)$$

เมื่อ ความเร็วพาหะประจุ (v) แสดงดังสมการที่ (2.25)

$$v = \frac{I_H}{q_0 N_H A_H} \quad (2.25)$$

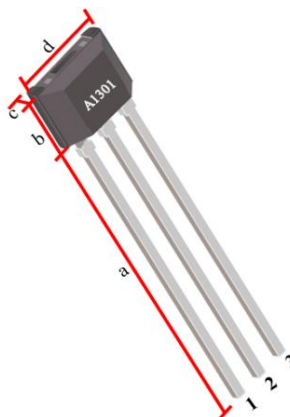
เมื่อ	I_H	คือ	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฮอลล์ (A)
	q_0	คือ	ค่าประจุอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)
	N_H	คือ	ความหนาแน่นของพาหะ ($1/\text{cm}^3$)
	A_H	คือ	พื้นที่หน้าตัดของฮอลล์ (cm^2)
	d	คือ	ความหนาของฮอลล์

จากความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (2.24) และ (2.25) สามารถอธิบายการตอบสนองของฮอลล์กับตัวแปรพื้นที่หน้าตัดของฮอลล์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฮอลล์และความหนาแน่นของพาหะแสดงดังสมการที่ (2.26)

$$V_H = \frac{I_H B}{q_0 N_H d} \quad (2.26)$$

2.6.2 ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ [25]

ในปัจจุบันเซ็นเซอร์แม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่นิยมกันมาก เนื่องจากสามารถใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับตำแหน่ง ความเร็ว หรือ ทิศทางในการเคลื่อนที่ และยังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบมาให้สามารถทนทานต่อการสั่นสะเทือน ฝุ่น และน้ำได้ ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ก็คือเซ็นเซอร์แม่เหล็กอีกรูปแบบหนึ่งที่จะทำงานก็ต่อเมื่อมีสนามแม่เหล็กอยู่ในบริเวณรอบ ๆ ตัวเซ็นเซอร์ โดยเราได้รู้ว่าแล้วว่าสนามแม่เหล็กมีคุณลักษณะที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ความเข้มสนามแม่เหล็ก และ ขั้วแม่เหล็ก (เหนือ, ใต้) ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์นั้นเป็นฟังก์ชันที่เกิดจากความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเมื่อตัวเซ็นเซอร์ตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กรอบ ๆ ได้เกินค่าที่กำหนดไว้จะเกิดแรงดันที่เอาต์พุต เรียกว่า “แรงดันฮอลล์ (Hall Voltage)” แสดงฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์เบอร์ A1301

จากรูปที่ 2.15 แสดงฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์เบอร์ A1301 โครงสร้างต่าง ๆ มีขนาดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์เบอร์ A1301

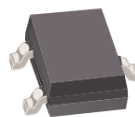
ตำแหน่ง	ขนาด (mm)
A	14.99±0.25
B	3.02±0.08
C	0.79
D	4.09±0.08

เมื่อขา 1 คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงในช่วง 4.5 ถึง 6 V ขา 2 คือ ขากราวด์ และ ขา 3 คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก ฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์เบอร์ A1301 จะมีค่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก เท่ากับ 2.5 mV/G ในการใช้งานเมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยไม่มีสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเริ่มต้นอยู่ที่ 2.5 V โดยประมาณ ค่านี้เรียกว่า Offset voltage โดยทั่วไปฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์มีรูปแบบที่นำมาใช้งานแตกต่างกันอยู่ 2 รูปแบบ คือ LH และ UA แสดงในรูปที่ 2.16 (ก) ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบจะมีผลตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิภายนอกเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)

3-Pin SOT23W (suffix LH)

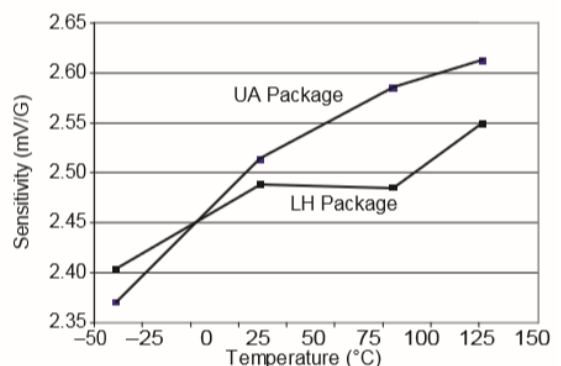


3-Pin SIP (suffix UA)



(ก)

1301 Device Sensitivity vs. Ambient Temperature



(ข)

รูปที่ 2.16 ลักษณะฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์

(ก) รูปแบบฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์

(ข) ผลกระทบต่ออุณหภูมิภายนอก

บทที่ 3

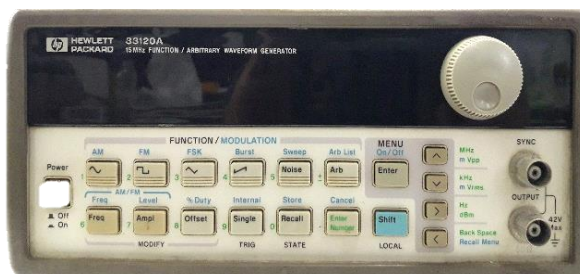
การออกแบบและดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าและความถี่ที่กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อการตอบสนองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ในงานวิจัยได้ทำการออกแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับกระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำและออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์ที่มีความแตกต่างกัน 3 รูปแบบ เพื่อศึกษาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ ความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและอุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำ ในส่วนของการวิเคราะห์วัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม โดยประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์สำหรับตรวจรู้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ

3.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.1.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการออกแบบวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) รุ่น HP-33120A รูปที่ 3.1 (ก) ด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ร่วมกับวงจรขยายสัญญาณชนิดคลาสเอบี (Class AB Amplifier Circuit) สำหรับขยายกระแสไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ และออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) รุ่น RIGOL DS1052E รูปที่ 3.1 (ข) ถูกใช้เพื่อจับสัญญาณของขดลวดเหนี่ยวนำและวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกแสดงในรูปที่ 3.2



(ก)

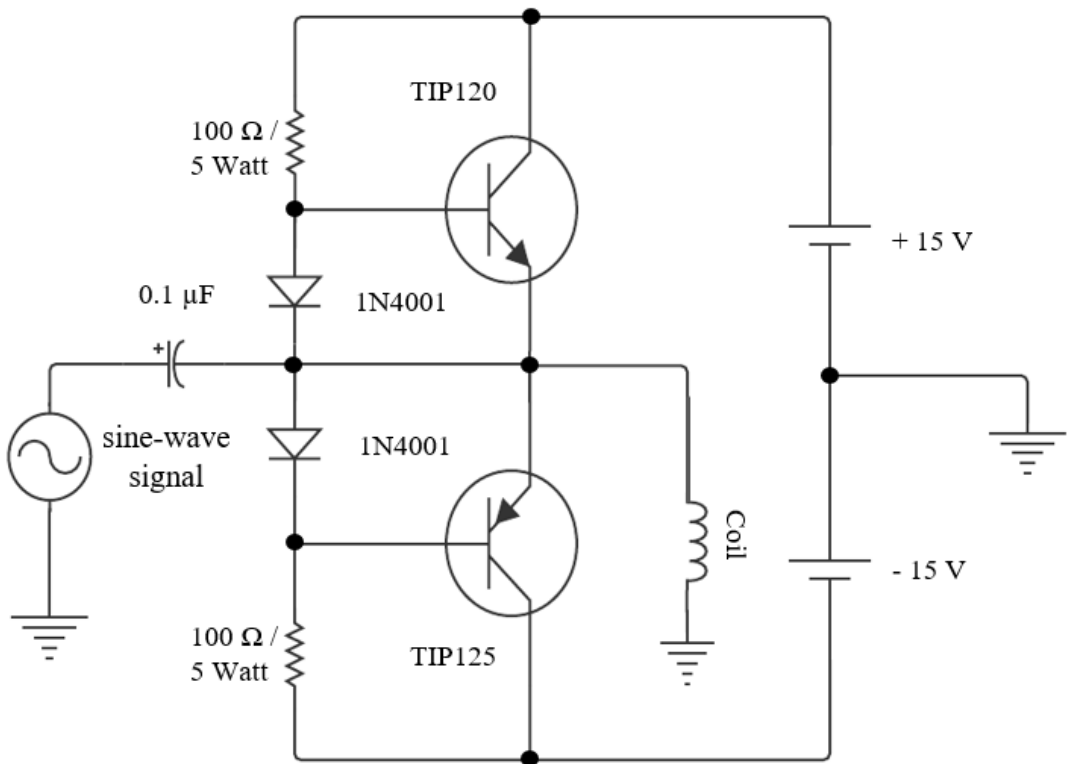


(ข)

รูปที่ 3.1 เครื่องมือสำหรับวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) รุ่น HP-33120A

(ข) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) รุ่น RIGOL DS1052E

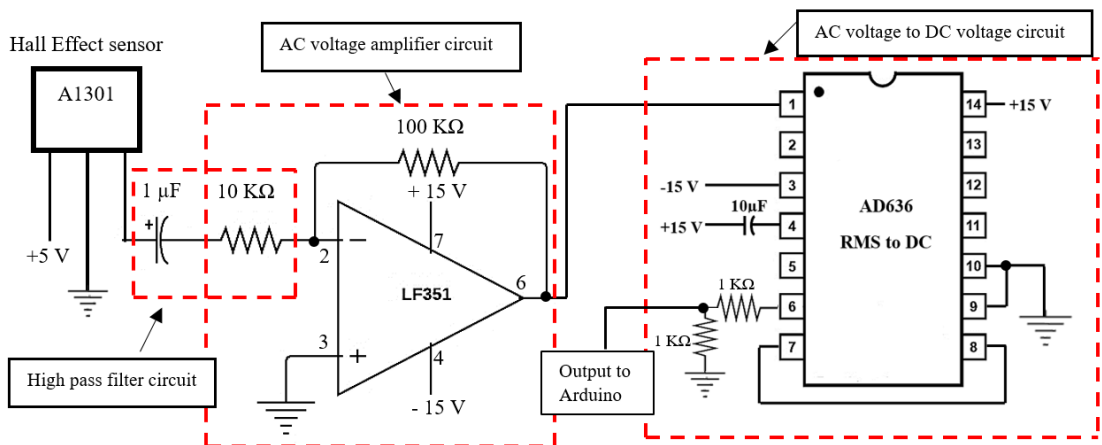


รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 3.2 แสดงวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือวงจรขยายสัญญาณชนิดคลาสเอบีเพื่อใช้ขยายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณผ่านวงจรคลาสเอบีจะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีกำลังขยาย 32 เท่า

3.1.2 วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ได้ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์เบอร์ A1301 ร่วมกับวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ใช้สำหรับแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นค่าแรงดันทางไฟฟ้า ภายในประกอบไปด้วย 3 วงจร คือ วงจรกรองความถี่สูง (High pass filter circuit) วงจรขยายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage amplifier circuit) และวงจรแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แสดงวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ในรูปแบบที่ 3.3



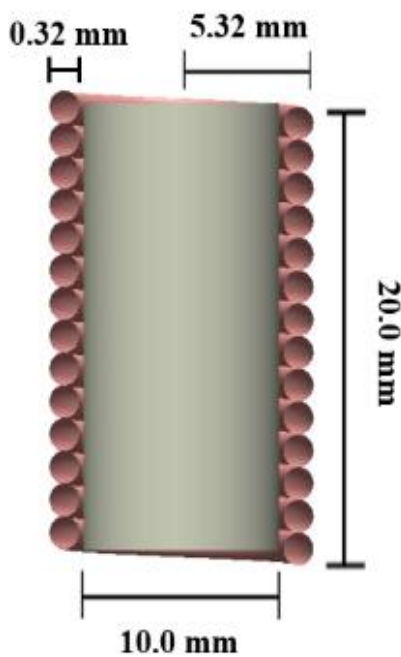
รูปที่ 3.3 วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

การสร้างขดลวดเหนี่ยวนำได้ออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ด้วยเส้นลวดทองแดงมาตรฐาน SWG เบอร์ 30 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3150 mm และใช้แกนเฟอร์ไรท์สำหรับการเหนี่ยวนำ การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์ทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังนี้

3.2.1 ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A (Type A)

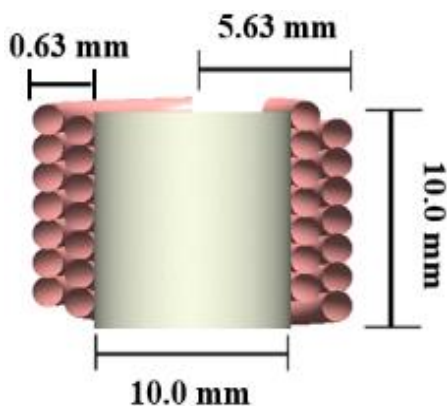
จำนวนชั้นของขดลวดทองแดง 1 ชั้น ด้วยจำนวนรอบในการพัน 50 รอบ/ชั้น พันรอบแกนเฟอร์ไรท์ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm และความยาว 20 mm แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขดลวดเหนียวนำรูปแบบ A

3.2.2 ขดลวดเหนียวนำรูปแบบ B (Type B)

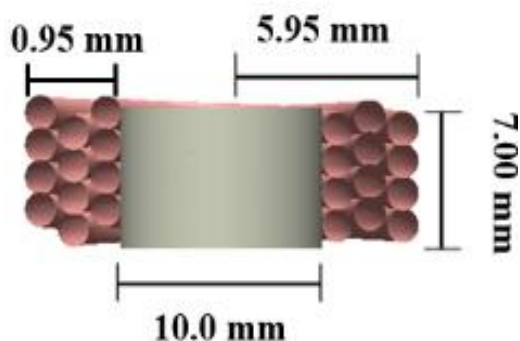
จำนวนชั้นของขดลวดทองแดง 2 ชั้น ด้วยจำนวนรอบในการพัน 26 และ 24 รอบ/ชั้น พันรอบแกนเฟอร์ไรท์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ด้วยความยาว 10 mm แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขดลวดเหนียวนำรูปแบบ B

3.2.3 ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C (Type C)

จำนวนชั้นของขดลวดทองแดง 3 ชั้น ด้วยจำนวนรอบในการพัน 18, 17 และ 15 รอบ/ชั้น พันรอบแกนเฟอร์ไรท์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ด้วยความยาว 7 mm แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

การศึกษามูลของการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้ใช้เครื่องมือวัดค่าแอลซีอาร์ รุ่น LCR-816 สำหรับวัดค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การวัดค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่องมือวัดแอลซีอาร์ รุ่น LCR-816

3.3 เครื่องมือในการวัดและตัวอย่างในการทดลอง

3.3.1 เครื่องมือในการวัด

การศึกษาค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำ ได้ใช้เครื่องมือวัด 3 ชนิด คือ มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลรุ่น FLUKE-115 (รูปที่ 3.8 (ก)) ถูกลำนำมาใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่น SDL900 (รูปที่ 3.8 (ข)) สำหรับนำมาใช้วัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำและเครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น midi LOGGER GL240 (รูปที่ 3.8 (ค)) สำหรับวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัด

(ก) มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลรุ่น FLUKE-115

(ข) เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่น SDL900

(ค) เครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น midi LOGGER GL240

3.3.2 วัสดุโลหะที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในการทดลอง

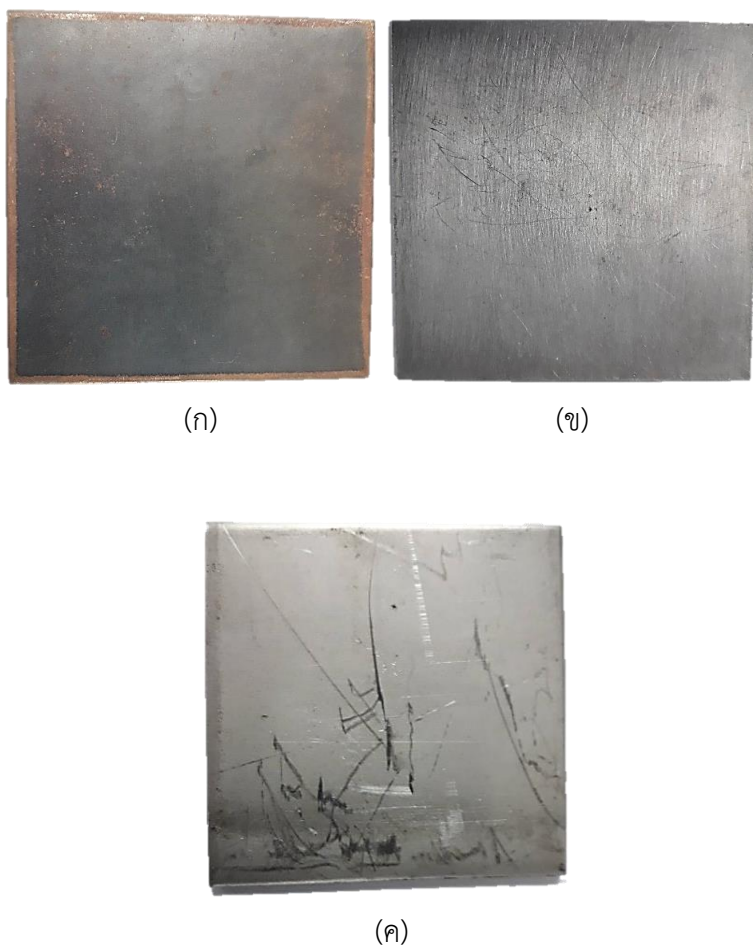
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการพิจารณาตัวอย่างวัสดุโลหะเป็น 2 ส่วน คือ ความหนา อะลูมิเนียมและชนิดวัสดุโลหะ

3.3.2.1 ตัวอย่างความหนาอะลูมิเนียม

การวัดความหนาวัสดุโลหะได้ใช้อะลูมิเนียมที่มีขนาดความกว้าง 50 mm และ ยาว 50 mm ด้วยความหนาที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 1, 2 และ 3 mm

3.3.2.2 ตัวอย่างชนิดวัสดุโลหะ

ตัวอย่างชนิดวัสดุโลหะได้เลือกใช้ตัวอย่างวัสดุโลหะที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ เหล็กแผ่นเบอร์ SS400 อะลูมิเนียม และสแตนเลสเบอร์ 410 ด้วยขนาดและความหนาที่เท่ากัน คือ ความกว้าง 50 mm และมีความยาว 50 mm ด้วยความหนา 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วัสดุโลหะที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

(ก) เหล็กแผ่นเบอร์ SS400

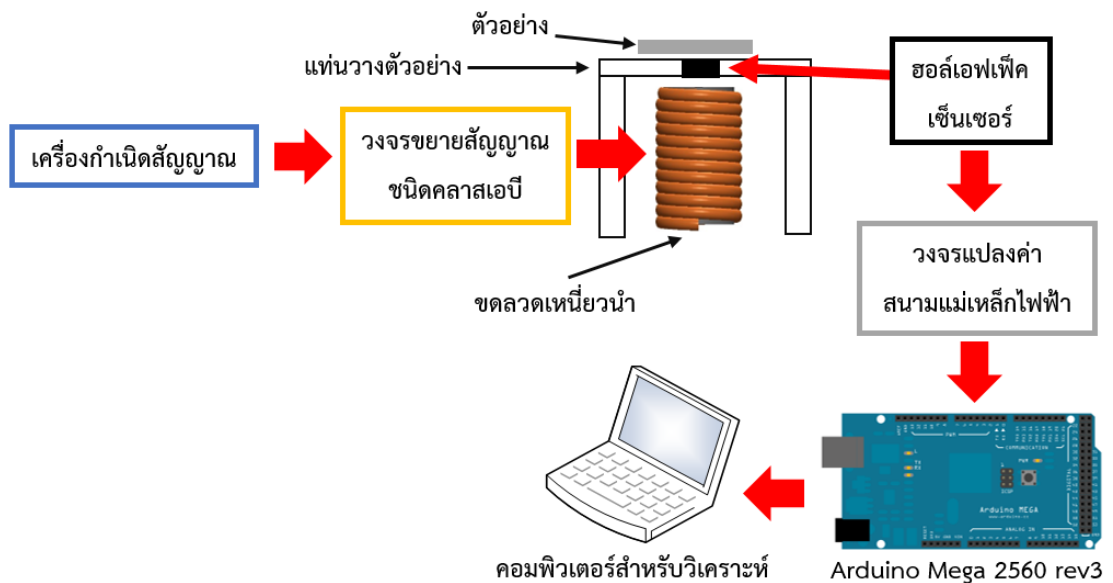
(ข) อะลูมิเนียม

(ค) สแตนเลสเบอร์ 410

3.4 การออกแบบระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ

3.4.1 ระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ

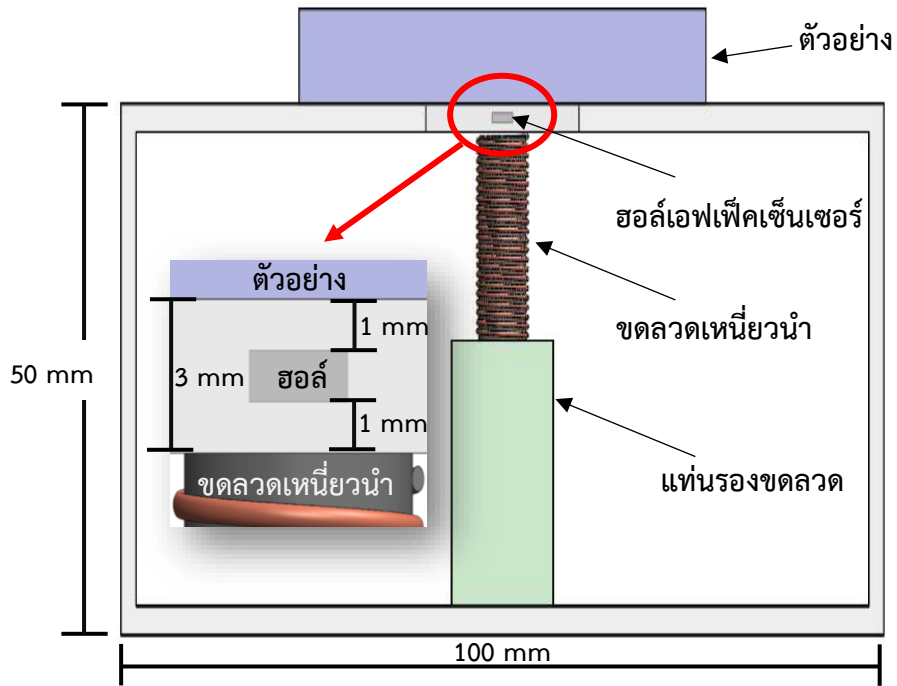
ระบบสำหรับวิเคราะห์วัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม โดยประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ตรวจรู้การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากปรากฏการณ์กระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุตัวนำไฟฟ้า ในการออกแบบระบบนี้ได้ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณผ่านวงจรขยายสัญญาณชนิดคลาสเอบีเพื่อขยายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ โดย Arduino Mega 2560 rev3 ถูกนำมาใช้รับค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกจากฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์และค่าที่รับมาจะถูกจัดเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์ผลต่อไป แผนภาพของระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ แสดงดังรูปที่ 3.10



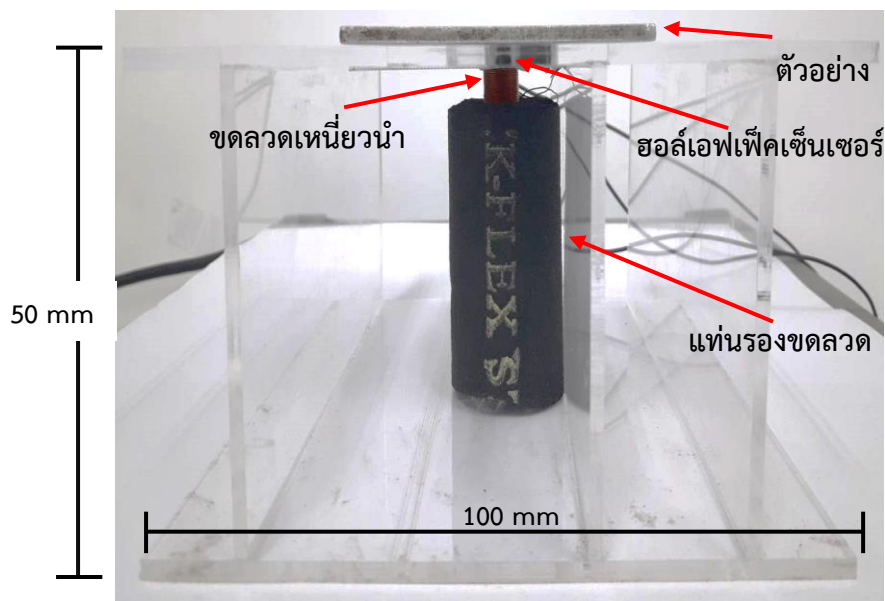
รูปที่ 3.10 แผนภาพระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ

3.4.2 การออกแบบระบบตรวจวัด

การออกแบบแท่นวางตัวอย่างได้ใช้แผ่นอะคริลิกใสที่มีความหนา 3 mm สำหรับเป็นฐานวางวัสดุโลหะด้วยขนาดความกว้าง 100 mm ความยาว 100 mm และความสูง 50 mm ในการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ได้ถูกติดตั้งอยู่เหนือขดลวดเหนี่ยวนำ 1 mm และอยู่ใต้วัสดุโลหะ 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12



(ก)

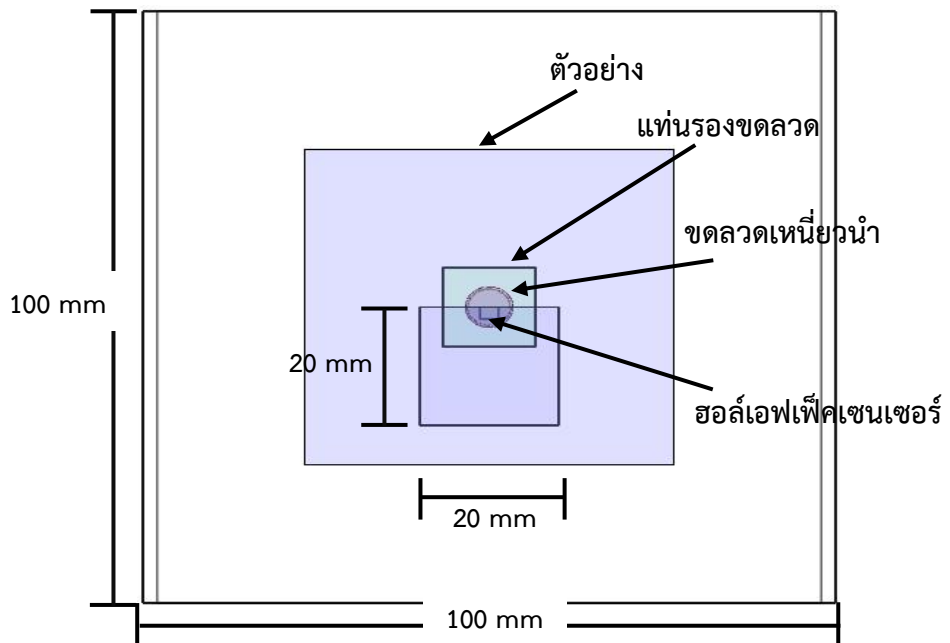


(ข)

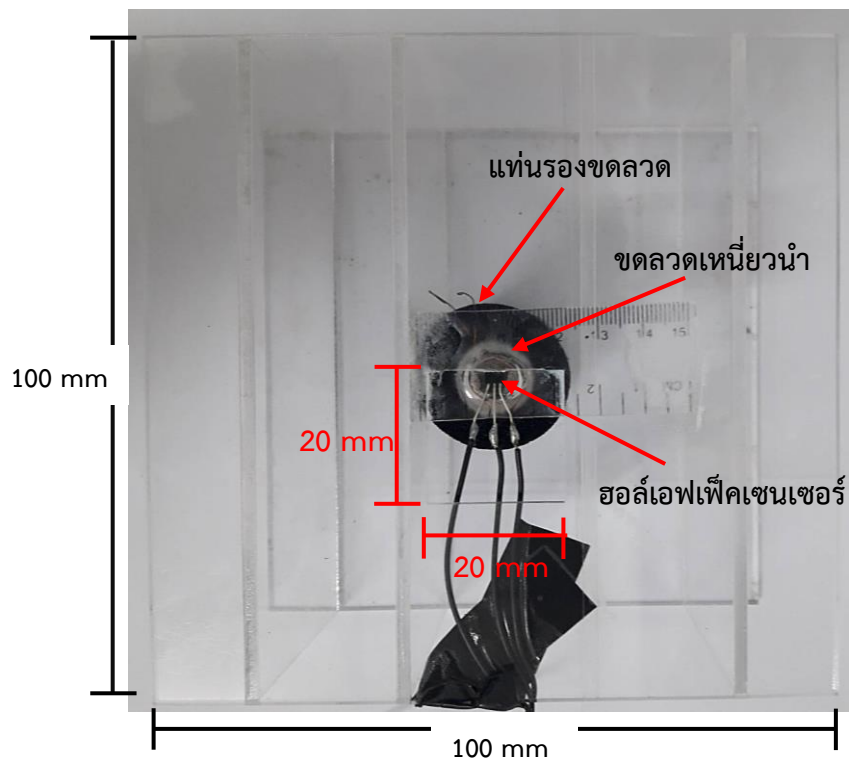
รูปที่ 3.11 ส่วนด้านหน้าของระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ

(ก) ภาพจากการออกแบบ

(ข) ภาพการติดตั้งอุปกรณ์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.12 ส่วนด้านบนของระบบตรวจวัดวัสดุโลหะ

(ก) ภาพจากการออกแบบ

(ข) ภาพการติดตั้งอุปกรณ์

3.5 การดำเนินงานวิจัย

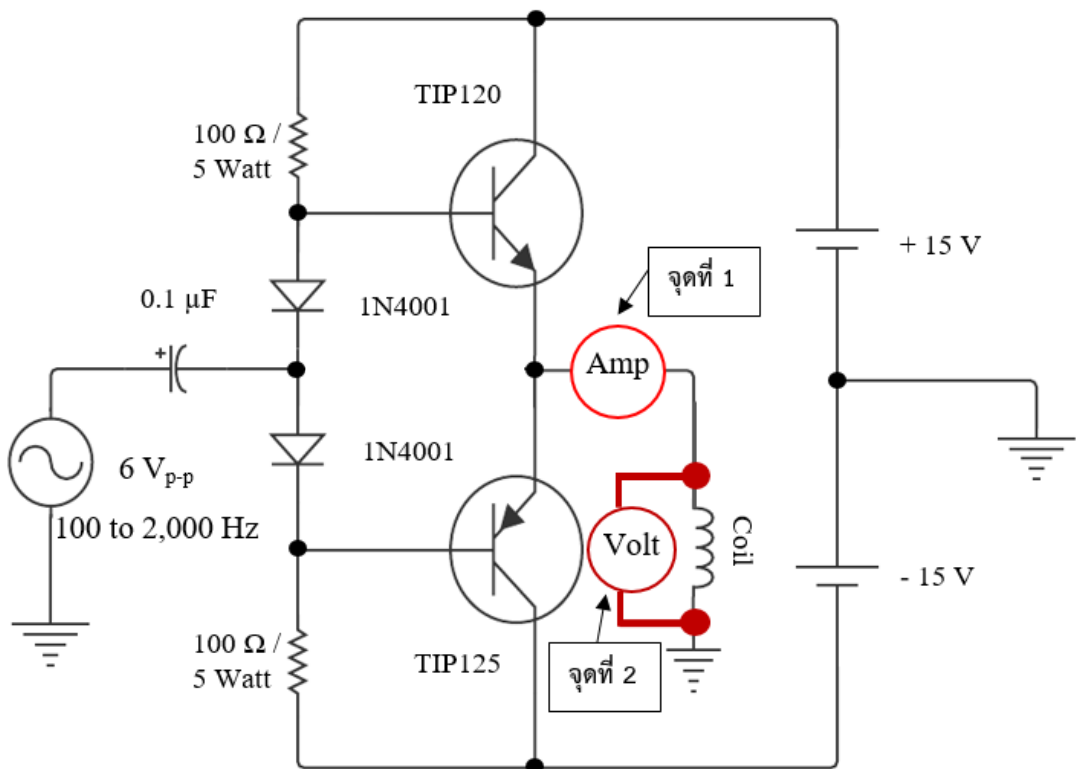
ในการดำเนินงานวิจัยได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ การวิเคราะห์อะลูมิเนียมและการวิเคราะห์ชนิดวัสดุโลหะ

3.5.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ

ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ถูกวิเคราะห์ ได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิของแกนขดลวดเหนี่ยวนำ แสดงการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.5.1.1 การวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

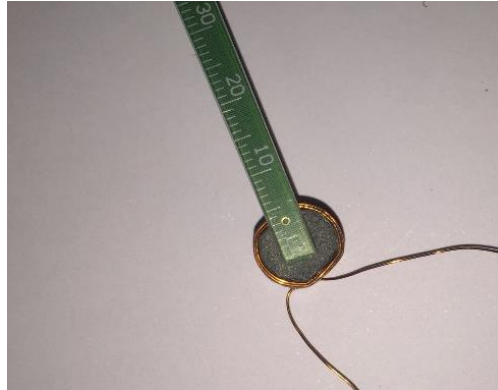
การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ได้ใช้ร่วมกับวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยศึกษาในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ด้วยแอมพลิฟายด์ 6 V_{p-p} ซึ่งมีลติมิเตอร์แบบดิจิตอลรุ่น FLUKE-115 ถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (จุดที่ 1) และออสซิลโลสโคปถูกนำมาใช้วิเคราะห์ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ (จุดที่ 2) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



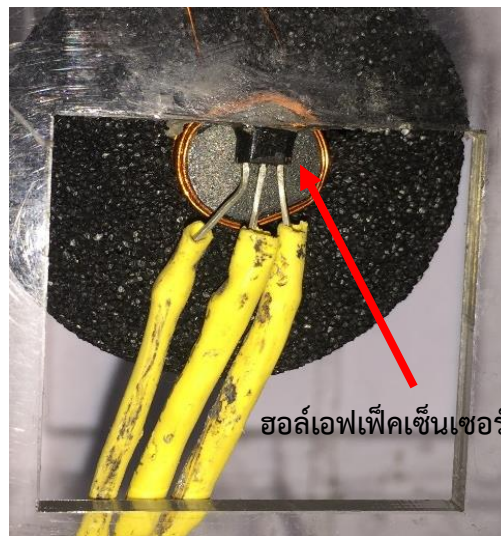
รูปที่ 3.13 แสดงการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของขดลวดเหนี่ยวนำ

3.5.1.2 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ได้ใช้ร่วมกับวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยแอมพลิจูด $6 V_{p-p}$ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไฟฟ้ารุ่น SDL900 และฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์เบอร์ A1301 สำหรับตรวจรู้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.14



(ก)



(ข)

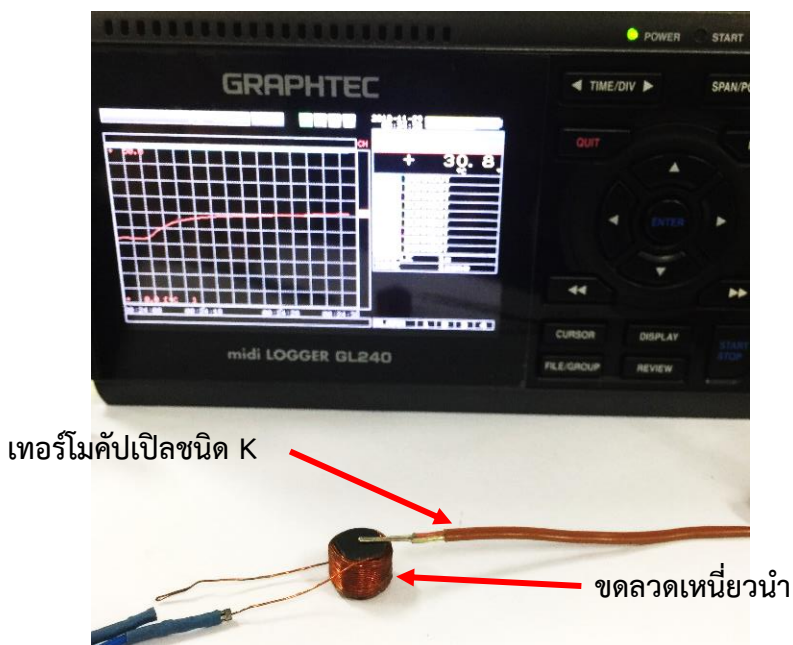
รูปที่ 3.14 การวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

(ก) เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไฟฟ้ารุ่น SDL900

(ข) ฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์เบอร์ A1301

3.5.1.3 การวิเคราะห์ความร้อนของแกนเหนี่ยวนำ

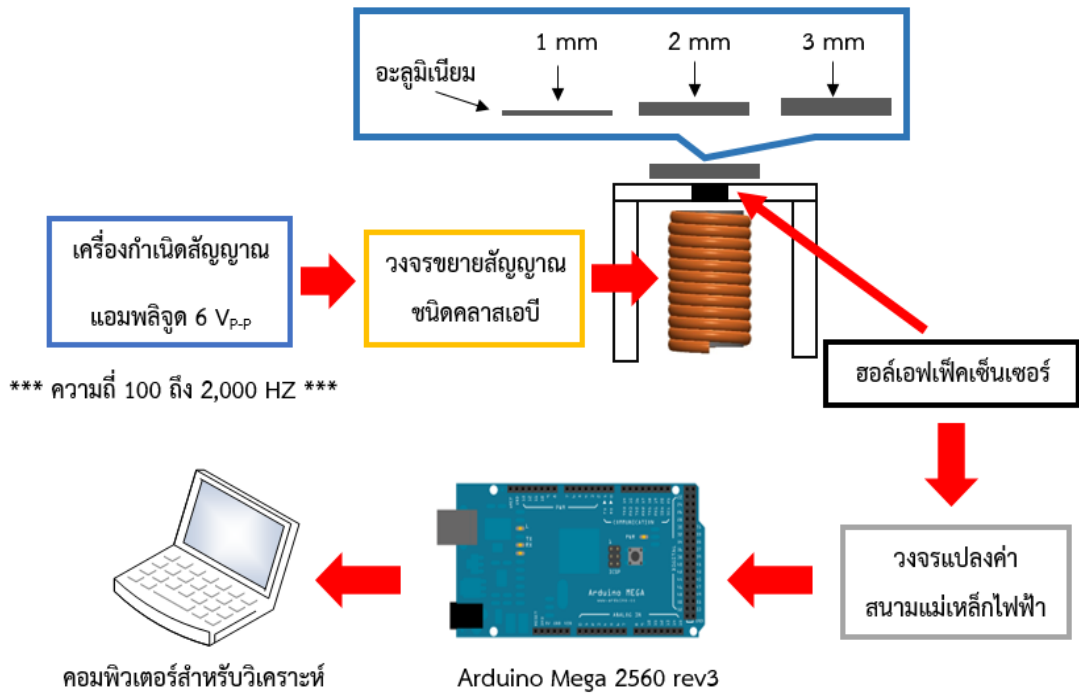
ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าความร้อนแกนเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ได้เลือกศึกษากระแสไฟฟ้าที่ 0.5 และ 1 A สำหรับกระดุนขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ เป็นระยะเวลา 1 Hr. และใช้เครื่องวัดอุณหภูมิรุ่น midi LOGGER GL240 ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สำหรับวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำส่วนบนดังแสดงในรูปที่ 3.15 ด้วยจำนวนการทดลอง 5 ครั้ง



รูปที่ 3.15 การวัดอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำ

3.5.2 การวัดความหนาอะลูมิเนียม

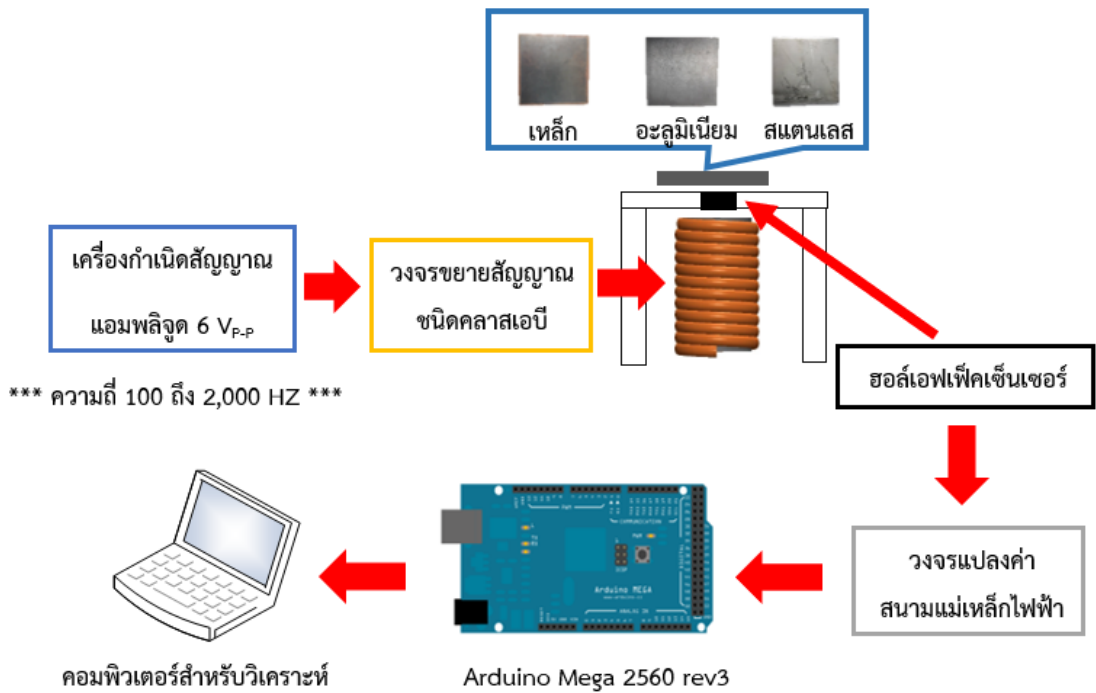
การวัดความหนาอะลูมิเนียมได้ใช้อะลูมิเนียมที่มีความหนา 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ โดยกระดุนขดลวดเหนี่ยวนำด้วยวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ด้วยแอมพลิจูด 6 V_{p-p} ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปสำหรับของอะลูมิเนียมได้ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ร่วมกับวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง อัตราเฉลี่ยในการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ด้วย Arduino เท่ากับ 5 ครั้ง/วินาที



รูปที่ 3.16 แผนภาพระบบการวัดความหนาอะลูมิเนียม

3.5.3 การวัดชนิดวัสดุโลหะ

การศึกษาการวัดชนิดวัสดุโลหะ ได้แก่ สเตนเลสเบอร์ 410 เหล็กแผ่นเบอร์ SS400 และ อะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm เท่ากัน ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ในการกระตุ้นการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำด้วยวงจรถูกกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ กระตุ้นที่ความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ด้วยแอมพลิจูด 6 V_{p-p} ทั้ง 2 การทดลอง ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุโลหะได้ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ร่วมกับ วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้ทำการทดลองทั้งหมด 20 ครั้ง เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการวัดด้วยฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ ด้วยอัตราเฉลี่ยในการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ด้วย Arduino Mega 2560 เท่ากับ 5 ครั้ง/วินาที



รูปที่ 3.17 แผนภาพระบบการวิเคราะห์ชนิดวัสดุโลหะ

3.6 สรุปการออกแบบและดำเนินงานวิจัย

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงวงจรสำหรับกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำโดยใช้วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรสำหรับเป็นภาครับของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์เบอร์ A1301 ได้ใช้วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนที่สองกล่าวถึงการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ด้วยจำนวนรอบในการพัน 50 รอบเท่ากันแต่แตกต่างกันคือจำนวนชั้นของขดลวด ได้แก่ Type A จำนวนชั้นขดลวด 1 ชั้น, Type B จำนวนชั้นขดลวด 2 ชั้น และ Type C จำนวนชั้นขดลวด 3 ชั้น ในส่วนที่สามกล่าวถึงตัวอย่างที่ใช้ในกรณีศึกษาซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ ความหนาของอะลูมิเนียมได้ใช้ที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm และชนิดวัสดุโลหะโดยใช้วัสดุโลหะแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียมที่ความหนา 3 mm และส่วนสุดท้ายการดำเนินงานวิจัยได้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ได้แก่ ความถี่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และอุณหภูมิ แล้วนำมาประยุกต์เพื่อศึกษาการวัดความหนาอะลูมิเนียมและชนิดวัสดุโลหะ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในบทความนี้กล่าวถึงผลของการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ Type A, Type B และ Type C โดยได้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้ร่วมกับวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าสลับ ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำ และผลจากการนำขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ มาประยุกต์ใช้สำหรับวัดความหนาอะลูมิเนียมที่ 1, 2 และ 3 mm และชนิดวัสดุโลหะ

4.1 ค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ

ผลของค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ ค่าความเหนี่ยวนำ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำและอุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำ ใช้งานร่วมกับวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการกระตุ้นที่ช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ด้วยแอมพลิจูด $6 V_{p-p}$ ถูกแสดงดังนี้

4.1.1 ค่าความเหนี่ยวนำ

การทดลองการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำที่ถูกออกแบบขึ้นมา 3 รูปแบบ ได้แก่ Type A, Type B และ Type C โดยใช้เครื่องมือวัดแอลซีอาร์ในการพิจารณา ผลการวัดค่าความเหนี่ยวนำแสดงดังตารางที่ 4.1 และค่าความซับซ้อนทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์แสดงดังตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ จากการวัดด้วยเครื่องแอลซีอาร์โดยค่าความเหนี่ยวนำขดลวดเหนี่ยวนำ Type C มีค่าเท่ากับ 0.082 mH, Type B เท่ากับ 0.072 mH และ Type A เท่ากับ 0.068 mH แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนรอบในการพันขดลวดทองแดง 50 รอบเท่ากันทั้ง 3 รูปแบบ แต่ลดตัวแปรความยาวแกนเหนี่ยวนำจาก 20 mm เป็น 10 mm และ 7 mm และเพิ่มจำนวนชั้นในการพันขดลวดแดง ส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.2

ตารางที่ 4.1 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ

ขดลวดเหนี่ยวนำ	ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)
Type A	0.068
Type B	0.072
Type C	0.082

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ จากสมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์จากการคำนวณมีค่าประมาณเท่ากันทั้ง 3 รูปแบบ เนื่องจากว่าแกนเฟอร์ไรท์ที่ใช้งานในการออกแบบนั้นชนิดเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบ

ตารางที่ 4.2 ค่าคำนวณความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ

ขดลวดเหนี่ยวนำ	ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ (H/m)
Type A	2.45×10^{-5}
Type B	2.47×10^{-5}
Type C	2.46×10^{-5}

4.1.2 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

การทดลองแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยการกระตุ้นในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ได้ใช้ออสซิลโลสโคปและมัลติมิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

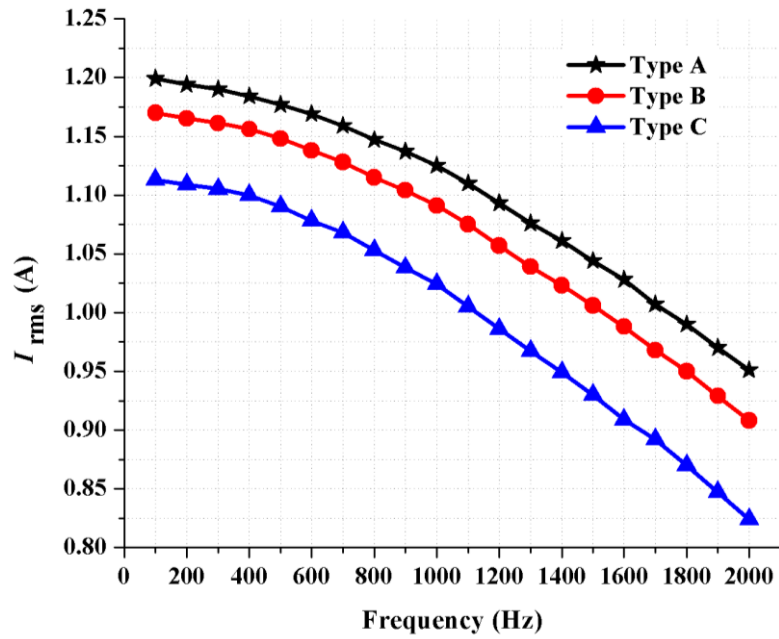
ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความถี่กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ

Frequency (Hz)	Voltage (V)			Current (A)		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	0.750	0.762	0.779	1.199	1.170	1.113
200	0.758	0.769	0.786	1.194	1.165	1.109
300	0.769	0.780	0.797	1.190	1.161	1.105

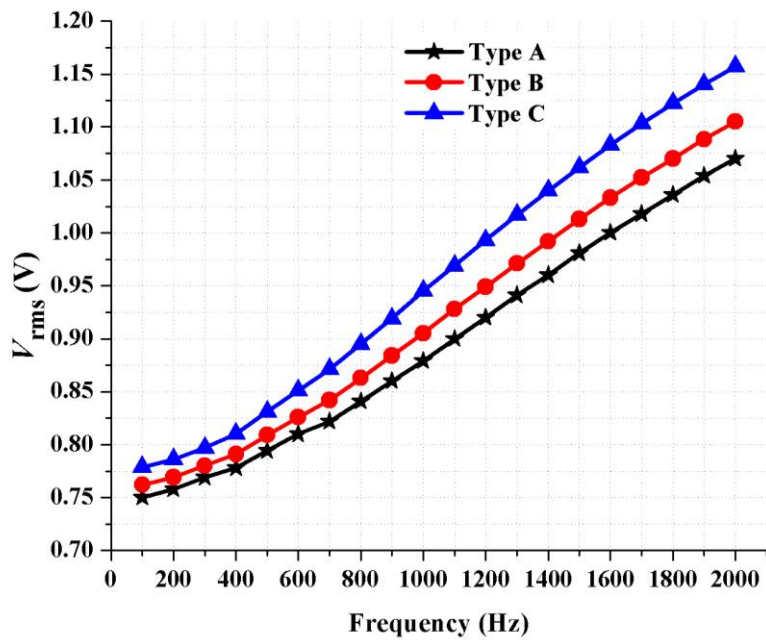
ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ความสัมพันธ์ของความถี่กับค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ

Frequency (Hz)	Voltage (V)			Current (A)		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
400	0.778	0.791	0.810	1.184	1.156	1.100
500	0.794	0.809	0.831	1.177	1.148	1.090
600	0.810	0.826	0.851	1.169	1.138	1.078
700	0.822	0.842	0.871	1.159	1.128	1.068
800	0.841	0.863	0.895	1.147	1.115	1.053
900	0.860	0.884	0.919	1.137	1.104	1.038
1,000	0.879	0.905	0.945	1.125	1.091	1.024
1,100	0.900	0.928	0.969	1.110	1.075	1.005
1,200	0.920	0.949	0.993	1.093	1.057	0.986
1,300	0.941	0.971	1.017	1.076	1.039	0.967
1,400	0.960	0.992	1.040	1.061	1.023	0.949
1,500	0.981	1.013	1.062	1.044	1.006	0.930
1,600	1.000	1.033	1.083	1.028	0.988	0.909
1,700	1.018	1.052	1.103	1.007	0.968	0.892
1,800	1.036	1.070	1.122	0.990	0.950	0.870
1,900	1.054	1.088	1.140	0.970	0.929	0.847
2,000	1.070	1.105	1.157	0.951	0.908	0.824

จากตารางที่ 4.3 เมื่อนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมกับความถี่ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าลดลง เนื่องจากว่าแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้ามีเฟสต่างกัน $\pi/2$ และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ Type A มีค่ามากกว่า Type B และ Type C ตามลำดับ เป็นผลมาจากค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ Type A มีค่าน้อยที่สุดส่งผลให้มีปริมาณของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากที่สุด



รูปที่ 4.1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz



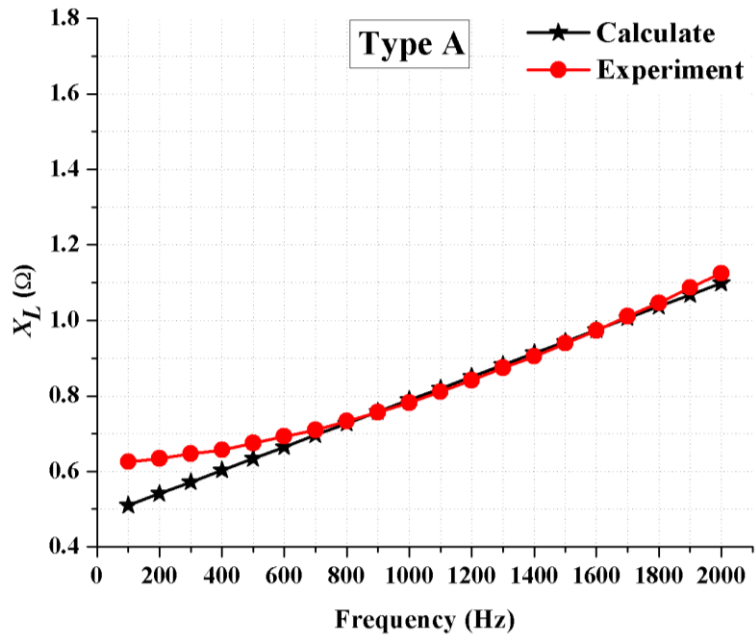
รูปที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz

4.1.3 ค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำ

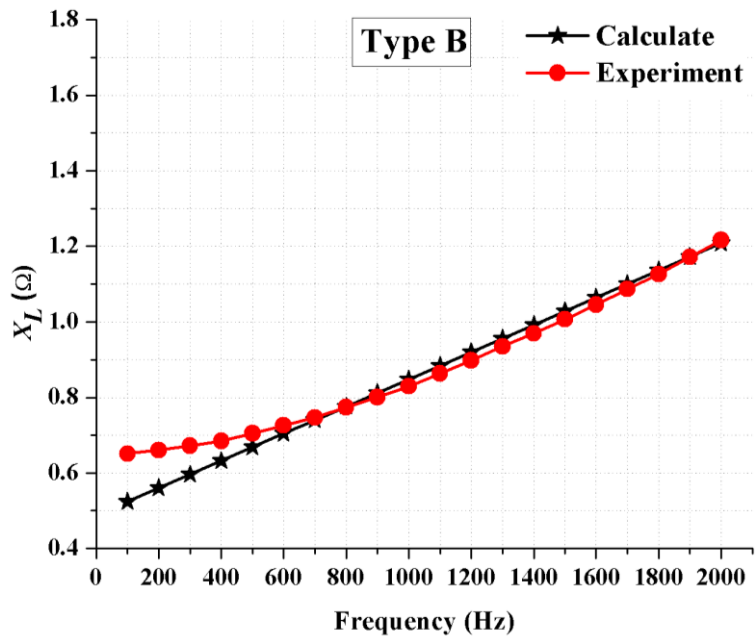
ในส่วนของการทดลองหาค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ จากการทดลองได้ใช้สมการที่ 2.12 เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองแสดงดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ จากการคำนวณและการทดลอง

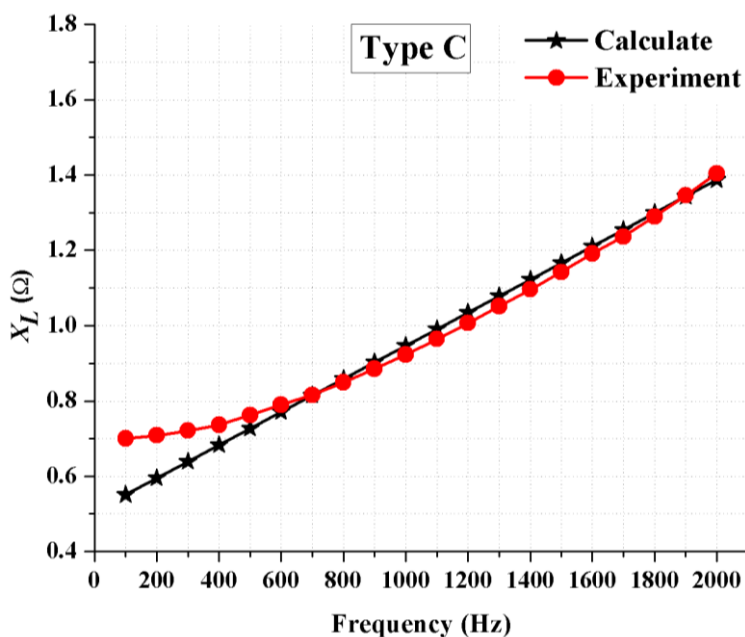
Frequency (Hz)	X_L (Ω)					
	Calculate			Experiment		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	0.51	0.52	0.55	0.56	0.58	0.63
200	0.54	0.56	0.59	0.58	0.59	0.65
300	0.57	0.59	0.64	0.59	0.61	0.67
400	0.60	0.63	0.68	0.62	0.65	0.69
500	0.63	0.66	0.73	0.65	0.68	0.73
600	0.66	0.70	0.77	0.67	0.71	0.77
700	0.69	0.74	0.82	0.69	0.75	0.82
800	0.73	0.78	0.86	0.73	0.77	0.85
900	0.76	0.81	0.90	0.76	0.80	0.88
1,000	0.79	0.85	0.95	0.78	0.83	0.92
1,100	0.82	0.88	0.99	0.81	0.86	0.96
1,200	0.85	0.92	1.04	0.84	0.89	1.00
1,300	0.88	0.96	1.08	0.87	0.93	1.05
1,400	0.91	0.99	1.12	0.90	0.97	1.09
1,500	0.94	1.03	1.17	0.93	1.00	1.14
1,600	0.97	1.06	1.21	0.97	1.04	1.19
1,700	1.01	1.10	1.26	1.01	1.08	1.24
1,800	1.03	1.14	1.29	1.04	1.12	1.29
1,900	1.07	1.17	1.34	1.09	1.17	1.34
2,000	1.10	1.21	1.39	1.13	1.21	1.40



(8)



(9)



(ค)

รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ

- (ก) ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A
- (ข) ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ B
- (ค) ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำเมื่อนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าความถี่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่มากส่งผลให้มีค่าความต้านสูงจึงทำให้ Type C มีค่าความต้านทานสูงที่สุด โดยเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดค่าความต้านทานขดลวดเหนี่ยวนำจากการทดลองมีความผิดพลาดสูงสุดที่ความถี่ 100 Hz โดย Type A, Type B และ Type C เท่ากับ 10.82%, 10.88% และ 14.15% ตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่สูงเป็นผลมาจากความเสถียรของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในช่วงความถี่ต่ำ

4.1.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ

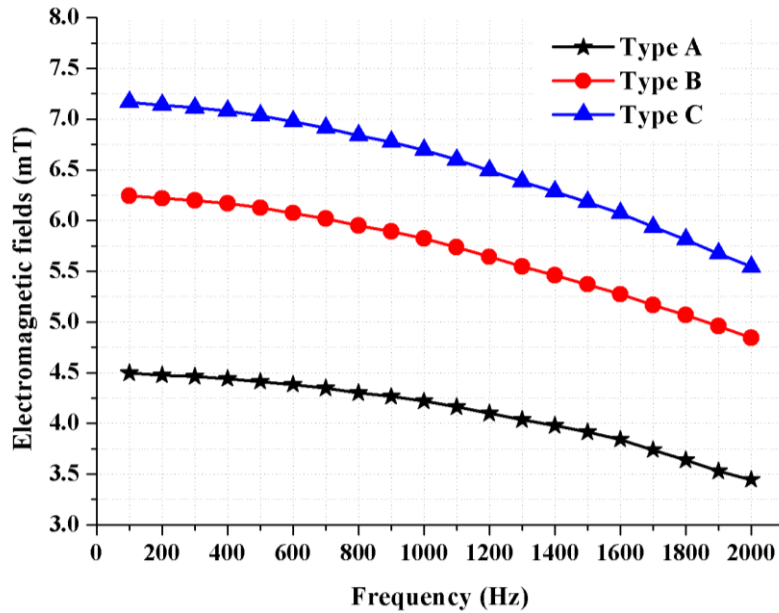
ในส่วนความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ได้พิจารณาความสัมพันธ์ของความถี่ที่ใช้กระตุ้น ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดและความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้ใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ

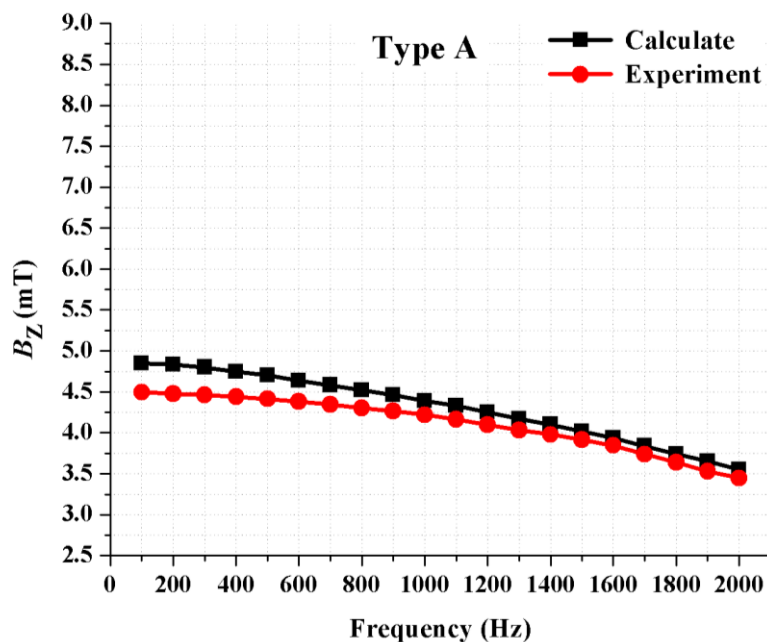
Frequency (Hz)	Current (A)			Electromagnetic fields (mT)		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	1.199	1.170	1.113	4.49	6.24	7.17
200	1.194	1.165	1.109	4.48	6.22	7.14
300	1.190	1.161	1.105	4.46	6.19	7.11
400	1.184	1.156	1.100	4.44	6.17	7.08
500	1.177	1.148	1.090	4.41	6.13	7.03
600	1.169	1.138	1.078	4.38	6.07	6.97
700	1.159	1.128	1.068	4.35	6.02	6.91
800	1.147	1.115	1.053	4.30	5.95	6.84
900	1.137	1.104	1.038	4.26	5.89	6.77
1,000	1.125	1.091	1.024	4.22	5.82	6.69
1,100	1.110	1.075	1.005	4.16	5.74	6.59
1,200	1.093	1.057	0.986	4.10	5.64	6.49
1,300	1.076	1.039	0.967	4.03	5.54	6.38
1,400	1.061	1.023	0.949	3.98	5.46	6.29
1,500	1.044	1.006	0.930	3.92	5.37	6.18
1,600	1.028	0.988	0.909	3.84	5.27	6.07
1,700	1.007	0.968	0.892	3.74	5.17	5.94
1,800	0.990	0.950	0.870	3.64	5.07	5.81
1,900	0.970	0.929	0.847	3.53	4.96	5.67
2,000	0.951	0.908	0.824	3.45	4.85	5.54

จากผลตารางที่ 4.5 เมื่อนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความถี่ดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นความถี่สูงขึ้นส่งผลให้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ มีความเข้มลดน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลดน้อยลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมีผลโดยตรงกับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และในช่วงความถี่เดียวกัน ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ Type A มีปริมาณมากกว่า Type B และ Type C

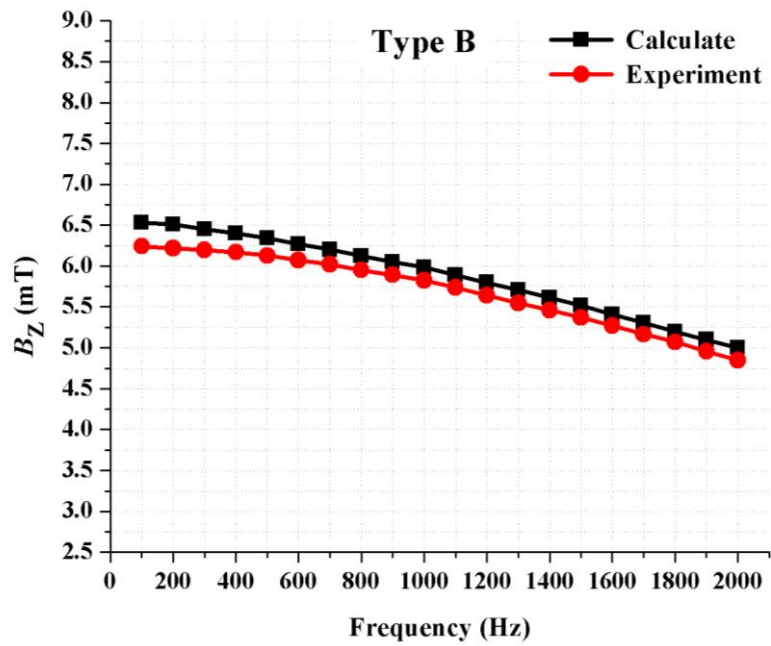
ตามลำดับ แต่ขดลวดเหนี่ยวนำ Type C มีประสิทธิภาพในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มมากกว่า Type B และ Type A ประมาณ 11.9% และ 29.3% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนชั้นขดลวดที่จำนวนรอบในการพันเท่ากันช่วยเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



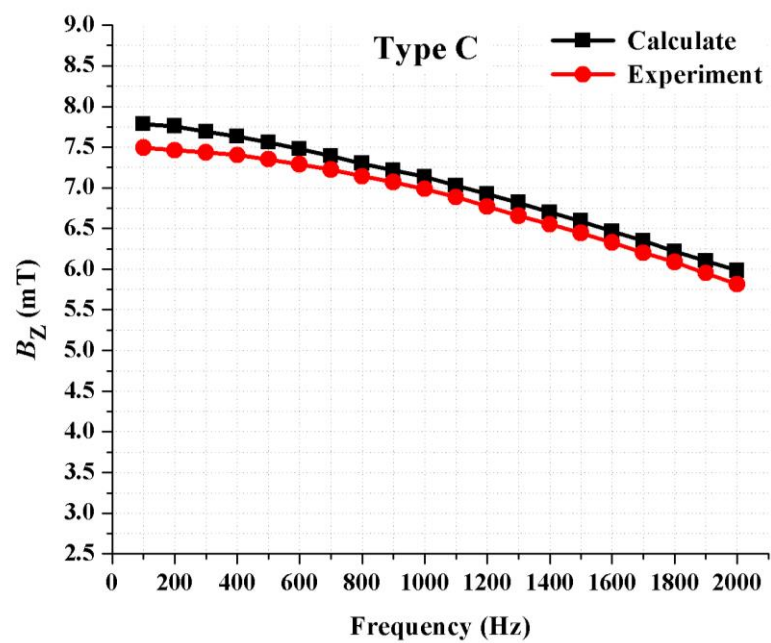
รูปที่ 4.4 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำจากการคำนวณและการทดลอง

(ก) ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ A

(ข) ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ B

(ค) ขดลวดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ จากการคำนวณ และการทดลอง

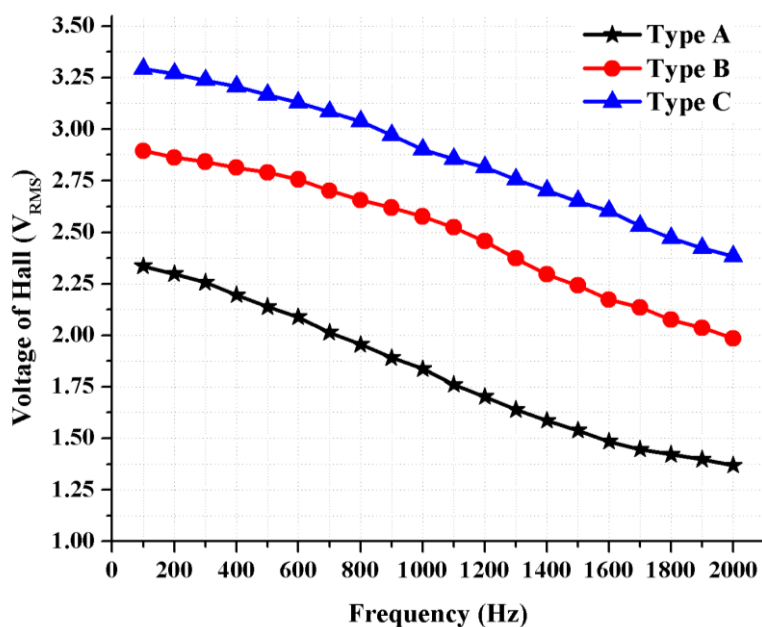
Frequency (Hz)	Electromagnetic fields (mT)					
	Calculate			Experiment		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	4.85	6.53	7.46	4.49	6.24	7.17
200	4.83	6.51	7.43	4.48	6.22	7.14
300	4.80	6.45	7.37	4.46	6.19	7.11
400	4.75	6.40	7.31	4.44	6.17	7.08
500	4.70	6.34	7.24	4.41	6.13	7.03
600	4.64	6.27	7.16	4.38	6.07	6.97
700	4.58	6.20	7.07	4.35	6.02	6.91
800	4.52	6.12	6.98	4.30	5.95	6.84
900	4.46	6.05	6.90	4.26	5.89	6.77
1,000	4.39	5.98	6.81	4.22	5.82	6.69
1,100	4.33	5.89	6.71	4.16	5.74	6.59
1,200	4.25	5.80	6.60	4.10	5.64	6.49
1,300	4.17	5.71	6.49	4.03	5.54	6.38
1,400	4.10	5.61	6.38	3.98	5.46	6.29
1,500	4.02	5.52	6.27	3.92	5.37	6.18
1,600	3.94	5.41	6.15	3.84	5.27	6.07
1,700	3.84	5.31	6.02	3.74	5.17	5.94
1,800	3.74	5.20	5.89	3.64	5.07	5.81
1,900	3.65	5.10	5.77	3.53	4.96	5.67
2,000	3.55	5.00	5.64	3.45	4.85	5.54

จากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 1,000 Hz จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากสมการที่ (2.4) ขดลวดเหนี่ยวนำ Type A มีค่าเท่ากับ 7.42%, Type B เท่ากับ 4.44% และ Type C เท่ากับ 4.23% และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงความถี่ 1,100 Hz ถึง 2,000 Hz ของขดลวดเหนี่ยวนำ Type A มีค่าเท่ากับ 1.23%, Type B เท่ากับ 1.34% และ Type C เท่ากับ 1.51% 8jkเปอร์เซ็นต์

ความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงความถี่ต่ำมีค่าสูงเป็นผลมาจากปริมาณของกระแสไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่ำมีความไม่เสถียร

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์

Frequency (Hz)	Electromagnetic fields (mT)			Output of Hall Effect (V)		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	4.49	6.24	7.17	2.34	2.89	3.29
200	4.48	6.22	7.14	2.29	2.86	3.27
300	4.46	6.19	7.11	2.25	2.84	3.24
400	4.44	6.17	7.08	2.19	2.81	3.21
500	4.41	6.13	7.03	2.14	2.79	3.17
600	4.38	6.07	6.97	2.09	2.76	3.13
700	4.35	6.02	6.91	2.01	2.70	3.08
800	4.30	5.95	6.84	1.96	2.66	3.04
900	4.26	5.89	6.77	1.89	2.62	2.97
1,000	4.22	5.82	6.69	1.84	2.58	2.90
1,100	4.16	5.74	6.59	1.76	2.52	2.85
1,200	4.10	5.64	6.49	1.70	2.46	2.81
1,300	4.03	5.54	6.38	1.64	2.37	2.76
1,400	3.98	5.46	6.29	1.59	2.29	2.70
1,500	3.92	5.37	6.18	1.54	2.24	2.65
1,600	3.84	5.27	6.07	1.48	2.17	2.60
1,700	3.74	5.17	5.94	1.45	2.13	2.53
1,800	3.64	5.07	5.81	1.42	2.08	2.47
1,900	3.53	4.96	5.67	1.39	2.04	2.42
2,000	3.45	4.85	5.54	1.37	1.98	2.38



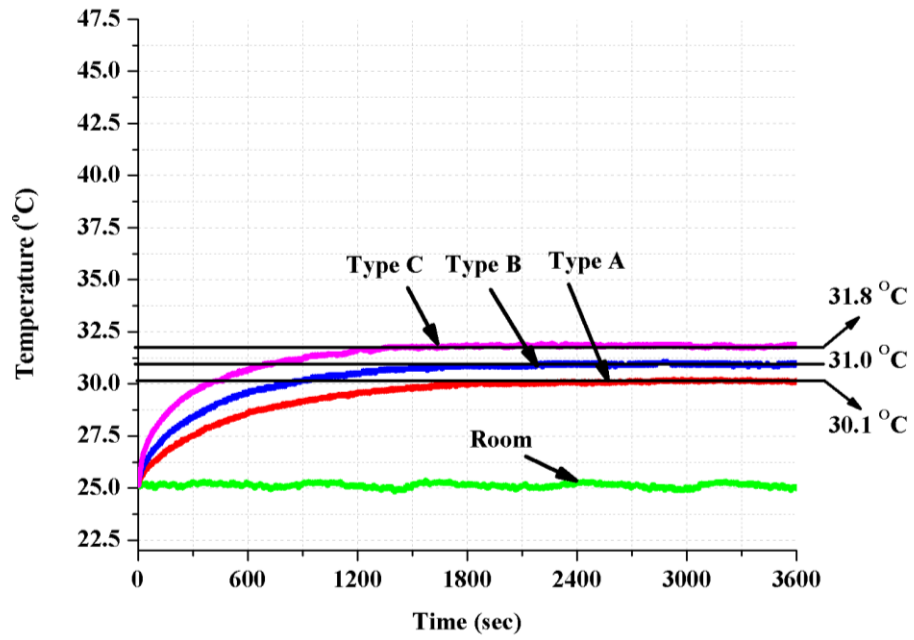
รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับตรวจรู้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz

จากผลการทดลองตารางที่ 4.7 เมื่อนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์กับความถี่ดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์เมื่อใช้ตรวจรู้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับผลของความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยผลของการทดลอง Type C สามารถสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงสุดและช่วยเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 37.4% และ 12.9% เมื่อเปรียบเทียบกับ Type A และ Type B ตามลำดับ

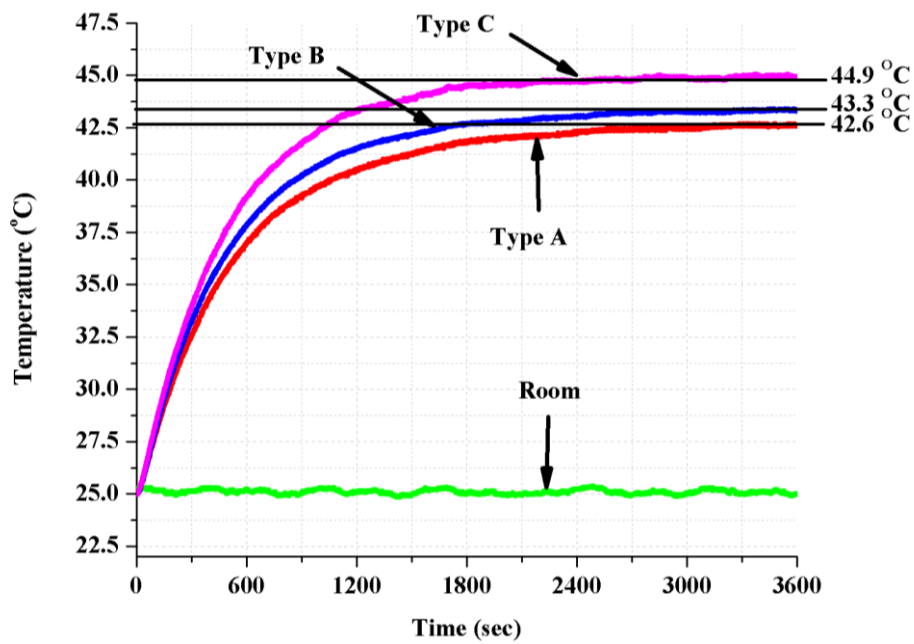
4.1.5 อุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำ

การทดลองอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยการกระตุ้นกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 และ 1.0 A เป็นระยะเวลา 1 Hr

ผลของอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำจากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นกระแสไฟฟ้า 0.5 และ 1 A ส่งผลให้อุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำ Type C > Type B > Type A ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำเป็นผลมาจากการเพิ่มจำนวนชั้นในการพันขดลวดทองแดงทำให้เกิดการสะสมความภายในแกนเหนี่ยวนำ ซึ่ง Type C มีจำนวนชั้นขดลวดทองแดง 3 ชั้น Type B มีจำนวนชั้นขดลวดทองแดง 2 ชั้น และ Type A มีจำนวนชั้นขดลวดทองแดง 1 ชั้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 อุณหภูมิแกนเหนียวนำของขดลวดเหนียวนำทั้ง 3 รูปแบบ

(ก) กระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 0.5 A

(ข) กระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้า 1.0 A

4.2 การวัดความหนาอะลูมิเนียม

การวัดความหนาอะลูมิเนียมที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยการกระตุ้นในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ที่สัญญาณคลื่นรูปไซน์แอมพลิจูด 6 V_{p-p} ได้ทำการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับการพิจารณาความหนาอะลูมิเนียม แสดงดังนี้

ตารางที่ 4.8 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ A

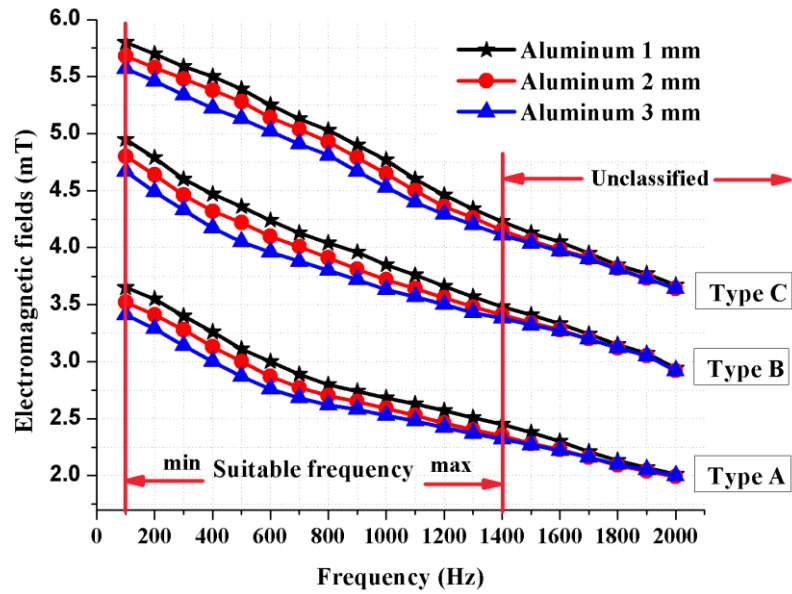
Frequency (Hz)	Type A					
	Aluminum 1 mm		Aluminum 2 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V _H (V)	B (mT)	V _H (V)	B (mT)	V _H (V)
100	3.65	1.98	3.52	1.89	3.41	1.80
200	3.55	1.91	3.41	1.79	3.29	1.70
300	3.40	1.81	3.28	1.71	3.14	1.60
400	3.26	1.72	3.13	1.61	3.00	1.54
500	3.11	1.62	3.00	1.52	2.87	1.44
600	3.00	1.50	2.87	1.42	2.76	1.34
700	2.89	1.41	2.77	1.32	2.68	1.23
800	2.80	1.34	2.70	1.27	2.62	1.18
900	2.74	1.28	2.65	1.20	2.58	1.12
1,000	2.68	1.21	2.59	1.13	2.53	1.05
1,100	2.63	1.16	2.53	1.07	2.48	1.00
1,200	2.57	1.11	2.46	1.01	2.42	0.95
1,300	2.51	1.05	2.40	0.97	2.37	0.92
1,400	2.45	0.99	2.35	0.92	2.33	0.88
1,500	2.38	0.95	2.28	0.86	2.27	0.85
1,600	2.30	0.91	2.23	0.82	2.23	0.82
1,700	2.21	0.87	2.16	0.79	2.16	0.79
1,800	2.13	0.82	2.09	0.76	2.09	0.76
1,900	2.07	0.78	2.04	0.73	2.04	0.73
2,000	2.01	0.76	1.99	0.71	1.99	0.71

ตารางที่ 4.9 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์สำหรับ
พิจารณาความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ B

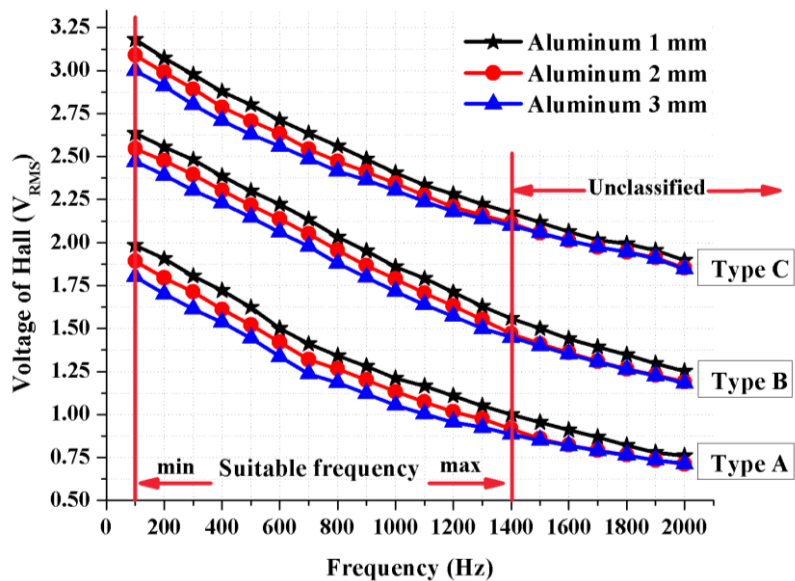
Frequency (Hz)	Type B					
	Aluminum 1 mm		Aluminum 2 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)
100	4.95	2.63	4.80	2.54	4.67	2.47
200	4.79	2.55	4.64	2.48	4.49	2.39
300	4.60	2.48	4.46	2.39	4.33	2.30
400	4.47	2.38	4.32	2.30	4.17	2.23
500	4.36	2.30	4.22	2.22	4.05	2.14
600	4.24	2.22	4.10	2.14	3.96	2.06
700	4.13	2.13	4.01	2.05	3.88	1.98
800	4.04	2.03	3.91	1.95	3.80	1.88
900	3.96	1.95	3.81	1.87	3.72	1.79
1,000	3.85	1.86	3.72	1.79	3.63	1.72
1,100	3.76	1.79	3.64	1.71	3.57	1.64
1,200	3.66	1.71	3.56	1.63	3.50	1.57
1,300	3.57	1.63	3.48	1.55	3.43	1.50
1,400	3.48	1.56	3.41	1.47	3.38	1.45
1,500	3.41	1.50	3.34	1.41	3.33	1.41
1,600	3.33	1.44	3.28	1.36	3.28	1.36
1,700	3.24	1.39	3.20	1.31	3.20	1.31
1,800	3.15	1.35	3.12	1.26	3.12	1.26
1,900	3.07	1.29	3.05	1.23	3.05	1.23
2,000	2.94	1.25	2.92	1.19	2.92	1.19

ตารางที่ 4.10 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์สำหรับ
พิจารณาความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

Frequency (Hz)	Type C					
	Aluminum 1 mm		Aluminum 2 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)
100	5.80	3.18	5.68	3.09	5.57	3.00
200	5.70	3.07	5.58	2.99	5.46	2.91
300	5.59	2.98	5.48	2.89	5.34	2.80
400	5.50	2.88	5.38	2.79	5.22	2.71
500	5.39	2.80	5.28	2.71	5.13	2.63
600	5.25	2.71	5.14	2.63	5.02	2.56
700	5.13	2.64	5.04	2.54	4.91	2.49
800	5.03	2.56	4.93	2.47	4.81	2.42
900	4.90	2.49	4.79	2.41	4.67	2.36
1,000	4.77	2.41	4.65	2.34	4.53	2.30
1,100	4.60	2.33	4.50	2.27	4.40	2.24
1,200	4.46	2.28	4.36	2.21	4.29	2.18
1,300	4.34	2.22	4.26	2.16	4.20	2.14
1,400	4.23	2.17	4.15	2.11	4.11	2.10
1,500	4.13	2.12	4.06	2.05	4.05	2.05
1,600	4.05	2.06	3.98	2.01	3.97	2.01
1,700	3.95	2.02	3.91	1.97	3.91	1.97
1,800	3.85	1.99	3.82	1.95	3.82	1.95
1,900	3.77	1.95	3.73	1.91	3.73	1.91
2,000	3.67	1.89	3.64	1.85	3.64	1.85



รูปที่ 4.8 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ สำหรับวัดความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz



รูปที่ 4.9 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คชั่นเซอร์สำหรับวัดความหนาอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ ในช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz

จากผลการทดลองตารางที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 เมื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คชั่นเซอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ สำหรับพิจารณาความหนาอะลูมิเนียมดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ที่สูงกว่า

1,400 Hz ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ของอะลูมิเนียมที่ความหนา 2 และ 3 mm เห็นความแตกต่างกันไม่ชัดเจน แต่สามารถเห็นความแตกต่างความหนา ระหว่าง 1 กับ 2 mm ได้อย่างชัดเจน และการกระตุ้นในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 1,400 Hz ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ของอะลูมิเนียมที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm สามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เนื่องจากว่าเป็นผลของความลึกกระแสไหลวนบนพื้นผิวอะลูมิเนียมแสดงดังตารางที่ 4.11 เมื่อค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอะลูมิเนียมเท่ากับ 1.26×10^{-6} H/m และ ค่าความนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมเท่ากับ 3.77×10^7 S/m ทำให้เห็นว่าการใช้ความถี่ที่สูงกว่า 1,400 Hz กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำส่งผลให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านความหนาอะลูมิเนียม 1 และ 2 mm แต่ไม่สามารถทะลุผ่านความหนาที่มากกว่า 2 mm ขึ้นไปได้ ผลของขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ มีแนวโน้มและสามารถพิจารณาความหนาอะลูมิเนียมได้เช่นเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันคือความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 4.11 ค่าคำนวณความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิวอะลูมิเนียม

Frequency (Hz)	ความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิวอะลูมิเนียม (mm)
100	5.79
200	4.73
300	4.09
400	3.66
500	3.34
600	3.09
700	2.89
800	2.73
900	2.59
1,000	2.47
1,100	2.36
1,200	2.27
1,300	2.19
1,400	2.11
1,500	2.05
1,600	1.98
1,700	1.93

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ค่าคำนวณความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิวอะลูมิเนียม

Frequency (Hz)	ความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิวอะลูมิเนียม (mm)
1,800	1.88
1,900	1.83
2,000	1.79

ตารางที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาอะลูมิเนียมที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm จากการวัดทั้งหมด 20 ครั้ง

Frequency (Hz)	% Error of Hall Effect sensor (%)								
	Aluminum 1 mm			Aluminum 2 mm			Aluminum 3 mm		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	0.98	0.96	0.97	0.96	0.95	0.96	0.78	0.77	0.80
200	0.95	0.97	0.96	0.97	0.93	0.94	0.76	0.77	0.78
300	0.97	0.93	0.95	0.94	0.78	0.86	0.78	0.74	0.72
400	0.93	0.89	0.91	0.90	0.76	0.83	0.75	0.72	0.70
500	0.96	0.92	0.94	0.93	0.81	0.87	0.76	0.74	0.73
600	0.80	0.95	0.87	0.91	0.68	0.80	0.65	0.76	0.67
700	0.82	0.86	0.84	0.85	0.61	0.73	0.66	0.69	0.61
800	0.88	0.88	0.83	0.88	0.78	0.83	0.70	0.70	0.69
900	0.83	0.81	0.82	0.82	0.59	0.70	0.66	0.65	0.58
1,000	0.78	0.78	0.78	0.78	0.53	0.66	0.63	0.62	0.55
1,100	0.69	0.63	0.66	0.64	0.47	0.56	0.55	0.51	0.47
1,200	0.63	0.67	0.65	0.66	0.40	0.53	0.50	0.54	0.44
1,300	0.54	0.54	0.56	0.54	0.35	0.45	0.44	0.43	0.39
1,400	0.56	0.56	0.56	0.56	0.34	0.45	0.44	0.45	0.37
1,500	0.57	0.61	0.59	0.60	0.31	0.45	0.46	0.49	0.38
1,600	0.46	0.55	0.51	0.52	0.35	0.44	0.36	0.44	0.36
1,700	0.38	0.45	0.42	0.44	0.36	0.40	0.31	0.36	0.34

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณา
อะลูมิเนียมที่มีความหนา 1, 2 และ 3 mm จากการวัดทั้งหมด 20 ครั้ง

% Error of Hall Effect sensor (%)									
Frequency (Hz)	Aluminum 1 mm			Aluminum 2 mm			Aluminum 3 mm		
	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type	Type
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1,800	0.36	0.53	0.44	0.48	0.33	0.41	0.29	0.42	0.34
1,900	0.33	0.49	0.41	0.45	0.32	0.39	0.26	0.39	0.33
2,000	0.35	0.45	0.40	0.43	0.25	0.34	0.28	0.36	0.28

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากการวัดอะลูมิเนียมที่มีความหนา 1, 2 และ 3 mm ทั้งหมด 20 ครั้ง มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 %

4.3 การวัดชนิดวัสดุโลหะ

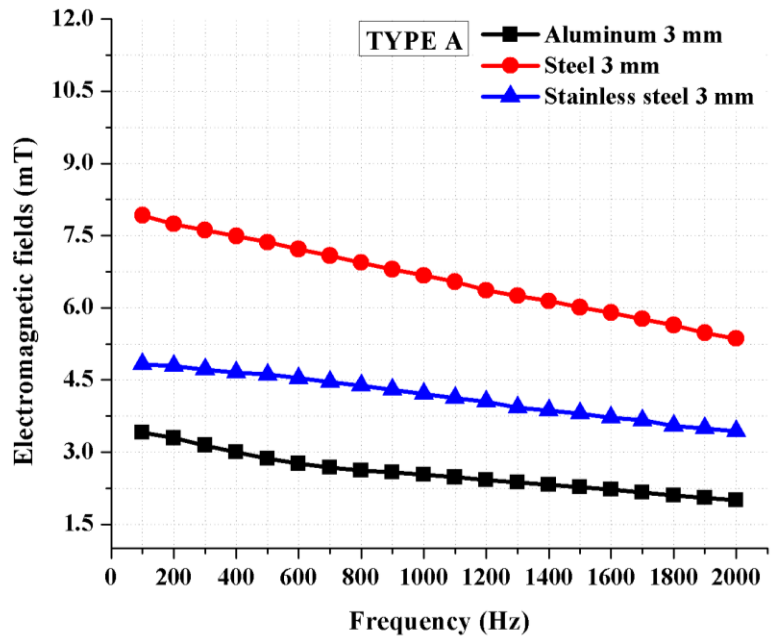
การวิเคราะห์ชนิดวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็กแผ่นเบอร์ SS400 อะลูมิเนียม และสแตนเลสเบอร์ 410 เป็นกรณีศึกษา ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยการกระตุ้นที่ช่วงความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz ที่สัญญาณคลื่นรูปไซน์แอมพลิจูด 6 V_{P-P} โดยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ในการพิจารณา ผลการทดลองแสดงดังนี้

ตารางที่ 4.13 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับ
พิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ A

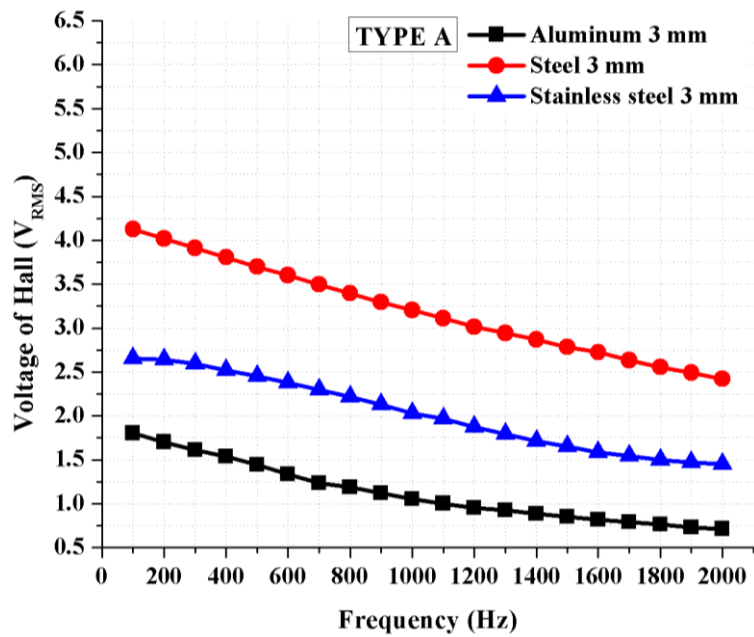
Type A						
Frequency (Hz)	Steel 3 mm		Stainless steel 3 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V _H (V)	B (mT)	V _H (V)	B (mT)	V _H (V)
100	7.92	4.13	4.83	2.66	3.41	1.80
200	7.74	4.02	4.79	2.64	3.29	1.70
300	7.61	3.91	4.72	2.59	3.14	1.60
400	7.49	3.81	4.65	2.52	3.00	1.54

ตารางที่ 4.13 (ต่อ) ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ A

Frequency (Hz)	Type A					
	Steel 3 mm		Stainless steel 3 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)
400	7.49	3.81	4.65	2.52	3.00	1.54
500	7.36	3.70	4.61	2.45	2.87	1.44
600	7.22	3.60	4.54	2.38	2.76	1.34
700	7.08	3.49	4.46	2.30	2.68	1.23
800	6.94	3.95	4.38	2.22	2.62	1.18
900	6.80	3.29	4.30	2.13	2.58	1.12
1,000	6.67	3.20	4.21	2.03	2.53	1.05
1,100	6.54	3.11	4.12	1.96	2.48	1.00
1,200	6.36	3.01	4.05	1.89	2.42	0.95
1,300	6.25	2.94	3.93	1.81	2.37	0.92
1,400	6.14	2.87	3.87	1.73	2.33	0.88
1,500	6.01	2.78	3.80	1.68	2.27	0.85
1,600	5.90	2.73	3.72	1.60	2.23	0.82
1,700	5.77	2.63	3.66	1.58	2.16	0.79
1,800	5.64	2.55	3.55	1.56	2.09	0.76
1,900	5.48	2.49	3.50	1.53	2.04	0.73
2,000	5.36	2.42	3.43	1.50	1.99	0.71



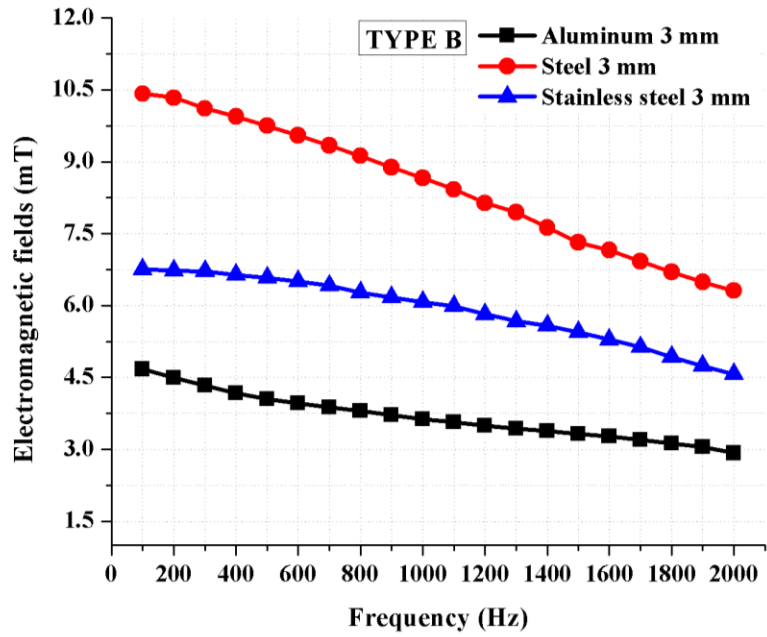
รูปที่ 4.10 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ A



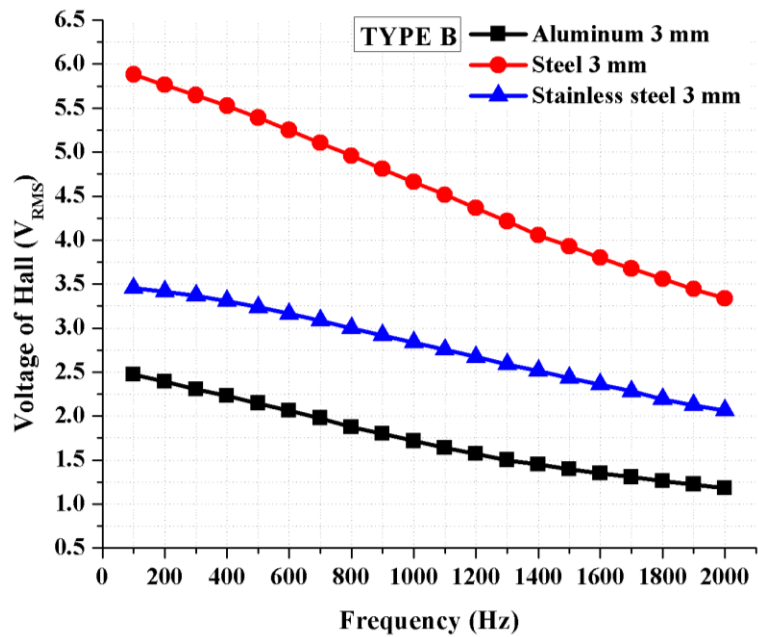
รูปที่ 4.11 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ A

ตารางที่ 4.14 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์สำหรับ
พิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ B

Frequency (Hz)	Type B					
	Steel 3 mm		Stainless steel 3 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)
100	10.42	5.88	6.76	3.45	4.67	2.47
200	10.33	5.76	6.72	3.41	4.49	2.39
300	10.11	5.64	6.71	3.37	4.33	2.30
400	9.94	5.52	6.64	3.30	4.17	2.23
500	9.75	5.39	6.58	3.24	4.05	2.14
600	9.55	5.25	6.50	3.16	3.96	2.06
700	9.34	5.10	6.41	3.08	3.88	1.98
800	9.12	4.96	6.27	3.00	3.80	1.88
900	8.88	4.81	6.17	2.92	3.72	1.79
1,000	8.66	4.66	6.07	2.83	3.63	1.72
1,100	8.42	4.51	5.99	2.75	3.57	1.64
1,200	8.14	4.36	5.82	2.67	3.50	1.57
1,300	7.94	4.21	5.67	2.59	3.43	1.50
1,400	7.63	4.06	5.58	2.51	3.38	1.45
1,500	7.32	3.93	5.44	2.43	3.33	1.41
1,600	7.16	3.80	5.29	2.36	3.28	1.36
1,700	6.92	3.68	5.13	2.28	3.20	1.31
1,800	6.70	3.56	4.93	2.21	3.12	1.26
1,900	6.49	3.44	4.74	2.15	3.05	1.23
2,000	6.31	3.34	4.57	2.10	2.92	1.19



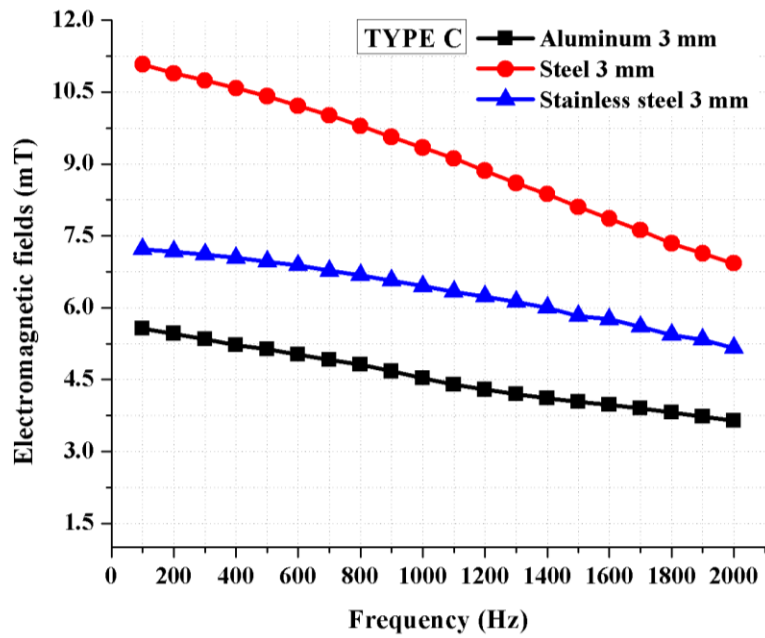
รูปที่ 4.12 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ B



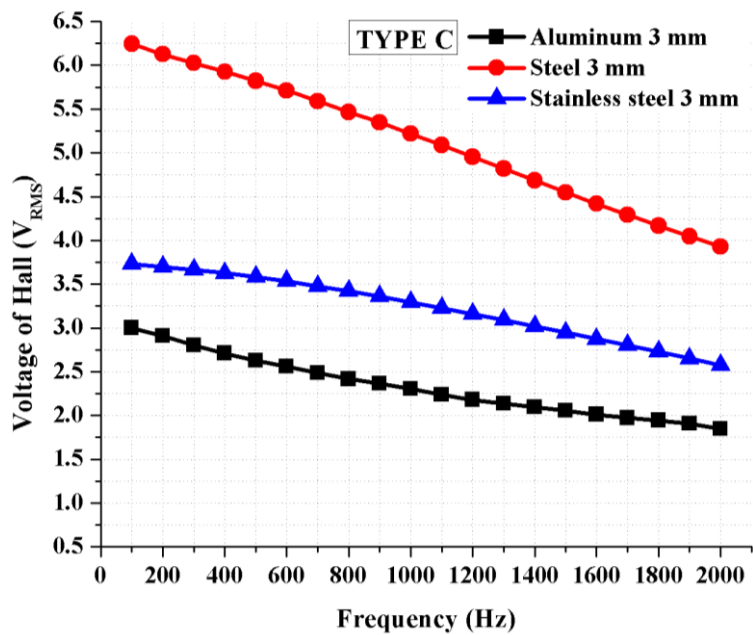
รูปที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ B

ตารางที่ 4.15 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์สำหรับ
พิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

Frequency (Hz)	Type C					
	Steel 3 mm		Stainless steel 3 mm		Aluminum 3 mm	
	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)	B (mT)	V_H (V)
100	11.08	6.24	7.22	3.73	5.57	3.00
200	10.89	6.13	7.17	3.69	5.46	2.91
300	10.74	6.02	7.11	3.66	5.34	2.80
400	10.58	5.93	7.04	3.63	5.22	2.71
500	10.41	5.82	6.96	3.58	5.13	2.63
600	10.21	5.71	6.88	3.53	5.02	2.56
700	10.01	5.59	6.77	3.48	4.91	2.49
800	9.79	5.47	6.68	3.42	4.81	2.42
900	9.56	5.35	6.56	3.36	4.67	2.36
1,000	9.34	5.22	6.45	3.29	4.53	2.30
1,100	9.11	5.09	6.33	3.23	4.40	2.24
1,200	8.86	4.95	6.23	3.16	4.29	2.18
1,300	8.60	4.82	6.12	3.09	4.20	2.14
1,400	8.37	4.68	6.00	3.02	4.11	2.10
1,500	8.10	4.55	5.83	2.95	4.05	2.05
1,600	7.86	4.42	5.76	2.87	3.97	2.01
1,700	7.62	4.29	5.60	2.80	3.91	1.97
1,800	7.34	4.16	5.43	2.73	3.82	1.95
1,900	7.13	4.05	5.33	2.65	3.73	1.91
2,000	6.93	3.93	5.16	2.57	3.64	1.85



รูปที่ 4.14 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและ อะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ C



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและ อะลูมิเนียม ด้วยขดเหนี่ยวนำรูปแบบ C

จากตารางที่ 4.13 - 4.15 เมื่อนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.10 - 4.15 แสดงให้เห็นว่า ขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ สามารถพิจารณาความแตกต่างของวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส

และอะลูมิเนียมที่ความหนา 3 mm ได้อย่างชัดเจน โดยเหล็กจะมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าฮอลล์เอฟเฟ็คชันเซอร์มากกว่า สแตนเลสและอะลูมิเนียม ตามลำดับ เป็นผลมาจาก ค่าความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.16 ซึ่ง สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านเหล็กได้น้อยกว่าสแตนเลสและอะลูมิเนียม ทำให้เกิดการหักล้าง กันระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าปฐมภูมิกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทุติยภูมิน้อย ส่งผลให้ค่าความเข้ม สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของเหล็กมีค่าสูงที่สุด และผลการวัดเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียมด้วยขดลวด เหนี่ยวนำทั้ง 3 แบบ มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่จะมีความแตกต่างกันคือความเข้มสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าโดย Type C สามารถสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงที่สุด

ตารางที่ 4.16 ค่าคำนวณความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะ

Frequency (Hz)	ความลึกของกระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะ (mm)		
	Steel	Stainless steel	Aluminum
100	3.56×10^{-2}	2.00×10^{-1}	5.79
200	2.52×10^{-2}	1.42×10^{-1}	4.73
300	2.05×10^{-2}	1.16×10^{-1}	4.09
400	1.78×10^{-2}	1.00×10^{-1}	3.66
500	1.59×10^{-2}	0.89×10^{-1}	3.34
600	1.45×10^{-2}	0.82×10^{-1}	3.09
700	1.34×10^{-2}	0.76×10^{-1}	2.89
800	1.26×10^{-2}	0.71×10^{-1}	2.73
900	1.19×10^{-2}	0.67×10^{-1}	2.59
1,000	1.12×10^{-2}	0.63×10^{-1}	2.47
1,100	1.07×10^{-2}	0.60×10^{-1}	2.36
1,200	1.03×10^{-2}	0.58×10^{-1}	2.27
1,300	9.87×10^{-3}	0.55×10^{-1}	2.19
1,400	9.52×10^{-3}	0.53×10^{-1}	2.11
1,500	9.19×10^{-3}	0.52×10^{-1}	2.05
1,600	8.90×10^{-3}	0.50×10^{-1}	1.98
1,700	8.64×10^{-3}	0.48×10^{-1}	1.93
1,800	8.39×10^{-3}	0.47×10^{-1}	1.88
1,900	8.17×10^{-3}	0.46×10^{-1}	1.83
2,000	7.96×10^{-3}	0.45×10^{-1}	1.79

ตารางที่ 4.17 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm จากการวัดทั้งหมด 20 ครั้ง

Frequency (Hz)	% Error of Hall Effect sensor (%)								
	Steel			Stainless steel			Aluminum		
	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C	Type A	Type B	Type C
100	0.32	0.31	0.30	0.41	0.62	0.33	0.77	0.97	0.95
200	0.35	0.33	0.32	0.45	0.67	0.36	0.75	0.95	0.95
300	0.30	0.30	0.31	0.41	0.60	0.33	0.80	0.87	1.00
400	0.29	0.27	0.30	0.36	0.54	0.29	0.69	0.95	0.98
500	0.27	0.27	0.29	0.37	0.54	0.29	0.73	0.93	0.97
600	0.21	0.25	0.28	0.33	0.49	0.27	0.72	0.83	0.91
700	0.15	0.17	0.19	0.23	0.34	0.18	0.65	0.92	0.92
800	0.23	0.24	0.25	0.32	0.48	0.26	0.55	0.87	0.97
900	0.26	0.23	0.20	0.31	0.46	0.25	0.68	0.88	0.98
1,000	0.20	0.20	0.21	0.27	0.41	0.22	0.49	0.59	0.96
1,100	0.19	0.17	0.20	0.23	0.34	0.18	0.43	0.53	0.70
1,200	0.15	0.16	0.16	0.21	0.31	0.17	0.40	0.66	0.73
1,300	0.13	0.21	0.29	0.28	0.42	0.23	0.47	0.47	0.65
1,400	0.19	0.21	0.24	0.29	0.43	0.23	0.56	0.56	0.56
1,500	0.17	0.18	0.18	0.23	0.35	0.19	0.52	0.42	0.52
1,600	0.23	0.19	0.15	0.25	0.38	0.21	0.48	0.48	0.48
1,700	0.25	0.20	0.14	0.26	0.40	0.19	0.37	0.45	0.45
1,800	0.23	0.18	0.13	0.24	0.36	0.21	0.35	0.34	0.34
1,900	0.21	0.18	0.16	0.25	0.37	0.24	0.41	0.35	0.31
2,000	0.24	0.23	0.21	0.30	0.45	0.21	0.40	0.44	0.44

จากตารางที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์สำหรับพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงจากการวัดเหล็ก สแตนเลสและอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm ทั้งหมด 20 ครั้ง มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 % แต่จะเห็นได้ว่าอะลูมิเนียมมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด

4.4 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำด้วยความถี่ต่ำส่งผลให้มีปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากกว่าในช่วงความถี่สูง ผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดมากช่วยเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกเพิ่มมากขึ้น จากผลการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำแสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบในการพันขดลวดที่เท่ากัน แต่เพิ่มจำนวนชั้นขดลวดช่วยเพิ่มการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีความเข้มมากขึ้น ข้อเสียคือจะเกิดการสะสมอุณหภูมิภายในแกนเหนี่ยวนำทำให้แกนมีความร้อนสูงขึ้น และการวัดความหนาและชนิดวัสดุโลหะตัวแปรที่เป็นตัวกำหนด ได้แก่ ความถี่ที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุและค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ ซึ่งทั้ง 3 ตัวแปรจะเป็นตัวกำหนดความลึกที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านโลหะชนิดนั้นได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ พบว่าการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำโดยกำหนดให้ตัวแปรจำนวนรอบในการพัน 50 รอบเท่ากัน แต่ลดขนาดตัวแปรความยาวของแกนเหนี่ยวนำแล้วเพิ่มขนาดรัศมีและจำนวนชั้นของขดลวดเหนี่ยวนำช่วยส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น ดังนี้

- 1.) Type A จำนวนชั้นขดลวดทองแดง 1 ชั้น จำนวนรอบในการพัน 50 รอบ/ชั้น รัศมี 5.32 mm ยาว 20 mm และค่าความเหนี่ยวนำ 0.068 mT
- 2.) Type B จำนวนชั้นขดลวดทองแดง 2 ชั้น จำนวนรอบในการพัน 26 และ 24 รอบ/ชั้น รัศมี 5.63 mm ยาว 10 mm และ ค่าความเหนี่ยวนำ 0.072 mT
- 3.) Type C จำนวนชั้นขดลวดทองแดง 3 ชั้น จำนวนรอบในการพัน 18 17 และ 15 รอบ/ชั้น รัศมี 5.95 mm ยาว 7 mm และ ค่าความเหนี่ยวนำ 0.082 mT

5.1.1 ค่าพารามิเตอร์ขดลวดเหนี่ยวนำ

การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขดลวดเหนี่ยวนำ ในส่วนแรก คือ การพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 ถึง 2,000 Hz พบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านทั้ง 3 รูปแบบ เมื่อกระตุ้นที่ความถี่ต่ำมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำมากกว่าที่ความถี่สูง ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับนั้นเปรียบเสมือนกับค่าความต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงส่งผลให้ Type A มีปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากกว่า Type B ประมาณ 2.3% และมากกว่า Type C ประมาณ 7.1% และ Type B มากกว่า Type C ประมาณ 4.8% และในการกระตุ้นที่ความถี่เดียวกัน Type C มีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่า Type B ประมาณ 11.9% และมากกว่า Type A ประมาณ 29.3% และผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ Type C ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์มีค่าสูงขึ้นประมาณ 37.4% และ 12.9% เมื่อเทียบกับ Type A และ Type B ตามลำดับ การพิจารณาอุณหภูมิแกนเหนี่ยวนำโดยการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.5 และ 1.0 A เมื่อเวลาผ่านไป 1 Hr พบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแกนเหนี่ยวนำ Type C > Type B > Type A ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มจำนวนชั้นในการพันขดลวดทองแดง ทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในแกนเหนี่ยวนำ

5.1.2 การวัดความหนาอะลูมิเนียม

ผลการทดลองการวัดความหนาอะลูมิเนียมที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm ด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ 3 รูปแบบ โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับตรวจรู้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าช่วงความถี่ที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ควรใช้ความถี่ในช่วงที่ต่ำกว่า 1,400 Hz ซึ่งสามารถเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน โดยค่าความนำไฟฟ้าของอะลูมิเนียม ค่าการซึมซาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของอะลูมิเนียมและความถี่ที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ตัวแปรทั้ง 3 จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของความถี่ที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านไปได้ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์จากการวัดอะลูมิเนียม 1, 2 และ 3 mm เท่ากับ 0.71%, 0.63% และ 0.55% ตามลำดับ

5.1.3 การวิเคราะห์ชนิดวัสดุโลหะ

ผลการวิเคราะห์ชนิดวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็กแผ่นเบอร์ SS400, สแตนเลสเบอร์ 410 และ อะลูมิเนียม โดยประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับตรวจรู้ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยการกระตุ้นที่ความถี่ 100 ถึง 2,000 Hz พบว่าขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 3 รูปแบบ สามารถแยกชนิดวัสดุโลหะได้อย่างชัดเจน ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์จากการวัดเหล็กมีค่ามากกว่าสแตนเลสและอะลูมิเนียม ตามลำดับ ความแตกต่างค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์สำหรับแยกวัสดุโลหะเป็นผลมาจากค่าความถี่กระแสไหลวนบนพื้นผิววัสดุโลหะในแต่ละชนิดที่สามารถทะลุผ่านได้ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของฮอลล์เอฟเฟ็คเซ็นเซอร์จากการวัดชนิดวัสดุโลหะ ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส และ อะลูมิเนียม เท่ากับ 0.22%, 0.33% และ 0.67% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในกรณีศึกษานี้ได้เลือกใช้ความถี่เริ่มต้นที่ 100 Hz เนื่องจากว่า การใช้ความถี่ที่ต่ำกว่า 100 Hz ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำเกิดความไม่เสถียร ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดสูงและการเลือกความถี่ที่ต่ำมาก ๆ ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำสูงขึ้น แต่ควรคำนึงถึงอุณหภูมิของแกนเหนี่ยวนำที่จะสูงตามปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลกระทบต่อเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Hamia, C. Cordier and C. Dolabdjian “Separability of Multiple Deep Crack Defects with an NDE Eddy Current System” **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 49, no. 1, Jan. 2013. pp. 124-127
- [2] R. Menezes, Artur L. Ribeiro and Helena G. Ramos “Evaluation of crack depth using eddy current techniques with GMR-based probes” **2015 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)**, Aug. 2015.
- [3] K. Tsukada, M. Hayashi, Y. Nakamura, K. Sakai and T. Kiwa “Small Eddy Current Testing Sensor Probe Using a Tunneling Magnetoresistance Sensor to Detect Cracks in Steel Structures” **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 54, no. 11, Nov. 2018.
- [4] Chen Huang and Xinjun Wu “Probe lift-off compensation method for pulsed eddy current thickness measurement” **Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation**, Dec. 2014. pp. 937-939
- [5] C. S. Angani, H. G. Ramos, A. L. Ribeiro and T. J. Rocha “Lift-Off Point of Intersection Feature in Transient Eddy-Current Oscillations Method to Detect Thickness Variation in Stainless Steel” **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 52, no. 6, June 2016.
- [6] T. Sasayama, T. Ishida, M. Matsuo and K. Enpuku “Thickness Measurement of an Iron Plate Using Low-Frequency Eddy Current Testing with an HTS Coil” **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. 26, no. 5, Aug. 2016.
- [7] Lulu Tian, Chun Yin, Yuhua Cheng and Libing Bai “Successive approximation method for the measurement of thickness using pulsed eddy current” **2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**, May 2015.
- [8] D. G. Park, C. S. Angani, G. D. Kim, C. G. Kim and Y. M. Cheong “Evaluation of Pulsed Eddy Current Response and Detection of the Thickness Variation in the Stainless Steel” **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 45, no. 10, Oct. 2009. pp. 3893-3896

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] J. Král, R. Smid, H. M. Geirinhas Ramos and A. Lopes Ribeiro “Thickness measurement using transient eddy current techniques” **2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, July 2011.
- [10] I. N. El Ghouli, A. Cheriet, S. Bensaid and A. E. Lakhdari “Accurate measurement of Aluminum layer thickness in a multilayer material using eddy current sensor” **2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)**, Oct. 2017.
- [11] Hongbo Wang, Wei Li and Zhihua Feng “Noncontact Thickness Measurement of Metal Films Using Eddy-Current Sensors Immune to Distance Variation” **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 64, no. 9, Sept. 2015. pp. 2557-2564
- [12] Zilian Qu, Qian Zhao and Yonggang Meng “Characterization of submicrometer thickness of copper film on silicon wafer by using pulsed eddy current method” **2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering**, May 2011.
- [13] Xin'an Yuan “Inner circumferential current field testing system with TMR sensor arrays for inner-wall cracks inspection in aluminum tubes” **Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO)**, vol. 122, July 2018, pp. 232-239
- [14] D.F.He, M. Shiwa, J.P. Jia, J.Takatsubo and S. Moriya “Multi-frequency ECT with AMR sensor” **NDT & E International Independent Nondestructive Testing and Evaluation**, vol. 44, no. 5, Sept. 2011. pp. 438-441
- [15] F. Vachera, F. Alvesb and C. Gilles-Pascauda “Eddy current nondestructive testing with giant magneto-impedance sensor” **NDT & E International Independent Nondestructive Testing and Evaluation**, vol. 40, no 6, Sept. 2007. pp. 439-442
- [16] John O’Malley. **Basic Circuit Analysis**. New York : McGraw-Hill Book Company, Inc. 1982.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] B. P. C. Rao. **Practical Eddy Current Testing**. Alpha Science International Limited, 2007
- [18] M. Rezal, Dahaman Ishak and M. Sabri “High voltage magnetic pulse generation using capacitor discharge technique” **Alexandria Engineering Journal**, vol. 53, no. 4, Dec. 2014. Pp. 803-808
- [19] R. K. Rajput. **Electrical Technology**. New Delhi : LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD Inc. 2004
- [20] Sergio Franco. **Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuit**. 3rd ED. New York : McGraw-Hill Book Company Inc. 2002
- [21] Denton J. Dailey. **Electronic Devices and Circuits**. New Jersey : Prentice Hall, Inc. 2001
- [22] R. F. C. Menezes. “**Eddy Current Method for the Assessment of Crack Depths in Metallic Non-ferromagnetic Plates.**” M.S. Thesis of Science Degree in Aerospace Engineering at Instituto Superior Técnico. 2015
- [23] NDT Education Resource Center, Iowa State University. 2001-2014. “**Material Properties Tables Electrical Conductivity and Resistivity.**” [Online]. Available : https://www.nde-ed.org/index_flash.htm.
- [24] Edward Ramsden. **Hall-Effect Sensors Theory and Application**. 2nd ED. USA : Elsevier Inc. 2006
- [25] Allegro MicroSystems, LLC. 2016. “**A1301 and A1302 Continuous-Time Ratiometric Linear Hall-Effect Sensor ICs.**” [Online]. Available : <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A1301-2-Datasheet.ashx>.

ภาคผนวก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

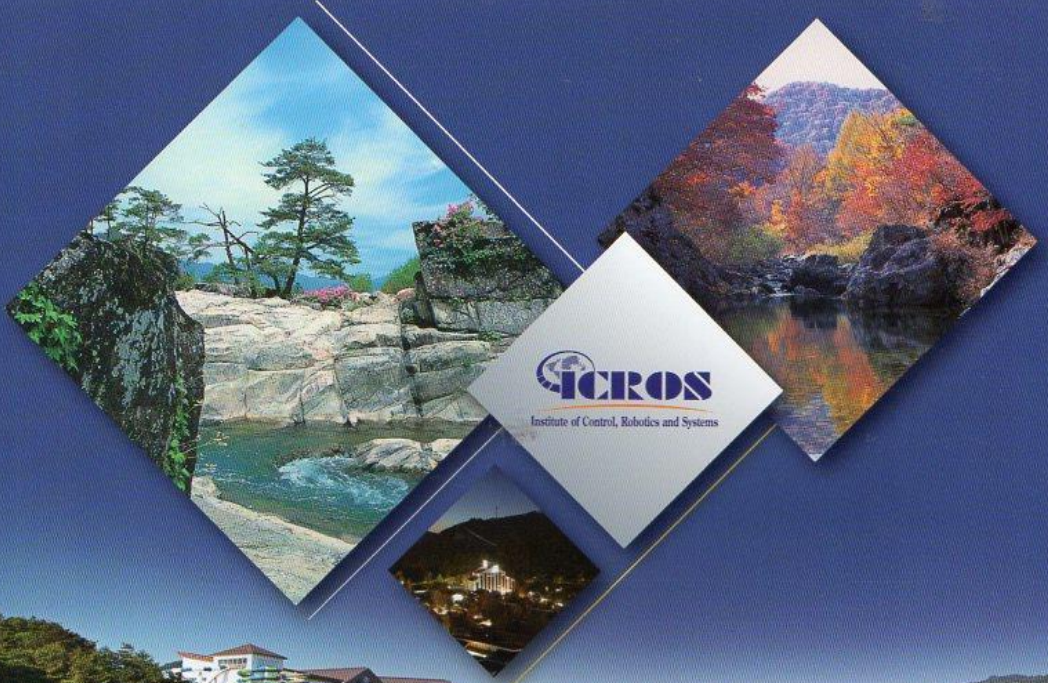
Final Program & Digest

SCIE IEEE S CAC ACA ECTI ISA AAI

ICCAS 2018

2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems

October 17(WED)~20(SAT), 2018
YongPyong Resort, PyeongChang, Korea



ICROS
Institute of Control, Robotics and Systems

<http://2018.iccas.org>

TA05

Sensors and Actuators |

Time : October 18(THU) 09:10~10:40
Room : Red Pine

Chair : Prof.Takeshi Mizuno
(Saitama University, Japan)

09:10~09:25

TA05-1

Realization of Magnetic Suspension by Flux-Path Control Mechanisms Lying Lateral to Magnetic Source

Takeshi Mizuno, Naoki Ishibashi, Yuji Ishino, Daisuke Yamaguchi, Masaya Takashi(Saitama University, Japan)

Noncontact suspension is achieved with three flux-path control mechanisms placed in the lateral of a magnetic source (permanent magnet). The attractive force acting on a ferromagnetic suspended object (floator) is adjusted by moving the ferromagnetic control plates vertically beside the permanent magnet. Such a configuration enables the effective gap to be larger than in the conventional flux-path control magnetic suspension system. An apparatus with three flux-path control mechanisms is designed and fabricated. In this mechanism, a ferromagnetic control plate is fixed on one end of a lever.

09:25~09:40

TA05-2

Position Control of Brushless DC Motor using Adaptive Sliding mode Control

Jinsuk Choi(POSTECH, Korea)

In this paper, we propose position control method using adaptive sliding mode control (ASMC) with timedelay Control (TDC) for Brushless DC motor (BLDC). PID control for position control of the BLDC cannot satisfy control need for disturbance and uncertainty in nonlinear systems. The BLDC position is controlled by applying ASMC with time-delay estimation(TDE) and pole-placement control (PPC). This controller solves the performance degradation due to the nonlinearity component of BLDC and improves performance in the transient state

09:40~09:55

TA05-3

MOBILE APPLICATION FOR RECOVERING PARALYSIS PATIENT' S MOTION

Anuntapat Anuntachai(King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang, Thailand)

Paralysis is a symptom when patient's central nervous system is failure because of blood deficiency. The patients cannot comfortably move their bodies due to muscle hyposthenia. The restoration requires regularly physical therapy which needs high accuracy because muscles have dysfunctional. This thesis represents the mobile application which help to muscle restoration of paralysis patient. This mobile application improves accuracy and efficiency of physical therapy. The physical therapy and muscle operation principles are collected and analyzed by this mobile application and iBeacons sensors.

09:55~10:10

TA05-4

Use of Deep Learning for Position Estimation and Control of Soft Glove

Jeesoo Ha(Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea), Dooyoung Kim, Sungho Jo(KAIST, Korea)

Soft wearable robots comprised of deformable materials have recently attracted much attention in the field of applications for its lightness and elasticity. However, there exist some limitation to the control of wearable robots due to the complexity of the model and the conditions of the wearer. In this paper, we propose a learning-based position control method of soft wearable glove using a deep neural network (DNN). To analyze our proposed method, we fabricated a soft pneumatic glove and a control board for the glove based on open hardware platform data. With our developed system, we collect

10:10~10:25

TA05-5

Development of Compatible Induction coil with Pure AC for Hall Effect Sensor: A Study on Metal Materials Thickness

Witsarut Sriratana, Yannadech - Khwankityotha, Sutham Satthamsakul(King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)

This study presents an analysis of the parameters to generate the electromagnetic fields of the induction coils for the application of Hall Effect sensor to classify the aluminum thickness and the classification of the metal materials. In this research three types of induction coil are considered: Type A with one layer, Type B with two layers, and Type C with three layers. Four experiments were conducted. The electromagnetic field of Type C is found to be 11.90% greater than Type B, and 29.26% greater than Type A...

10:25~10:40

TA05-6

Development of Sensor Module for Detecting the Magnetron Power Based on Microwave Oven Frequency

Sutham Satthamsakul, Witsarut Sriratana(King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)

This study presents the design of sensor module to be used in analyzing the electromagnetic power created from magnetron by using microwave as the case study on basis of Rectenna (Rectifying antenna) consisting of 2 main parts including sensing part and transduction part. The experimental results would be used to analyze the appropriate form of sensor module. This research compared sensor module for 3 forms including Type A, Type B, and Type C, with different sizes of diameter of wires consisting, by comparing the efficiency in preventing the leak of measured power.

2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2018)
Oct. 17~20, 2018; YongPyong Resort, PyeongChang, GangWon, Korea

Development of Compatible Induction coil with Pure AC for Hall Effect Sensor: A Study on Metal Materials Thickness

Witsarut Sriratana^{1*}, Yannadech Khwankityotha² and Sutham Satthamsakul³

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok, 10520, Thailand
(E-mail: ¹witsarut.sr@kmitl.ac.th, ²driteja@hotmail.com and ³sutham.sa@kmitl.ac.th) * Corresponding author

Abstract: This study presents an analysis of the parameters to generate the electromagnetic fields of the induction coils for the application of Hall Effect sensor to classify the aluminum thickness and the classification of the metal materials. In this research three types of induction coil are considered: Type A with one layer, Type B with two layers, and Type C with three layers. Four experiments were conducted. The electromagnetic field of Type C is found to be 11.90% greater than Type B, and 29.26% greater than Type A. The core temperature of Type C with 1 A current applied was found to be 3.50% hotter than Type B and 5.14% hotter than Type A. The classification of the aluminum thickness with the frequency range of 100 Hz to 1.4 kHz are suitable for identifying the thickness of 1, 2 and 3 mm. In terms of the classification of metal materials with all the three types of the induction coil, it can be separated clearly from the samples which consist of steel, stainless steel and aluminum. The total error by using Hall Effect sensor is $\pm 0.5702\%$.

Keywords: Induction coil, Electromagnetic fields, Hall Effect sensor, Thickness measurement, Metal materials.

1. INTRODUCTION

One of several methods of nondestructive testing is eddy current testing, which is based on the principle of exciting an electromagnetic field on a conductive material. In this way eddy current has been used by researchers to detect cracks on the surface as well as the inside of a material [1], analysis of liquid's conductivity [2], the separation of material thickness [3,4] and thickness measurement of lift-off [5]. These works have highlighted the importance of electromagnetic fields generation for the eddy current testing, namely, that the selection of suitable parameters for measurement is paramount in the reduction of errors and thus enhanced inspection efficiency.

In this study, three types of induction coils were designed. The assumptions of the study will be influenced by the parameter of induction coil such as the electromagnetic fields density, temperature and the current flowing through the induction coil. Hall Effect sensor was applied to analyze the parameters suitable for the separation of aluminum thickness and the classification of metal materials. Since the output voltage of a Hall Effect sensor can be measured variables low values, highly sensitive to electromagnetic fields, a reasonable cost as well as the ease of use and installation.

2. FUNDAMENTAL METHODS

2.1 Generation of Electromagnetic Fields

This section describes the variables that affect to generate electromagnetic fields of induction coil or magnetic flux density (B_z), as shown in Eq. (1) [6].

$$B_z = \frac{\mu IN}{2l} \left(\frac{Z + \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (Z + \frac{l}{2})^2}} - \frac{Z - \frac{l}{2}}{\sqrt{R^2 + (Z - \frac{l}{2})^2}} \right) \quad (1)$$

In this case of alternating current, result of the current (I) flowing through the induction coil as shown in Eq. (2) [7].

$$I = \frac{V_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \frac{V_m}{2\pi fL} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

The inductance (L) of the induction coil is given by Eq. (3) [2].

$$L = \frac{\mu N^2 \pi R^2}{4l} \quad (3)$$

Where μ is material permeability of core (H/m), N is number of turns in wire coil, l is coil length (m), R is mean radius of coil (m), f is the frequency of generator (Hz), Z is the position magnetic flux (m), and V_m is peak maximum of sinusoidal signal (V).

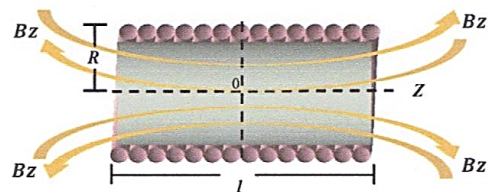


Fig. 1 Cross-sectional of coil.

Thickness measurement of a metal is affected by the depth of the eddy current (δ), which is in turn affected by the surface metal material were the eddy current frequency (f), magnetic permeability of material (μ_m) and electrical conductivity of material (σ). The relationship between these parameters is captured in Eq. (4) [4].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_m \sigma}} \quad (4)$$

2.2 Principle of Hall Effect Sensor

In the analysis of electromagnetic fields from induction coils. Hall Effect sensor number A1301 is used to convert the electromagnetic fields into voltage. The Eq. (5) shows the voltage calculation from the Hall Effect sensor [2].

$$V_H = \frac{R_H}{W_H} I_H B \quad (5)$$

Where V_H is output voltage of Hall Effect sensor (mV), W_H is thickness of the Hall generator (mm), R_H is Hall coefficient (Ω), I_H is the constant current (mA) and B is magnetic flux density (mT)

3. DESIGN OF THE INDUCTION COIL

This section describes the design of coil used in the experiments. In this experiment, copper wire standard SWG number 30 with diameter 0.3150 mm due to copper wire has the small size, it reduces the dimension for design of the induction coil and the ferrite core with diameter 10 mm and length 20, 10 and 7 mm were used. Fig. 2 shows the three designs of induction coil.

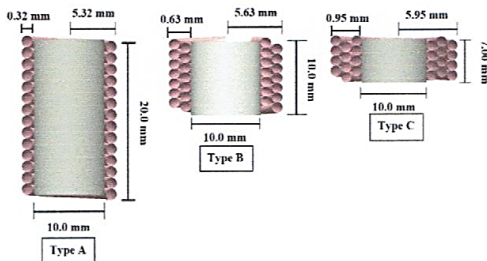


Fig. 2 Simulated cross-sections of the three types of induction coil.

Table 1 shows the affecting of the coil length, the radius. It was found that, the inductance of induction coil Type C is higher than Type A and Type B, which is according to the assumption of Eq. (3).

Table 1 Inductance and resistance of the three types of the induction coil.

Samples name	No. of turn per layer	Inductance (mH)	Resistance (Ω)
Type A	50	0.06541	0.34473
Type B	26, 24	0.07050	0.37857
Type C	18, 17, 15	0.08240	0.41602

4. MEASURING SYSTEM

4.1 Installation of measurement

The design of the device for measuring the sample is shown in Fig. 3. The Hall Effect sensor is located at 1 mm above the induction coil and 1 mm below the sample.

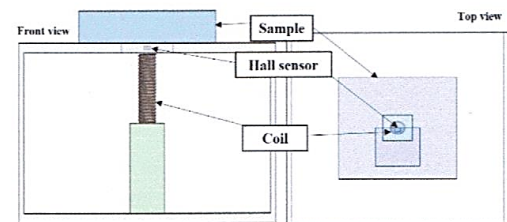


Fig. 3 Design of measurement process.

4.2 Process of experiment

In this study, a sinusoidal AC signal of 6 V_{P-P}, with the frequency range of 100 Hz to 2 kHz to excite an induction coil. The signal is amplified by a Class AB amplifier, which is then fed into the electromagnetic coil as the excitation voltage. The output voltage of the Hall Effect sensor is processed with a microcontroller 10 bit, and sent to a workstation for data storage analyzing the relationship of electromagnetic fields and output voltage of Hall Effect sensor. Fig. 4 shows completed set of block diagram of overall system.

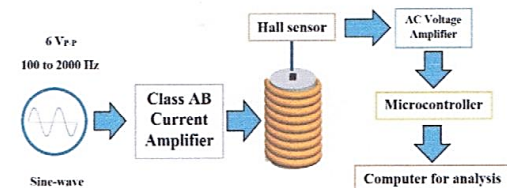


Fig. 4 Block diagram of measurement system.

5. EXPERIMENT AND RESULT

The experiments were divided into 4 parts: electromagnetic fields of induction coil, temperature of core, classification of metal thickness and classification of metal materials.

5.1 Electromagnetic fields of induction coil

In the experiment, the instrument used to measure the electromagnetic fields of the induction coil is the AC / DC Magnetic Field Meter Model SDL900 EXTECH® INSTRUMENT.

Fig. 5 shows the current flowing through the induction coil. Note that the frequency of generator and the inductance of the induction coil according to the fundamental theory of Eq. (2) affects the increase and decrease of the current flowing through the induction coil. As a result, the current flowing through the induction coil Type A is greater than B and C, respectively.

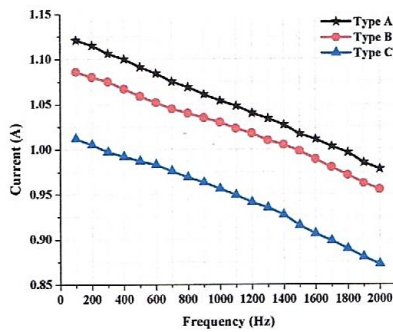


Fig. 5 The current flowing through the induction coils.

Fig. 6 shows the electromagnetic fields of the three induction coils in the frequency range of 100 Hz to 2 kHz. As shows that the frequency increases, resulting in a decrease in the electromagnetic fields due to the current flowing through the induction coil of Fig. 5 has a reduced value. From the results of Fig. 5 at the frequency range of 100 Hz to 2 kHz, Type C has the lowest current flowing through the induction coil but results of Fig. 6 shows that Type C has higher electromagnetic fields than the induction coil Type B and Type A, respectively. Note that the decrease of the coil length and the increases in the number of layers, results in an increase the electromagnetic fields, which is based on the assumption of Eq. (1).

Fig. 7 shows the output voltage from Hall Effect sensors to measure the electromagnetic fields of the three induction coil. Note that the output voltage of the Hall Effect sensor is the same as the electromagnetic fields or the output voltage from the Hall Effect sensor is direct variation with the electromagnetic fields.

5.2 Temperature of induction core

In this experiment, the excitation current of the

induction coil is at 1 A. Thermistor was used for measuring the temperature of core due to a sensitive response to temperature.

Fig. 8 shows the temperature of the three induction coils when the excitation with currents of 1 A. The steady-state temperature response for induction core of Type A = 42.59 °C, Type B = 43.34 °C and Type C = 44.90 °C. Note that the effect of temperature increase is due to the increase in the number of layers of induction coils, resulting in the internal heat accumulation of the cores.

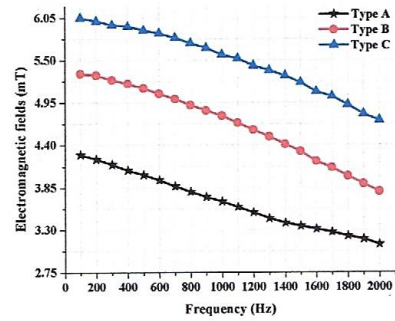


Fig. 6 The electromagnetic fields of the induction coils.

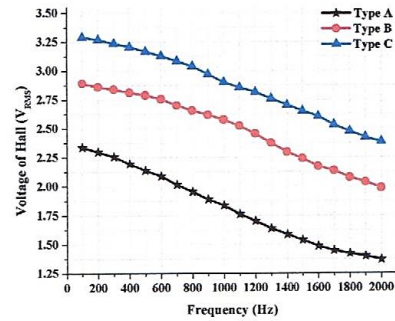


Fig. 7 The output voltage from Hall Effect sensor.

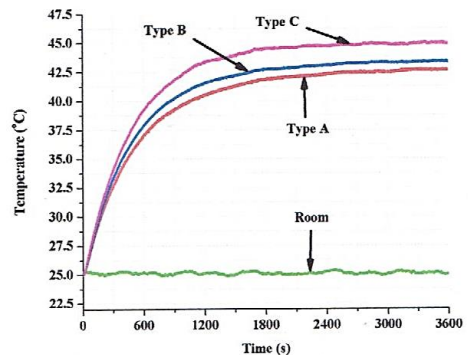


Fig. 8 Temperature of induction cores.

5.3 Classification of metal thickness

This experiment concerns with the measurement of the thicknesses of aluminum. Aluminum specimens of thickness 1, 2 and 3 mm, with a width of 50 mm and a length of 50 mm are used. Twenty rounds were used with a sampling rate of 5 times/sec.

Figs. 9 and 10 shows the electromagnetic fields of the induction coil and output voltage from Hall Effect sensor for the classification of aluminum thickness. Note that the frequency range of 100 Hz to 1.4 kHz is suitable for classifying aluminum thickness of 1, 2 and 3 mm but the frequency higher than 1.4 kHz that unclassified aluminum thickness of 2 and 3 mm because of the depth of eddy current on aluminum surface calculated from Eq. (4) equal 2.05 mm at the frequency of 1.6 kHz, the magnetic permeability of aluminum = 1.256×10^{-6} H/m and electrical conductivity of aluminum = 3.77×10^7 S/m, it shows that the frequency higher than 1.4 kHz that the classification of aluminum thickness between 2 and 3 mm are not clear. The effect of different induction coils design is no effect on the classification of aluminum thickness but has a different effect on the intensity of the electromagnetic fields.

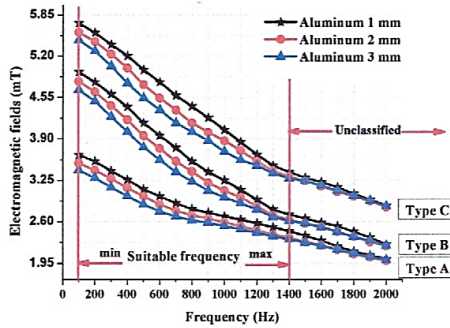


Fig. 9 The electromagnetic fields for classification of aluminum thickness.

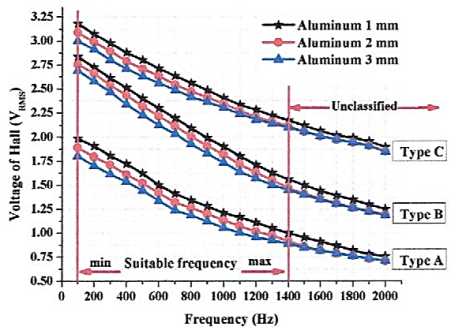


Fig. 10 The output voltage from Hall Effect sensor for classification of aluminum thickness.

5.4 Classification of metal materials

In the classification of metal materials, three types of samples are used: aluminum, steel and stainless steel with a size 50 x 50 mm and thickness 3 mm. A frequency of 500 Hz is used for analyzing metal materials classification. Twenty rounds were used with a sampling rate of 5 times/sec.

Figs. 11 and 12 shows the electromagnetic fields of the induction coils and the output voltage from Hall Effect sensor can clearly distinguish the difference of metal materials. The electromagnetic fields of induction coils and the output voltage from Hall Effect sensor of steel are more than stainless steel and aluminum due to the effect of the generation of electromagnetic fields on the surface steel for resisting electromagnetic fields of the induction coil is less than stainless steel and aluminum, which intensity of the electromagnetic fields on the surface metal depends on the depth of eddy current on surface metal, as shown calculate the depth eddy current of aluminum, stainless steel and steel in Table 2.

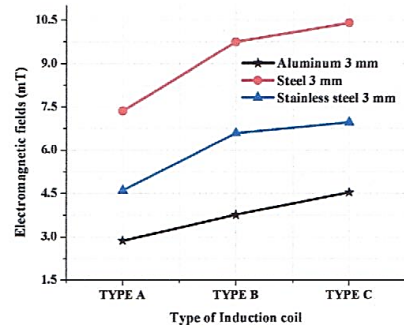


Fig. 11 The electromagnetic fields for classification of metal materials.

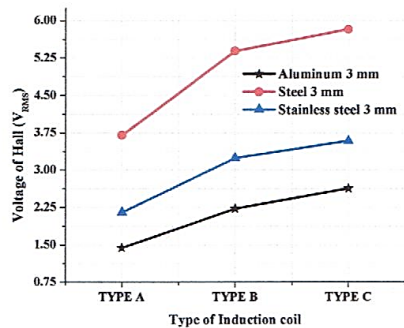


Fig. 12 The output voltage from Hall Effect sensor classification of metal materials.

Table 2 The depth of eddy current on materials surface.

Materials	The depth of eddy current at 500 Hz (mm)
Aluminum	3.67
Stainless steel	0.61
Steel	0.09

6. CONCLUSION

In conclusion, this research studies the effects of the induction coils with a number of different layers, which are 1, 2 and 3 layers. The effect of increasing the number of layers of the induction coils, the resulting electromagnetic fields have a higher value. However, increasing the number of layers of induction coils that caused accumulation of heat within the induction core. The application for classification of the aluminum thickness and the classification of metal materials. Variables that impact the analysis were the frequency, the magnetic permeability of materials and the electrical conductivity of materials which have the effect on the depth of the eddy current values. Note that the depth of the eddy current values used for analysis of the thickness of aluminum and classification of the metal materials. The electromagnetic fields intensity is no effect on the classifying of the aluminum thickness and classification of the metal materials, but it does affect the output voltage of the Hall Effect sensor.

REFERENCES

- [1] M. Smetana and V. Chudacik, "Investigation of Artificial Fatigue Cracks by Eddy Current Technique", *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2017.
- [2] S. Sokjabok and W. Sriratana, "Analysis of Liquids Conductivity Using Hall Effect Sensor Based on Electromagnetic Field Properties", *Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 2017.
- [3] T. Sasayama and T. Ishida, "Thickness Measurement of an Iron Plate Using Low-Frequency Eddy Current Testing with an HTS Coil", *IEEE transactions on applied superconductivity*, Vol. 26, No. 6, 2016.
- [4] I. Nacereddine El Ghoul, "Accurate measurement of Aluminum layer thickness in a multilayer material using eddy current sensor", *Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2016.
- [5] M. Lu and L. Yin, "A Novel Compensation Algorithm for Thickness Measurement Immune to Lift-Off Variations Using Eddy Current Method", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 65, No. 12, 2016.
- [6] M. Rezal and D. Ishak, "High voltage magnetic pulse generation using capacitor discharge technique", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 53, pp. 803-808, 2014.
- [7] R. K. Rajput, *Electrical Engineering*, LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD, India, 2004

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายญาณเดช ขวัญกิจโยธา
วัน เดือน ปีเกิด	18 กุมภาพันธ์ 2537
ที่อยู่	36/4 หมู่ 3 ตำบลขุนแก้ว อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	2558 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ 2.) การออกแบบเซ็นเซอร์และทรานสดิวเซอร์

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Witsarut Sriratana, **Yannadech Khwankityotha**, Sutham Satthamsakul. "Development of Compatible Induction coil with Pure AC for Hall Effect Sensor: A Study on Metal Materials Thickness" 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 17-20 Oct. 2018, Daegwallyeong, South Korea, pp. 575-579