

การเปรียบเทียบการกระตุ้นระหว่าง Pure DC และ Combined DC
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

COMPARISON BETWEEN PURE DC AND COMBINED DC EXCITATION
FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF HALL EFFECT SENSOR

วนิสรา แก้วนามชัย
VANISARA KAEWNAMCHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-060-032

การเปรียบเทียบการกระตุ้นระหว่าง Pure DC และ Combined DC
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

COMPARISON BETWEEN PURE DC AND COMBINED DC EXCITATION
FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF HALL EFFECT SENSOR

วนิสรา แก้วนามชัย
VANISARA KAEWNAMCHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-M-060-032

COMPARISON BETWEEN PURE DC AND COMBINED DC EXCITATION
FOR EFFICIENCY IMPROVEMENT OF HALL EFFECT SENSOR

VANISARA KAEWNAMCHAI

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-060-032

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบการกระตุ้นระหว่าง Pure Dc และ Combined DC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์
นักศึกษา	นางสาวนิศรา แก้วนามชัย
รหัสนักศึกษา	60601005
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ โดยการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมี 2 วิธีการกระตุ้นคือ Pure DC และ Combined DC นอกจากนี้ พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จากผลการตอบสนองของวัสดุโลหะที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส เป็นกรณีศึกษา รวมถึงวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของโดเมนความถี่ จากผลการทดสอบเมื่อพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor พบว่าการกระตุ้นแบบ Combined DC วัสดุแต่ละชนิดมีผลการตอบสนองที่ดี และแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ Pure DC ไม่สามารถแยกผลการตอบสนองของวัสดุอะลูมิเนียม และสแตนเลสออกจากกันได้ นอกจากนี้พบว่าเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC ผลการตอบสนองสามารถแยกความหนาของอะลูมิเนียมได้เช่นเดียวกัน มีการแสดงผลการตอบสนองของวัสดุในรูปแบบของโดเมนความถี่จากโปรแกรม MATLAB เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปเปรียบเทียบผลการทดลองจากการวัดจริง และจากการแสดงผลด้วย Oscilloscope พบว่า ผลการตอบสนองของวัสดุเมื่อพิจารณาจากโดเมนความถี่ สามารถแยกชนิดของวัสดุได้เป็นอย่างดีในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC รวมไปถึงสามารถแยกความหนาที่แตกต่างกันของอะลูมิเนียมได้เช่นเดียวกัน ในขณะที่ใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC มีเพียงเหล็ก และ สแตนเลสที่ตอบสนองต่อการทดสอบได้เป็นอย่างดี แต่อะลูมิเนียม และในกรณีที่ไม่มีวัสดุ ผลการตอบสนองไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน โดยการแสดงผลจากโดเมนความถี่นี้มีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรวมของระบบการวัดวัสดุ เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC และ Combined DC คือ $\pm 0.0697\%$ และ $\pm 0.5853\%$ ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ได้จาก MATLAB และจากการวัดจริง เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC และ Combined DC คือ $\pm 0.081\%$ และ $\pm 0.803\%$ ตามลำดับ

Thesis Title	Comparison between Pure DC and Combined DC Excitation for Efficiency Improvement of Hall Effect sensor
Student	Ms. Vanisara Kaewnamchai
Student ID.	60601005
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Witsarut Sriratana

ABSTRACT

This thesis presents the improvement of the Hall Effect sensor with excitation of the induction coil to create the electromagnetic field. Two excitation methods, namely Pure DC and Combined DC, were considered. Experiments were designed to investigate the output voltage from the Hall Effect sensor on three types of materials, namely Steel, Aluminum and Stainless steel, whose results are interpreted in the frequency domain. Test results showed that the three materials when excited induction coil by the Combined DC approach generally gave good responses where the voltage level separations are clearly seen, as well as showing the ability of classifying the aluminum thickness. The Pure DC excitation was shown to be incapable of separating the responses between aluminum and stainless steel. Frequency domain responses were also computed in MATLAB to ensure reliability and to allow accurate result comparison between the actual measurements and the one from the oscilloscope. Frequency domain results showed that the Combined DC was capable of separating the materials from one another, as well as classifying the aluminum thickness. The Pure DC excitation, however, could only separate the steel and stainless steel, but gave no significant differences between aluminum and the control case. Additionally, the output in the form of the frequency domain is related to the output voltage of the Hall Effect sensor. The percentages of total tolerances of the measuring system when used the excitation induction coil with Pure DC and Combined DC are 0.0697% and 0.5853%, respectively. Moreover, the percentages tolerances of the frequency from The MATLAB and the actual measurement when used Pure DC and Combined DC are $\pm 0.081\%$ and $\pm 0.803\%$, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสำเร็จ ความเมตตา กรุณา คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆ จาก รศ.ดร. วิศรุต ศรีรัตนะ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลการทำวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับ วิทยานิพนธ์ ควบคุม และดูแลการทำงานต่างๆด้วยความเอาใจใส่เสมอมา ตลอดจนให้คำแนะนำ การสนับสนุน โอกาสในการเรียนต่อในระดับที่สูงขึ้น รวมถึงกำลังใจในการเรียน และในการเขียน วิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ต่างๆ และกำลังใจ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย และการเรียนรู้

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม และภาควิชาอื่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมถึงสถาบันอื่น ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีให้กันตลอดการเรียนที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณนายวัฒนา แก้วนามชัย นางฐิติภัก แก้วนามชัย ผู้ซึ่งเป็นบิดา และมารดาของข้าพเจ้า รวมไปถึงญาติพี่น้อง และคนรัก ที่เข้าใจ สนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

คุณงามความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ และคำแนะนำต่างๆ ข้าพเจ้าขอให้ทุกๆท่านจงมีแต่ความสุข สุขภาพแข็งแรงตลอดไป

นางสาววนิศรา แก้วนามชัย
ผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ	2
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	4
2.2 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing-NDT).....	5
2.2.1 การทดสอบโดยการตรวจพินิจ Visual Examination (VE)	5
2.2.2 การทดสอบด้วยสารแทรกซึม Liquid penetrant testing (LPT).....	5
2.2.3 การทดสอบด้วยผงแม่เหล็ก Magnetic particle testing (MPT)	6
2.2.4 การทดสอบด้วยวิธีภาพถ่ายรังสี Radiographic testing (RT)	6
2.2.5 การตรวจสอบโดยใช้คลื่นความถี่สูง Ultrasonic testing (UT)	7
2.2.6 การตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน Eddy current testing (ECT).....	7
2.3 ทฤษฎีกระแสไหลวน	9
2.3.1 การกำเนิดกระแสไหลวน (Eddy Current).....	9
2.3.2 ความลึกในการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน	10
2.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	11
2.5 ทฤษฎีของ Hall Effect sensor.....	14
2.5.1 ปรากฏการณ์ของ Hall	14
2.5.2 Hall Effect sensor.....	15
2.6 วงจรการขยายสัญญาณ	16
2.6.1 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง	17
2.6.2 วงจรขยายชนิดคลาสเอ (Class A amplifier circuit)	17
2.7 โลหะตัวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	18
2.7.1 อะลูมิเนียม (Aluminum)	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.2 เหล็ก (Steel).....	19
2.7.3 เหล็กกล้าไร้สนิม หรือสแตนเลส (Stainless steel)	19
2.8 การแปลงฟูรีเยร์.....	19
2.8.1 การแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปโดเมนเวลา.....	19
2.8.2 การแปลงสัญญาณในรูปโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่	20
2.9 สรุป.....	22
บทที่ 3 การออกแบบระบบ และการดำเนินงาน.....	23
3.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรแปลงค่าต่างๆ.....	23
3.1.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	23
3.1.2 วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
3.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ.....	26
3.3 อุปกรณ์การวัดในแต่ละส่วน และวัสดุโลหะทดสอบ	27
3.3.1 เครื่องมือการวัด	27
3.3.2 ชิ้นงานวัสดุโลหะ เป็นกรณีศึกษาในการทดสอบ.....	29
3.4 การออกแบบระบบการทดสอบวัสดุโลหะ.....	30
3.5 การดำเนินงานวิจัย.....	30
3.5.1 การวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเหนี่ยวนำ	30
3.5.1.1 ค่าอุณหภูมิความร้อนบริเวณแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ	30
3.5.1.2 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ.....	31
3.5.1.3 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ.....	31
3.5.2 การทดสอบการแสดงผลการตอบสนองของวัสดุโลหะ	31
3.5.3 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองของวัสดุในรูปโดเมนความถี่	33
3.6 สรุป.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง.....	36
4.1 ผลการทดลองเพื่อหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขดลวดเหนี่ยวนำ	36
โดยการวัดอุณหภูมิบนแกนของขดลวดที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ	
4.2 ผลการตอบสนองของวัสดุโลหะ โดยการกระตุ้นแบบ	38
Pure DC และ Combined DC	
4.2.1 ผลการทดลองในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	38
4.2.2 ผลการทดลองในรูปแบบกระแสไฟฟ้า.....	39
4.2.3 ผลการทดลองในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต	40
4.3 การตอบสนองของวัสดุโดยการพิจารณาในรูปของโดเมนความถี่	42
4.3.1 การกระตุ้นขดลวดแบบ Pure DC.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การกระตุ้นขดลวดแบบ Combined DC.....	51
4.4 สรุป	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการทดลอง	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก.....	67
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	68
ประวัติผู้เขียน	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ	11
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่างๆ	13
4.1 เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมিবนขดลวดเหนี่ยวนำ	37
4.2 เพอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Pure DC และ Combined DC	37
ของอุณหภูมিবนขดลวดเหนี่ยวนำ	
4.3 กระแสไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pure DC	40

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงการเกิดกระแสไหลวน8
2.2	แสดงการเหนี่ยวนำให้เกิด Eddy current ในวัสดุตัวนำ9
2.3	แสดงความลึกในการเหนี่ยวนำของ Eddy current10
2.4	แสดงสนามแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์11
2.5	แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสสลับและอิมพีแดนซ์14
2.6	แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Hall15
2.7	แสดงขนาด และส่วนประกอบของ Hall Effect sensor16
2.8	แสดงวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟส สำหรับกรองความถี่สูง17
2.9	แสดงวงจรขยายสัญญาณ Class-A amplifier อย่างง่าย18
2.10	แสดงโดเมนเวลารูปคลื่นสี่เหลี่ยม20
2.11	แสดงรูปโดเมนความถี่22
3.1	แสดงเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น MCH-K305D23
3.2	แสดงไดอะแกรมระบบการทำงานของ Pure DC23
3.3	แสดงวงจรขยายสัญญาณ Class-A amplifier24
3.4	แสดงเครื่องกำเนิดสัญญาณ รุ่น HP-33120A24
3.5	แสดงไดอะแกรมระบบการทำงานของ Combined DC24
3.6	แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจาก Class-A amplifier25
3.7	แสดง Hall Effect sensor A130125
3.8	แสดงวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้งานร่วมกับ Hall Effect sensor25
3.9	แสดง Arduino Mega 2560 Rev326
3.10	แสดงวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ Voltage to Frequency Converter26
3.11	แสดงเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) รุ่น RIGOL DS1052E26
3.12	แสดงขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์27
3.13	แสดงเครื่องมือวัดค่า LCR หรือ LCR Meter27
3.14	แสดงเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการวัด28
3.15	แสดงวัสดุโลหะที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้29
3.16	แสดงระบบการวัดโดยรวม30
3.17	แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณกึ่งกลางแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ31
3.18	แสดงรูปแบบจำลองการออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ31
3.19	แสดงขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของแผ่นอะคลีลิกที่ถูกเจาะ32
3.20	แสดงการติดตั้ง Hall Effect sensor และขดลวดเหนี่ยวนำ32
3.21	แสดงระยะห่างระหว่าง Hall Effect sensor และขดลวดเหนี่ยวนำ33
3.22	แสดงรูปแบบการทดสอบ33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 แสดงระบบการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของวัสดุในรูปแบบของโดเมนความถี่	33
3.24 แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม MATLAB	34
3.25 แสดงตัวอย่างของโดเมนเวลาเมื่อแปลงเป็นโดเมนความถี่	34
3.26 แสดงแผนภูมิกระบวนการแปลงจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่	35
โดยใช้โปรแกรม MATLAB	
4.1 แสดงอุณหภูมิบนแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ	36
4.2 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC	38
4.3 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC	39
4.4 แสดงกระแสไฟฟ้าของขดลวดเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC	40
4.5 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor	41
โดยการใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC	
4.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor	41
โดยการใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC	
4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	42
โดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 1 mm	
4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	43
โดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 2 mm	
4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	43
โดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 3 mm	
4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	44
โดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 1 mm	
4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	45
โดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 2 mm	
4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	45
โดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 3 mm	
4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	46
โดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 1 mm	
4.14 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	46
โดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 2 mm	
4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	47
โดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm	
4.16 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ	48
โดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะที่ทำการวัด ที่ความหนา 1 mm	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ48 โดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 2 mm	
4.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบ49 โดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 3 mm	
4.19 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด.....50 ในระบบ Pure DC ที่ความหนา 1 mm	
4.20 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด.....51 ในระบบ Pure DC ที่ความหนา 2 mm และ 3 mm	
4.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC52 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 1 mm	
4.22 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC52 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 2 mm	
4.23 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC53 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 3 mm	
4.24 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC53 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 1 mm	
4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC54 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 2 mm	
4.26 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC54 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 3 mm	
4.27 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC55 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 1 mm	
4.28 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC55 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 2 mm	
4.29 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC56 ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm	
4.30 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบ.....57 โดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 1 mm	
4.31 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบ.....57 โดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 2 mm	
4.32 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบ.....58 โดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 3 mm	
4.33 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด.....59 ในระบบ Combined DC ที่ความหนา 1 mm	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด.....	60
ในระบบ Combined DC ที่ความหนา 2 mm และ 3 mm	
4.35 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของอะลูมิเนียม	61
ที่ความหนาต่างกัน ในระบบ Combined DC	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุโลหะทั้งในอดีตและปัจจุบันได้มีการใช้งานมาอย่างต่อเนื่อง เมื่อมนุษย์มีความต้องการใช้โลหะมากขึ้น ส่งผลให้มีการบุกกรุกและทำลายทรัพยากรแร่ธาตุธรรมชาติมากขึ้นเช่นเดียวกัน การรีไซเคิลโลหะจึงมีบทบาทสำคัญในการช่วยลดการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่มากเกินไป โดยสามารถลดมลภาวะให้แก่สิ่งแวดล้อม รวมถึงช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตจากการถลุงแร่โดยตรง ทั้งนี้ เนื่องจากวัสดุโลหะสามารถนำมารีไซเคิลได้ง่าย สามารถนำกลับมาใช้งานได้ยังมีประสิทธิภาพ หากมีการรีไซเคิลที่ถูกต้อง และหนึ่งในขั้นตอนสำคัญของการรีไซเคิล คือ การคัดแยกโลหะ ซึ่งก่อนที่จะนำโลหะไปรีไซเคิล จะต้องมีการคัดแยกโลหะต่างชนิดออกจากกันก่อนที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการหล่อ หลอม รีด ขึ้นรูป ฯลฯ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

การแยกชนิดของโลหะในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก โดยการแยกชนิดของโลหะ เช่น เหล็ก และเหล็กกล้าไร้สนิมบางชนิด สามารถทำได้ด้วยการใช้สนามแม่เหล็กแรงสูง แต่วัสดุจำพวกโลหะเบาอย่างอะลูมิเนียม และทองแดง ได้มีการใช้เครื่องแยกโลหะซึ่งมีต้นทุนสูง เป็นผลให้มีการศึกษาและวิจัยในด้านนี้ โดยมีการประยุกต์การใช้งานกับเซนเซอร์ ซึ่งในปัจจุบันมีการตรวจวัดหลากหลายรูปแบบและอยู่บนพื้นฐานของการตรวจวัดโดยไม่ทำลายวัตถุ (Non-Destructive testing หรือ NDT) [1] โดย NDT มีหลากหลายวิธีการ เช่น การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง การตรวจสอบด้วยรังสี การตรวจสอบด้วยแม่เหล็ก เป็นต้น และหนึ่งในวิธีการตรวจวัดที่ใช้ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานร่วมกับงานวิจัยนี้ คือ การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบวัสดุบนพื้นฐานของ NDT รูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้เซนเซอร์สนามแม่เหล็ก การตรวจสอบการกัดกร่อนบนชั้นผิวของโครงสร้างเครื่องบินโดยใช้กระแสไหลวนชั่วคราว การวัดความหนาของสารฉนวนที่เคลือบอยู่บนพื้นผิววัสดุสเตนเลส การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ และ EMATs ในการวัดชิ้นงานที่มีความลึกของหลุมที่แตกต่างกัน และการวิเคราะห์ความผิดพลาดของฮอลล์เซนเซอร์ 4 ตัว ติดตั้งในรูปแบบทแยงมุมกันด้วยโดเมนความถี่สำหรับการวัดความไม่สมบูรณ์ของวัสดุ [2-6]

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่า งานวิจัยที่มีในปัจจุบันเกี่ยวข้องกับการตรวจวัดวัสดุโลหะ หรือการสร้างเครื่องแยกชนิดของโลหะ ซึ่งเครื่องแยกโลหะที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องจำแนกวัสดุในปริมาณที่มากและรวดเร็ว และมีการใช้เครื่องจักรและมนุษย์ทำงานร่วมกันเพื่อจำแนกวัสดุโลหะ อาจนำมาซึ่งค่าใช้จ่ายที่สูง งานวิจัยนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ (Hall Effect sensor) อันเนื่องมาจากระบบกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 2 ระบบ สำหรับเปรียบเทียบผลการตอบสนองของวัสดุ โดยอยู่บนพื้นฐานของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบนวัสดุตัวนำ ทำการวิเคราะห์ด้วยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor รวมถึงมีการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ เนื่องจากสามารถให้ความละเอียดสูง เข้าใจผลการทดลองได้ง่าย ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์และสามารถนำไปต่อยอดกับอุตสาหกรรมอื่นได้ในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาโครงสร้าง และการออกแบบระบบการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้กับ Hall Effect sensor
2. เพื่อศึกษาหลักการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไหลวน โดยการใช้การเหนี่ยวนำของขดลวด
3. เพื่อศึกษาผลการตอบสนองของวัสดุโลหะ ด้วยการวิเคราะห์จากแรงดันไฟฟ้าของ Hall Effect sensor จากหลักการของกระแสไหลวน รวมไปถึงการวิเคราะห์ในรูปแบบของ กระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
4. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบโดเมนความถี่ จากการแปลงฟูเรียร์ด้วยโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบผลการแสดงผลจาก Oscilloscope

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ Hall Effect sensor ด้วยวิธีการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธี โดยพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor จากการทดสอบกับวัสดุโลหะ เหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส เป็นกรณีศึกษา รวมไปถึงวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของโดเมนความถี่จาก Oscilloscope และจากโปรแกรม MATLAB

1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาหลักการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Hall Effect sensor
2. ศึกษาผลการตอบสนองของวัสดุโลหะ บนพื้นฐานของทฤษฎีกระแสไหลวน
3. ออกแบบ และจำลองอุปกรณ์การวัดเพื่อทดสอบกับวัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นวัสดุโลหะต่างชนิดกัน 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส
4. วิเคราะห์ผลการทดลองจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กระแส และแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปแบบของโดเมนเวลา และโดเมนความถี่ รวมไปถึงค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

ได้รับประโยชน์จากการศึกษาพื้นฐานของการตรวจวัดแบบไม่ทำลาย การกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยประยุกต์ใช้ Hall Effect sensor ร่วมกับวงจรขยายพื้นฐานในการทดสอบการตอบสนองของวัสดุโลหะที่ต่างกัน 3 ชนิด ต่อวิธีการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ Hall Effect sensor และการวิเคราะห์ในรูปแบบของโดเมนความถี่ เพื่อแสดงถึงความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันแม้เพียงเล็กน้อย

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

สามารถแบ่งเนื้อหาวิทยานิพนธ์นี้ออกเป็น 5 บท ซึ่งในแต่ละบทมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และความสำคัญของวิธีการตรวจวัดบนพื้นฐานการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีกระแสไหลวน ความมุ่งหมายและจุดประสงค์ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้กับ Hall Effect sensor โดยทดสอบการตอบสนองของวัสดุโลหะต่อวิธีการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

บทที่ 2 กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัด การกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า Hall Effect sensor และการแปลงฟูเรียร์

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการสร้างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ การขยายสัญญาณ และวิธีการทดสอบกับวัสดุโลหะ

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดสอบ การวิเคราะห์ผลการทดสอบจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และการวิเคราะห์ผลการทดสอบในรูปแบบโดเมนความถี่ เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองที่แตกต่างกันของโลหะแต่ละชนิด

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

ทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ การกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้กับ Hall Effect sensor จากการทดสอบกับวัสดุโลหะเป็นกรณีศึกษา ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด บนพื้นฐานของการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (NDT) ด้วยวิธีกระแสไหลวน โดยมีการทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การทดสอบโดยไม่ทำลายวัตถุ (NDT) ซึ่งรวมถึงทฤษฎีของกระแสไหลวน การกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เหนี่ยวนำ ทฤษฎีของ Hall Effect sensor วงจรขยายสัญญาณ วัสดุโลหะตัวนำ และการวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้การแปลงฟูเรียร์เร็ว (Fast Fourier Transform หรือ FFT)

2.1 ทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาการตรวจวัดของโลหะจำพวก เหล็ก และสแตนเลสบางชนิด สามารถทำได้ด้วยการใช้สนามแม่เหล็กแรงสูง แต่วัสดุจำพวกอะลูมิเนียม หรือวัสดุที่เป็นโลหะเบาไม่สามารถจำแนกได้เป็นอย่างดี และมีวิธีการที่แตกต่างกันไป รวมถึงเครื่องจักรที่ใช้ในปัจจุบันมีราคาสูง เป็นผลให้มีการศึกษาและวิจัยในด้านนี้ ซึ่งงานวิจัยต่างๆดำเนินการตรวจวัดได้หลากหลายรูปแบบและอยู่บนพื้นฐานของการตรวจวัดด้วย NDT เช่น การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม การตรวจสอบด้วยคลื่นความถี่สูง การตรวจสอบด้วยรังสี การตรวจสอบด้วยแม่เหล็ก เป็นต้น หนึ่งในวิธีการตรวจสอบที่ใช้ทฤษฎี และหลักการพื้นฐานร่วมกับงานวิจัยนี้ คือ การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy current testing) มีหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งทางด้าน การตรวจสอบรอยความบกพร่อง [7-8] ขนาด รูปร่าง รวมไปถึงความลึกของรอยแตก ร้าวบนวัสดุ [9] การจำแนกวัสดุโลหะโดยการจำลองวัสดุด้วยโปรแกรม ANSYS [10] การจำแนกวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก โดยใช้ Impedance spectroscopy [11] การจำแนกทองแดง และสแตนเลสโดยใช้เครื่องแยกโลหะ [12] โดยในบางงานวิจัยได้มีการประยุกต์ใช้งานร่วมกับ Hall Effect sensor ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ที่อาศัยอำนาจแม่เหล็กในการวัด ได้มีงานวิจัยที่นำเสนอเกี่ยวกับการติดตั้ง Hall Effect sensor ในรูปแบบต่างๆเปรียบเทียบกับ การตรวจวัดหลุมขนาดต่างๆบนชิ้นงานโลหะ [13] หรือการวัดความหนาของฉนวนที่เคลือบวัสดุโลหะนั้นอยู่ โดยมีการประยุกต์ใช้กับ Hall Effect sensor [4]

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้กับ Hall Effect sensor โดยการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำสำหรับกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 วิธี โดยวิเคราะห์ผลการทดสอบกับวัสดุโลหะเป็นกรณีศึกษาในรูปของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor และในรูปของโดเมนความถี่ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมมีงานวิจัยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำต่างๆ [14] ที่มีความสัมพันธ์กับความถี่ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของ Hall Effect sensor และงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบ Hall Effect sensor และ Ultrasonic sensor ด้วยวิธีที่เรียกว่า วิธี EMAT ในการตรวจสอบความลึกของหลุม อีกทั้งยังนำเสนอในรูปแบบของโดเมนความถี่ [5] และงานวิจัยที่ทำการจำแนกวัสดุที่ไม่ใช่โลหะด้วยวิธีการ Electromagnetic separation (EMS) กล่าวคือ ใช้แม่เหล็กในการจำแนกวัสดุที่มีการปะปนกันของวัสดุโลหะตัวนำ และวัสดุที่เป็นฉนวน [15]

2.2 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing- NDT) [1]

วิธีการทดสอบโดยไม่ทำลาย ได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของชิ้นงาน และสามารถนำไปประเมินความเหมาะสมในการใช้งานของชิ้นงานนั้นๆ ซึ่ง NDT ได้ถูกใช้งานในอุตสาหกรรมหลายแขนง เช่น นิวเคลียร์ การบินและอวกาศ รถยนต์ อุตสาหกรรมอาหาร และการแพทย์ เป็นต้น การตรวจสอบด้วยวิธี NDT ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญเฉพาะและประสบการณ์ของผู้ทดสอบ ความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด ใบบรรองการตรวจสอบ และขั้นตอนมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ ในปัจจุบัน NDT มีหลายวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อการพัฒนาวัสดุใหม่ๆ รวมถึงเป็นการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน ซึ่งวิธีการใหม่ๆ ยังคงได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลายวิธีการยังคงมีประสิทธิภาพในการใช้งานได้เป็นอย่างดี อีกทั้งสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยเทคโนโลยีเซนเซอร์ อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องมือวัดต่างๆ

NDT มีมากกว่า 40 วิธีการทดสอบ ซึ่งถูกดัดแปลงมาจาก 6 วิธีการที่เป็นวิธีการพื้นฐาน ดังนี้

- a. Visual examination
- b. Liquid penetrant testing
- c. Magnetic particle testing
- d. Radiographic testing
- e. Ultrasonic testing
- f. Eddy current testing

2.2.1 การทดสอบโดยการตรวจพินิจ Visual Examination (VE)

เป็นขั้นตอนแรกของการตรวจสอบที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง ใช้เพื่อการตรวจสอบร่องรอยความไม่ต่อเนื่องบนพื้นผิวของชิ้นงาน จุดบกพร่องที่แสดงบนพื้นผิวก่อให้เกิดความเสียหายได้มากกว่าเมื่อเทียบกับร่องรอยความบกพร่องที่อยู่ภายใต้พื้นผิววัสดุ ถึงแม้วิธีการทดสอบ NDT อื่นๆ ได้ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น แต่การตรวจสอบโดยใช้สายตา ยังคงเป็นส่วนที่สำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการควบคุมคุณภาพ ซึ่งควรใช้ก่อน ระหว่าง และหลังการผลิต เนื่องจากวิธีการนี้ช่วยในการประเมินชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงาน และลักษณะทั่วไป เช่น พื้นผิวที่มีความขรุขระ รอยแตกร้าวบนพื้นผิว และจุดบกพร่องอื่นๆ จากกระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การหล่อ การหลอม และการเชื่อม

การตรวจสอบจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยตรวจสอบ เช่น แว่นตา แว่นขยายหรืออุปกรณ์ช่วยมองในกรณีที่ไม่สามารถใช้สายตาโดยตรงได้ เช่น กล้อง ที่สามารถควบคุมได้จากระยะไกล สำหรับการตรวจสอบในท่อ หรือบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด การใช้แสงสว่างและมุมมอง ทั้งสองสิ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาชิ้นงาน ซึ่งพื้นผิวของชิ้นงานควรได้รับการตรวจสอบที่มุม 90 องศา จึงจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด และแสงสว่างที่ใช้มีประสิทธิภาพที่สุด อยู่ที่ 200 lux สำหรับการตรวจสอบที่ละเอียดมาก ควรใช้แสงสว่างมากกว่า 500 lux เหนือสิ่งอื่นใดคือ ความรู้ และความชำนาญของผู้ทดสอบซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากที่จะทำให้การตรวจสอบด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.2 การทดสอบด้วยสารแทรกซึม Liquid penetrant testing (LPT)

การทดสอบด้วยสารแทรกซึมเป็นหนึ่งในวิธีการทดสอบที่ง่าย ใช้สำหรับการตรวจสอบจุดบกพร่องที่เห็นได้บนพื้นผิวของชิ้นงาน วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชิ้นงานหลายรูปแบบ

เช่น ชิ้นงานขนาดใหญ่ เล็ก เรียบง่าย หรือชิ้นงานที่ซับซ้อน เป็นต้น โดยสามารถตรวจสอบกับชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของโลหะ อโลหะ โลหะผสม เซรามิก เครื่องแก้ว รวมถึงวัสดุพอลิเมอร์ได้บางส่วน

การตรวจสอบทำได้ด้วยการเริ่มทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานโดยใช้ Cleaner หลังจากนั้นทำการพ่นสารแทรกซึมบนชิ้นงาน โดยสารแทรกซึมนี้มีสีต่างๆเพื่อให้เห็นรอยแตกร้าวของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีสีย้อมที่สามารถมองเห็นได้ในแสงปกติ และสารเรืองแสงที่จำเป็นต้องตรวจสอบกับแสงอัลตราไวโอเล็ต หลังจากการใช้สารแทรกซึมแล้วจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งให้เพียงพอที่สารจะแทรกซึมไปในบริเวณที่แตกร้าว หลังจากนั้นเช็ดสารแทรกซึมออก และใช้น้ำยา Developer เพื่อเป็นการดึงให้สารแทรกซึมที่อยู่ในรอยแตกร้าวที่นั้นแสดงออกมาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

วิธีการนี้เหมาะสำหรับการตรวจสอบทุกๆรอยแตกร้าว รอยความไม่ต่อเนื่อง และความบกพร่องต่างๆที่เปิดออกสู่พื้นผิวของชิ้นงาน วิธีการทดสอบนี้มีความไวสูง และใช้ต้นทุนต่ำ แต่ไม่สามารถตรวจสอบร่องรอยความบกพร่องใต้พื้นผิวของชิ้นงานได้ และเป็นการยากที่ใช้งานบนพื้นผิวที่ขรุขระ และมีรูพรุน

2.2.3 การทดสอบด้วยผงแม่เหล็ก Magnetic particle testing (MPT)

ใช้สำหรับการตรวจสอบรอยบกพร่องที่อยู่บนพื้นผิว และใต้พื้นผิวของชิ้นงานที่เป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก ซึ่งวิธีการนี้ทำงานอยู่บนพื้นฐานของสนามแม่เหล็ก โดยเมื่อนำวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกเข้าไปอยู่ในสนามแม่เหล็ก วัสดุนั้นจะประพฤติกรรมเป็นแม่เหล็กด้วย เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านในวัสดุจะต่อเนื่องกันจากจุดหนึ่งไปอีกจุดอื่นๆ เมื่อมีรอยบกพร่องอยู่บนบริเวณพื้นผิว หรือใต้พื้นผิวของชิ้นงาน สนามแม่เหล็ก และเส้นแรงแม่เหล็กที่สัมพันธ์กันจะเกิดการเบี่ยงเบนและรั่วไหลออกมา เส้นแรงแม่เหล็กที่รั่วไหลได้แสดงออกมาบนพื้นผิวของวัสดุที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กชั่วคราว สามารถสังเกต และตรวจสอบได้ โดยการใช้ประโยชน์จากการแยกส่วนของผงแม่เหล็กที่ถูกพ่นลงบนพื้นผิวชิ้นงานก่อนที่จะนำชิ้นงานนั้นเข้าไปในสนามแม่เหล็ก การพ่นพื้นผิวด้วยผงแม่เหล็กนี้สามารถบ่งบอกรอยแตกร้าวได้หลากหลายรูปแบบ ทั้งตำแหน่ง ขนาด และรูปร่างของรอยความไม่ต่อเนื่อง

วิธีการทดสอบด้วยผงแม่เหล็กนี้ มีประสิทธิภาพสำหรับการทดสอบรอยแตกร้าวได้ทั้งบนพื้นผิว และใต้พื้นผิว ร่องรอยการขีด รอยแตกร้าวจากการอบ หรือชุบ แต่วิธีการนี้ใช้ได้เฉพาะวัสดุที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกเท่านั้น และเส้นแรงแม่เหล็กจะต้องตั้งฉากกับรอยความไม่ต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบมากกว่า 2 ครั้งขึ้นไป และหลังการทดสอบจำเป็นต้องทำความสะอาดทุกครั้ง

2.2.4 การทดสอบโดยวิธีภาพถ่ายรังสี Radiographic testing (RT)

การทดสอบด้วยรังสีเป็นหนึ่งในวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัตถุที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย วิธีการนี้มีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงผ่านชิ้นงาน โดยจากหลักการดูดซับพลังงานที่ไม่เท่ากันของวัตถุ และเมื่อรังสีทะลุผ่านวัตถุ จะมีการดูดซับรังสีที่ต่างกัน รังสีที่ถูกดูดกลืนส่วนใหญ่แล้วขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น และความหนาของวัตถุนั้นๆ หากวัตถุนั้นมีรอยแตกร้าวได้ พื้นผิวก็สามารถวิเคราะห์รูปแบบของวัตถุจากภาพถ่ายรังสีได้ โดยรอยแตกร้าวที่นั้นจะถูกแสดงออกมาเนื่องจากพลังงานของรังสีผ่านชิ้นงานตรงบริเวณที่เป็นรอยแตกร้าวได้มากกว่าบริเวณอื่น และทำปฏิกิริยากับสารไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวฟิล์มได้มากกว่า เมื่อล้างฟิล์มออกมาแล้วบริเวณจุดบกพร่องจึงมีสีคล้ำกว่าบริเวณอื่น ดังนั้นการถ่ายภาพด้วยรังสีจึงเป็นการแปรผลจากเงาของภาพชิ้นงานที่ปรากฏอยู่บนฟิล์มนั่นเอง เช่นเดียวกับแผ่นฟิล์ม X-ray ทางกายภาพ นอกเหนือจากการตรวจสอบ

รอยบกพร่องแล้ว วิธีการตรวจสอบนี้ได้ถูกประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบที่หลากหลาย เช่น การตรวจสอบการเชื่อม การหล่อ ของวัสดุต่างๆ

ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบวิธีอื่นๆ การทดสอบด้วยรังสีมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าวิธีการอื่นๆ และการตรวจสอบมีความเสี่ยงอาจก่อให้เกิดอันตรายจากรังสี จึงต้องปิดกั้นพื้นที่เพื่อความปลอดภัยในระหว่างการตรวจสอบ

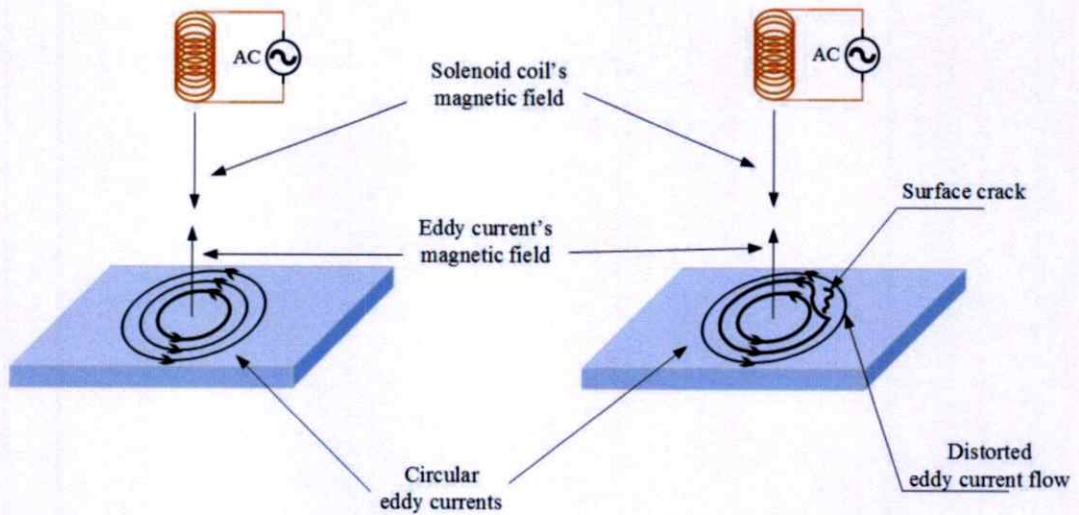
2.2.5 การตรวจสอบโดยใช้คลื่นความถี่สูง Ultrasonic testing (UT)

การทดสอบโดยใช้คลื่นความถี่สูงอัลตราโซนิก ส่งผ่านไปยังวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อคลื่นเสียงผ่านวัสดุ คลื่นเสียงมีการสูญเสียพลังงานไปในระหว่างทาง และมีการสะท้อนกลับที่บริเวณพื้นผิวของวัตถุ ส่วนของตัวรับจะรับคลื่นที่สะท้อนออกมา และเมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณจึงจะทราบตำแหน่งของรอยบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ คลื่นเสียงเป็นไปตามกฎของการแพร่กระจาย เช่นเดียวกับคลื่นแสง นอกจากนี้ความเร็วในการแพร่กระจายของคลื่นในวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุนั้นๆ ในการตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกที่นำมาใช้มีสองวิธี คือ การส่งผ่านตลอด และวิธีการวัดการสะท้อนกลับ การตรวจสอบด้วยอัลตราโซนิกใช้ช่วงวงรอบความถี่กว้างในช่วง 0.5-25 MHz ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ที่ได้ยิน

อัลตราโซนิกสามารถตรวจสอบรอยบกพร่องต่างๆได้ เช่น รอยแตก ร้าว รอยความไม่ต่อเนื่องในแผ่นเพลท ท่อ การเชื่อม การหล่อ การตี วิธีการนี้ใช้อย่างแพร่หลายในการควบคุมคุณภาพ และการตรวจสอบวัสดุในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ และในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต การใช้งานร่วมกับแบตเตอรี่แบบพกพาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับอุปกรณ์การตรวจสอบนี้ ทำให้มีความสะดวกและเหมาะสมกับงานมากขึ้น รวมไปถึงวิธีการแสดงผลแบบทันทีที่ได้ถูกนำมาพัฒนาด้วยเช่นกัน เพื่อตรวจสอบ และจำแนกวัสดุ ในกระบวนการควบคุมคุณภาพ เช่น วัสดุชิ้นนี้สามารถยอมรับได้ หรือไม่ ข้อจำกัดในการใช้การตรวจสอบด้วยวิธีอัลตราโซนิกนี้ ผู้ปฏิบัติงานจะต้องมีความรอบคอบ และมีประสบการณ์ในการตรวจสอบ รวมถึงความสามารถในการแปลผลวิเคราะห์ชิ้นงานนั้นๆ การตรวจสอบเป็นไปได้อย่างยากในชิ้นงานที่มีรูปร่างที่ไม่สมบูรณ์ มีพื้นผิวหยาบ ขรุขระ หรือมีขนาดเล็ก และบางจนเกินไป วิธีการนี้จะต้องใช้สารตัวนำคลื่นเป็นสื่อกลางในการส่งผ่านพลังงานคลื่นระหว่างอุปกรณ์วัด และส่วนที่ต้องการตรวจสอบ ดังนั้น จึงต้องมีการทำความสะอาดทุกครั้ง

2.2.6 การตรวจสอบด้วยวิธีกระแสไหลวน Eddy current testing (ECT)

วิธีการนี้มีพื้นฐานมาจากการเหนี่ยวนำกระแสในวัสดุตัวนำที่สามารถตรวจสอบ และสังเกตได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระแสเหนี่ยวนำกับวัสดุ เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงผ่านวัสดุตัวนำไฟฟ้า กระแสเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของวัสดุตัวนำ กระแสเหล่านี้อยู่ในทิศตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสไหลวน เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวดนั้น โดยทิศทางสนามแม่เหล็กจะแปรเปลี่ยนไปตามแต่ละรอบของไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายไป ซึ่งเรียกว่าเป็นการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก กระแสไหลวนนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กให้แก่ตัวมันเองได้ ซึ่งมีทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้น ดังนั้นผลลัพธ์ของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป เมื่อทำการเปลี่ยนขดลวดที่เป็นตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดกระแสไหลวน

ในการทดสอบ กล่าวได้ว่าหัววัดเป็นตัวเชื่อมระหว่างอุปกรณ์การวัด วัสดุทดสอบ และระบบ มี 2 ส่วนหลัก คือ 1. การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนด้วยวัสดุทดสอบ 2. การป้อนผลตอบสนองจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังระบบประมวลผลสัญญาณ หัววัดชนิดต่างๆ ที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีให้เลือกหลายชนิดเหมาะสำหรับการตรวจสอบชิ้นงานที่แตกต่างกัน วิธีการตรวจสอบด้วยกระแสไหลวนมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เพื่อระบุหรือจำแนกความแตกต่างระหว่างความหลากหลายทางกายภาพ โครงสร้าง และการแยกโลหะในวัสดุตัวนำ กระแสไหลวนได้ถูกนำมาใช้

- สำหรับการวัดหรือระบุลักษณะต่างๆ เช่น คุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้า ความซึมซาบแม่เหล็ก ขนาดเกรน และขนาดทางกายภาพต่างๆ
- สำหรับตรวจสอบรอยแยก รอยแตก ร้าว ช่องว่าง และรอยความไม่ต่อเนื่องอื่นๆ ที่เกิดบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก
- เพื่อแยกชนิดของวัสดุโลหะ ตรวจสอบความแตกต่างของคุณสมบัติ และโครงสร้างขนาดเล็ก
- เพื่อวัดความหนาของฉนวนที่เคลือบอยู่บนวัสดุตัวนำ

ข้อจำกัดในการใช้งานของวิธีนี้ คือ การตรวจสอบถูกจำกัดในพื้นที่ผิววัตถุหรือบริเวณที่ใกล้พื้นผิว รวมถึงวิธีการนี้มีความยากในการใช้งานกับวัสดุที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติก ความรู้เฉพาะทางของผู้ทำการทดสอบจึงจำเป็นมากสำหรับการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบ เช่น การออกแบบหัววัดเฉพาะทาง และการตีความข้อมูลจากการตรวจสอบได้

จากวิธีการทดสอบที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.2.1 - 2.2.6 แสดงให้เห็นว่าแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบที่ต่างกันขึ้นอยู่กับงานที่ต้องการตรวจสอบ สภาพแวดล้อม ผู้ทำการทดสอบ การทำความสะอาด และอันตรายที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อทั้งผู้ทดสอบ และชิ้นงานทดสอบ ในงานวิจัยนี้จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการตรวจสอบด้วยวิธี Eddy current เนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาในข้างต้น สอดคล้องกับการนำ Hall Effect sensor มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบผลการตอบสนองของวัสดุตัวนำในงานวิจัยนี้ได้

2.3 ทฤษฎีกระแสไหลวน

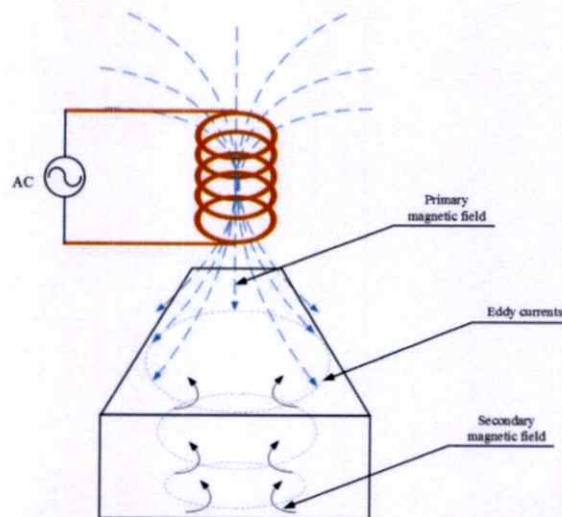
2.3.1 การกำเนิดกระแสไหลวน (Eddy current)

กระแสไหลวนเกิดจากการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุตัวนำไฟฟ้า โดยหลักการทางฟิสิกส์ที่ใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับการเกิดกระแสไหลวน คือ กฎของฟาราเดย์ กล่าวไว้ว่า หากสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดนั้น โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และเครื่องหมายลบในสมการดังกล่าว เป็นไปตามกฎของเลนซ์ ซึ่งใช้อธิบายเกี่ยวกับทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไหลวนบนวัสดุตัวนำ โดยทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทิศที่ทำให้เกิดการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก [16]

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

- เมื่อ ε คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (V)
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด (Turns)
 ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก (Weber)

เมื่อทำการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดทองแดง จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นบริเวณรอบๆขดลวดนั้น เรียกว่า สนามแม่เหล็กปฐมภูมิ (Primary magnetic field) ทิศทางของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงตามวงรอบของไฟฟ้ากระแสสลับ หากนำวัสดุตัวนำไฟฟ้า เข้ามาอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กนี้ สนามแม่เหล็กปฐมภูมิที่เกิดรอบๆขดลวดจะสร้างกระแสไหลวนขึ้นบนวัสดุตัวนำไฟฟ้า ซึ่งกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นนี้ก็จะสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กปฐมภูมิตามกฎของเลนซ์ เรียกว่า สนามแม่เหล็กทุติยภูมิ (Secondary magnetic field) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเหนี่ยวนำให้เกิด Eddy current ในวัสดุตัวนำ

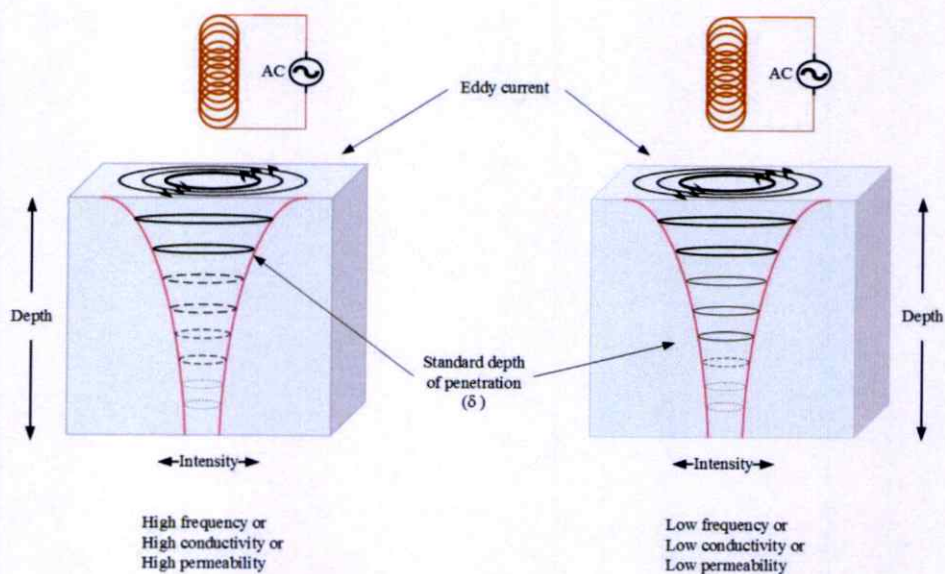
2.3.2 ความลึกในการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน

เป็นปรากฏการณ์ที่เป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์กันระหว่าง Eddy current และขึ้นอยู่กับความถี่ ความนำไฟฟ้า และความซึมซาบ ปรากฏการณ์นี้สนใจ Eddy current บริเวณพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งอยู่ใกล้กับขดลวดที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ความหนาแน่นของ Eddy current จะลดลงตามความลึกใต้พื้นผิวของวัสดุตัวนำ ซึ่งความลึกในการเหนี่ยวนำของ Eddy current สำหรับทุกความหนาของวัสดุตัวนำใด จะขึ้นอยู่กับความนำไฟฟ้า ความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ บนความถี่ที่เลือกใช้งาน โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.2)$$

- เมื่อ δ คือ ความลึกของ Eddy current (m)
 f คือ ความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ (Hz)
 μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ (H/m)
 σ คือ ค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุ (mhos/m)

โดยความลึกของ Eddy current ที่ลดลง เป็นสัดส่วนผกผันกับความนำไฟฟ้า ความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุตัวนำ และความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับ ความนำไฟฟ้า และความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาใช้จะมีค่าคงที่ ซึ่งสิ่งที่สามารถปรับเปลี่ยนได้คือ ความถี่ ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการให้มีความลึกของ Eddy current สูง แต่วัสดุที่นำมาทดสอบมีความนำไฟฟ้าสูง หรือความซึมซาบแม่เหล็กสูง ความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำจะต้องเป็นความถี่ต่ำ ในขณะเดียวกัน เมื่อใช้ความถี่สูงในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ควรใช้เมื่อวัสดุมีความหนาไม่มาก หรือใช้สำหรับการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวของวัสดุ



รูปที่ 2.3 แสดงความลึกในการเหนี่ยวนำของ Eddy current

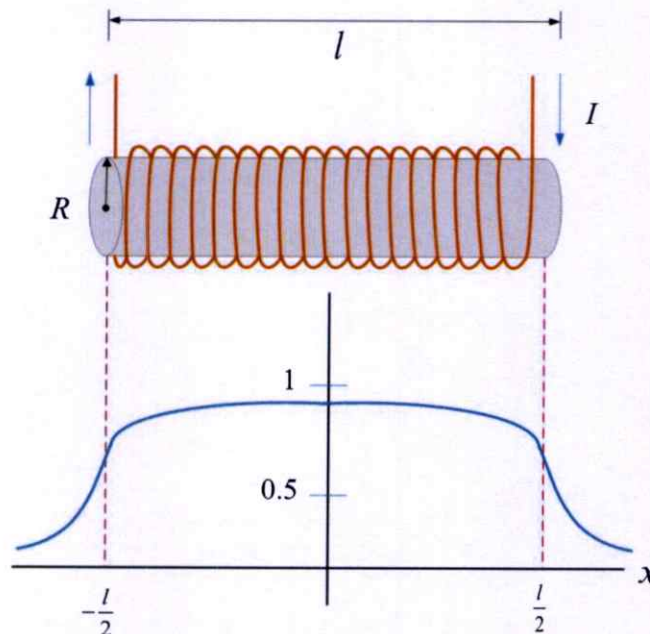
จากสมการ 2.2 จะสังเกตได้ว่าตัวแปรที่มีส่วนสำคัญในการหาความลึกของ Eddy current บนพื้นผิววัสดุโลหะ นอกเหนือจากความถี่ที่เลือกใช้แล้ว คือ ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ ดังนั้น ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความซึมซาบทางแม่เหล็ก และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 2.1 ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก และค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ [17]

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	ค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก (H/m)	ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (S/m)
เหล็กแผ่น เบอร์ SS400	6.3×10^{-3}	1.00×10^7
อะลูมิเนียม เบอร์ 5052	1.26×10^{-6}	3.77×10^7
สแตนเลส เบอร์ 410	1.19×10^{-3}	1.44×10^6

2.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [16]

การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสร้างได้โดยการพันขดลวดรอบแกน และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านวัตถุตัวนำนี้ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบวัตถุตัวนำขึ้น โดยเรียวัตถุตัวนำนี้ว่า ขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหัววัด เพื่อใช้ในการตรวจสอบวัสดุ โดยสามารถเพิ่มขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ โดยการเพิ่มขนาดของแกน รอบการพันของขดลวดรอบแกน ขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรที่กล่าวมานี้ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก และการเลือกชนิดวัสดุของแกนที่นำมาใช้ ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กที่ต่างกัน ส่งผลให้ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต่างกันด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.4 แสดงสนามแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์

จากรูปที่ 2.4 แสดงสนามแม่เหล็กของโซลินอยด์ โดยที่บริเวณจุดกึ่งกลางของแกน จะมีปริมาณสนามแม่เหล็กสูงที่สุด และสนามแม่เหล็กจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของจุดกึ่งกลางที่บริเวณปลายสุดของแกน โดยสนามแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์ที่แผ่ออกมาอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งแกน สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.3

$$B = \frac{\mu NI}{2l} \left[\frac{x + \frac{l}{2}}{\sqrt{(x + \frac{l}{2})^2 + R^2}} + \frac{x - \frac{l}{2}}{\sqrt{(x - \frac{l}{2})^2 + R^2}} \right] \quad (2.3)$$

- เมื่อ B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (T)
 μ คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของแกนขดลวดเหนี่ยวนำ (H/m)
 N คือ จำนวนรอบของการพันขดลวด (Turns)
 I คือ กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ (A)
 l คือ ความยาวของขดลวดเหนี่ยวนำ (m)
 R คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำ (m)
 x คือ ตำแหน่งของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (m)

ในขณะที่สมการที่ 2.4 และ 2.5 แสดงสนามแม่เหล็กที่แผ่ออกมาบริเวณจุดกึ่งกลางของแกนขดลวดโซลินอยด์ และที่บริเวณปลายของแกน ตามลำดับ

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 n I \quad \text{โดย} \quad n = \frac{N}{l} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I \quad (2.5)$$

การเลือกใช้วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ จำเป็นต้องศึกษาจากค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ คือ ความสามารถในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของวัสดุ เปรียบเสมือนกับค่าความนำไฟฟ้าในเรื่องของกระแสไฟฟ้า และแสดงออกมาในสัดส่วนของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก B หรือเรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่สร้างสนามแม่เหล็กในตัวของวัสดุ H และ μ คือ ค่าการตอบสนองของแม่เหล็กต่อวัสดุชนิดต่างๆ หรือ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมสนามแม่เหล็กของวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.6)$$

โดยค่าความซึมซาบแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับค่าของสนามแม่เหล็ก และความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ สำหรับค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.7)$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

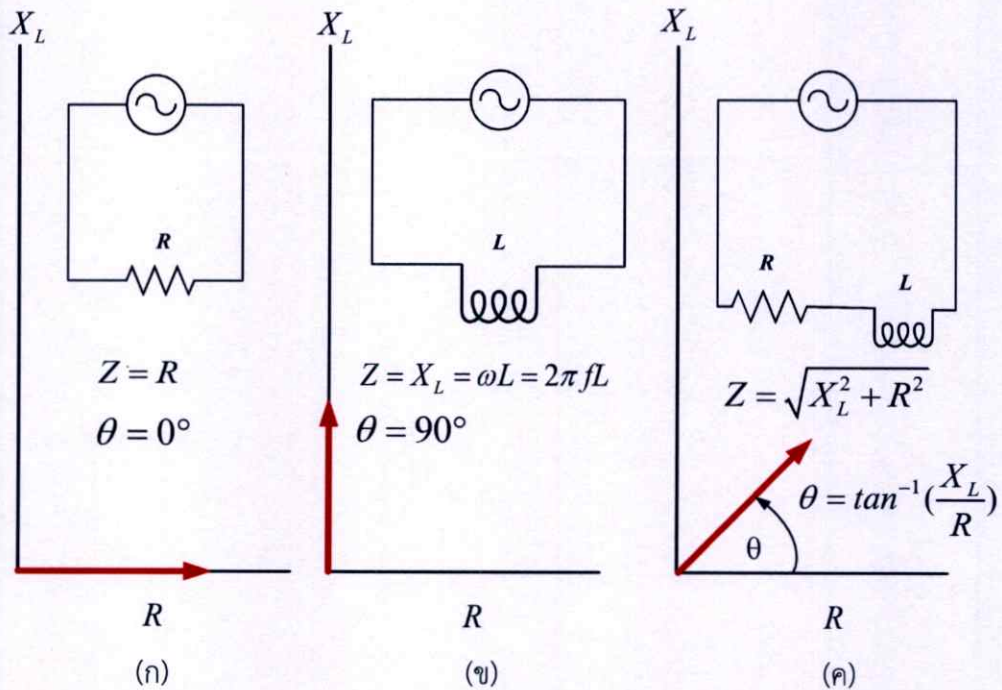
μ_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กของวัสดุชนิดต่างๆ [1]

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมซาบได้ทางแม่เหล็ก
วัสดุโลหะผสมนิกเกิล 600	1.05
เหล็กกล้าไร้สนิม หรือสแตนเลส เบอร์ 304	1
ไทเทเนียม	1
ทองเหลือง / บรอนซ์	1
อะลูมิเนียม	1
เหล็กผสม โมลิบดีนัม	30
เหล็กคาร์บอน	200
เหล็กกล้าไร้สนิม หรือสแตนเลส เบอร์ 410	360
เหล็กแผ่น	2000
เหล็กกล้าผสมสูง	9000
เฟอร์ไรท์	10000

หากวัสดุใดมีค่าสัมประสิทธิ์ซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุมากกว่า 1 วัสดุนี้จะถูกเรียกว่า เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้วัสดุที่เป็นเฟอร์โรแมกเนติกสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดโซลินอยด์ จากตารางที่ 2.2 ทำให้ทราบว่าเฟอร์ไรท์มีค่าซึมซาบแม่เหล็กที่สูง เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นแกนเหนียวนำทำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในปริมาณที่สูงด้วยเช่นกัน

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้ขดลวดที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จึงจะกล่าวถึงวงจรไฟฟ้ากระแสสลับพอสังเขป โดยทั่วไปวงจรไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน (R) ตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) แต่จะกล่าวถึงเพียง ตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น



รูปที่ 2.5 วงจรไฟฟ้ากระแสสลับและอิมพีแดนซ์

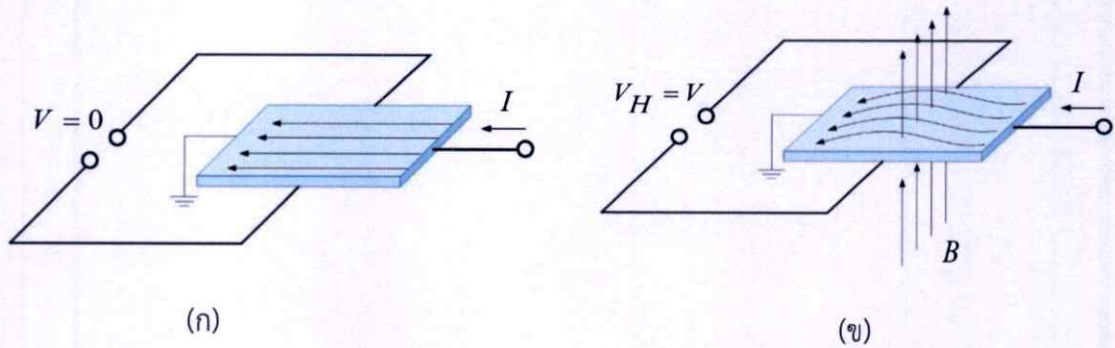
- (ก) เมื่อผ่านตัวต้านทานเพียงตัวเดียว
- (ข) เมื่อผ่านตัวเหนี่ยวนำเพียงตัวเดียว
- (ค) เมื่อผ่านทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน

จากรูปที่ 2.5 (ก) เมื่อมีตัวต้านทานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเพียงตัวเดียว จะมีคุณสมบัติคือ จำกั้ดกระแสที่ไหลเหมือนในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง โดยอิมพีแดนซ์ (Z) จะเท่ากับตัวต้านทาน คือ $Z = R$ เฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจะมีเฟสที่ตรงกัน ในรูปที่ 2.5 (ข) แสดงตัวเหนี่ยวนำในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเพียงตัวเดียว เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับตัวเหนี่ยวนำ จะเกิดอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำขึ้น เรียกว่า Inductive reactance (X_L) ตัวเหนี่ยวนำนี้จะมีการต้านกระแสไฟฟ้าเช่นเดียวกับตัวต้านทาน และอิมพีแดนซ์ของวงจรนี้ คือ $Z = X_L = \omega L = 2\pi fL$ โดยเฟสเซอร์ไดอะแกรมของกระแสไฟฟ้าจะล้าหลังแรงดันไฟฟ้าอยู่ 90° และในรูปที่ 2.5 (ค) แสดงวงจรไฟฟ้ากระแสสลับที่มีตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำอยู่ในวงจรเดียวกัน

2.5 ทฤษฎีของ Hall Effect sensor [16, 18]

2.5.1 ปรากฏการณ์ของ Hall

สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.6 โดยเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแผ่นโลหะตัวนำ หรือ Hall Element ในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในแผ่นโลหะ เมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่แผ่นโลหะนั้น แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่แผ่นโลหะตัวนำ ที่มีสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแผ่นโลหะ เมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมแผ่นโลหะตัวนำ เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ Hall Effect



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ Hall

โดยแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่เกิดบนแผ่นโลหะตัวนำนี้ เรียกว่า Hall voltage (V_H) เกิดขึ้นเมื่อมีประจุอิเล็กตรอน (e) เคลื่อนที่ในแผ่นโลหะตัวนำเมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้า (I) ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศตั้งฉากกับแผ่นโลหะตัวนำ (B_{\perp}) ที่มีความหนา (d) และมีความหนาแน่นของประจุที่เคลื่อนที่ (n) ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9 โดย R_H เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของ Hall Effect sensor ซึ่งขนาดของ Hall voltage จะแปรผันโดยตรงกับขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จากปรากฏการณ์ Hall Effect นี้ จึงได้มีผู้นำมาสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก และพัฒนามาเป็น Hall Effect sensor ที่นำมาประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน

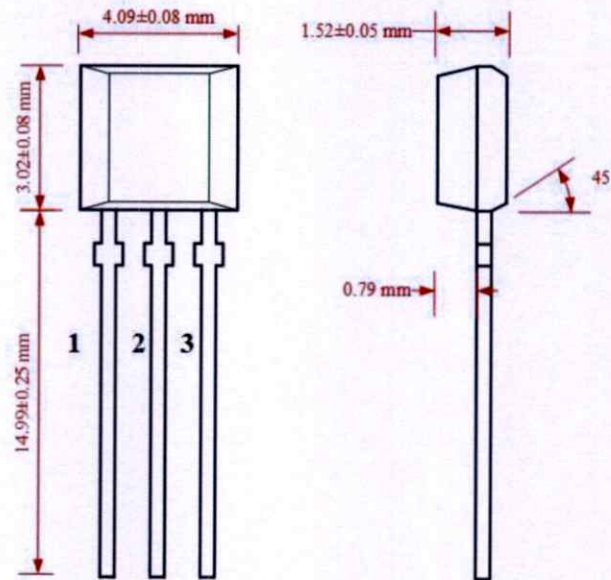
$$V_H = \frac{IB_{\perp}}{ned} \quad (2.8)$$

$$V_H = \frac{R_H IB_{\perp}}{d} \quad (2.9)$$

2.5.2 Hall Effect sensor

อุปกรณ์ตรวจรู้ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Hall Effect sensor A1301 [19] เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ที่มีความสัมพันธ์กับค่าของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถประยุกต์ใช้งานการตรวจวัดได้หลากหลาย เช่น การตรวจสอบตำแหน่ง ระยะทาง ความเร็ว หรืองานการตรวจสอบกับวัสดุโลหะต่างๆ Hall Effect sensor เป็นที่นิยม และใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจาก ต้นทุนต่ำ มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ฝุ่น น้ำ และการสั่นสะเทือน

Hall Effect sensor ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสม เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป จากรูปที่ 2.7 แสดงขนาด และส่วนประกอบของ Hall Effect sensor โดยมีทั้งหมด 3 ขา ขาที่ 1 คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายให้ ซึ่งควรวัดในช่วง 4.5-6.0 V ขาที่ 2 คือ ขากราวด์ และขาที่ 3 คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต หรือ Hall voltage โดยในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กอยู่บริเวณรอบๆ Hall Effect sensor จะมีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตคงที่ที่ 50% ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป หรือเรียกแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตนี้ว่า Offset voltage ซึ่ง Hall Effect sensor A1301 ที่นำมาใช้มีความไวในการตอบสนองต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก คือ 2.5 mV/G



รูปที่ 2.7 แสดงขนาด และส่วนประกอบของ Hall Effect sensor

ซึ่งทิศของสนามแม่เหล็กมีผลกับ Hall voltage โดยหากนำขั้วได้ ($-B$) เข้าใกล้ด้านหน้าของ Hall Effect sensor ค่าของ Hall voltage จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ เมื่อนำขั้วเหนือ ($+B$) เข้าใกล้ Hall voltage จะมีค่าลดลงเป็นสัดส่วนกัน เนื่องจาก Hall voltage ที่เปลี่ยนแปลงไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็ก และทิศของสนามแม่เหล็ก โดยสัดส่วนนี้สามารถระบุเป็นค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$Sens = \frac{V_{H(-B)} - V_{H(+B)}}{2B} \quad (2.10)$$

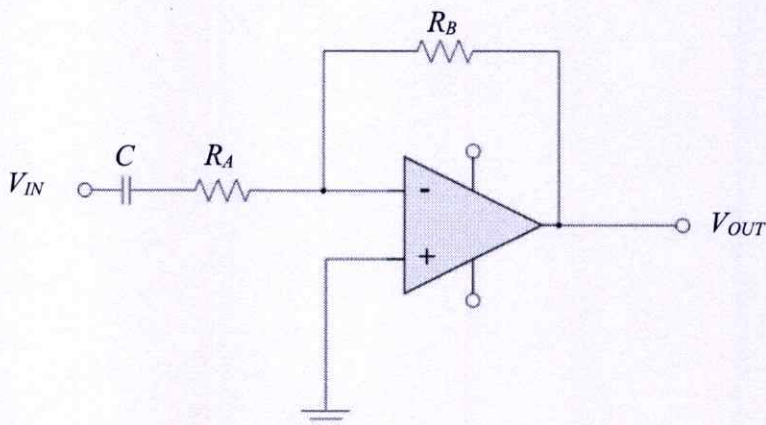
เมื่อ	$Sens$	คือ ค่าความไวในการตอบสนองของสนามแม่เหล็ก (mV/T)
	$V_{H(-B)}, V_{H(+B)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor ขั้วได้ ($-B$) และขั้วเหนือ ($+B$) ตามลำดับ (V)
	B	คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (T)

2.6 วงจรการขยายสัญญาณ [20]

การขยายสัญญาณจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ หรือวงจรรีเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเพิ่มขนาดหรือกำลังของสัญญาณ ตัวขยายสัญญาณจะรับสัญญาณจากทรานซิสเตอร์หรือจากแหล่งกำเนิดสัญญาณต่างๆ และให้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณเดิม ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นสัญญาณอินพุตที่มีขนาดเล็ก และต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์อื่นๆ

2.6.1 วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสสำหรับกรองความถี่สูง

ในงานวิจัยนี้มีการใช้วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟสเพื่อกรองความถี่สูง โดยวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟส เป็นการขยายสัญญาณอินพุตให้ได้สัญญาณเอาต์พุตกลับเฟสที่ 180° และมีการกรองความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดให้ผ่านไปได้ และตัดความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการทิ้งไป ทำได้โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแบบกลับเฟส สำหรับกรองความถี่สูง

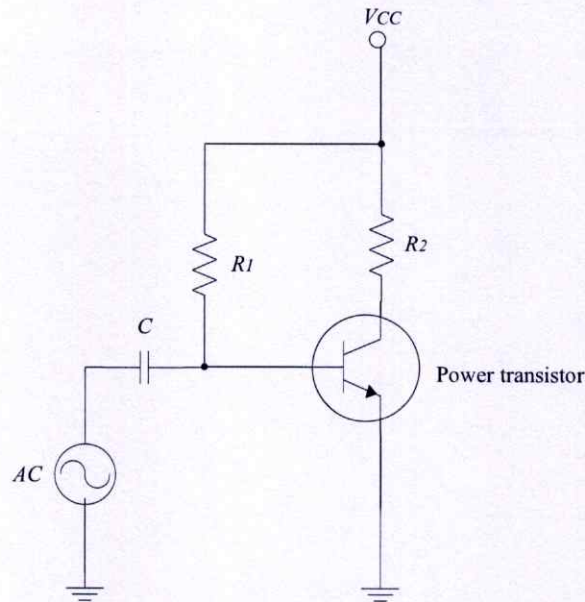
โดยสามารถกล่าวได้ว่า ความถี่ที่กำหนด คือ ความถี่ตัดผ่าน (Cut off frequency) สามารถคำนวณความถี่ตัดผ่านได้จากสมการที่ 2.11

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_A C} \quad \text{โดย } \omega_c = \frac{1}{R_A C} \quad (2.11)$$

- เมื่อ f_c คือ ความถี่ตัดผ่านเชิงเส้น (Hz)
 ω_c คือ ความถี่ตัดเชิงมุม (rad/s)
 R_A คือ ตัวต้านทาน (Ω)
 C คือ ตัวเก็บประจุ (F)

2.6.2 วงจรขยายชนิดคลาสเอ (Class A amplifier circuit)

ในการขยายสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็นคลาสต่างๆ ตามการใช้งาน และประสิทธิภาพ ได้แก่ 1. วงจรขยายคลาสเอ (Class A amplifier circuit) 2. วงจรขยายคลาสบี (Class B amplifier circuit) 3. วงจรขยายคลาสเอบี (Class AB amplifier circuit) 4. วงจรขยายคลาสซี (Class C amplifier circuit) และ 5. วงจรขยายคลาสดี (Class D amplifier circuit) ซึ่งจะกล่าวถึงวงจรการขยายสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพียงวงจรเดียว คือ Class-A amplifier circuit



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรขยายสัญญาณ Class-A amplifier อย่างง่าย

จากรูปที่ 2.9 แสดง Class-A amplifier circuit อย่างง่าย ประกอบไปด้วย ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และทรานซิสเตอร์ โดยสามารถปรับปรุงได้ตามความเหมาะสมของการใช้งาน วงจรขยายคลาสนี้มีอัตราขยายที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพการขยายประมาณ 25-50% ข้อดีของคลาสนี้ คือ สัญญาณที่ได้ไม่มีความผิดเพี้ยน โดยจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการป้อนสัญญาณอินพุตที่สูงจนเกินไป เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตไม่เกิดความผิดเพี้ยนขึ้น แต่ข้อเสียของคลาสนี้คือการเกิดความร้อนสูง เนื่องจากมีกระแสไหลในวงจรตลอดเวลา แม้จะไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนเข้าไปก็ตาม

2.7 โลหะตัวนำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [17]

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เหล็ก สเตนเลส หรือเหล็กกล้าไร้สนิมและอะลูมิเนียม ซึ่งวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ได้ถูกเลือกนำมาทดสอบ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้งานมากในงานอุตสาหกรรม และในการรีไซเคิลโลหะ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดพอสังเขป

2.7.1 อะลูมิเนียม (Aluminum)

มีบทบาทสำคัญทางด้านอุตสาหกรรม มีคุณสมบัติที่น่าสนใจ คือ ไม่เป็นสารพิษ ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ ไม่เป็นแม่เหล็ก ไม่เป็นเงา มีความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้มีน้ำหนักเบา สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย สามารถดัด กิ่ง และหล่อแบบได้ง่าย ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ราคาถูก แต่ความแข็งแรงต่ำ อาจเกิดการหักงอได้ง่าย จึงมีการเติมสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม เพื่อความแข็งแรง เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ อะลูมิเนียม เบอร์ A5052 ตามมาตรฐาน JIS

2.7.2 เหล็ก (Steel)

เป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย พบมากได้ในธรรมชาติ การนำมาใช้งานจะต้องนำมาถลุงแร่เหล็กก่อนที่จะนำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่นต่อไป เหล็กเป็นโลหะสีขาวหรือสีเทา มีความงาม มีคุณสมบัติแม่เหล็กดูดติด ซึ่งเหล็กมีความต้านทานแรงดึงสูง ทนทาน อีกทั้งยังนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีอีกด้วย สามารถหล่อแล้วนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาแปรรูปได้หลากหลาย เพื่อนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน หรือในโรงงานอุตสาหกรรมได้ รวมถึงเหล็กดิบสามารถปรับปรุงคุณภาพได้โดยการเติมธาตุต่างๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว ให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น เหล็กกล้า เหล็กหล่อ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เหล็กแผ่น เกรด SS400 ตามมาตรฐานของ JIS G3101-1995

2.7.3 เหล็กกล้าไร้สนิม หรือสแตนเลส (Stainless steel)

ในทางวิศวกรรมเหล็กกล้าไร้สนิมนิยมนำมาใช้งาน โดยมีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อน เนื่องจากมีปริมาณโครเมียมผสมอยู่อย่างน้อย 12% จึงจะสามารถป้องกันการเกิดสนิมและป้องกันการกัดกร่อนได้ ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ Martensitic, Ferritic, Precipitation- hardening และ Austenitic ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียงชนิด Martensitic เท่านั้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ เหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด Martensitic AISI 410 ซึ่งผลิตตามมาตรฐาน ASTM Standard ของ Stainless Steel เทียบเท่ากับเหล็กกล้าไร้สนิม 1CR13, S41000 (US AISI, ASTM)

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด Martensitic เป็นเหล็กกล้าผสมที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ในระดับปานกลางจนถึงระดับสูง และมีธาตุอื่นๆผสมอยู่ คือ นิกเกิล โมลิบดีนัม โครเมียม และแมงกานีส ซึ่งธาตุที่นำมาผสมเหล่านี้ภายหลังจากการชุบแข็งแล้ว เหล็กจะมีคุณสมบัติเป็น Martensite ได้ง่าย และการชุบแข็งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ได้ การนำไปใช้งานควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดงานนั้นๆ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีความต้านทานต่อการเกิดสนิมและความแข็งแรงในระดับที่ปานกลาง โดยมีความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด Austenitic และ Ferritic แต่จะมีมีความแข็งแรงและทนทานมากกว่า และมีคุณสมบัติแม่เหล็กดูดติดพบในการใช้งานด้านวิศวกรรมทั่วไป เช่น สลักเกลียว หัวฉีดย หัวฟัน ชิ้นส่วนต่างๆของวาล์ว ลูกปืน เพลลา อุปกรณ์เครื่องจักรสำหรับการผลิตเครื่องตัด เครื่องมือแพทย์ และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

2.8 การแปลงฟูเรียร์ [21-24]

การแปลงฟูเรียร์ เป็นการแปลงสัญญาณที่เดิมอยู่ในรูปของโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปของสัญญาณความถี่หรือโดเมนความถี่ ซึ่งโดเมนความถี่นิยมใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์สัญญาณได้ง่ายกว่าโดเมนเวลา โดเมนความถี่ โดยทั่วไปเรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) การวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมใช้อุปกรณ์ฟูเรียร์ และการแปลงฟูเรียร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์สัญญาณทางวิศวกรรม

2.8.1 การแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปโดเมนเวลา

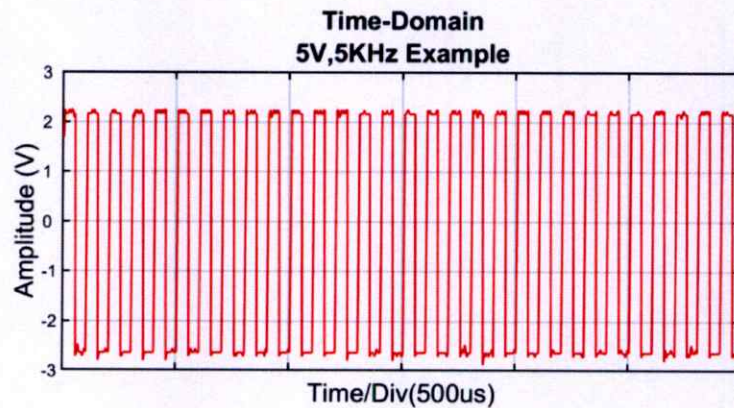
การวิเคราะห์สัญญาณในรูปของโดเมนความถี่ เริ่มจากการแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor เมื่อทำการทดสอบกับวัสดุให้อยู่ในรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (โดเมนเวลา) ในงานวิจัย

นี้ได้เลือกใช้ Voltage to frequency converter คือ AD654 [25] สามารถแสดงความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยมได้จากสมการที่ 2.12

$$f_{out} = \frac{V_H}{10(V) \times (R_1 + R_2) \times C_T} \quad (2.12)$$

- เมื่อ f_{out} คือ ความถี่เอาต์พุต (Hz)
 V_H คือ Hall voltage (V)
 R_1, R_2 คือ ตัวต้านทานในวงจร (Ω)
 C_T คือ ตัวเก็บประจุ (F)

จากรูปที่ 2.10 แสดงโดเมนเวลาของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor ขนาด 5 V ความถี่ 5 kHz ที่ Time division 500 μ s ด้วย แอมพลิจูด 5 Vp-p



รูปที่ 2.10 แสดงโดเมนเวลารูปคลื่นสี่เหลี่ยม

2.8.2 การแปลงสัญญาณในรูปโดเมนเวลาให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่

ในทางปฏิบัติ สัญญาณจากการวัด จะไม่สามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันปิด และมีรูปร่างเป็นจุด ซึ่งสัญญาณนี้จะเป็นลำดับของตัวเลข โดยแทน $x(n)$ และ $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ เรียกว่า สัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete signal) สามารถใช้ DFT (Discrete Fourier transform) สำหรับประมาณสเปกตรัมความถี่สัญญาณที่ได้จากการวัดในรูปของลำดับของตัวเลข แต่เนื่องจากการคำนวณด้วย DFT จะใช้เวลานานในการคำนวณ จึงใช้ FFT (Fast Fourier transform) ในการแก้ไขปัญหาอนุกรมฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง หรือ The discrete Fourier series (DFT) แสดงในสมการที่ 2.13

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.13)$$

- เมื่อ $x(n)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง
 N คือ คาบเวลา

$$\text{โดย } x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.14)$$

มีความถี่มูลฐาน คือ $\omega_0 = \frac{2\pi}{N}$ เรเดียน และความถี่ฮาร์โมนิก คือ $\frac{2\pi}{N}k$, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ แต่เนื่องจากการคำนวณด้วย DFT ใช้เวลานานในการคำนวณ จึงใช้ FFT (Fast Fourier transform) ในการแก้ไขปัญหานี้

ให้ $x(n)$ เป็นลำดับเลขเชิงซ้อน หรือลำดับเลขจำนวนจริง จำนวน $N=2^k$ จุด โดย $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ แล้วให้ $X(k)$ คือ DFT ของ k ที่จุด โดย $k=0, 1, 2, \dots, N-1$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad (2.15)$$

เมื่อ $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ คือรากที่ N ของ 1 ตัวหลัก (a primitive N^{th} -root of unity) ทำการแบ่งอินพุต $x(n)$ ออกเป็นสองส่วน นั่นคือ ตัวชี้กำลังเป็นเลขคู่ และอีกตัวที่มีเลขชี้กำลังเป็นคี่ จะได้ $X(k)$ ใหม่ เป็น

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_N^{2kn} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) W_N^{(2n+1)k} \quad (2.16)$$

$$= \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) (W_N^2)^{kn} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) (W_N^k) (W_N^2)^{kn} \quad (2.17)$$

เนื่องจาก $W_N^2 = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}} = W_{N/2}$ จะได้

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) W_{N/2}^{kn} \quad (2.18)$$

เป็นการคำนวณ $(N/2)$ - point DFT โดย W_N^k ซึ่งเป็นเลขเชิงซ้อน เรียกว่า Twiddle factor ในขั้นตอนนี้เป็น การแบ่งตัวชี้ n ออกเป็นสองส่วน ในขณะที่ตัวชี้ k สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนได้เช่นเดียวกัน โดยใน ส่วนแรก คือ $k=0, 1, 2, \dots, N/2-1$ ซึ่งใช้สมการที่ 2.18 ในการคำนวณ และส่วนที่สองคือ $k=N/2, \dots, N-1$ ซึ่งเท่ากับตัวชี้ ส่วนนี้จะเป็น $k+N/2$ เมื่อ k เป็นตัวชี้ในส่วนแรก

จาก $X(k+N/2)$ โดยแทน k ด้วย $k+N/2$ ในสมการที่ 2.18 จะได้

$$X(k+N/2) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_{N/2}^{(k+N/2)n} + W_N^{k+N/2} \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) W_{N/2}^{(k+N/2)n} \quad (2.19)$$

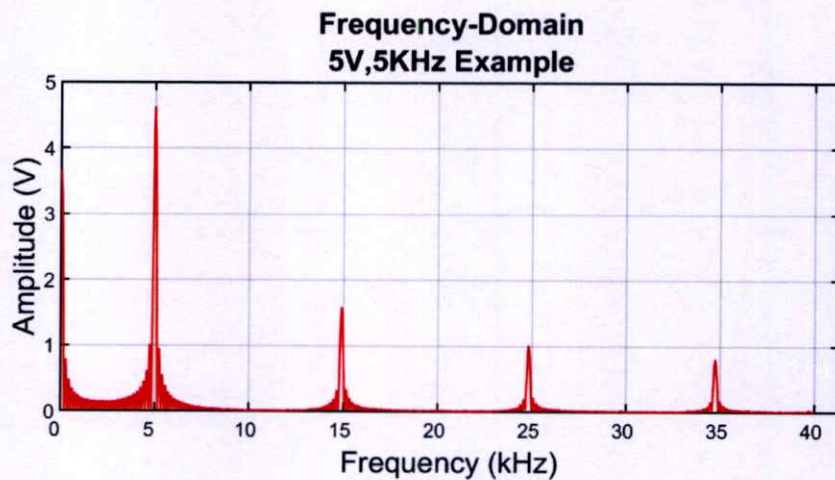
$$= \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)(W_{N/2}^{kn})(W_{N/2}^{N/2})^n + W_N^k W_N^{N/2} \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)(W_{N/2}^{kn})(W_{N/2}^{N/2})^n \quad (2.20)$$

เนื่องจาก $W_{N/2}^{N/2} = e^{-j2\pi} = 1$ และ $W_N^{N/2} = e^{-j2\pi(N/2)N} = e^{-j\pi} = -1$ จะได้

$$X(k + N/2) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n)(W_{N/2}^{kn}) - W_N^k \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1)(W_{N/2}^{kn}) \quad (2.21)$$

และสามารถนำสมการที่ 2.18 และ 2.21 ไปคำนวณด้วย FFT ซึ่งการคำนวณ FFT ขนาด N จุด คือ การคำนวณ N - point DFT ด้วย FFT นั้นเอง

จากรูปที่ 2.11 แสดงโดเมนความถี่ที่ 5 kHz เมื่อทำการแปลงจากรูปแบบโดเมนเวลาเป็น รูปแบบโดเมนความถี่ โดยใช้การแปลงฟูเรียร์จากโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 2.11 แสดงรูปโดเมนความถี่

2.9 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ทั้งเรื่องการใช้ Hall Effect sensor ในการใช้เพื่อตรวจวัดวัสดุ ความลึก ความหนา รูปร่างของรอยแตกร้าวบนวัสดุ การแสดงผลออกมาในรูปแบบของโดเมนความถี่ รวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เช่น การทดสอบ โดยไม่ทำลาย กระแสไหลวน Hall Effect sensor สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ วงจรการขยาย สัญญาณที่เลือกมาใช้ การแปลงโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ด้วยการใช้ FFT ในโปรแกรม MATLAB เป็นต้น

บทที่ 3

การออกแบบระบบ และการดำเนินงาน

การวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพของ Hall Effect sensor โดยพิจารณาการตอบสนองของวัสดุโลหะเป็นกรณีศึกษาจากระบบการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน 2 วิธี ด้วยการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าและโดเมนความถี่ ส่งผลให้ในบทนี้กล่าวถึง การออกแบบระบบการทดสอบ การกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งแบ่งระบบการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็น 2 วิธี คือ การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (Pure DC) และการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับวงจรขยายสัญญาณ (Combined DC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ Hall Effect sensor ในการทดสอบกับวัสดุโลหะเป็นกรณีศึกษา การแนะนำอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมไปถึงนำเสนอการดำเนินงานวิจัยในด้านต่างๆ ทั้งด้านการทดสอบ การประมวลผล และการแสดงผล ซึ่งได้มีจัดการทำไดอะแกรมเพื่ออธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบการทดสอบและแสดงผลโดยรวม

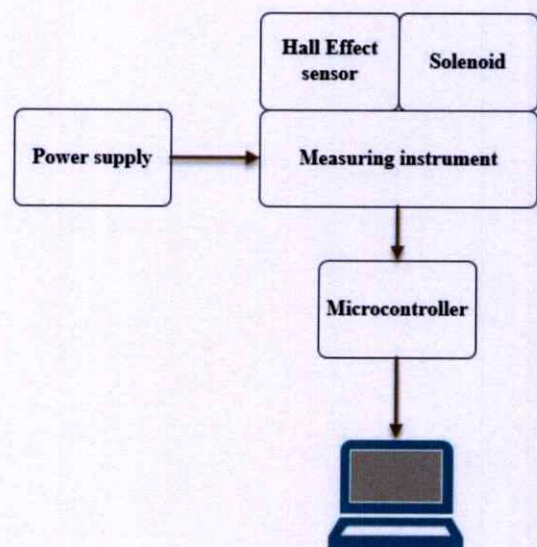
3.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรแปลงค่าต่างๆ

3.1.1 วงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

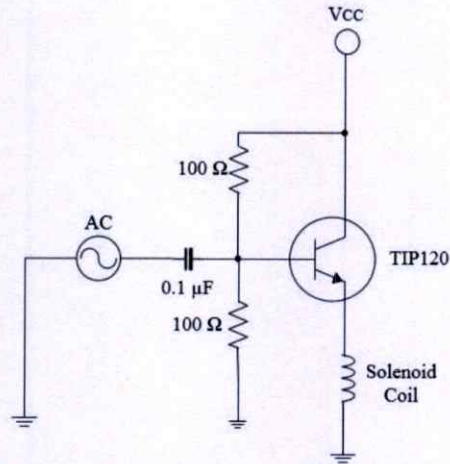
จากทฤษฎีที่กล่าวมาในบทที่ 2 การสร้างระบบกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC และ การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC โดยมีการทำงานร่วมกับวงจรขยายสัญญาณคลาสเอ (Class-A amplifier circuit)



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น MCH-K305D



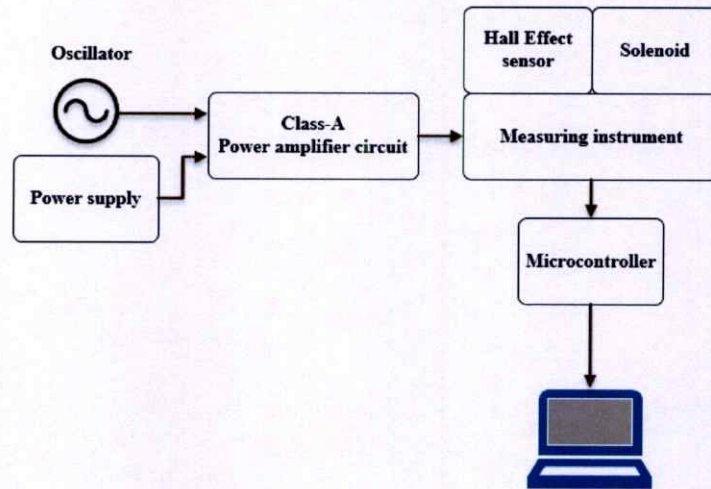
รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมระบบการทำงานของ Pure DC



รูปที่ 3.3 แสดงวงจรขยายสัญญาณ Class-A amplifier



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องกำเนิดสัญญาณ รุ่น HP-33120A

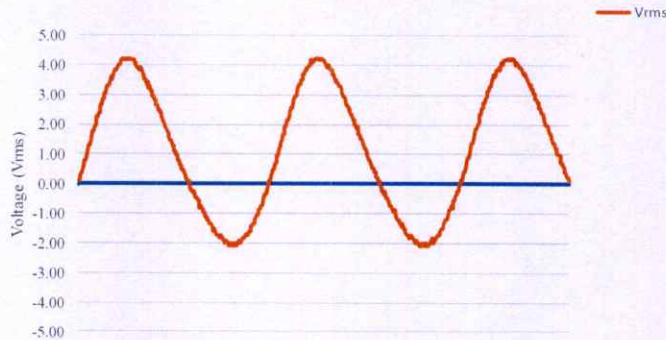


รูปที่ 3.5 แสดงไดอะแกรมระบบการทำงานของ Combined DC

ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC ได้เลือกใช้เครื่อง DC-Power supply รุ่น MCH-K305D ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และจากรูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมระบบการทำงานเมื่อใช้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำที่มีการติดตั้ง Hall Effect sensor เพื่อทำการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้เข้าสู่ส่วนของ Microcontroller และจัดเก็บในคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 3.3 แสดงวงจรกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC ซึ่งมีการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (Vcc) และไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับวงจรขยายสัญญาณ Class-A เครื่องกำเนิดสัญญาณ รุ่น HP-33120A ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ได้ถูกนำมาใช้เพื่อให้กำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์แก่วงจรขยายสัญญาณ Class-A สำหรับขยายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ความถี่ 260 Hz แอมพลิจูด 6 Vp-p สำหรับการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC โดยไดอะแกรมระบบการทำงานของ Combined DC

แสดงได้ดังในรูปที่ 3.5 ซึ่งมีระบบการทำงานคล้ายกับระบบของ Pure DC แต่มีความแตกต่างกันในส่วนองวิธีการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำเท่านั้น



รูปที่ 3.6 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจาก Class-A amplifier

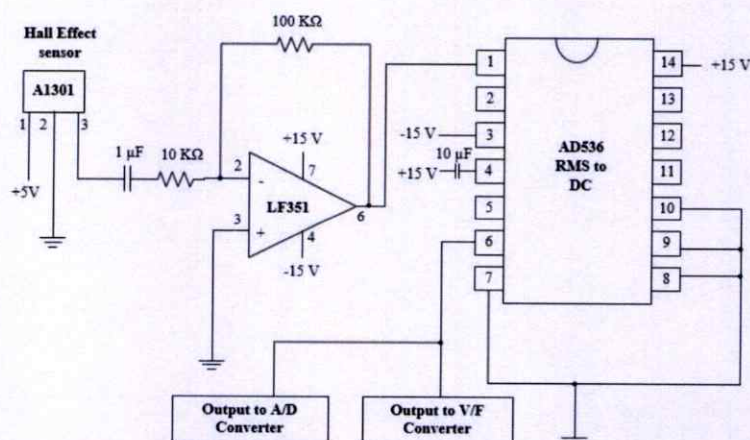
เนื่องจากการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC มีการใช้วงจรขยายแรงดันไฟฟ้า Class A ซึ่งวงจรขยายแรงดันไฟฟ้านี้มีการใช้ความถี่ร่วมกับไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่แสดงออกมาจึงมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีการ Shift ขึ้นไปทางด้านบวกเล็กน้อย ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.6

3.1.2 วงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

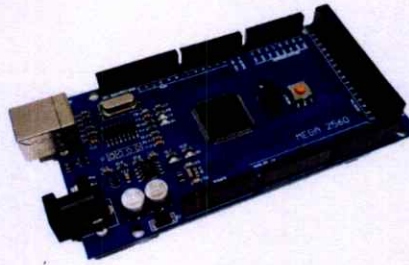
ในการวัดวัสดุจะต้องมีอุปกรณ์รับค่าความแตกต่างของความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Hall Effect sensor เบอร์ 1301 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยมีการใช้งานร่วมกับวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จาก Hall Effect sensor เป็นแรงดันไฟฟ้า สำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าแรงดันทางไฟฟ้า และนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้แปลงเป็นความถี่ในรูปของโดเมนเวลา เพื่อดำเนินการแปลงสัญญาณ และวิเคราะห์สัญญาณในรูปแบบของโดเมนความถี่ต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดง Hall Effect sensor A1301

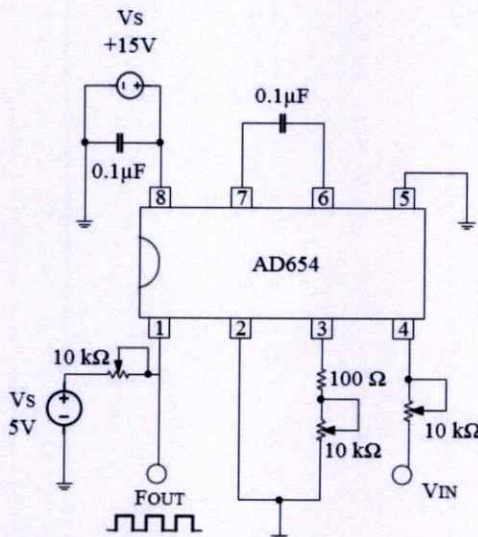


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใช้งานร่วมกับ Hall Effect sensor

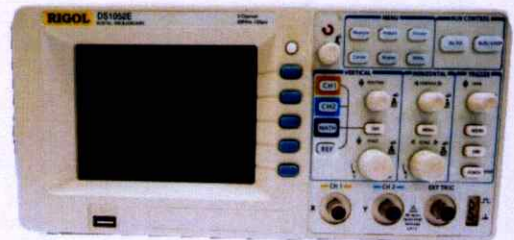


รูปที่ 3.9 แสดง Arduino Mega 2560 Rev3

จากรูปที่ 3.8 แสดงวงจรแปลงค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยมีการใช้งานร่วมกับ Hall Effect sensor ซึ่งจากรูปวงจรประกอบด้วยวงจรใหญ่ 3 ส่วน คือ วงจรกรองความถี่สูง วงจรขยายแรงดันไฟฟ้าของไฟฟ้ากระแสสลับ และวงจรแปลงค่าแรงดันทางไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นเอาต์พุตจะถูกส่งไปยัง A/D Converter ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Arduino Mega 2560 Rev3 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซีเบอร์ AD654 โดยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ แสดงได้ดังในรูปที่ 3.10 และได้มีการใช้เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) รุ่น RIGOL DS1052E ในการจับสัญญาณความถี่ที่ออกมาเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3.11



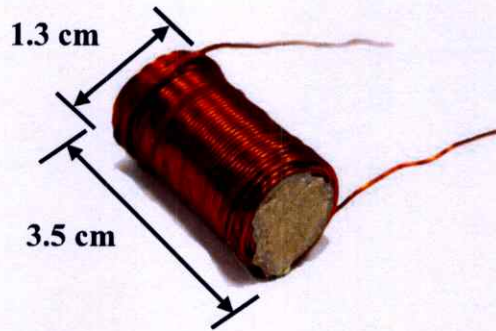
รูปที่ 3.10 แสดงวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ Voltage to Frequency Converter



รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) รุ่น RIGOL DS1052E

3.2 การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ

ในการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำได้เลือกใช้ขดลวดชนิดโซลินอยด์ โดยนำเส้นลวดทองแดงมาตรฐาน UK Standard wire gauge (SWG) เบอร์ 22 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.395 mm พันรอบแกนเฟอร์ไรท์ ขนาดความสูง 3.5 cm. เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 cm. จำนวน 200 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำชนิดโซลินอยด์



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องมือวัดค่า LCR หรือ LCR Meter

จากรูปที่ 3.13 แสดงเครื่อง LCR Meter Instek รุ่น LCR 816 ซึ่งถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความต้านทาน และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดนี้ โดยค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำนี้ คือ 1.1541 mH และ 0.473 Ω ตามลำดับ

3.3 อุปกรณ์การวัดในแต่ละส่วน และวัสดุโลหะทดสอบ

3.3.1 เครื่องมือการวัด

จากการออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ เครื่องมือวัดเป็นสิ่งจำเป็นในการตรวจรู้ และทดสอบ โดยเครื่องมือที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER GL240 เพื่อทำการวัดอิมพีแดนซ์บริเวณแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น FLUKE 115 สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก AC/DC Magnetic meter EXTECH Instruments รุ่น SDL900 เพื่อนำมาใช้วัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังในรูปที่ 3.14



(ก)



(ข)



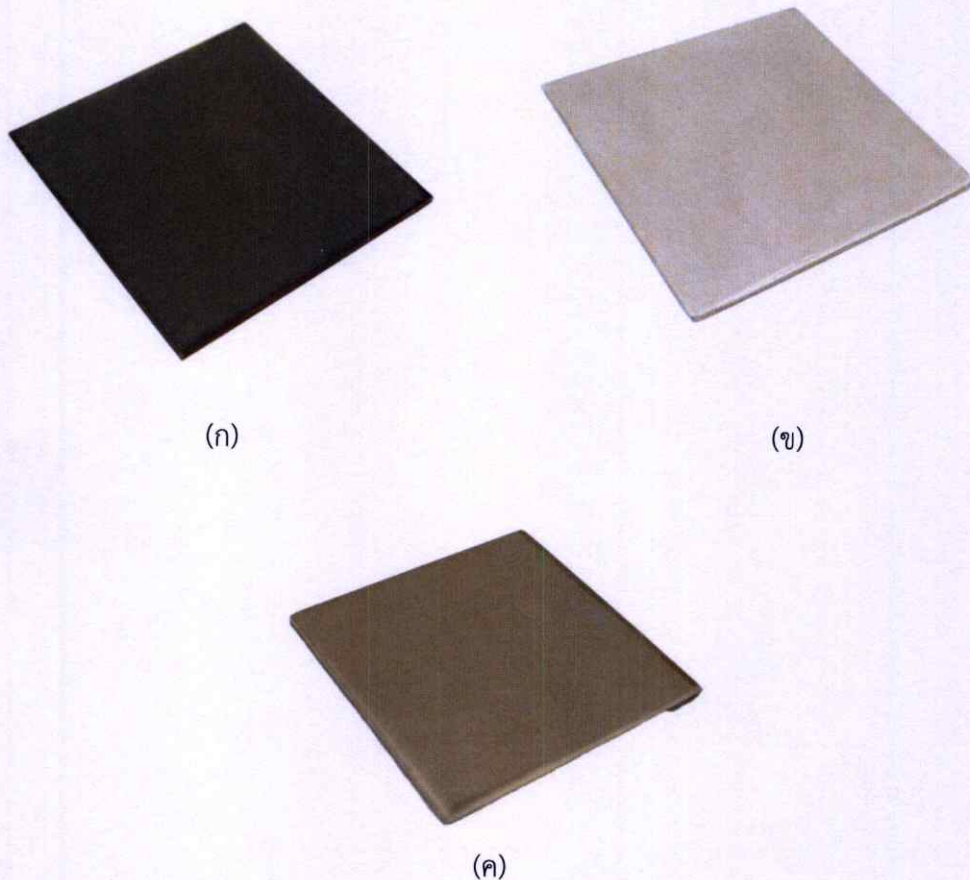
(ค)



รูปที่ 3.14 แสดงเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการวัด
 (ก) เครื่องวัดอุณหภูมิ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER
 GL240
 (ข) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น FLUKE 115
 (ค) เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก AC/DC Magnetic meter
 EXTECH Instruments รุ่น SDL900

3.3.2 ชิ้นงานวัสดุโลหะ เป็นกรณีศึกษาในการทดสอบ

การทดสอบการตอบสนองของวัสดุโลหะในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วัสดุโลหะตัวนำ 3 ชนิด คือ เหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส ที่มีขนาดเท่ากัน คือ ความกว้าง 50 mm และความยาว 50 mm ด้วยความหนาที่แตกต่างกัน คือ 1 mm, 2 mm และ 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.15



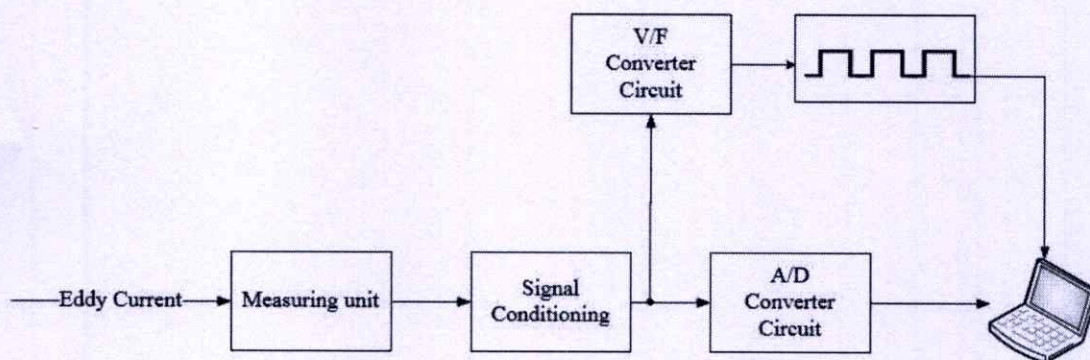
รูปที่ 3.15 แสดงวัสดุโลหะที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้

- (ก) เหล็ก
- (ข) อะลูมิเนียม
- (ค) สแตนเลส

โดยวัสดุโลหะที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นกรณีศึกษาดังที่กล่าวมา สามารถเป็นรูปทรงใดๆ นอกเหนือจากรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ ซึ่งไม่ส่งผลต่อการวัด เนื่องจาก Hall Effect sensor วัดความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณพื้นผิวของวัสดุเท่านั้น แต่สิ่งที่มีผลในการวัดได้แก่ ความหนาของวัสดุ ซึ่งเป็นผลจากความลึกในการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน ตามทฤษฎีความลึกในการเหนี่ยวนำของกระแสไหลวน และระยะห่างระหว่าง Hall Effect sensor กับวัสดุโลหะที่นำมาทดสอบ โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กจะแปรผกผันกับระยะห่างของวัสดุทดสอบและ Hall Effect sensor

3.4 การออกแบบระบบการทดสอบวัสดุโลหะ

ในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้ทำงานภายใต้การทดสอบแบบไม่ทำลายวัตถุ (NDT) โดยใช้งานร่วมกับ Hall Effect sensor สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของขดลวด จนเกิดกระแสไหลวนบนพื้นผิวของวัสดุตัวนำ จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor จะผ่านวงจรขยายสัญญาณดังที่กล่าวมาแล้วในส่วนข้างต้น และส่งไปยัง Arduino Mega 2560 Rev3 เพื่อนำค่าที่ได้จัดเก็บในคอมพิวเตอร์ และวิเคราะห์ผลต่อไป เช่นเดียวกันในส่วนของการวิเคราะห์การทดลองในรูปของโดเมนความถี่ โดยทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor เป็นความถี่รูปคลื่นสี่เหลี่ยมจาก V/F Converter circuit และนำค่าความถี่ในรูปของโดเมนเวลาที่ได้ จัดเก็บในคอมพิวเตอร์ และใช้โปรแกรม MATLAB ในการประมวลผลสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงระบบการวัดโดยรวม

3.5 การดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยได้แบ่งการทำงานออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC และการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC ซึ่งทั้งสองรูปแบบได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเหนี่ยวนำ การแสดงผลตอบสนองของวัสดุโลหะ และการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของวัสดุโลหะในรูปโดเมนความถี่

3.5.1 การวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเหนี่ยวนำ

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขดลวดเหนี่ยวนำที่ถูกนำมาวิเคราะห์ คือ อุณหภูมิความร้อนบริเวณแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งาน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นได้ถูกวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบ ในแง่ของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำทั้งสองรูปแบบ คือ Pure DC และ Combined DC

3.5.1.1 ค่าอุณหภูมิความร้อนบริเวณแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์อุณหภูมิความร้อนบริเวณแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ ได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรก เนื่องจากเมื่อทำการป้อนกระแสไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อ Hall Effect sensor ได้ จึงทำการ

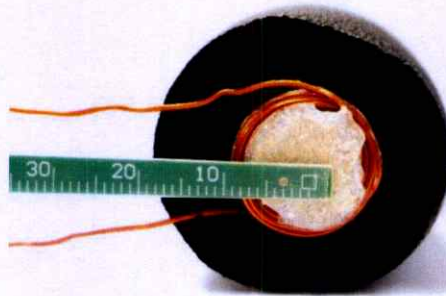
วิเคราะห์อุณหภูมิความร้อนด้วยการเริ่มป้อนกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดที่ 0.5 A, 1 A, 1.5 A และ 2 A เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมงต่อกระแสไฟฟ้าที่กระตุ้น 1 ค่า จากนั้นใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ รุ่น midi LOGGER GL240 ในการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิของแกนเหนียวนำ เป็นจำนวน 3 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก)

3.5.1.2 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นขดลวดเหนียวนำ

เป็นการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนียวนำ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบกับชนิดของวัสดุโลหะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor และได้ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น FLUKE 115 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข)

3.5.1.3 ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดเหนียวนำ

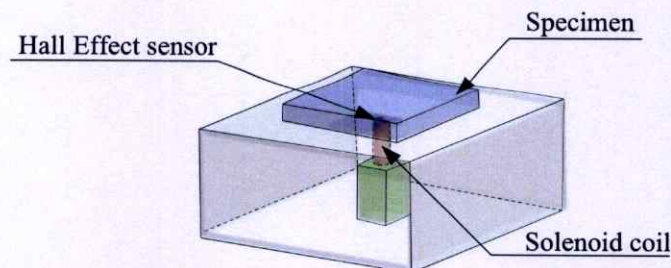
การวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กได้ใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก รุ่น SDL900 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ค) ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแกนขดลวดเหนียวนำที่เกิดจากการกระตุ้นแบบ Pure DC และ Combined DC ซึ่งรูปที่ 3.17 แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณกึ่งกลางแกนของขดลวดเหนียวนำ ที่ซึ่งจะเป็นบริเวณสำหรับติดตั้ง Hall Effect sensor



รูปที่ 3.17 แสดงการวัดค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณกึ่งกลางแกนของขดลวดเหนียวนำ

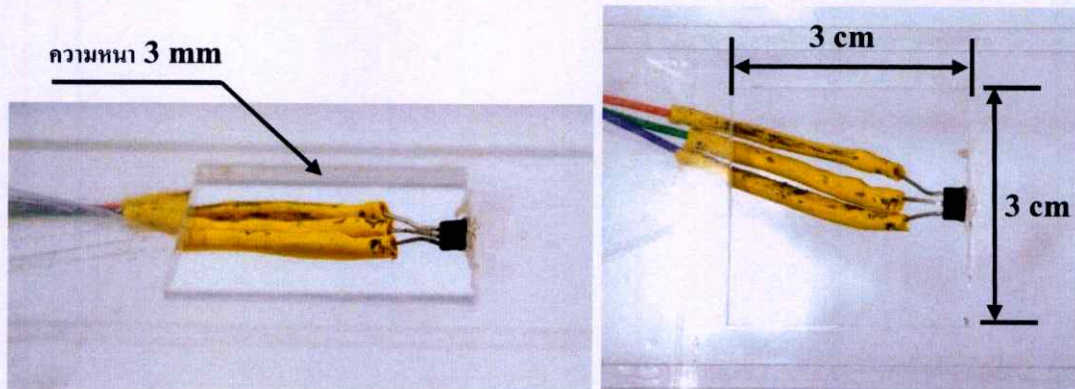
3.5.2 การทดสอบการแสดงผลการตอบสนองของวัสดุโลหะ

ในการดำเนินงานวิจัย ได้ออกแบบอุปกรณ์การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งประกอบไปด้วยกล่องอะคริลิกใส โดยเจาะรูที่บริเวณกึ่งกลางของกล่อง ฐานรองขดลวดเหนียวนำ ขดลวดเหนียวนำ Hall Effect sensor และชิ้นงานทดสอบ



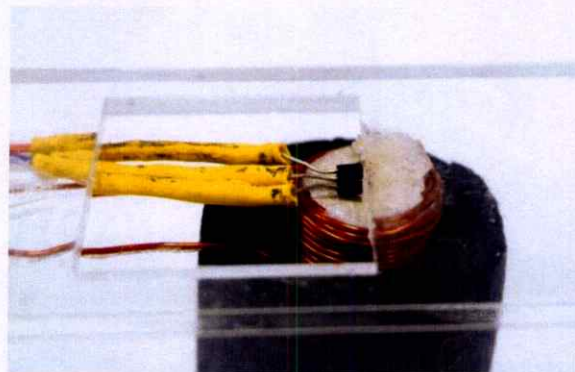
รูปที่ 3.18 แสดงรูปแบบจำลองการออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ Hall Effect sensor ได้ถูกติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของแผ่นอะคลีลิกใส ความหนา 3 mm ในบริเวณรูที่ถูกเจาะตำแหน่งกึ่งกลางของกล่องอะคลีลิกใส โดยมีขนาดความกว้าง 3 cm และ ยาว 3 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.19

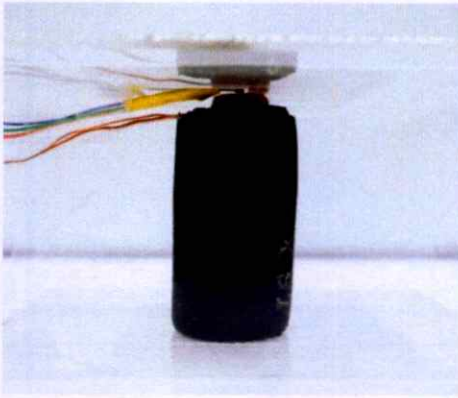


รูปที่ 3.19 แสดงขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของแผ่นอะคลีลิกที่ถูกเจาะ

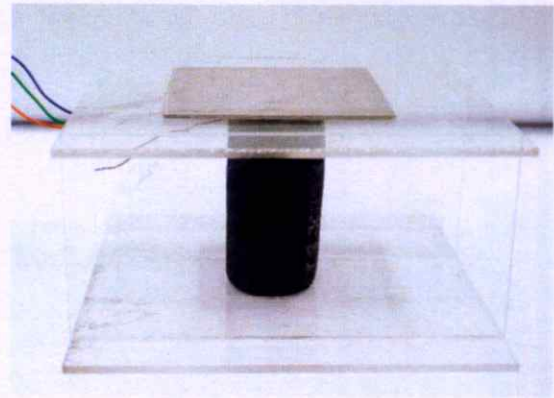
ขดลวดเหนี่ยวนำได้ถูกติดตั้งให้ Hall Effect sensor อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแกนของขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และในการติดตั้งนี้ ขดลวดเหนี่ยวนำ และ Hall Effect sensor ไม่มีการสัมผัสกัน โดยมีระยะห่างประมาณ 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.21 รวมไปถึงในการทดสอบ ชิ้นงานวัสดุโลหะทดสอบจะมีระยะห่างจาก Hall Effect sensor เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการควบคุมระยะที่อาจมีผลกับการวัดได้



รูปที่ 3.20 แสดงการติดตั้ง Hall Effect sensor และขดลวดเหนี่ยวนำ



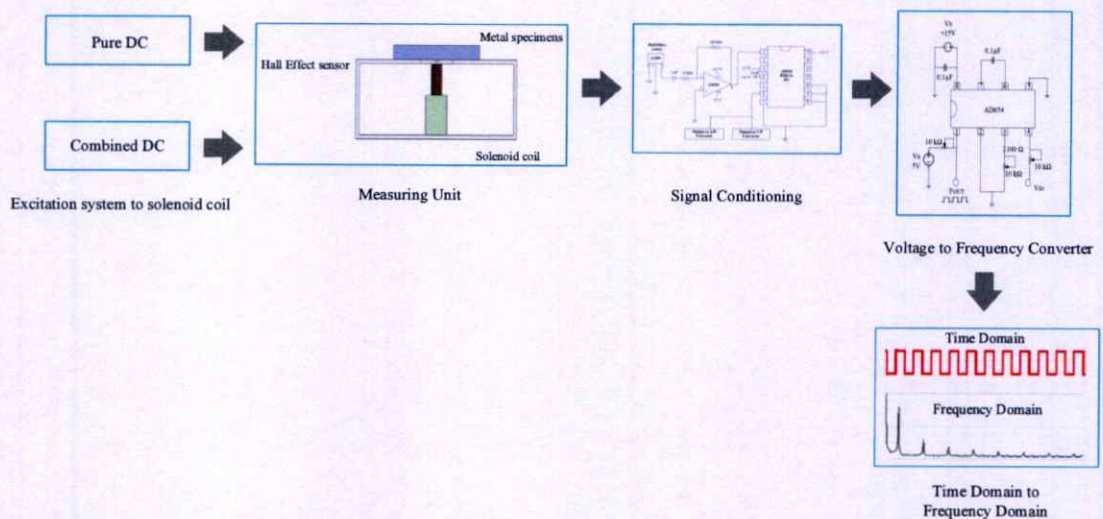
รูปที่ 3.21 แสดงระยะห่างระหว่าง Hall Effect sensor และขดลวดเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.22 แสดงรูปแบบการทดสอบ

จากรูปที่ 3.22 แสดงอุปกรณ์การทดสอบ รวมถึงรูปแบบการทดสอบ โดยในการทดสอบ จะทำการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำใน 2 รูปแบบ ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำ สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอบๆ จึงนำวัสดุโลหะทดสอบวางบนกล่องอะคริลิกใส ที่บริเวณกึ่งกลางมีการติดตั้ง Hall Effect sensor ไว้เพื่อวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากในแผ่นวัสดุโลหะทดสอบมีกระแสไหลวนเกิดขึ้น และในวัสดุโลหะแต่ละชนิดมีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

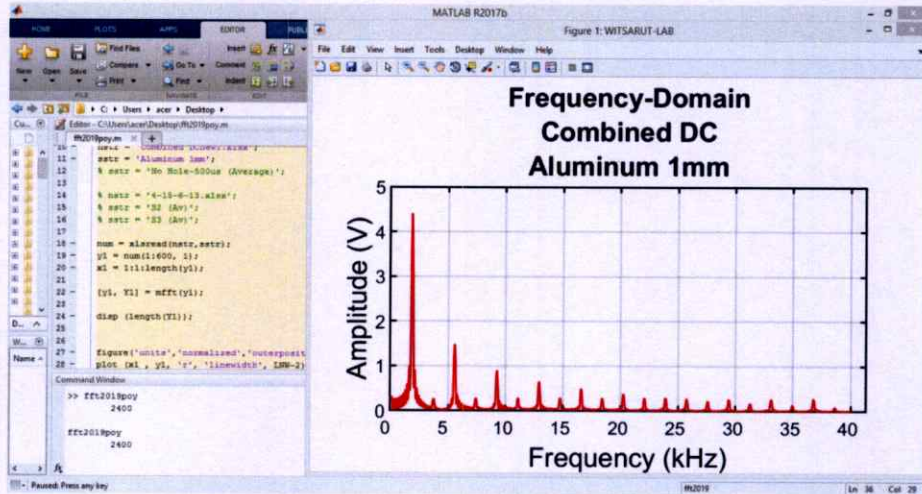
3.5.3 การวิเคราะห์ผลการตอบสนองของวัสดุในรูปโดเมนความถี่



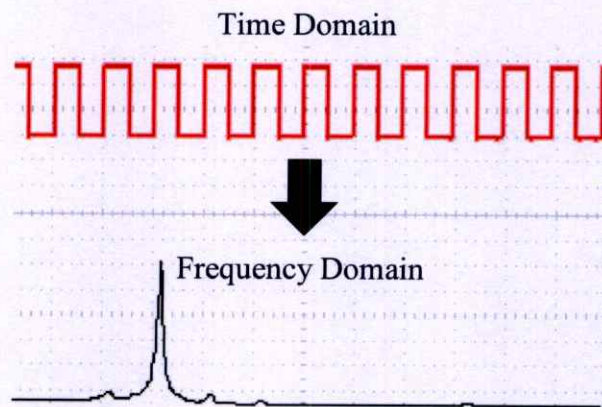
รูปที่ 3.23 แสดงระบบการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของวัสดุในรูปแบบของโดเมนความถี่

จากรูปที่ 3.23 แสดงระบบการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของวัสดุในรูปแบบของโดเมนความถี่ โดยเริ่มจากการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำใน 2 รูปแบบ และทำการวัดโดยใช้อุปกรณ์การทดสอบที่ออกแบบมา จากนั้นเข้าสู่ส่วนของ Signal conditioning เพื่อทำการปรับแต่ง และเปลี่ยนสัญญาณให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ต่อมาได้ส่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกปรับแต่งแล้วไปยัง

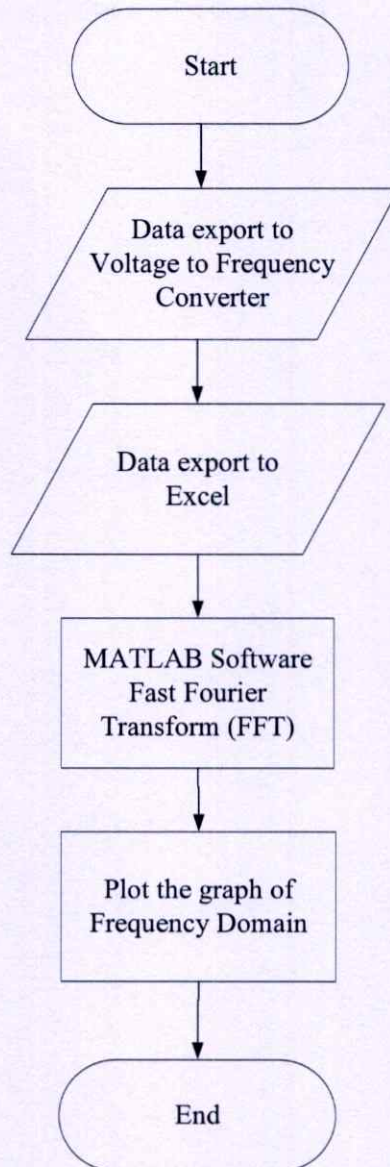
Voltage to frequency converter และนำค่าความถี่ในรูปของโดเมนเวลา (Time domain) เข้าสู่โปรแกรม MATLAB ในฟังก์ชัน Fast Fourier transform หรือ FFT เพื่อแปลงความถี่ในรูปแบบโดเมนเวลาให้เป็นโดเมนความถี่ (Frequency domain) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.24 และทำการวิเคราะห์รูปสัญญาณต่อไป จากรูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2017b, 64-bit (win64) ในการแสดงผลให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ และในรูปที่ 3.26 แสดงแผนภูมิการทำงานโดยใช้ MATLAB



รูปที่ 3.24 แสดงตัวอย่างการทำงานของโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างของโดเมนเวลาเมื่อแปลงเป็นโดเมนความถี่



รูปที่ 3.26 แสดงแผนภูมิกระบวนการแปลงจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบระบบโดยรวม วงจรการกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรการแปลงค่าต่างๆ การออกแบบขดลวดเหนี่ยวนำ วัสดุโลหะที่เลือกนำมาใช้ในการทดสอบ ทั้ง 3 ชนิด รวมถึง เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการวัดของงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ตรวจรู้ Hall Effect sensor ที่นำมาใช้วัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุตัวนำแต่ละชนิด และการดำเนินงานได้มีการนำเสนอเป็นไดอะแกรม และแผนภูมิการทำงาน เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย

โดยในการดำเนินงานวิจัยนี้ กระทำภายใต้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC และการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทั้ง 2 ระบบ ดังจะกล่าวในบทถัดไป ในหัวข้อเรื่อง ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

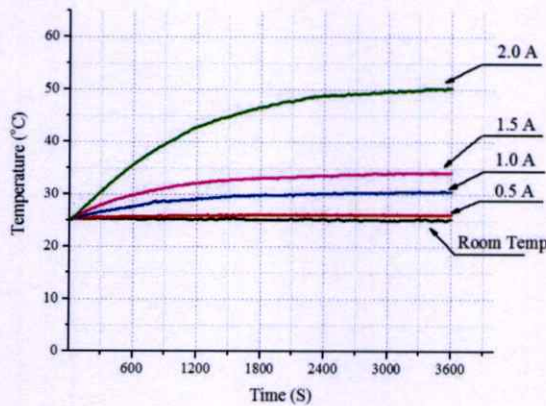
บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

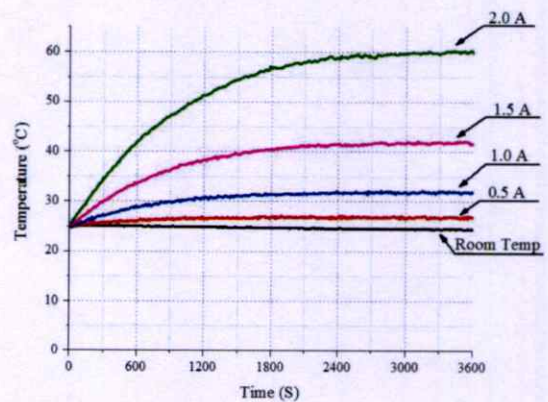
บทนี้กล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการทดสอบการตอบสนองของวัสดุแต่ละชนิด เป็นกรณีศึกษา อันเนื่องมาจากการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ Pure DC และ Combined DC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้กับ Hall Effect sensor โดยทำการพิจารณาผลการทดลองในด้านต่างๆ เริ่มตั้งแต่พิจารณาหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยแสดงผลออกมาในรูปของอุณหภูมิ ผลการตอบสนองของวัสดุที่แสดงผลออกมาในรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปลงไป แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor รวมไปถึงเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปของโดเมนความถี่ ซึ่งมาจากแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor จากการแสดงผลด้วย Oscilloscope และจากโปรแกรม MATLAB

4.1 ผลการทดลองเพื่อหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขดลวดเหนี่ยวนำ โดยการวัดอุณหภูมิบนแกนของขดลวดที่กระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

ก่อนทำการทดสอบกับวัสดุ จำเป็นต้องหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้เพื่อกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดเป็นระยะเวลาสั้น ขดลวดอาจเกิดความร้อนสะสมและเกิดความเสียหายได้ โดยหากขดลวดเกิดความร้อนสะสมที่มากเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อ Hall Effect sensor ได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากในการออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ ได้ทำการติดตั้ง Hall Effect sensor ที่บริเวณด้านบนแกนของขดลวด ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ผ่านมา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิบนแกนของขดลวดเหนี่ยวนำ

(ก) การกระตุ้นแบบ Pure DC

(ข) การกระตุ้นแบบ Combined DC

จากการศึกษาคุณสมบัติการทนทานความร้อนของ Hall Effect sensor ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ประมาณ 50 °C หากอุณหภูมิสูงจนเกินไปจะส่งผลให้ผลการตอบสนองของสนามแม่เหล็ก

เปลี่ยนแปลงไปได้ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ การวัดอุณหภูมิของขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC และ Combined DC โดยในการทดสอบของทั้งสองรูปแบบ ได้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดตั้งแต่ 0.5 A, 1.0 A, 1.5 A และ 2 A ตามลำดับ ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 1 ชั่วโมงต่อหนึ่งค่ากระแสไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5 A – 1 A ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมিবนขดลวดเหนี่ยวนำ

กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวด (A)	Pure DC		Combined DC	
	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง (%)	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง (%)
0.5	25.949	2.968	26.563	5.405
1.0	29.212	15.916	30.558	21.257
1.5	32.122	27.463	38.292	51.946
2.0	43.619	73.084	52.159	106.972

จากตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมিবนขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องในขณะที่ทำการวัด โดยอุณหภูมิที่แสดงในตารางเป็นอุณหภูมิที่เฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปใน 1 ชั่วโมง จากการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง สังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องของระบบการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าระบบการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC เนื่องจาก Combined DC มีการใช้ Class-A amplifier ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำจึงเกิดความร้อนสูง

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Pure DC และ Combined DC ของอุณหภูมিবนขดลวดเหนี่ยวนำ

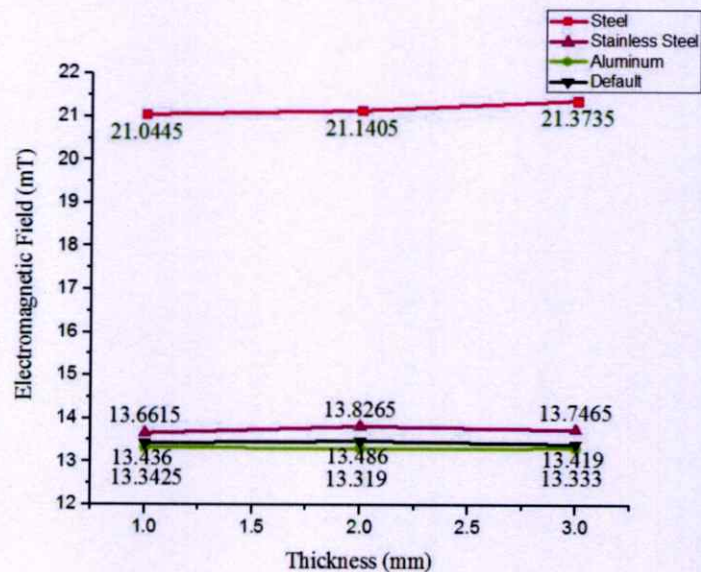
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวด (A)	Pure DC/ Combined DC	
	อุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งสองระบบการทดสอบ (C)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างสองระบบการทดสอบ (%)
0.5	26.256	2.338
1.0	29.885	4.504
1.5	35.207	17.524
2.0	47.889	17.832

ในขณะที่ จากตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Pure DC และ Combined DC ของอุณหภูมิบนขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อหาประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำของทั้งสองรูปแบบในอุณหภูมิที่ไม่สูงจนเกิดผลกระทบต่อ Hall Effect sensor ซึ่งช่วงกระแสไฟฟ้า 0.5 A - 1.0 A นั้นเหมาะสมสำหรับนำมาใช้เพื่อกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่าง Pure DC และ Combined DC อยู่ที่ 2.338% และ 4.504% ของกระแสไฟฟ้า 0.5 A และ 1.0 A ตามลำดับ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กระแสไฟฟ้าที่ 0.8 A เนื่องจากสามารถกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้กระแสไฟฟ้าที่ 0.5 A และกระแสไฟฟ้าที่ 0.8 A จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าที่ 1.0 A

4.2 ผลการตอบสนองของวัสดุโลหะ โดยการกระตุ้นแบบ Pure DC และ Combined DC

ในการนำเสนอผลการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 1. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 2. กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำ และ 3. แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor ซึ่งนำเสนอโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองจากการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำทั้ง 2 รูปแบบ คือ การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC และการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC

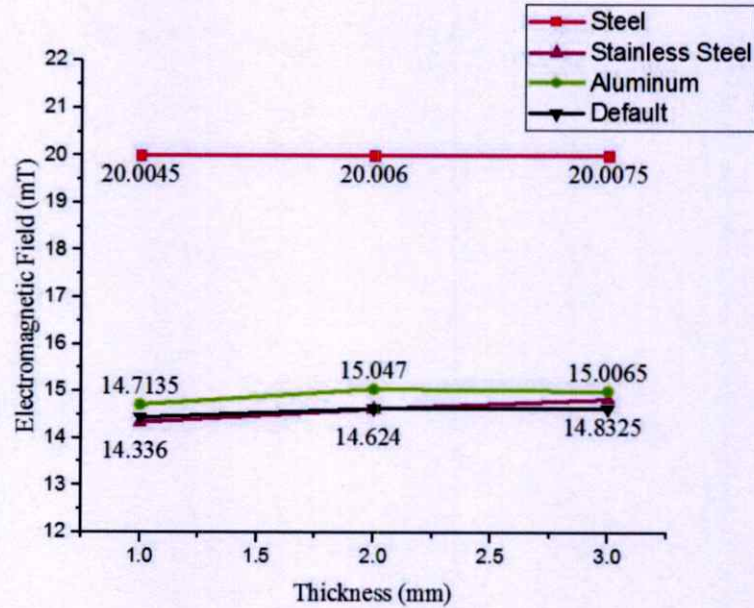
4.2.1 ผลการทดลองในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC

ผลการทดลองในรูปแบบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาจากการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่บริเวณเดียวกับ Hall Effect sensor ได้ถูกติดตั้งอยู่ เมื่อทำการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าเหล็กสามารถตอบสนองได้ดีกว่า

วัสดุชนิดอื่น ในขณะที่สแตนเลส อะลูมิเนียม และในการวัดขณะที่ไม่มีวัสดุ มีการตอบสนองต่อการทดสอบได้ใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถแยกผลการตอบสนองออกจากกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.3 แสดงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC โดยวัสดุโลหะชนิดเหล็ก สามารถตอบสนองต่อการทดสอบได้อย่างชัดเจน แต่ทั้งอะลูมิเนียม สแตนเลส และเมื่อทำการวัดขณะที่ไม่มีวัสดุ ไม่สามารถแยกผลการตอบสนองออกจากกันได้ เช่นเดียวกับผลการทดลองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC

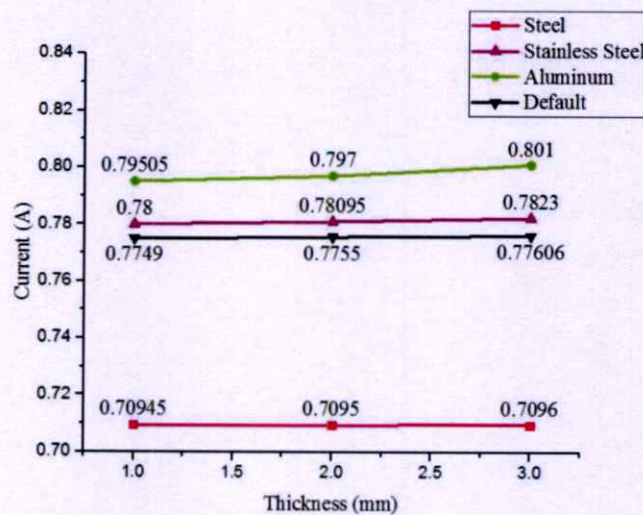
4.2.2 ผลการทดลองในรูปแบบกระแสไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่แสดงในผลการทดลองนี้ มาจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ขดลวดเหนี่ยวนำ สำหรับใช้กระตุ้นขดลวดในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจากการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวดเหนี่ยวนำนี้มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor เนื่องจากการแสดงผลการทดลองกระแสไฟฟ้าของขดลวด เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC กระแสไฟฟ้าที่แสดงออกมาในวัสดุแต่ละชนิด มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนไม่สามารถแยกออกจากกันอย่างชัดเจน รวมไปถึงไม่สามารถแสดงออกมาเป็นรูปกราฟที่ชัดเจนได้ จึงทำการแสดงผลการทดลองเป็นค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละค่า และในแต่ละความหนาของวัสดุแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 กระแสไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำในการกระตุ้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Pure DC

ความหนาของวัสดุ (mm)	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ขดลวด (A)			
	เหล็ก	สแตนเลส	อะลูมิเนียม	ขณะไม่มีวัสดุ
1	0.807	0.804	0.8109	0.8035
2	0.807	0.807	0.8108	0.8079
3	0.807	0.801	0.8107	0.8075

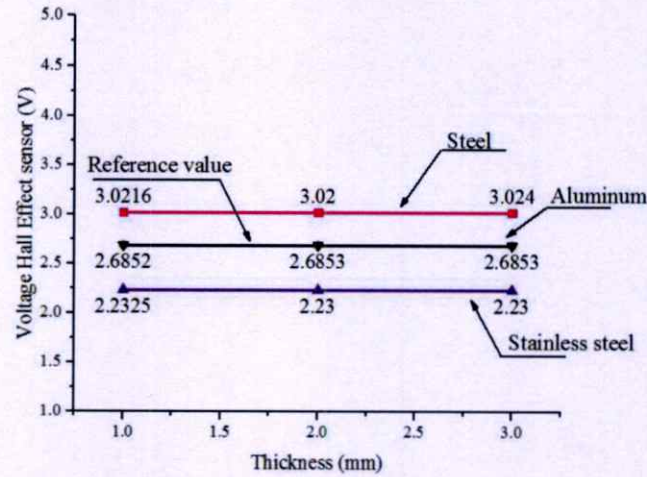
จากรูปที่ 4.4 แสดงผลการทดลองกระแสไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC จากกราฟ ในด้านความหนาของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ในด้านการตอบสนองของวัสดุเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC วัสดุทั้งสามชนิดมีการตอบสนองได้ดี แต่จากผลการตอบสนองของสแตนเลส จะสังเกตได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีวัสดุ ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก หากนำมาเทียบกับสเกลที่ใหญ่จะส่งผลให้วัสดุสแตนเลส และเมื่อไม่มีวัสดุ ไม่สามารถแยกผลการตอบสนองออกจากกันได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 4.4 แสดงกระแสไฟฟ้าของขดลวดเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC

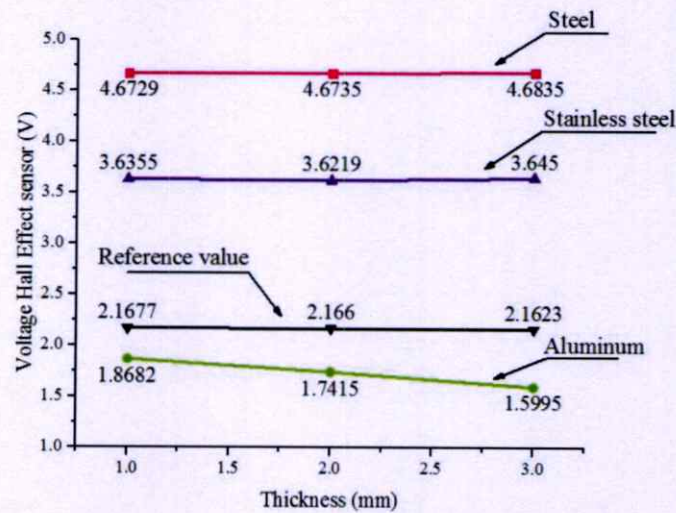
4.2.3 ผลการทดลองในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

ผลการทดสอบการตอบสนองของวัสดุ โดยการพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor เมื่อทำการวัดกับวัสดุเหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส โดยมีการเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor เมื่อไม่มีการทดสอบวัสดุ



รูปที่ 4.5 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor โดยการกระตุ้นแบบ Pure DC

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อใช้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC โดยผลการตอบสนองของเหล็กและสแตนเลส สามารถแยกออกจากกันได้ อย่างชัดเจน ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor ของอะลูมิเนียม กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเมื่อไม่มีการวัดวัสดุ ในทุกๆความหนาไม่สามารถแยกผลการตอบสนองออกจากกันได้



รูปที่ 4.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor โดยการกระตุ้นแบบ Combined DC

จากรูปที่ 4.6 เมื่อใช้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor สามารถแยกชนิดของวัสดุทั้งสามชนิดออกจากกันได้ อย่างชัดเจน และในขณะเดียวกันผลการตอบสนองของวัสดุอะลูมิเนียมในแง่ของความหนา ยังสามารถแยกออกจากกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นผลมาจากสมการที่ 2.2 โดยความถี่ที่นำมาใช้ร่วมใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC สามารถแยกความหนาของอะลูมิเนียมได้ถึง 5 mm ในขณะที่เหล็กและสแตนเลสสามารถแยกความหนาได้เพียง 0.137 mm และ 0.84 mm ตามลำดับ เนื่องมาจากค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความถี่ที่นำมาใช้ หากใช้ความถี่ต่ำจะ

สามารถสร้าง Eddy current ได้ดีกว่าการใช้ความถี่สูง ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3.2 เรื่องความลึกในการเหนี่ยวนำของ Eddy current

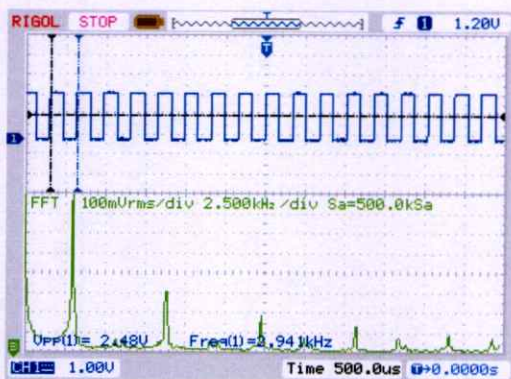
4.3 การตอบสนองของวัสดุโดยการพิจารณาในรูปของโดเมนความถี่

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC และ Combined DC ซึ่งแสดงผลการทดลองในรูปของโดเมนความถี่ โดยมาจากการแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor ให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลา จากนั้นทำการแปลงผลการทดลองที่อยู่ในรูปแบบของโดเมนเวลา ให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ โดยใช้โปรแกรม MATLAB

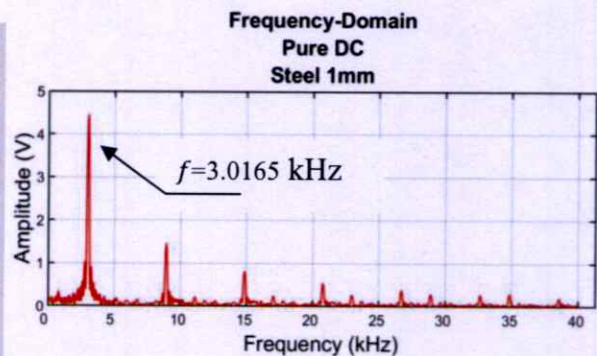
จากการปรับแต่งค่าของวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ ได้ปรับแต่งค่าโดยที่แรงดันไฟฟ้า 5 V จะได้ความถี่ 5 kHz ด้วยแอมพลิจูด 5 V_{p-p} ที่ Time division เท่ากับ 500 μ s ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก Hall Effect sensor สามารถนำไปเปรียบเทียบกับความถี่ที่ถูกแปลงออกมาได้ โดยในเอกสารข้อมูลของไอซี AD654 Voltage to frequency [25] ระบุเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของความถี่เป็นเชิงเส้นเมื่อใช้ความถี่ในช่วงที่กล่าวมาซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1% จึงสามารถนำไปเปรียบเทียบกับความถี่ที่ถูกแปลงมาได้ ทั้งความถี่ที่แสดงใน Oscilloscope และความถี่ที่มาจากการคำนวณของ MATLAB โดยแสดงผลออกมาเป็นความถี่ที่แตกต่างกันของวัสดุแต่ละชนิด

4.3.1 การกระตุ้นขดลวดแบบ Pure DC

ผลการทดลองในรูปแบบของโดเมนความถี่เมื่อทำการวัดวัสดุ 3 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยในผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการแสดงผลของ Oscilloscope และผลการทดลองจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB



(ก)



(ข)

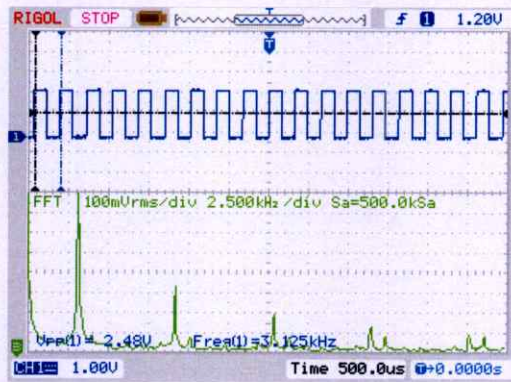
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็กที่มีความหนา 1 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

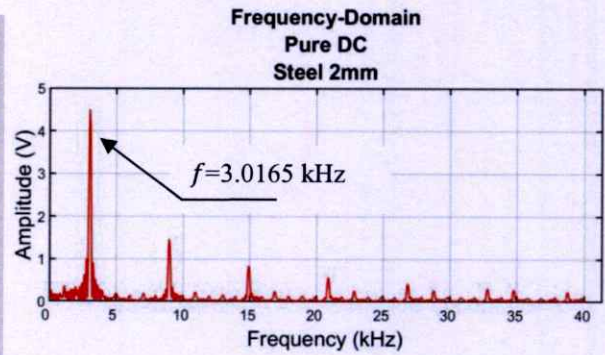
(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.7 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.941 kHz แต่รูปที่ 4.7 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 3.0165 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 3.02 V เฮอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.615% และ 0.12% ตามลำดับ



(ก)



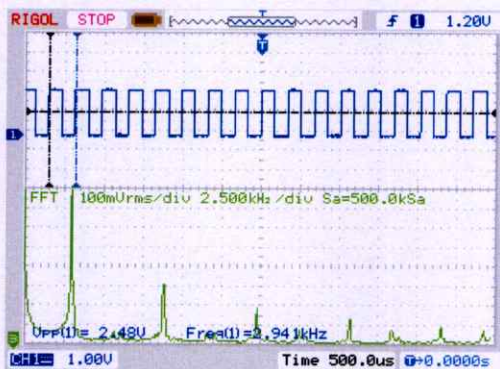
(ข)

รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็กที่มีความหนา 2 mm

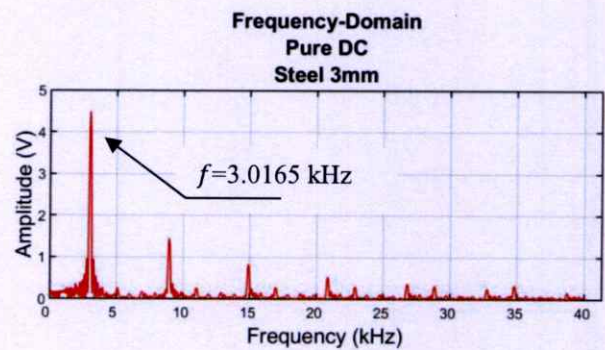
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.8 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 3.125 kHz แต่รูปที่ 4.8 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 3.0165 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 3.023 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 3.374% และ 0.215% ตามลำดับ



(ก)



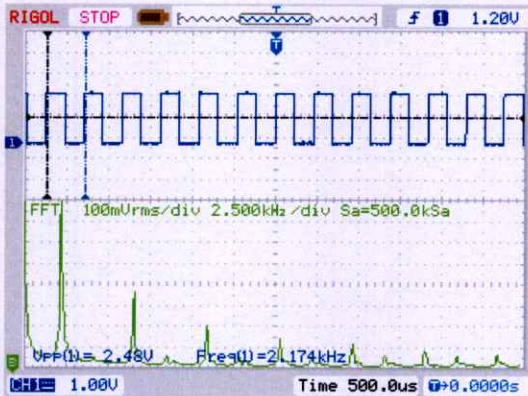
(ข)

รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็กที่มีความหนา 3 mm

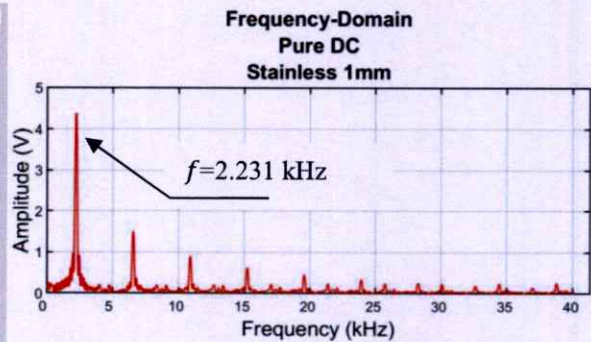
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.9 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.941 kHz แต่รูปที่ 4.9 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 3.0165 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 3.023 V เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.713% และ 0.215% ตามลำดับ



(ก)



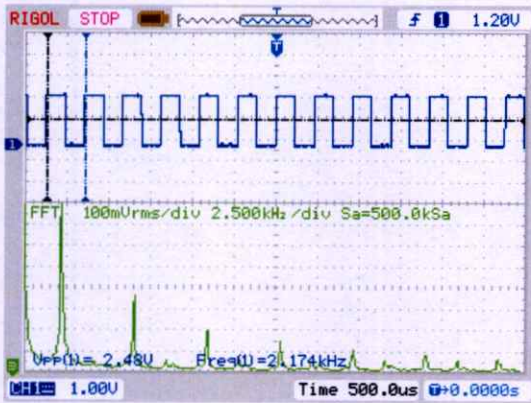
(ข)

รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 1 mm

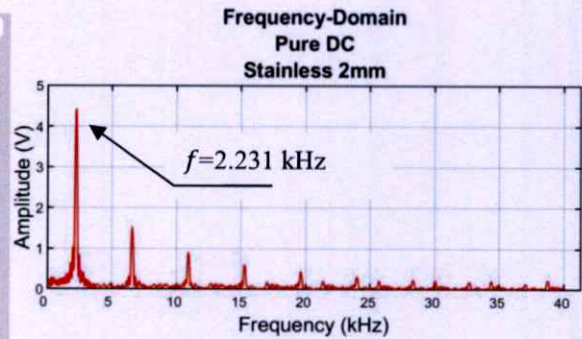
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.10 (ก), 4.11 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope มีขนาดเท่ากัน คือ 2.174 kHz แต่รูปที่ 4.10 (ข), 4.11 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.231 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.233 V เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.642% และ 0.089% ตามลำดับ ผลการทดลองดังที่กล่าวมาเป็นผลการทดลองของสแตนเลสที่ความหนา 1 mm และ 2 mm ซึ่งมีขนาดเท่ากันในทุกๆค่า



(ก)



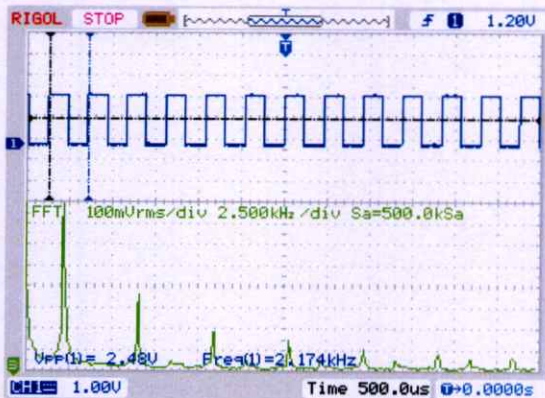
(ข)

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 2 mm

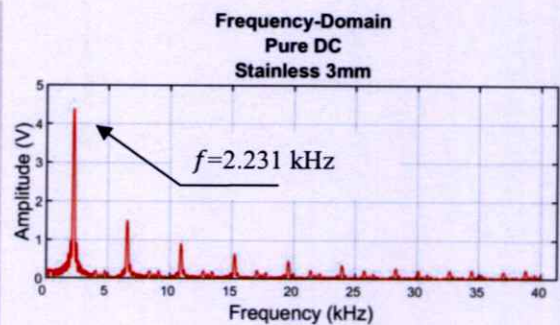
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

ในขณะที่รูปที่ 4.12 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.174 kHz แต่รูปที่ 4.12 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.231 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.231 V เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.55% และ 0%



(ก)

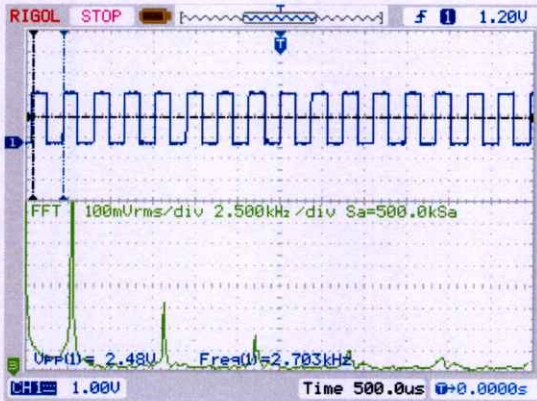


(ข)

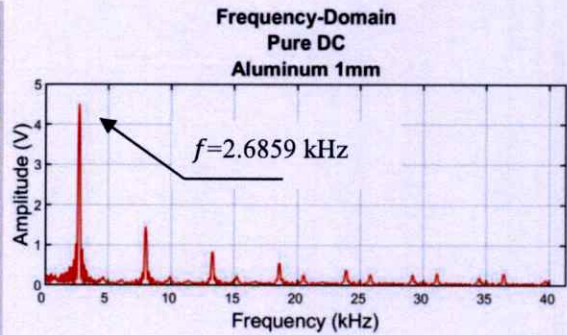
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 3 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB



(ก)



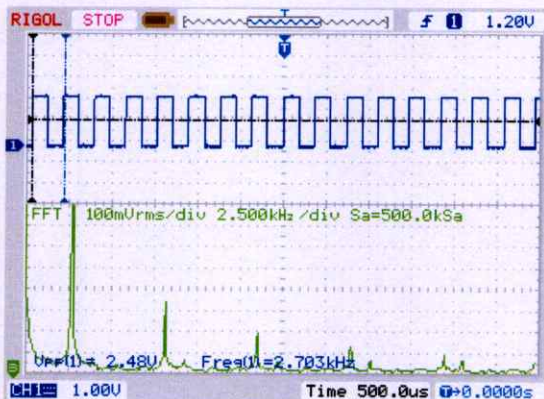
(ข)

รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 1 mm

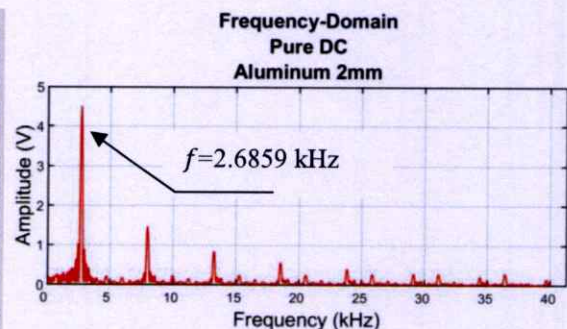
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.13 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.703 kHz แต่รูปที่ 4.13 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.6859 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.684 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.707% และ 0.071% ตามลำดับ



(ก)



(ข)

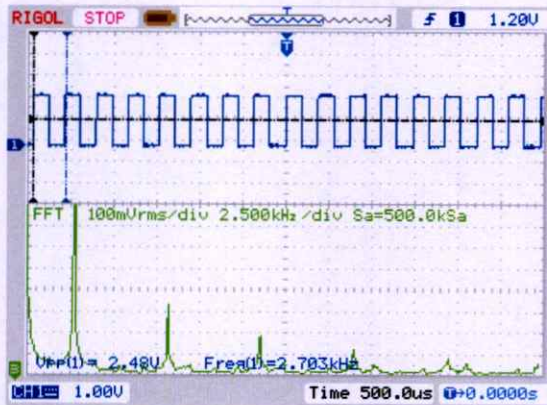
รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 2 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

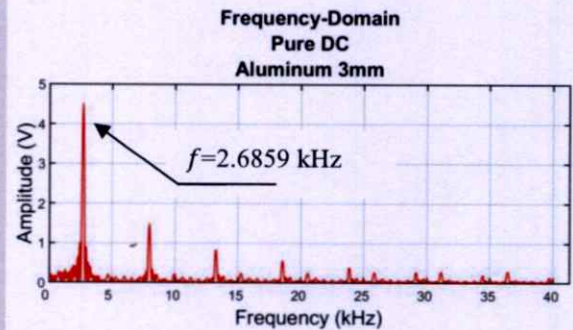
(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.14 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope และรูปที่ 4.14 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB มีค่าเท่ากับผลการทดลองที่ความหนาของ

อะลูมิเนียม 1 mm ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.686 V และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างไประหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.633% และ 0.0037% ตามลำดับ



(ก)

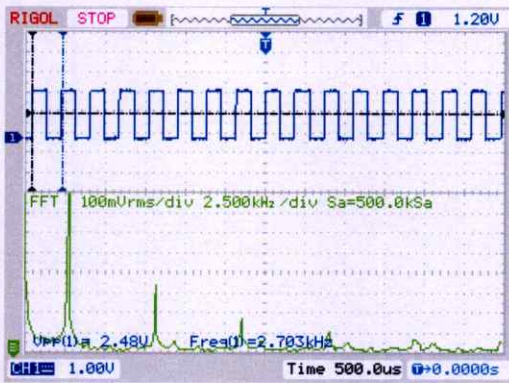


(ข)

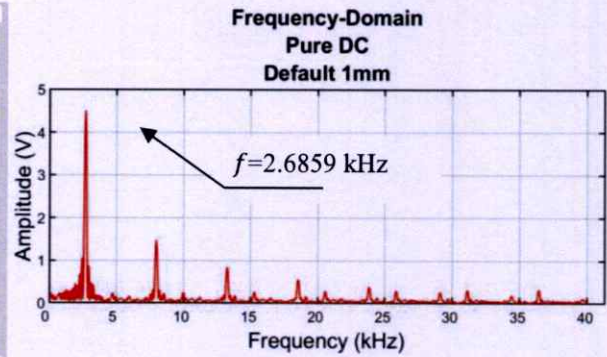
รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm

- (ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope
- (ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.15 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope และรูปที่ 4.15 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB มีค่าเท่ากับผลการทดลองที่ความหนาของอะลูมิเนียม 1 mm และ 2 mm ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.685 V โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างไประหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.670% และ 0.034% ตามลำดับ



(ก)

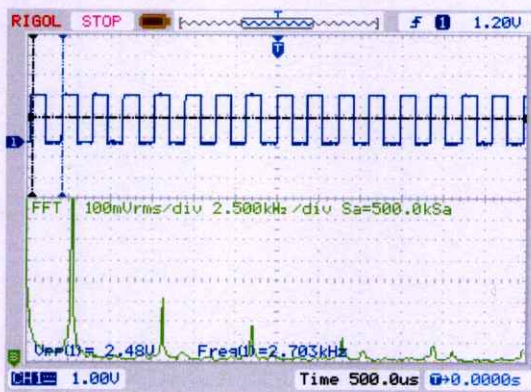


(ข)

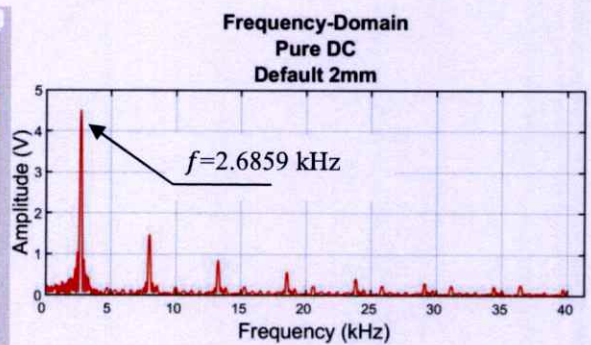
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุ ในขณะที่ทำการวัด ที่ความหนา 1 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB



(ก)



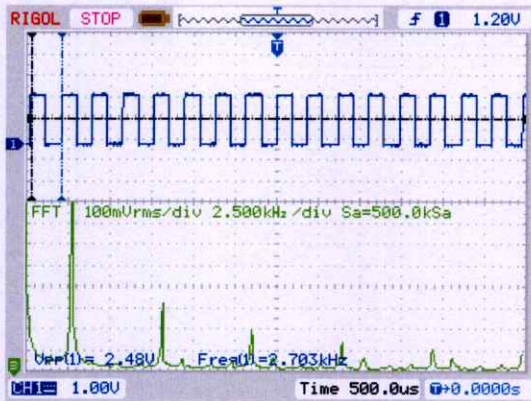
(ข)

รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุ ในขณะที่ทำการวัด ที่ความหนา 2 mm

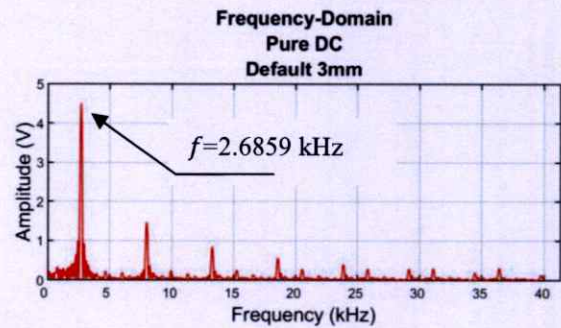
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.16 (ก) และ 4.17 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope รูปที่ 4.16 (ข) และ 4.17 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ รวมไปถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่างๆ ค่าที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าเท่ากับผลการทดลองที่ความหนาของอะลูมิเนียม 3 mm



(ก)



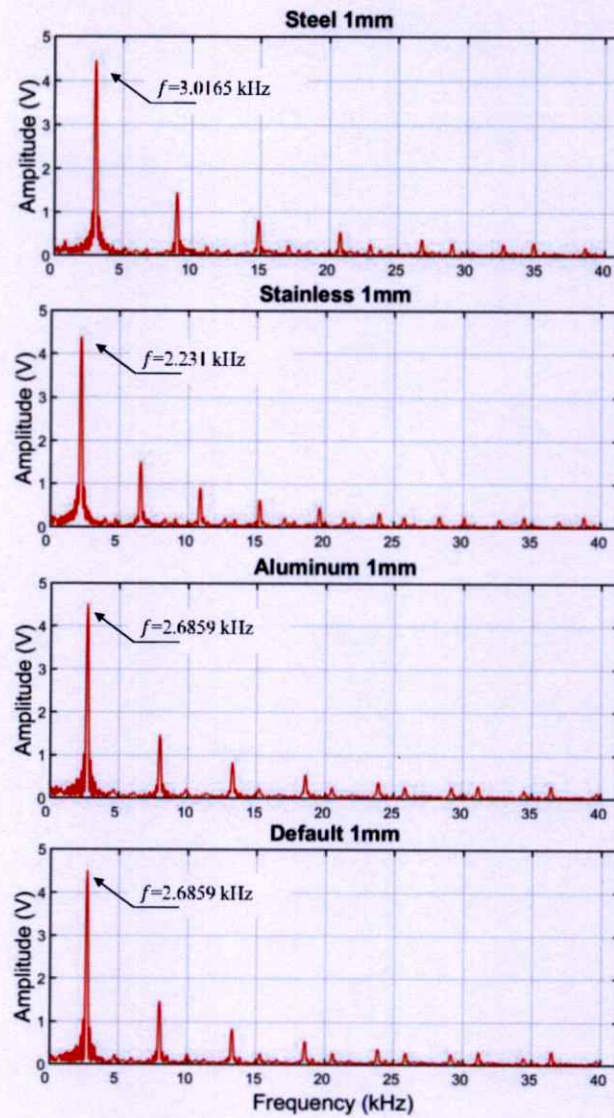
(ข)

รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Pure DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุ ในขณะที่ทำการวัด ที่ความหนา 3 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

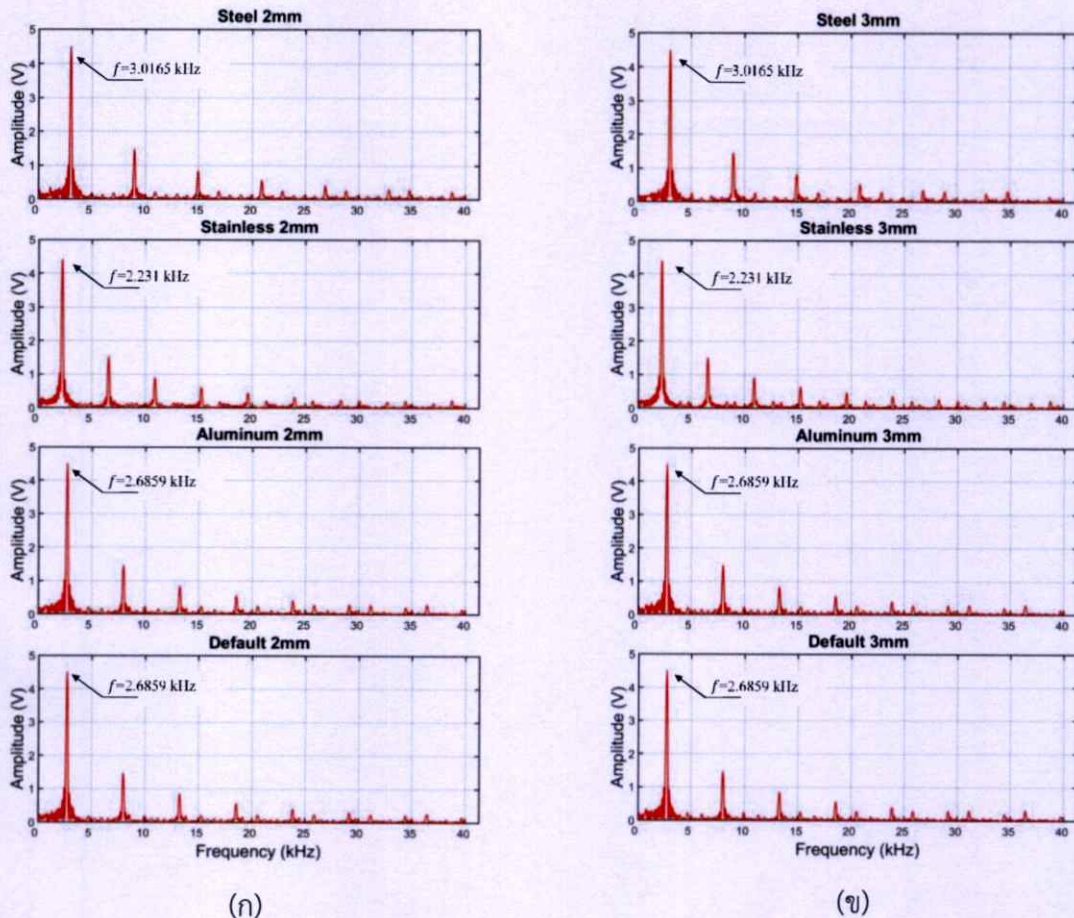
(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.18 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope รูปที่ 4.18 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ รวมไปถึงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่างๆ ค่าที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าเท่ากับผลการทดลองที่ความหนาของอะลูมิเนียม 1 mm กล่าวคือ มีความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope 2.703 kHz ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB เป็น 2.6859 kHz และแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.684 V โดยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.707% และ 0.071% ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด ในระบบ Pure DC ที่ความหนา 1 mm

รูปที่ 4.19 และ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุ ซึ่งแบ่งการเปรียบเทียบเป็นความหนาของวัสดุแต่ละชนิด โดยรูปที่ 4.19, 4.20 (ก) และ 4.20 (ข) ที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm ตามลำดับ สามารถแยกผลการตอบสนองของ เหล็ก สแตนเลส และอะลูมิเนียมออกจากกันได้เป็นอย่างดี แต่ในขณะที่ทำการวัดโดยปราศจากวัสดุ ผลการตอบสนองที่แสดงออกมา ไม่สามารถแยกออกจากอะลูมิเนียมได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พิจารณาโดยใช้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor



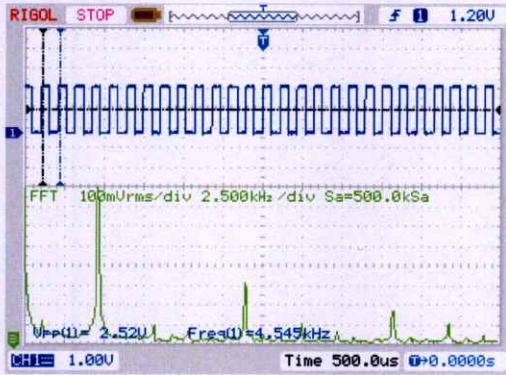
รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด ในระบบ Pure DC

(ก) ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ 2 mm

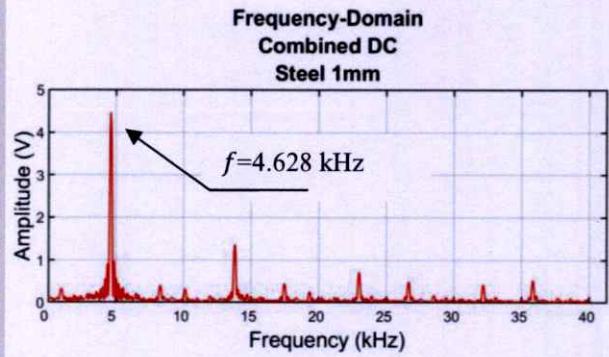
(ข) ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ 3 mm

4.3.2 การกระตุ้นขดลวดแบบ Combined DC

เป็นการแสดงผลการทดลองในรูปแบบของโดเมนความถี่เมื่อทำการวัดวัสดุ 3 ชนิดที่แตกต่างกัน เป็นกรณีศึกษา โดยในผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบกับระหว่างการแสดงผลของ Oscilloscope และผลการทดลองจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.3.1 แต่เป็นการแสดงผลการทดลองที่มาจากการใช้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC



(ก)

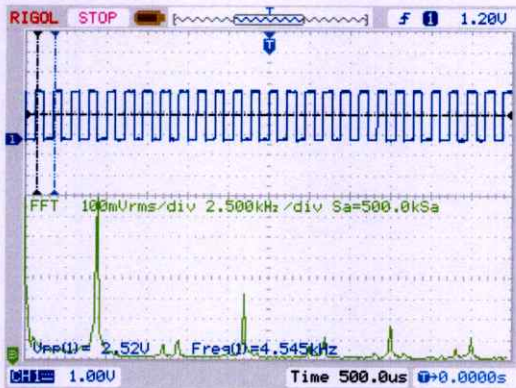


(ข)

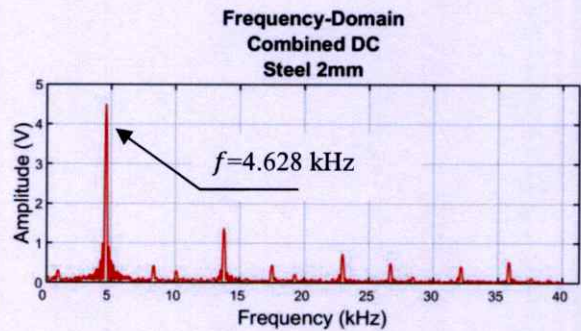
รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 1 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB



(ก)



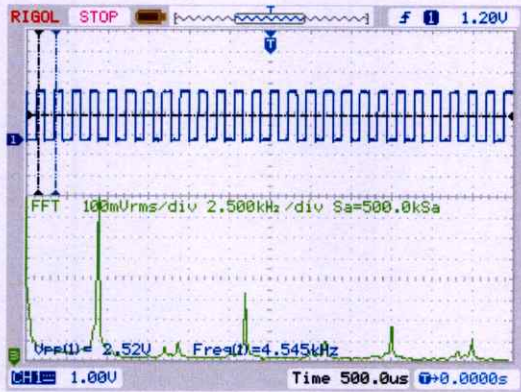
(ข)

รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 2 mm

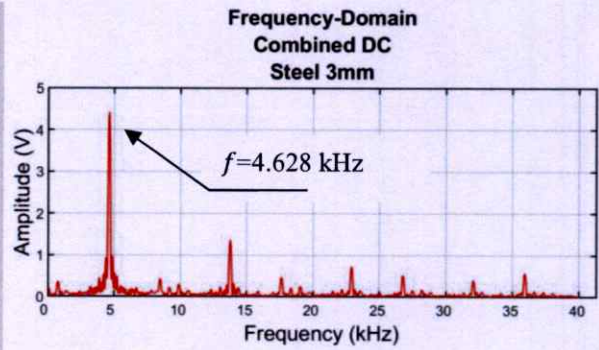
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

เมื่อใช้ระบบการกระตุ้นแบบ Combined DC ทำการวัดวัสดุเหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 1, 2 และ 3 mm พบว่ามีการแสดงผลการทดลองเท่ากันในทุกค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 โดยรูปที่ 4.21 (ก), 4.22 (ก) และ 4.23 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 4.545 kHz แต่รูปที่ 4.21 (ข), 4.22 (ข) และ 4.23 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 4.628 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 4.670 V เปรียบเทียบกับความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับ ความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.676% และ 0.899% ตามลำดับ



(ก)

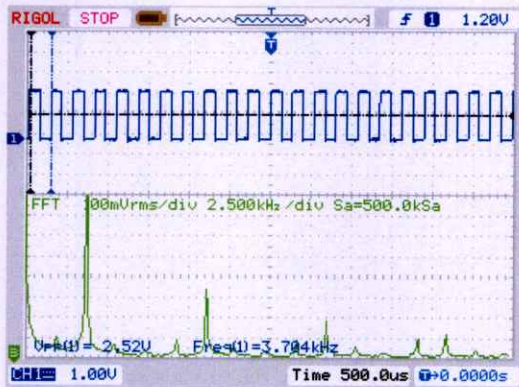


(ข)

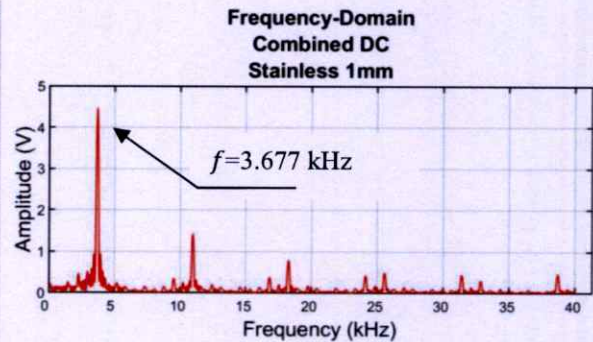
รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุเหล็ก ที่ความหนา 3 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB



(ก)



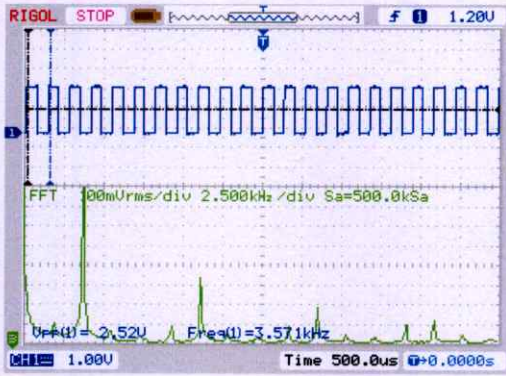
(ข)

รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 1 mm

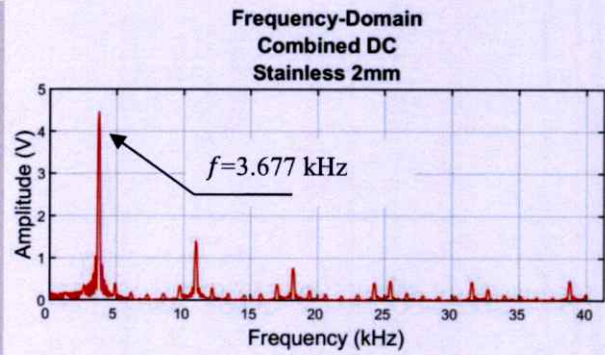
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.24 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 3.704 kHz แต่รูปที่ 4.24 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 3.677 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 3.642 V เปรอ์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.702% และ 0.961% ตามลำดับ



(ก)

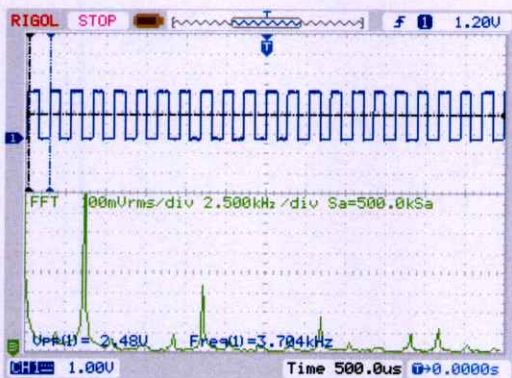


(ข)

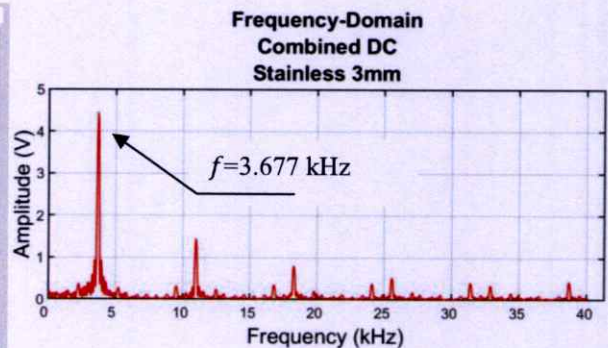
รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 2 mm

- (ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope
- (ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.25 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 3.571 kHz แต่รูปที่ 4.25 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 3.677 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 3.641 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.923% และ 0.988% ตามลำดับ



(ก)



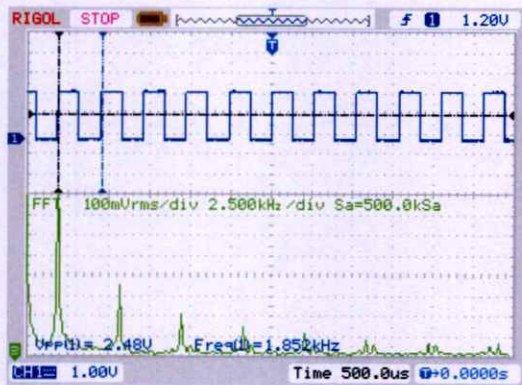
(ข)

รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุสแตนเลส ที่ความหนา 3 mm

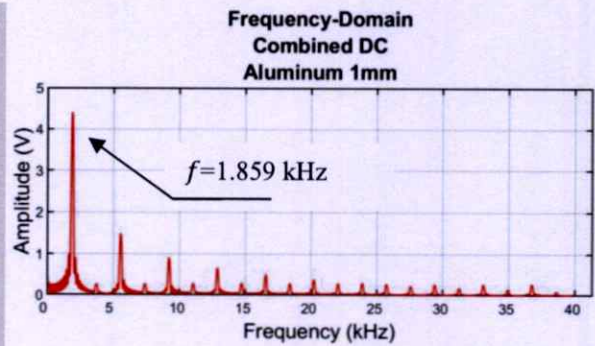
- (ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope
- (ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.26 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 3.704 kHz แต่รูปที่ 4.26 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB เป็น 3.677 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 3.641 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.7302% และ 0.9887% ตามลำดับ



(ก)

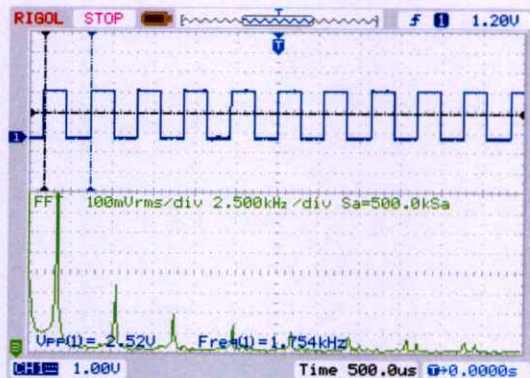


(ข)

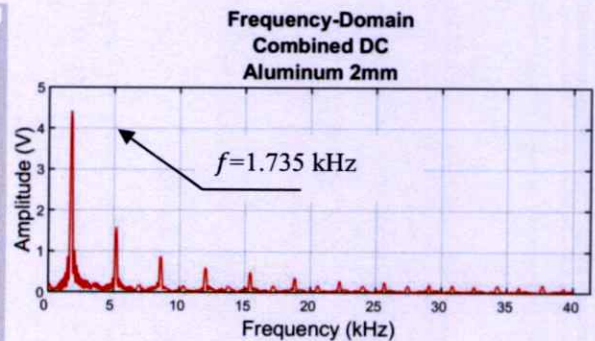
รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 1 mm

- (ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope
- (ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.27 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 1.852 kHz แต่รูปที่ 4.27 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.859 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 1.866 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.750% และ 0.375% ตามลำดับ



(ก)

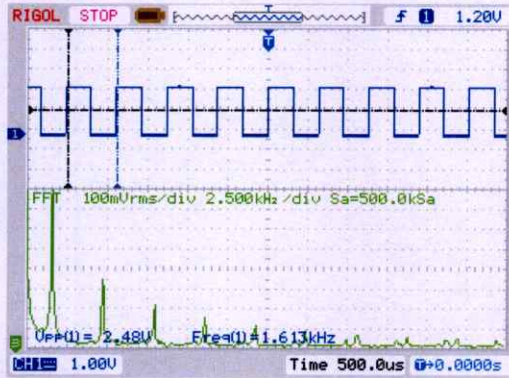


(ข)

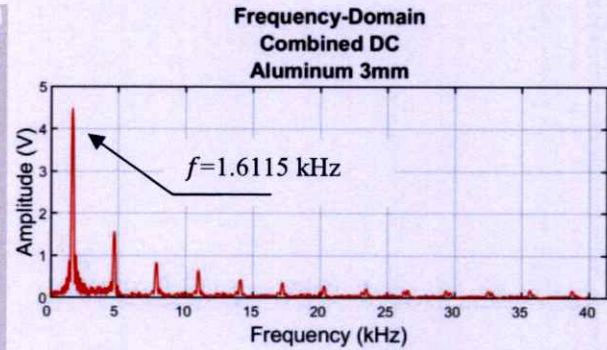
รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 2 mm

- (ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope
- (ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.28 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 1.754 kHz แต่รูปที่ 4.28 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.735 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 1.742 V เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.688% และ 0.402% ตามลำดับ



(ก)



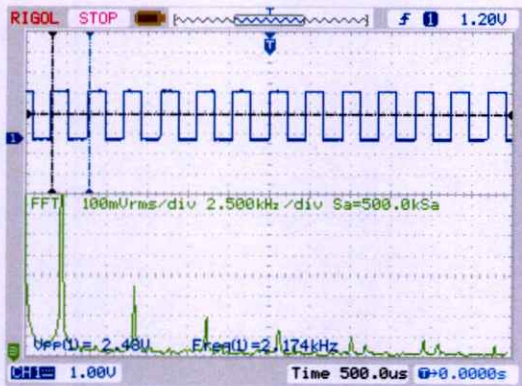
(ข)

รูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนา 3 mm

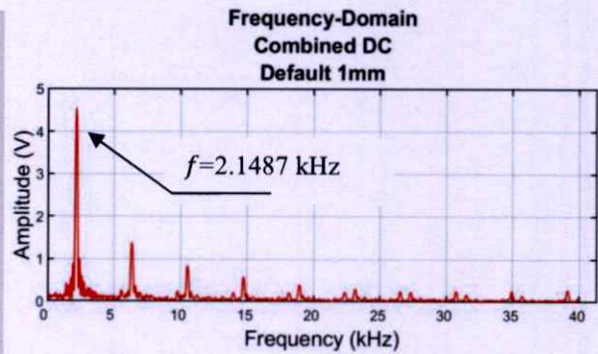
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.29 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 1.613 kHz แต่รูปที่ 4.29 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.6115 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 1.596 V เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 1.0651% และ 0.971% ตามลำดับ



(ก)



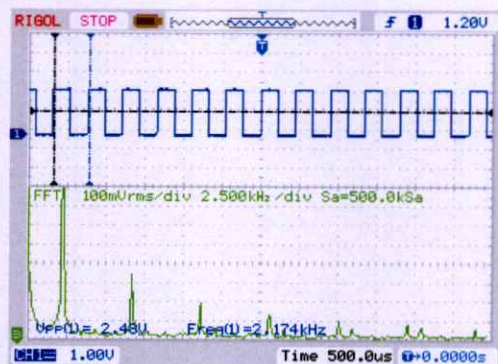
(ข)

รูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 1 mm

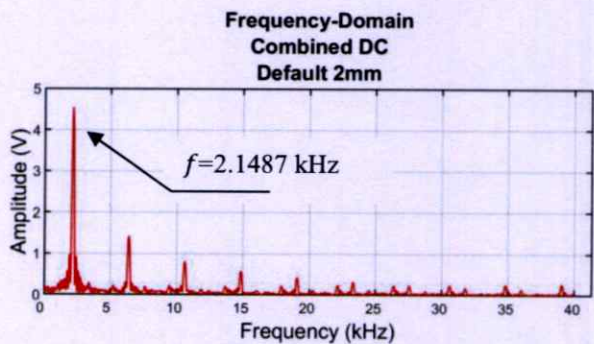
(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.30 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.174 kHz แต่รูปที่ 4.30 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.1487 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.165 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.415% และ 0.753% ตามลำดับ



(ก)



(ข)

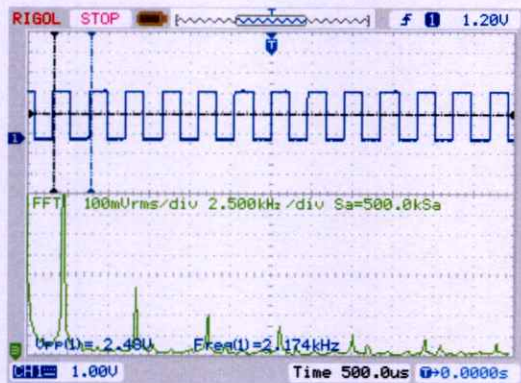
รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 2 mm

(ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope

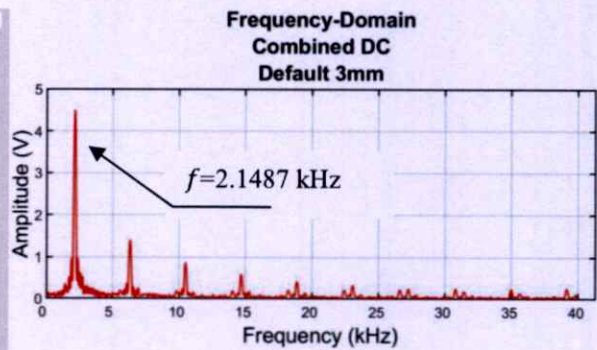
(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

จากรูปที่ 4.31 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.174 kHz แต่รูปที่ 4.31 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.1487 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.166 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.369% และ 0.798% ตามลำดับ



(ก)



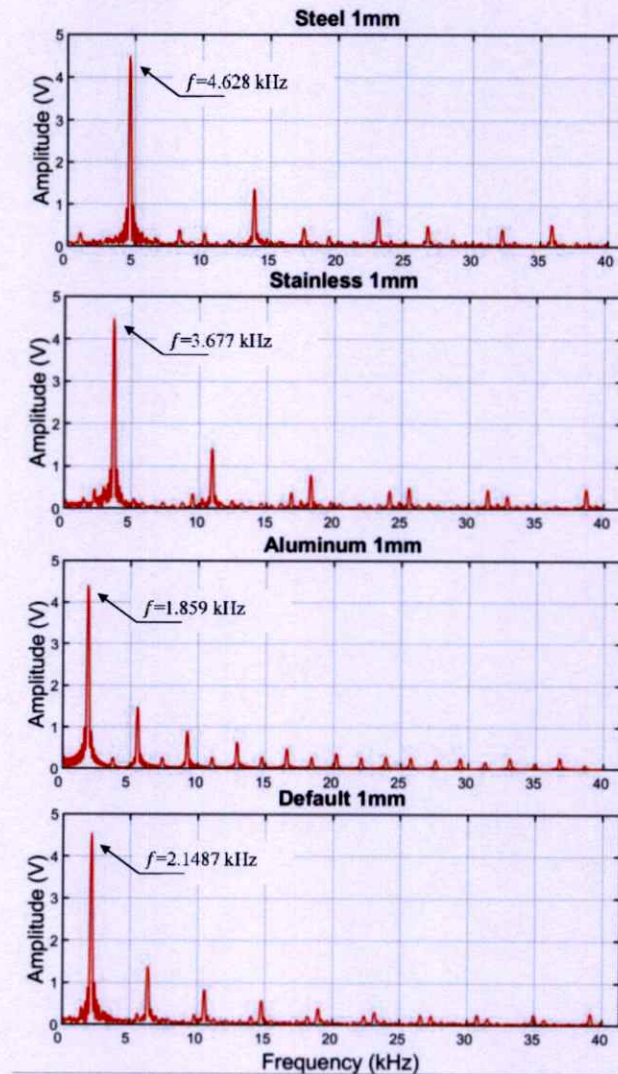
(ข)

รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองของ Combined DC ในรูปแบบโดเมนความถี่ เมื่อไม่มีวัสดุในขณะทำการวัด ที่ความหนา 3 mm

- (ก) ผลการทดลองจาก Oscilloscope
(ข) ผลจากการคำนวณด้วย MATLAB

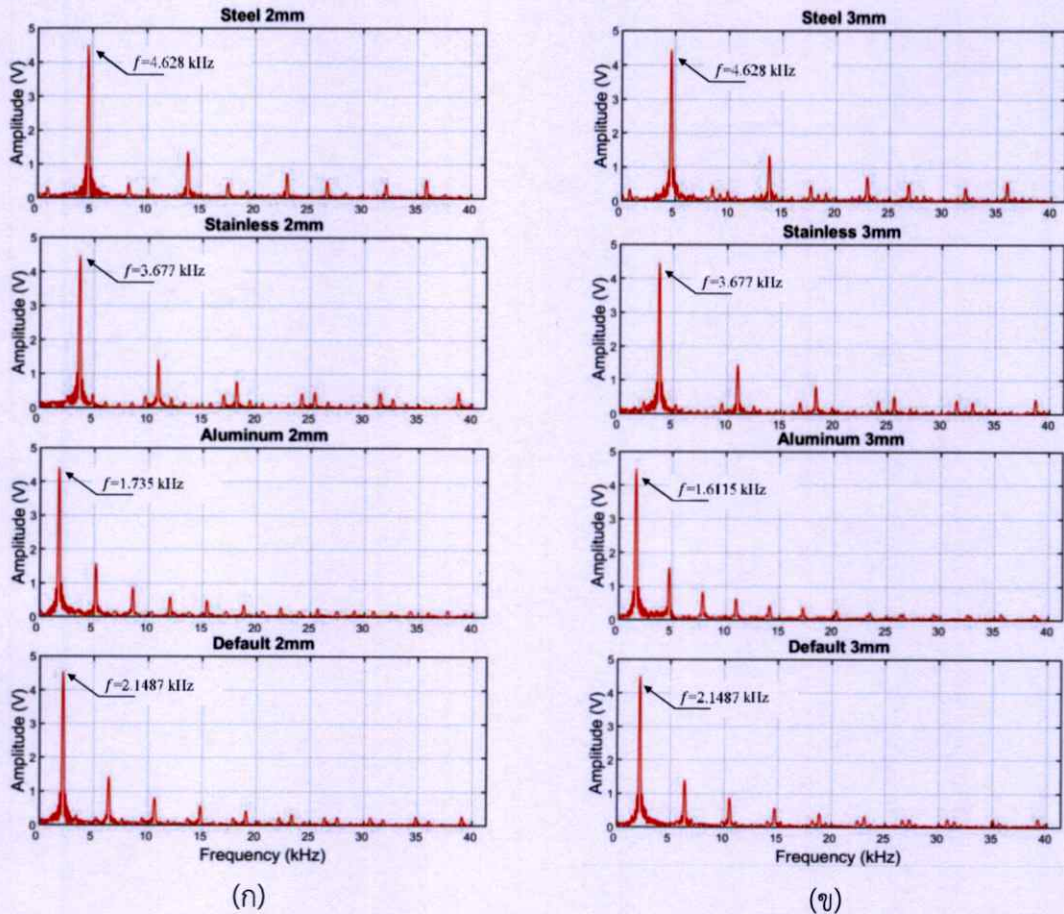
จากรูปที่ 4.32 (ก) ความถี่ของผลการทดลองจาก Oscilloscope คือ 2.174 kHz แต่รูปที่ 4.32 (ข) ความถี่ของผลการทดลองจากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 2.1487 kHz ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor ที่ทำการวัดได้ คือ 2.164 V เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก Hall Effect sensor กับความถี่จาก Oscilloscope และความถี่จากการคำนวณด้วย MATLAB คือ 0.462% และ 0.707% ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งจากการใช้การกระตุ้นขดลวดแบบ Pure DC และ Combined DC เมื่อพิจารณาความถี่ที่แสดงออกมาจาก Oscilloscope ในเกือบทุกผลการทดลอง มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 1% ในขณะที่ความถี่จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% ทั้งหมด กล่าวคือ การใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณและแสดงค่าความถี่ ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริงในการวัด ซึ่งมีความน่าเชื่อถือในการแสดงผลมากกว่าการแสดงผลโดยใช้ Oscilloscope



รูปที่ 4.33 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิดในระบบ Combined DC ที่ความหนา 1 mm

รูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุ ซึ่งแบ่งการเปรียบเทียบเป็นความหนาของวัสดุแต่ละชนิด โดยรูปที่ 4.33, 4.34 (ก) และ 4.34 (ข) ที่ความหนา 1, 2 และ 3 mm ตามลำดับ สามารถแยกผลการตอบสนองของ เหล็ก สแตนเลส อะลูมิเนียม และ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor เมื่อทำการวัดในขณะที่ไม่มีวัสดุได้ รวมไปถึงสามารถแยกผลการตอบสนองในแง่ของความหนาของอะลูมิเนียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พิจารณา โดยใช้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor

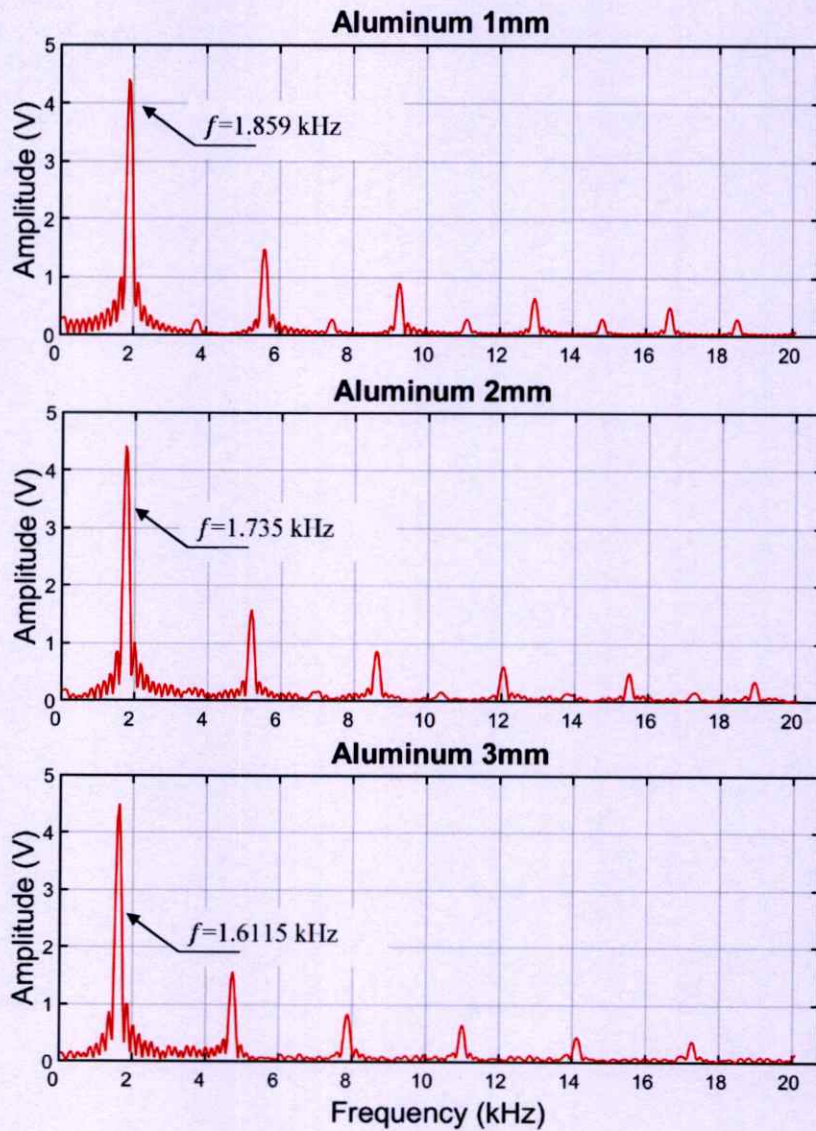


รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุแต่ละชนิด ในระบบ Combined DC

(ก) ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ 2 mm

(ข) ความหนาของวัสดุแต่ละชนิดที่ 3 mm

จากรูปที่ 4.35 เป็นการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของวัสดุอะลูมิเนียม ที่ความหนาแตกต่างกัน โดยทำการขยายสเกลให้เห็นชัดมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถแยกความหนาของอะลูมิเนียมได้อย่างชัดเจน และผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่พิจารณาโดยใช้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบโดเมนความถี่ของอะลูมิเนียมที่มีความหนาต่างกัน
ในระบบ Combined DC

4.4 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบการตอบสนองของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบเมื่อใช้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Pure DC และ Combined DC ทั้งการหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับขดลวดเหนี่ยวนำ ผลการตอบสนองของวัสดุในรูปแบบของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้าของขดลวดเหนี่ยวนำ และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor อีกทั้งแสดงผลการตอบสนองของวัสดุโดยพิจารณาในรูปของโดเมนความถี่ ซึ่งมีการเปรียบเทียบผลการตอบสนองในรูปของโดเมนความถี่จาก Oscilloscope และ MATLAB

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดให้กับ Hall Effect sensor ด้วยวิธีการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำที่แตกต่างกันเพื่อกำหนดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในการทดสอบกับวัสดุโลหะเป็นกรณีศึกษา โดยวิธีแรก ใช้ Pure DC ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ และวิธีที่ 2 คือการใช้ Combined DC โดยได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. การพิจารณาหากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งาน สำหรับการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้เลือกใช้กระแสไฟฟ้าขนาด 0.8 A สำหรับการใช้งานของทั้ง 2 ระบบ การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ เนื่องจากความร้อนสะสมในแกนขดลวดเหนี่ยวนำ อาจส่งผลกระทบต่อ Hall Effect sensor และอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดด้วยเช่นเดียวกัน โดยกระแสไฟฟ้า 0.5 A - 1.0 A มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง ระหว่างสองระบบการทดสอบ อยู่ระหว่าง 2.338% - 4.504%

2. การตอบสนองของวัสดุโดยพิจารณาจากตัวแปรต่างๆ ผลการทดลองของแต่ละตัวแปรได้ทำการเปรียบเทียบการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำระหว่าง Pure DC และ Combined DC ซึ่งเมื่อพิจารณาในด้านของความเข้มสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปของขดลวดเหนี่ยวนำ และใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กบนแกนของขดลวดในขณะที่ทำการวัดวัสดุ โดยใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC ผลการทดลองความเข้มสนามแม่เหล็ก วัสดุเหล็กสามารถตอบสนองต่อผลการทดสอบได้ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น แต่ไม่สามารถแยกแยะผลตอบสนองของวัสดุอื่น ๆ ออกจากกันได้อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับผลการทดลองเมื่อใช้การกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการวัดรวมของระบบ Pure DC และ Combined DC เป็น 0.475% และ 0.483% ตามลำดับ ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ทำการวัดวัสดุ โดยเมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC ผลการตอบสนองของวัสดุแต่ละชนิดไม่เท่าที่ควร แต่เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC วัสดุทั้งสามชนิดมีผลการตอบสนองได้อย่างชัดเจน แต่สแตนเลสมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าในขณะที่ไม่มีวัสดุ และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการวัดรวมของระบบ Pure DC และ Combined DC เป็น 0.382% และ 0.790% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Hall Effect sensor โดยใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC วัสดุเหล็ก และสแตนเลส มีการตอบสนองต่อการทดสอบได้ดี และสามารถแยกผลการตอบสนองออกจากกันได้อย่างชัดเจน แต่ไม่สามารถแยกอะลูมิเนียมออกจากผลการทดลองในขณะที่ไม่มีวัสดุ ในขณะที่เมื่อใช้การกระตุ้นแบบ Combined DC วัสดุทั้งสามชนิดมีผลการตอบสนองแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน รวมไปถึงสามารถแยกผลการตอบสนองในแง่ของความหนาของอะลูมิเนียมได้ อันเนื่องมาจากการเลือกใช้ความถี่ต่ำในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความถี่ของกระแสไหลวน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการวัดรวมของระบบ Pure DC และ Combined DC คือ 0.0697% และ 0.5853% ตามลำดับ

3. การตอบสนองของวัสดุแต่ละชนิด โดยพิจารณาจากโดเมนความถี่ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอการแสดงผลในรูปแบบของโดเมนความถี่ เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างของผลการทดลองได้อย่างชัดเจน ดังนั้น จึงเลือกใช้โปรแกรม MATLAB ในการแสดงผลในรูปแบบของโดเมนความถี่ เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปเปรียบเทียบผลการทดลองจากการวัดจริง และจากการแสดงผลด้วย Oscilloscope โดยพบว่า ผลการตอบสนองของวัสดุเมื่อพิจารณาจากโดเมนความถี่ สามารถแยกผลการตอบสนองต่อชนิดของวัสดุได้เป็นอย่างดี สำหรับการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำแบบ Combined DC รวมไปถึงสามารถแยกความหนาที่แตกต่างกันของอะลูมิเนียมเช่นเดียวกัน ในขณะที่ใช้การกระตุ้นแบบ Pure DC มีเพียงเหล็ก และสแตนเลสที่สามารถตอบสนองต่อผลการทดลองได้ดี แต่ไม่สามารถแยกอะลูมิเนียม และในขณะที่ไม่มีวัสดุออกจากกันได้ โดยการแสดงผลจากโดเมนความถี่นี้มีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Hall Effect sensor และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการวัดรวมของระบบ Pure DC และ Combined DC เป็น 0.081% และ 0.803% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการตอบสนองของวัสดุโลหะนี้ ควรมีตัวอย่างในการทดสอบที่หลากหลายมากกว่า 3 ชนิด รวมไปถึงควรมีการนำเสนอความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้นขดลวดเหนี่ยวนำที่หลากหลาย เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการใช้งานในหลายย่านความถี่ที่เหมาะสมกับการทดสอบ

ในการใช้งานจริง การนำเสนอในรูปแบบของโดเมนความถี่ สามารถใช้ Oscilloscope ในการแสดงผลแบบประมาณค่าเบื้องต้นในรูปแบบของ Fast Fourier transform ได้ หากอยากทราบค่าที่แท้จริง สามารถนำข้อมูลในรูปแบบของโดเมนเวลา และคำนวณค่าความถี่โดยใช้ MATLAB ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. P. C. Rao. **Practical Eddy Current Testing**. Alpha Science International Limited, 2007.
- [2] C. S. Daroczi, J. Szollosy, G. Vertesy, J. Pavo and K. Miya “Electromagnetic NDT Material Testing by Magnetic Field Sensor” **Nondestructive Testing of Materials R. Collins, W.D. Dover, J.R. Bowler and K. Miya, Editors.**, Glasgow : Bell and Bain Ltd, 1995. pp. 75-86
- [3] David J. Harrison “The detection of corrosion in layered structures using transient eddy currents” **Nondestructive Testing of Materials R. Collins, W.D. Dover, J.R. Bowler and K. Miya, Editors.**, Glasgow : Bell and Bain Ltd, 1995. pp. 115-124
- [4] 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, Jan. 2016.
- [5] Witsarut Sriratana and Riichi Murayama “Performance comparison of Hall Effect sensor and EMATs in measurement of specimen with various hole depths” **Proc. SPIE 9234, International Conference on Experimental Mechanics 2013 and Twelfth Asian Conference on Experimental Mechanics** June. 2014.
- [6] S. Suwannasuk, W. Sriratana and R. Murayama “Error Analysis of 4-Crossing Hall Sensor with Frequency Domain in Measurement of Material Imperfection” **Applied Mechanics and Materials.**, vol. 781, pp. 471-474. 2015.
- [7] Gui Yun Tian and Ali Sophian “Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors” **NDT&E International 38 (2005) 77–82** Aug. 2004.
- [8] 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.
- [9] K. Enokizono, Y. Tsuchida and T. Chady “Crack Size and Shape Determination by Moving Magnetic Field Type Sensor” **IEEE Transactions on Magnetics.**, vol. 34, no. 4, July. 1998.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] G. Li, Z. Wei, Z. Qian and X. Ma “Application of ECS in metal material separation based on ANSYS*” **2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**, Oct. 2016.
- [11] M. D. O’Toole, N. Karimian and A. J. Peyton “Fast Classification of Non-magnetic Metal Targets using Eddy Current Based on Impedance Spectroscopy” **2017 IEEE SENSORS** Dec. 2017.
- [12] Denis Sokolov. “**Metal Separator for Copper and Stainless Steel.**” Final Thesis of Savonia University of Applied Sciences, Finland. 2012
- [13] Witsarut Sriratana and Riichi Murayama “Application of Hall Effect sensor : A Study on the Influences of Sensor Placement ” **2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics** July. 2013.
- [14] W. Sriratana, Y. Khwankityotha and S. Sathamsakul “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)** Dec. 2018.
- [15] D. Fletcher, R. Gerber and T. Moore “The Electromagnetic Separation of Non – Ferrous Metals from Each Other” **IEEE Transactions on Magnetics.**, vol. 31, no. 6, July. 1995.
- [16] Raymond A. Serway. **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics.** 3rd ED. United States of America : Saunders College Publishing, Inc. 1992.
- [17] 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. Dec 2018.
- [18] Honeywell Inc. “**Hall Effect sensing and Application.**” [Online]. Available : <https://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-sensors-magneto-resistive-hall-effect-applications-005715-2-en2.pdf>. Nov 2018.
- [19] 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>. Nov 2018.
- [20] Robert B., Louis N. **Electronic Devices and Circuits Theory.** 7nd ED. New Jersey : Prentice Hall, Inc. 2001.
- [21] ปิยะ โควินท์ทวิวัฒน์. **สัญญาณและระบบกับการประยุกต์ใช้โปรแกรม SCILAB.** นครปฐม : เพชรเกษม พรินติ้ง กรุป จำกัด. 2552.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] Hwei P. Hsu, **Schaum's Outline of Theory and Problems of Analog and digital communications**. 2nd ED. New York : The McGraw-Hill Company, Inc. 2003.
- [23] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky and S. Hamid Nawab. **Signals & Systems**. 2nd ED. New Jersey : Prentice Hall, Inc. 1996.
- [24] พิณิจ กำหอม. “DFT และ FFT.” [Online]. Available : http://webstaff.kmutt.ac.th/~ekapon.siw/ENE208/Lectures/dft_fft_pinit.pdf. Nov 2018.
- [25] Analog Device, Inc., 2013. “AD654 Low Cost Monolithic Voltage to Frequency Converter.” [Online]. Available : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad654.pdf>. Nov 2018.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Since 1961
SICE

SICE
Annual
Conference
2018

September 11-14, 2018
Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan



Final Program

A Study on Influences of Metal Materials on Electromagnetic Field Generated by Pure DC and Combined DC

Witsarut Sriratana¹, Vanisara Kaewnamchai^{2†} and Lerdlekha Sriratana³

^{1,2}Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University, Thailand
(Tel: +66(0)-2329-8347; E-mail: ¹witsarut.sr@kmitl.ac.th, ²60601005@kmitl.ac.th, ³lerdlekha_s@ru.ac.th)

Abstract: This paper presents the classification of metals materials by application of Hall Effect sensor based on the eddy current method with non-destructive testing. The electromagnetic field was generated by winding an SWG 22 wire onto the ferrite core to create a solenoid. Two measurement systems are used. One uses a Pure DC supply as the excitation voltage of the electromagnetic field of the Hall Effect sensor system; while the other uses a combination of AC and DC supply, which is amplified through an integrated Class-A amplifier circuit, as the excitation voltage. Three different metal samples, namely, steel, aluminum and stainless steel were used as specimen. Current test conducted to determine the suitable current level revealed that a 0.8 A current is safe to allow tests to be conducted. Results show that the Combined DC system is capable to classify conductive materials, where the Pure DC system lacks in this functionality. The Output voltage of Hall Effect sensor to test with steel, aluminum and stainless steel is 4.68 V, 1.74 V and 3.63 V, respectively. Furthermore, the use of the Combined DC system enables aluminum thickness to be distinguished. The tolerance of the system measuring the materials when using the Pure DC and Combined DC are $\pm 0.0697\%$ and $\pm 0.5853\%$ respectively.

Keywords: Hall Effect sensor, Metal materials, Electromagnetic field, Classification, Measurement, Instrumentation

1. INTRODUCTION

Non-destructive testing (NDT) is an effective technique used to test imperfections on the specimen. One of the most popular NDT technique is to use eddy currents as a means to probe the specimen. Many works exist in the literature on the various applications of the eddy current testing. Ref [1] gives an overview of Non-destructive testing techniques and outlining the use of eddy current in measuring the thickness, size and cracking shape of the material.

The use of a Hall Effect sensor in Non-destructive testing applications has many advantages including high durability, measurement performances and low cost. These features have attracted many researchers to develop various NDT techniques based on this type of sensor. Fernandez et al. [2] demonstrated the effects of heat on the Hall Effect sensor measurements with the electromagnetic field of the excited coil for temperature estimation, where the onset of heat decreases the performance of the machine. Inthawatkul et al. [3] studied the metal particles through the use of the Hall Effect sensor under temperature conditions.

This research aims to classify metal materials through the usage of a Hall Effect sensor. Specifically, a very low signal is used which thereby requires the use of a Class-A amplifier by direct current with stimulation with frequency (Combined DC) to enable the Hall Effect sensor to classify materials. The advantages of Class-A amplifier circuit are simple to design and low cost than other amplifier circuit class. [4]

2. PRINCIPLES

2.1 Generation of Electromagnetic Field

The measurement of materials requires induced voltage on the specimen, which according to the eddy current, is the electromagnetic field (B). The electromagnetic field generated by winding a copper wire (SWG 22) onto the ferrite core, namely Solenoid, as shown in Figure 1. The north pole is the electromagnetic field ejected from the end of the coil and where the electromagnetic field rush into another side is the south pole. The magnetic field is formed around the solenoid coil but at the centre of the solenoid coil's electromagnetic field has a maximum value. When increasing the current (I) or the number of turns of the coil (N), the magnetic flux density is increasing too as shown in Eq. (1). As well as the induced magnetic field (L) in the solenoid coil if increasing the number of turns and cross-sectional area of the core (A) the inductance will increase proportionately, as shown in Eq. (2). [5]

$$B_{Solenoid} = \frac{\mu NI}{l} \quad (1)$$

$$L_{Solenoid} = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0, \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

where μ is the permeability of the medium (H/m)
 μ_r is the relative permeability
 μ_0 is the permeability of free space (H/m)

In this research, the solenoid coil winding with copper wire (SWG 22) length (l) 3.5 cm., radius (r) 1.3 cm. bound by 200-turns. The inductance of the solenoid coil is 1.1541 mH.

[†] Vanisara Kaewnamchai is the presenter of this paper.

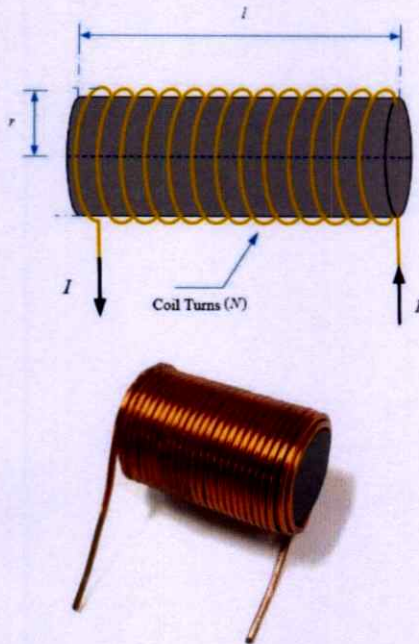


Fig.1 The structure and pattern of winding a wire of the solenoid coil.

Because of these factors, the conductor materials have different conductivity and magnetic permeability, so the frequency needs to be adjusted to suit measurements. The intensity of the eddy current in the form of depth (δ) that the electromagnetic field can be measured depending on stimulation frequency (f), which is shown in Eq.(3). [6]

$$\delta = \frac{l}{\sqrt{\pi f \mu_s \sigma}} \quad (3)$$

where μ_s is the permeability of a sample (H/m)
 σ is the conductivity of a sample (S/m)

2.2 Hall Effect Sensor

In the classification of materials, the Linear Hall Effect sensor ICs A1301 is used to achieve the required classification. This achievement is because the Hall Effect sensor consists of P type and N type semiconductors, so the output voltage from the Hall Effect sensor (V_H) is proportional to the electromagnetic field, as shown in Eq.(4). The intensity of the magnetic field (B) is related to Lorentz force (F) when charged on the magnetic field (q) at the angle (θ) moving with a velocity (v), as shown in Eq.(5).[7]

$$V_H = \frac{R_H}{d} IB \quad (4)$$

$$F = qvB \sin \theta \quad (5)$$

where R_H is Hall coefficient ($\Omega \cdot \text{cm} / \text{G}$)

d is the thickness of the Hall generator (mm)

I is the constant current (mA)

3. ELECTROMAGNETIC FIELD SYSTEMS

When the electrical current is exerted to the solenoid coil, the magnetic flux density is highest at the centre's core of the coil. This magnetic flux density is exerted onto the Hall Effect sensor installed near the coil in order to make the results more obvious.

3.1 Electromagnetic Field System With Pure DC

The DC power supply to the measuring instrument by the power supply input voltage is 3 V, the current is 0.8 A. This voltage and current is supplied to the measuring system that consists of a solenoid coil and Hall Effect sensor. The measurement is done by placing the specimen on the measurement device containing solenoid coil, which is installed in the middle of the device. The Hall Effect sensor is placed on top of the solenoid core to detect the magnetic field. Figure 2 shows the measuring unit.

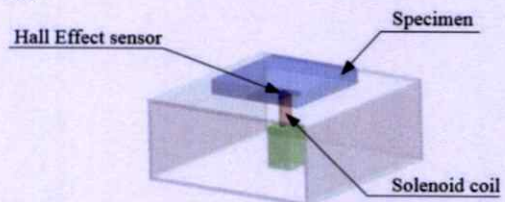


Fig.2 The measuring unit.

The output voltage of Hall Effect sensor is then sent to a microcontroller for analog-to-digital conversion (ADC) and processed on a workstation. The block diagram of the measuring system using Pure-DC is shown in Figure 3.

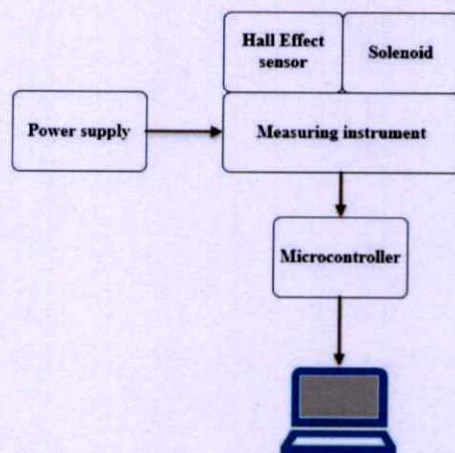


Fig.3 The processing of measurement and analysis system used the measuring instrument with Pure DC.

3.2 Electromagnetic Field System With Combined DC

The coordination of direct current and alternating current through the Class-A amplifier circuit by the power supply input voltage is 3 V, the frequency is 260 Hz and the current is 0.8 A, to the measuring unit of Figure 2. As well as Pure DC measurement system, the output voltage of Hall Effect sensor is sent to a microcontroller for analog-to-digital conversion (ADC) and processed on a workstation and displayed on a workstation. The measuring system of Combined DC diagram is shown in Figure 4.

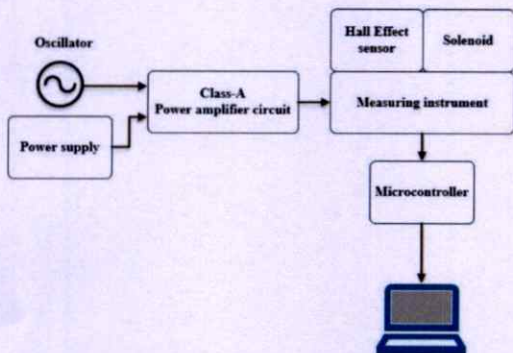


Fig.4 The processing of measurement and analysis system used the measuring instrument with Combined DC.

Note that the Hall Effect sensor measurement is sensitive to the presence of eddy current on the conductor material, hence to ensure correctness and accuracy of the measurements, calculation of the eddy current intensity when using the Class-A amplifier through the use of Eq.(3) must be conducted.

4. EXPERIMENTAL OF SYSTEM WITH PURE DC AND COMBINED DC

This section compares the experimental measurements of each material specimen through the use of Pure DC and Combined DC methods. Variables of interest include the temperature of the solenoid, the electromagnetic field, and the applied current.

4.1 Experimental in Term of Temperature

Before conducting the experiments of measuring the materials, temperature analysis of the heating coil using the thermistor NTC type installed on the top of the solenoid core is conducted. This heat occurred as a solenoid core loss and thus a proper current usage level must be selected to prevent damage to the Hall Effect sensor. The temperature analysis is divided into two parts: the heat of the coil caused by the DC power supply (Stimulating the Pure DC) and the coordination of DC and AC through the Class-A amplifier circuit (Combined DC). Both of experimental have the current are 0.5 A, 1 A, 1.5 A and 2 A, respectively.

The test is conducted 3 times with one hour break between each trial. The results showed that the proper current is 0.5 A - 1 A due to the heat of current range is not high to affect the Hall Effect sensor when used for a long time, as shown in Figure 5 and Figure 6.

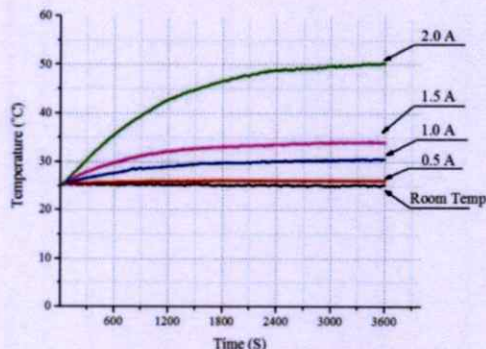


Fig.5 The temperature of the coil when using excitation with Pure DC.

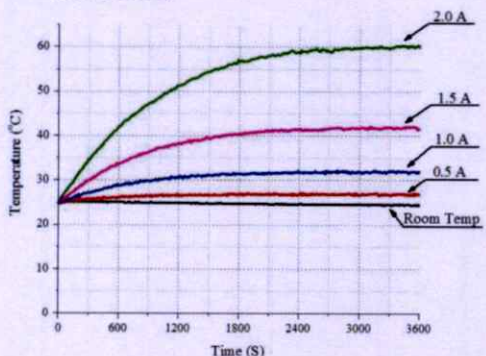


Fig.6 The temperature of the coil when using excitation with Combined DC.

However, in practice the excitation current used in the experimental designs is 0.8 A. This current level is sufficiently high to enable generation of magnetic field levels that allows proper measurements while maintaining low levels of magnetic core losses.

4.2 Experimental in Term of Electromagnetic Field

Figure 7 and 8 show the results of applying the electromagnetic field to each material with equal thickness of 3 mm using Exttech Instrument model SDL900, which is a standard magnetic flux measurement, to measure the flux of each material.

Considering the intensity of the electromagnetic field from excitation with Pure DC and Combined DC, it is found that for both measuring apparatuses, the electromagnetic flux passing through the steel is approximately 33% greater than those of aluminum, stainless steel and the control material. This result show that although the electromagnetic field based measuring systems are capable of detecting the steel, it cannot adequately classify the aluminum and stainless steel

since there are only 3% differences between the electromagnetic field readings of aluminum and stainless steel.

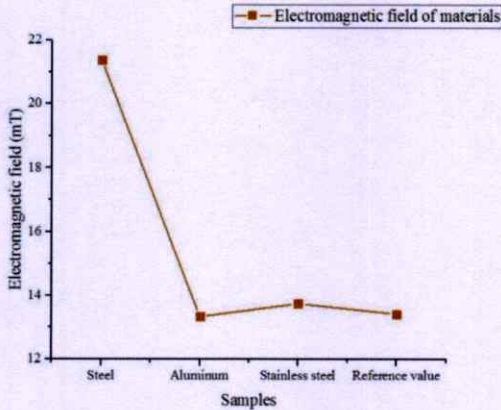


Fig.7 The electromagnetic field of each material by using excitation with Pure DC.

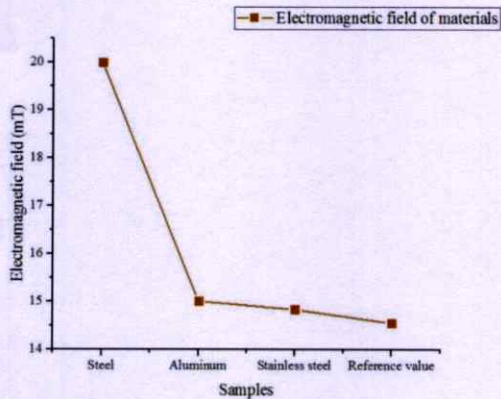


Fig.8 The electromagnetic field of each material by using excitation with Combined DC.

4.3 Experimental in Term of Current

From considering the intensity of the electromagnetic field, the values are similar that can not be separated the materials. Therefore, considering the current of each material, figure 9 and figure 10 is an example of measured current with a thickness of 3 mm of each material.

Figure 9 shows the current measurements of the materials through the use of the Pure DC system. The currents have similar values at approximately 0.81 A, hence the Pure DC approach is incapable of classifying the materials. This inability also suggests that the Pure DC system does not have enough resolution to adequately distinguish between the currents of the materials.

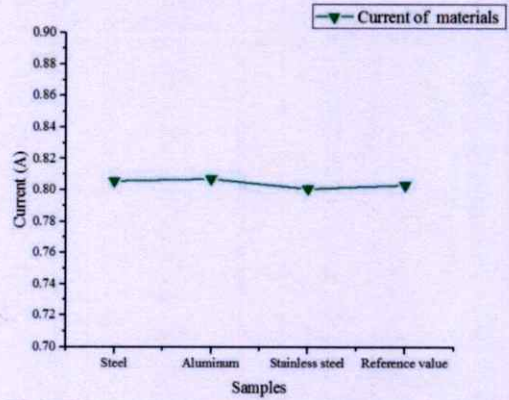


Fig.9 The current measurement when measured each material, by using excitation with Pure DC.

Figure 10 shows the current measurements from the solenoid coil using the excitation with the Combined DC. The amount of current passing through steel is poorer than those of aluminum, stainless steel and the reference material. Specifically, the current difference between steel and the default sample is approximately 0.09 A (11.25%), whereas the current differences between aluminum and stainless steel to the reference value are approximately 0.01 A (1.2%). These small current differences, particularly between that of stainless steel and the reference value, show that although the current based measuring systems are capable to detect the steel, it cannot adequately classify the aluminum and stainless steel.

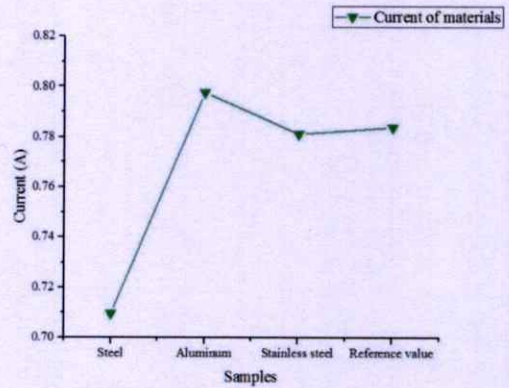


Fig.10 The current measurement when measured each material, by using excitation with Combined DC.

5. THE CLASSIFICATION OF METAL MATERIALS

The experiments of Section 4.2 and 4.3 showed that the intensities of electromagnetic field and the current alone are not sufficient to classify the materials. This section thus considers the Hall Voltage output from the specimens. In this respect, specimens of steel, aluminum and stainless steel specimen, each with thicknesses of 1 mm, 2 mm and 3 mm respectively, are stimulated with Pure DC and Combined DC.

Figure 11 shows the Hall Voltage responses upon stimulation with the Pure DC. It is seen in this figure that steel and stainless steel will be successfully classified. Note that the Hall Voltage response from aluminum is no different from the normal output voltage of the Hall Effect sensor when there is no material.

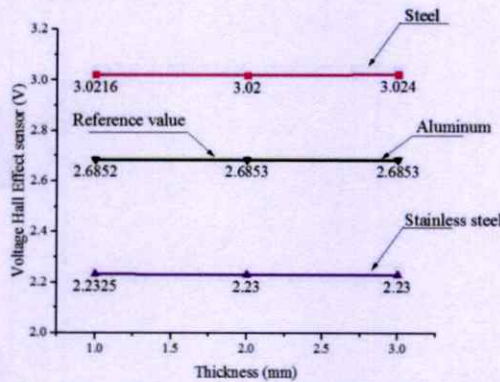


Fig.11 The output voltage of Hall Effect sensor when measured each material, by using excitation with Pure DC.

Figure 12 shows the Hall Voltage responses upon excitation with the Combined DC system. Note that for this system, there exists at least a 15% difference between the Hall Voltage responses of the aluminum and the default specimen. This revelation means that the Combined DC system now contains the ability of classifying all the three metal samples, as well as aluminum thicknesses, where the Pure DC has lacked this capability.

Note also that the steel specimen has a relative permeability value of $\mu = 6.3 \times 10^{-3}$ (H/m) and $\sigma = 1.0298 \times 10^7$ (S/m) at a frequency of 260 Hz. The size of the depth is calculated from Eq.(3) to be 0.137 mm, so that for the output voltage of Hall Effect sensor of the thickness 1 mm, 2 mm and 3 mm there is no difference. Nonetheless the calculated depth of measurable magnetic field for stainless steel from Eq.(3) was 0.84 mm, while the calculated measurable depth of the magnetic field for aluminum was 5 mm. Furthermore, in Fig.12 the aluminum line shows a linearly decreasing trend as the thickness of the aluminum specimen increases. This result shows that the graph is inversely proportional to one another. This inverse slope in the aluminum line also

serves to confirm the fact that the Combined DC system has the capability of classifying the aluminum thickness.

The overall error of Pure DC measurement system is $\pm 0.0697\%$ and Combined DC is $\pm 0.5853\%$

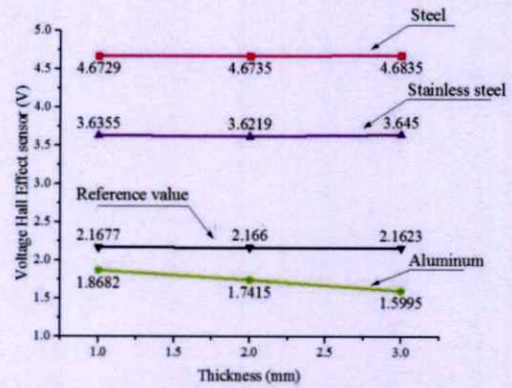


Fig.12 The output voltage of Hall Effect sensor when measured each material, by using excitation with Combined DC.

Table 1 summarizes the advantages and disadvantages of DC power supply (Pure DC) to the coil and the DC power supply to the coil through Class-A amplifier circuit (Combined DC).

Table 1 Advantages and disadvantages of usage by excitation with Pure DC and Combined DC.

	Pure DC	Combined DC
Temperature of solenoid coil	Good	Poor
Classification of materials	Poor	Good
Measurement the depth of the material	Poor	Good
The complexity of the circuit	Good	Good
The cost	Good	Good

6. CONCLUSION

This paper has presented a Hall-Effect sensor based non-destructive testing methodology for the classification of metal materials. Specifically, two measurement systems are used. One involves the use of a Pure DC voltage as the excitation voltage of the electromagnetic field of the Hall Effect sensor system, the other involves the use of a combination between a DC voltage and an AC voltage as the excitation voltage to the electromagnetic field of the Hall Effect sensor system. Current test was first conducted to determine a suitable current level for applying the voltages. This current level was experimentally determined to be 0.8 A. Results show

that the application of the Pure DC system to the solenoid is incapable of classifying stainless steel and aluminum due to resolution inadequacy. However, when the Combined DC system is used, metal materials including normal steel, aluminum and stainless steel are adequately identified. In addition, considering the application, the output voltage of the Hall Effect sensor when using excitation Combined DC suitable for using classification of material including the frequency used in this research can separate the thickness of the aluminum.

REFERENCES

- [1] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, and E. Vazquez-Sanchez, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525-2565, Mar, 2011. doi:10.3390/s110302525
- [2] Daniel Fernandez, Doosoo Hyun, and Yonghyun Park, "Permanent Magnet Temperature Estimation in PM Synchronous Motors Using Low-Cost Hall Effect Sensors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, VOL. 53, NO. 5, September /October 2017, pp. 4515 – 4525.
- [3] I. Inthawatkul, W. Sriratana, S. Sathamsakul, "Measurement of Metal Particles in Oil Lubricant using Hall Effect Sensor Under Temperature Conditions", *The Society of Instrument and Control Engineers (SICE Annual Conference 2017)*, Kanazawa, September 19-22, 2017.
- [4] R. Boylestad and L. Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory", Seventh Edition Prentice-Hall, Inc, New Jersey, pp.679-692.
- [5] Martin A. Plonus, "Applied Electromagnetics", TICS, International Edition, McGraw-Hill Education-Europe, New York, 01 January 1980.
- [6] Z. Song, T. Yamada, H. Shitara and Y. Takemura, "Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing", *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, Vol.3, No.12, December 2011, pp.546-550. doi:10.4236/jemaa.2011.312082
- [7] S. Sokjabok, W. Sriratana, S. Sathamsakul, "Analysis of Liquids Conductivity Using Hall Effect Sensor Based on Electromagnetic Field Properties", *The Society of Instrument and Control Engineers (SICE Annual Conference 2017)*, Kanazawa, September 19-22, 2017.

15:55-16:10	ThC02.4	<i>Operation Optimization Method of Microgrid Using Multi-Agent Control</i> , pp. 975-978. Tran, Huynh Ngoc (Toyota Tech. Inst), Tanabe, Shinichi (Toyota Tech. Inst), Nankiyo, Tatsuo (Toyota Tech. Inst), Kawanishi, Michihiro (Toyota Tech. Inst), Sato, Akinori (Toyota Motor Corp)
16:10-16:25	ThC02.5	<i>Parallel Multi-Swarm Canonical Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization for Voltage and Reactive Power Control</i> , pp. 979-982. Yoshida, Hotaka (Meiji Univ), Fukuyama, Yoshikazu (Meiji Univ)
16:25-16:40	ThC02.6	<i>Simultaneous Regulation of Multiple Flow Rates for Power Generation Control of OTEC Plant Using Double-Stage Rankine Cycle</i> , pp. 983-988. Matsuda, Yoshitaka (Saga Univ), Ouchida, Riku (Saga Univ), Sugi, Takenao (Saga Univ), Goto, Satoru (Saga Univ), Morisaki, Takafumi (Saga Univ), Yasunaga, Takeshi (Saga Univ), Ikegami, Yasuyuki (Saga Univ)
ThC03 Conference Room 2		Analytical Measurement (Regular Session)
Chair: Teramoto, Kenbu		Saga Univ
Co-Chair: Mizuno, Takeshi		Saitama Univ
15:10-15:25	ThC03.1	<i>Research on Data Processing Method of Large-Scale Helical Gear On-Machine Measurement with Scanning Probe</i> , pp. 989-994. Hai, Lixin (Xi'an Univ. of Tech), Li, Yan (Xi'an Univ. of Tech)
15:25-15:40	ThC03.2	<i>Fault Evolution Parameter Extraction Method Faced to Wind Turbine Gearbox System</i> , pp. 995-1000. Jiang, Zhanglei (Beijing Information Science & Tech. Univ)
15:40-15:55	ThC03.3	<i>Trajectory Control in Mass Measurement System Using Relay Feedback of Velocity and Restoring Force Compensation</i> , pp. 1001-1004. Mizuno, Takeshi (Saitama Univ), Nishizawa, Kelsuke (Saitama Univ), Takasaki, Masaya (Saitama Univ), Ishino, Yuji (Saitama Univ), Hara, Masayuki (Saitama Univ), Yamaguchi, Daisuke (Saitama Univ)
15:55-16:10	ThC03.4	<i>A Study on Influences of Metal Materials on Electromagnetic Field Generated by Pure DC and Combined DC</i> , pp. 1005-1010. Sriratana, Witsarut (King Mongkut's Inst. of Tech. Ladkrabang), Kaewnamchai, Vanisara (King Mongkut's Inst. of Tech. Ladkrabang), Sriratana, Lerdlekha (Ramkhamhaeng Univ)
16:10-16:25	ThC03.5	<i>Viscosity Measurement Using a Dielectric Sensor with Lateral Motion to Incite Wave Surface Undulations</i> , pp. 1011-1014. Abe, Takeshi (Tokyo Gas Engineering Solutions Corp), Behrens, Michael (Tokyo Inst. of Tech), Cross, Jeffrey Scott (Tokyo Inst. of Tech)
16:25-16:40	ThC03.6	<i>Application to Prediction of Fiber Mixture Ratio by Convolution Neural Network</i> , pp. 1015-1019. Wada, Takuya (Shinshu Univ), Koyama, Shouhei (Shinshu Univ), Ishizawa, Hiroaki (Shinshu Univ)
16:40-16:55	ThC03.7	<i>Dimensional Analysis for Vehicle Dynamic Experiments</i> , pp. 1020-1022. Park, Yeayoung (Pusan National Univ), Ahn, Changsun (Pusan National Univ)
ThC04 Conference Room 3		Computational Intelligence: New Trends and Applications (Organized Session)
Chair: Nobukawa, Sou		Chiba Inst. of Tech
Co-Chair: Kondo, Nobuhiko		Tokyo Metropolitan Univ
Organizer: Hatanaka, Toshiharu		Osaka Univ
Organizer: Mitsukura, Yasue		Keio Univ
Organizer: Nobukawa, Sou		Chiba Inst. of Tech
15:10-15:25	ThC04.1	<i>Risk Analysis of Financial Time-Series Using Multi-Scale Entropy (I)</i> , pp. 1023-1028. Nobukawa, Sou (Chiba Inst. of Tech), Sekine, Tomoaki (Chiba Inst. of Tech), CHIBA, Masaru (Fukui Univ. of Tech), Yamanishi, Teruya (Fukui Univ. of Tech), Nishimura, Haruhiko (Univ. of Hyogo)
15:25-15:40	ThC04.2	<i>Wind Prediction Performance of Complex Neural Network with ReLU Activation Function (I)</i> , pp. 1029-1034. Tachibana, Kanta (Kogakuin Univ), Otsuka, Kentaro (Kogakuin Univ)
15:40-15:55	ThC04.3	<i>A Study on Vision-Based Behavior Learning of Real Mobile Robot by Deep Q-Network (I)</i> , pp. 1035-1038. Kato, Daichi (National Inst. of Tech. Matsue Coll), Sasaki, Hikaru (Nara Inst. of Science and Tech), Horiuchi, Tadashi (National Inst. of Tech. Matsue Coll), Aodai, Toshiyuki (National Inst. of Tech. Matsue Coll)
15:55-16:10	ThC04.4	<i>General Swarm Model for Black-Box Function Optimization with Inertia and Random Factors (I)</i> , pp. 1039-1042. Xiao, Heng (Osaka Univ), Hatanaka, Toshiharu (Osaka Univ)
16:10-16:25	ThC04.5	<i>A Mobile Application for Estimating Emotional Valence Using a Single-Channel EEG Device (I)</i> , pp. 1043-1048. Ogino, Mikito (Dentsu ScienceJam Inc), Mitsukura, Yasue (Keio Univ)
16:25-16:40	ThC04.6	<i>Estimation of Learning Process Based on Bayesian Network Using LMS Log Data (I)</i> , pp. 1049-1050. Kondo, Nobuhiko (Tokyo Metropolitan Univ), Hatanaka, Toshiharu (Osaka Univ)
ThC05 Conference Room 4		Decentralized, Networked, and Multi-Agent Discrete-Event Systems (Organized Session)
Chair: Shu, Shaolong		Tongji Univ
Co-Chair: Yin, Xiang		Shanghai Jiao Tong Univ
Organizer: Cai, Kai		Osaka City Univ
15:10-15:25	ThC05.1	<i>A Framework for Opacity in Networked Supervisory Control Systems (I)</i> , pp. 1051-1052. Yin, Xiang (Shanghai Jiao Tong Univ)
15:25-15:40	ThC05.2	<i>Decentralized Opacity Enforcement in Discrete Event Systems Using Supervisory Control (I)</i> , pp. 1053-1058. Tong, Yin (Xidian Univ. China / Univ. of Cagliari, Italy), Cai, Kai (Osaka City Univ), Giua, Alessandro (Univ. of Cagliari)
15:40-15:55	ThC05.3	<i>Online Supervisory Control of Multi-Agent Discrete-Event Systems with Warehouse Automation Case Study (I)</i> , pp. 1059-1062.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาววนิศรา แก้วนามชัย
วัน เดือน ปีเกิด	28 พฤศจิกายน 2537
ที่อยู่	28/523 หมู่ 2 ตำบลคลองสาม อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
เบอร์ติดต่อและอีเมล	+66 84-709-6469, vanisara.poy52@gmail.com 60601005@kmitl.ac.th
ประวัติการศึกษา	2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญด้าน	เซนเซอร์และทรานส์ดิวเซอร์

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Witsarut Sriratana, **Vanisara Kaewnamchai**, Lerdlekha Sriratana “A Study on Influences of Metal Materials on Electromagnetic Field Generated by Pure DC and Combined DC” 2018 57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Nara, Japan , pp. 1005-1010