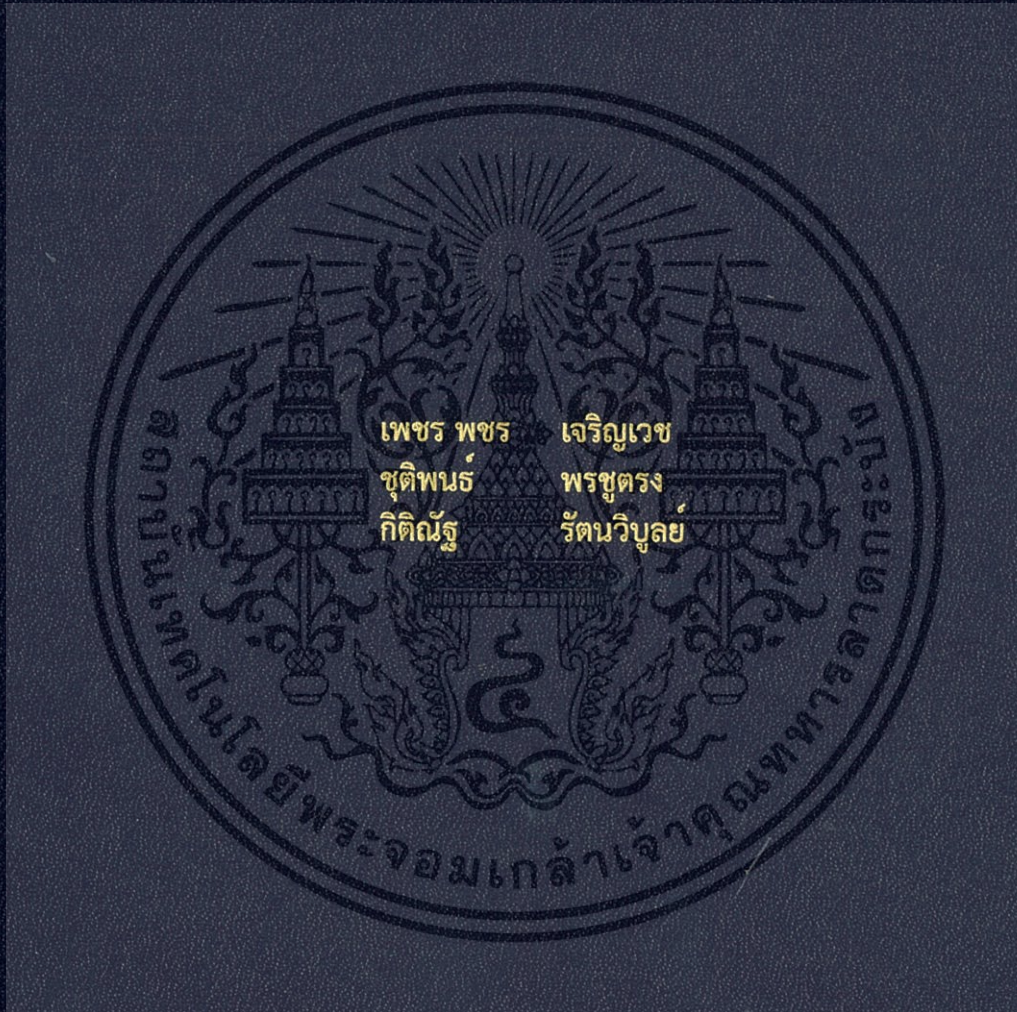


การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อการจำแนกชนิดของวัสดุไดอิเล็กตริกบนพื้นฐานของ  
ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

CLASSIFICATION OF DIELECTRIC MATERIALS USING MICROWAVE  
BASED ON HALL EFFECT SENSOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อการจำแนกชนิดของวัสดุไดอิเล็กทริกบนพื้นฐานของ  
ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

CLASSIFICATION OF DIELECTRIC MATERIALS USING MICROWAVE  
BASED ON HALL EFFECT SENSOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CLASSIFICATION OF DIELECTRIC MATERIALS USING MICROWAVE  
BASED ON HALL EFFECT SENSOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญาานิพนธ์      การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อการจำแนกชนิดของวัสดุไดอิเล็กตริกบนพื้นฐาน  
ของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์  
CLASSIFICATION OF DIELECTRIC MATERIALS USING MICROWAVE  
BASED ON HALL EFFECT SENSOR

นักศึกษาผู้จัดทำ      นายเพชร พชร เจริญเวช      รหัสนักศึกษา 56010891  
                                 นายชุตินันท์ พรชุตตรง      รหัสนักศึกษา 56010320  
                                 นายกิตติณัฐ รัตน์วิบูลย์      รหัสนักศึกษา 56011239

ปริญญา      วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา      วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา      2559

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุธรรม สัทธรรมสกุล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อการจำแนกชนิดของวัสดุไดอิเล็กตริกบนพื้นฐานของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์	
	CLASSIFICATION OF DIELECTRIC MATERIALS USING MICROWAVE BASED ON HALL EFFECT SENSOR	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายเพชร พชร เจริญเวช	รหัสนักศึกษา 56010891
	นายชุตินันธ์ พรชุตตรง	รหัสนักศึกษา 56010320
	นายกิติณัฐ รัตนวิบูลย์	รหัสนักศึกษา 56011239
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุธรรม สัทธรรมสกุล	
ปีการศึกษา	2559	

### บทคัดย่อ

การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อจำแนกชนิดของวัสดุไดอิเล็กตริกบนพื้นฐานของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ด้วยการวิเคราะห์แรงดันเออร์ทพของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ซึ่งในการศึกษาคั้งนี้เป็นกรนำโมดูลวัดกระแสที่อยู่บนพื้นฐานของฮอลล์เอฟเฟกต์เพื่อรับค่ากระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์ การรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นไมโครเวฟจะใช้เซนเซอร์ในการรับคลื่น และเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งโมดูลวัดกระแสที่ใช้จะมีไอซีวัดกระแสเบอร์ ACS712 ค่าที่ได้จะถูกเก็บโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino) ผ่านการเขียนโปรแกรม ต่อมาในการทดลองได้มีการนำวัสดุมาคั้งระหว่างเซนเซอร์และคลื่นไมโครเวฟที่ถูกปล่อยออกมาโดยวัสดุที่ใช้ได้แก่ แผ่นไม้ แผ่นอะคริลิก และเซรามิกส์ ทำให้ค่ากระแสที่ออกจากเซนเซอร์มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามวัสดุที่ใช้ในการทดลอง จากการทดลองผลปรากฏว่าสามารถแยกวัสดุที่นำมาทดลองได้ และเห็นได้ชัดถึงระยะของการวางวัสดุจะมีผลต่อการจำแนกด้วย

Thesis Title	CLASSIFICATION OF DIELECTRIC MATERIALS USING MICROWAVE BASED ON HALL EFFECT SENSOR	
Authors	Mr.Petch Pachara	Jareanwach
	Mr.Chutipon	Pornchutrong
	Mr.Kitinut	Rattanaiviboon
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Witsarut Sriratana	
Thesis Co-Advisor	Asst.Prof.Sutham Satthamsakul	
Year	2016	

### ABSTRACT

To use microwave for classification dielectric material base on Hall Effect Sensor by analysis output voltage of Hall Effect Sensor that in this study bring current sensor module for detect the electrical signals from sensor. This sensor is used to detect electromagnetic field on microwave and convert it to current. This current sensor module use IC ACS712 model. The values from module are keep by microcontroller (Arduino) via programming. Then in the experiment, materials are set up between the sensor and microwave which include wood plate, acrylic plate, and ceramic plate. After set up completely, the electrical signals from the sensor will be change allow materials. In conclusion this experiment can be classify all materials in experiment and showing the positions of material relate to classification.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย ขอขอบคุณ ผศ.สุธรรม สัทธรรมสกุล สำหรับข้อแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านในการทำวิจัย นอกจากนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญา นิพนธ์เรื่องนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ในระดับปริญญาตรีที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาการวัดและควบคุม ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและพื้นฐานของเครื่องมือการวัด.....	3
2.1 ตัวรับรู้ฮอลล์.....	3
2.2 โมดูลวัดกระแส.....	7
2.3 คลื่นไมโครเวฟ.....	8
2.3.1 แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูง.....	9
2.3.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุ.....	11
2.4 ตัวเรียงกระแส.....	12
2.4.1 วงจรเรียงกระแส.....	12
2.4.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น.....	12
2.4.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	13
2.4.2 การใช้ตัวเก็บประจุในการกรองแรงดันให้คงที่.....	14
2.5 ขอตดกีไดโอด.....	14
2.6 สายอากาศ.....	15
2.6.1 ลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของสายอากาศ.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.2 สายอากาศแบบโมนโพล.....	16
2.6.3 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น.....	17
2.7 การสื่อสารแบบเอสพีไอ.....	20
2.8 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	21
2.8.1 การแปลงโดยวิธีการสุ่มตัวอย่าง.....	21
2.8.1.1 การสุ่มตัวอย่างแบบพีเอเอ็ม.....	22
2.8.1.2 การสุ่มตัวอย่างแบบพีซีเอ็ม.....	22
2.8.2 วิธีการคำนวณการแปลงแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	24
บทที่ 3 ขั้นตอนการออกแบบและทดลอง.....	27
3.1 การออกแบบโครงงาน.....	27
3.2 ฮาร์ดแวร์.....	28
3.2.1 การออกแบบเซนเซอร์.....	28
3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ.....	29
3.3 ซอฟต์แวร์.....	29
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	34
4.1 การทดลองเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตรของวัสดุต่าง ๆ.....	34
4.1.1 การทดลองของแผ่นไม้.....	34
4.1.2 การทดลองของอะคริลิก.....	37
4.1.3 การทดลองของเซรามิก.....	39
4.2 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตร.....	42
4.2.1 การเปรียบเทียบที่ระยะ 0 เซนติเมตร.....	42
4.2.2 การเปรียบเทียบที่ระยะ 1 เซนติเมตร.....	43
4.2.3 การเปรียบเทียบที่ระยะ 2 เซนติเมตร.....	44
4.2.4 การเปรียบเทียบที่ระยะ 3 เซนติเมตร.....	45
4.2.5 การเปรียบเทียบที่ระยะ 4 เซนติเมตร.....	46
4.2.6 การเปรียบเทียบที่ระยะ 5 เซนติเมตร.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.7 การเปรียบเทียบที่ระยะ 6 เซนติเมตร.....	48
4.2.8 การเปรียบเทียบที่ระยะ 7 เซนติเมตร.....	49
4.2.9 การเปรียบเทียบที่ระยะ 8 เซนติเมตร.....	50
4.2.10 การเปรียบเทียบที่ระยะ 9 เซนติเมตร.....	51
4.2.11 การเปรียบเทียบที่ระยะ 10 เซนติเมตร.....	52
4.2.12 การเปรียบเทียบที่ระยะ 11 เซนติเมตร.....	53
4.2.13 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ..... กับระยะการทดลอง	54
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	58
บรรณานุกรม.....	59
ภาคผนวก.....	61

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวรับรู้ฮอลล์.....	3
2.2 การต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์.....	3
2.3 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	4
2.4 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	5
2.5 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H$ .....	6
2.6 โมดูลวัดกระแส.....	8
2.7 วงจรแสดงรูปแบบการจำลองการทำงานของแมกนีตรอน.....	9
2.8 อิเล็กตรอนวิ่งวนรอบแกนกลางผ่านช่องว่างของแมกนีตรอนไปยังแอนโนดที่จุดต่าง ๆ.....	10
2.9 วงจรแรงดันสองเท่าแบบครึ่งคลื่น ขณะเกิดแรงดันทางบวก.....	11
2.10 วงจรแรงดันสองเท่าแบบครึ่งคลื่น ขณะเกิดแรงดันทางลบ.....	11
2.11 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น.....	13
2.12 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น.....	14
2.13 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่ใช้ตัวเก็บประจุในการกรองแรงดัน.....	14
2.14 สัญลักษณ์ของขอตดคีโคโอด.....	15
2.15 สายอากาศ.....	15
2.16 พลังงานจากคลื่นวิทยุที่ได้รับบนสายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่น.....	16
2.17 โครงสร้างของสายอากาศ.....	17
2.18 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ.....	17
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อสายอากาศวางแนวนอน.....	18
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อสายอากาศวางแนวตั้ง.....	18
2.21 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล.....	19
2.22 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพล.....	19
2.23 การเชื่อมต่อการสื่อสารแบบเอสพีไอ.....	20
2.24 สัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อก และแบบดิจิทัล.....	21
2.25 การแปลงสัญญาณโดยใช้การสุ่มตัวอย่าง.....	22
2.26 ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่าง (Sampling).....	23
2.27 ขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing).....	23
2.28 ขั้นตอนการเข้ารหัส (Encoding).....	24
2.29 การจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ที่ความละเอียด 4 bit 3 bit และ 2 bit.....	24

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.30 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ได้รับจากเสาอากาศกับแรงดัน..... ที่ออกจากไอซีเบอร์ ACS71224	25
3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงานของโครงการ.....	27
3.2 เซนเซอร์.....	28
3.3 การติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับตู้ไมโครเวฟ.....	28
3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน.....	29
3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมบันทึกค่าลงการ์ด.....	31
3.6 ตัวอย่างการติดตั้งวัสดุห่างจากช่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟ 5 เซนติเมตร.....	32
3.7 ตำแหน่งการวางวัสดุในการทดลอง.....	33
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตรกับ..... จำนวนการทดลองของแผ่นไม้	35
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตรกับ..... จำนวนการทดลองของแผ่นไม้	36
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตรกับ..... จำนวนการทดลองของแผ่นอะคริลิก	37
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตรกับ..... จำนวนการทดลองของแผ่นอะคริลิก	38
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตรกับ..... จำนวนการทดลองของแผ่นเซรามิก	40
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตรกับ..... จำนวนการทดลองของแผ่นเซรามิก	41
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 0 เซนติเมตร.....	42
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 1 เซนติเมตร.....	43
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 2 เซนติเมตร.....	44
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 3 เซนติเมตร.....	45
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 4 เซนติเมตร.....	46
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 5 เซนติเมตร.....	47
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 6 เซนติเมตร.....	48
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 7 เซนติเมตร.....	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 8 เซนติเมตร.....	50
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 9 เซนติเมตร.....	51
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 10 เซนติเมตร.....	52
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 11 เซนติเมตร.....	53
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตร...	55



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงค่าความไวที่ใช้ในการแปลงระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า.....	8
4.1 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร.....	34
4.2 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร.....	35
4.3 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของอะคริลิกที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร.....	37
4.4 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของอะคริลิกที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร.....	38
4.5 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของเซรามิกที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร.....	39
4.6 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของเซรามิกที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร.....	40
4.7 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 0 เซนติเมตร.....	42
4.8 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 1 เซนติเมตร.....	43
4.9 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 2 เซนติเมตร.....	44
4.10 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 3 เซนติเมตร.....	45
4.11 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 4 เซนติเมตร.....	46
4.12 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 5 เซนติเมตร.....	47
4.13 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 6 เซนติเมตร.....	48
4.14 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 7 เซนติเมตร.....	49
4.15 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 8 เซนติเมตร.....	50
4.16 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 9 เซนติเมตร.....	51
4.17 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 10 เซนติเมตร.....	52
4.18 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 11 เซนติเมตร.....	53
4.19 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ระยะการทดลองตั้งแต่ 0 ถึง 11 เซนติเมตร.....	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปริญญานิพนธ์

โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาเกี่ยวกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ในการตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ หรือจะกล่าวได้ว่าในคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟนั้นจะมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าคลื่นไมโครเวฟนั้นกำลังงานมากพอ โดยในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตั้งฉากกันอยู่

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานสัญญาณผ่านคลื่นความถี่ไมโครเวฟกันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากคลื่นความถี่ในย่านไมโครเวฟจะมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าคลื่นนั้นกำลังงานมากพอ โดยในโครงการที่กำลังดำเนินการอยู่มีส่วนเกี่ยวข้องกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ สายอากาศ และคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ในโครงการนี้อยู่ในรูปของไอซีวัดกระแสเบอร์ ACS712 ดังนั้นจึงได้นำเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟมาวิจัยร่วมกับสายอากาศ โดยมีไอซีวัดกระแส ACS712 ในการวัดกระแสที่ได้จากตัวเซนเซอร์ที่สร้างมาจากพื้นฐานสายอากาศ เพื่อให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าไปใช้ในการจำแนกวัสดุไดอิเล็กตริกต่าง ๆ โดยในการทดลองจะประกอบไปด้วยวัสดุ 3 ชนิด คือ ไม้ อะคริลิก และเซรามิก ซึ่งได้ตั้งสมมติฐานว่าไม้จะมีการซึมซาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีที่สุด ในส่วนของอะคริลิกจะมีการซึมซาบน้อยกว่าไม้ และเซรามิกจะอยู่ระหว่างไม้และอะคริลิกเพราะไม่ได้โปร่งใสเหมือนอะคริลิก และที่บเหมือนไม้แต่มีสารเคลือบเซรามิกที่มีโลหะประกอบ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์
2. เพื่อศึกษาการทำงานของแมกนีตรอนและคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
3. เพื่อให้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถรู้จักกับ ค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
4. เพื่อศึกษาการทำงานของเซนเซอร์ที่ใช้สำหรับการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในย่านคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
5. เพื่อศึกษาการทำงานของตัวเรียงกระแส
6. เพื่อศึกษาการทำงานของไอซีวัดกระแส (IC - ACS712)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. ศึกษาการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ
2. ทำให้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ สามารถตรวจวัดค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
3. สร้างอุปกรณ์บันทึกค่าเอาพุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์
4. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับเวลา เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟตัดผ่าน

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเพื่อหาวิธีการที่ใช้และวางแผนดำเนินงาน
2. ศึกษาหลักการและทฤษฎีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
3. ศึกษาการเขียนโปรแกรมอาดูโนสำหรับ การบันทึกค่าเป็นไฟล์ (.CSV)
4. ทดสอบเซนเซอร์ในการตรวจรู้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟ
5. ทำการทดลองเพื่อเก็บค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่มีวัสดุไดอิเล็กทริกระหว่างไมโครเวฟกับเซนเซอร์
6. วิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดลอง
7. จัดทำเอกสารของโครงการ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ฝึกการวางแผนและการแก้ปัญหาระหว่างการทำโครงการ
2. มีความรู้และความเข้าใจเรื่องคลื่นไมโครเวฟ
3. ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถตรวจรู้ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟ

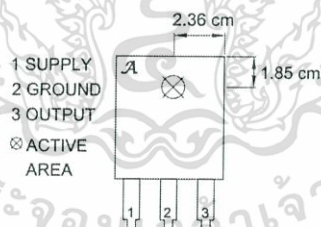
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและพื้นฐานของเครื่องมือการวัด

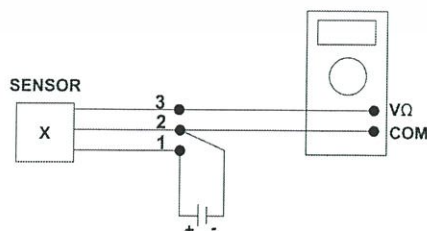
ในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ คลื่นไมโครเวฟ สายอากาศ พื้นฐานของวงจรเรียงกระแส การสื่อสารแบบเอสพีไอ และการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล รวมถึงส่วนของโมดูลวัดกระแสที่ทำหน้าที่ในการวัดกระแสที่ได้จากสายอากาศ โดยจะทำการสร้างเซนเซอร์ที่ใช้พื้นฐานมาจากสายอากาศโมโนโพล ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3

### 2.1 ตัวรับรู้ฮอลล์

จากการศึกษารายละเอียดของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 ประกอบไปด้วยขา 3 ขา ซึ่งขาที่ 1 ไว้สำหรับรับแรงดันไฟฟ้า (Supply) ขนาด 4.5 ถึง 6 โวลต์ ขาที่ 2 เป็นขาที่ต่อกับกราวด์ (Ground) ขาที่ 3 เป็นเอาต์พุต (Output) และพื้นที่การทำงาน (Active Area) เป็นส่วนที่ใช้ในการรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับขาที่ 1 และขาที่ 2 ต่อไปยังขั้วลบของแหล่งจ่าย จากนั้นนำขา 2 และ 3 ต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แรงดันออฟเซต (Offset Voltage) คือความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กมากกระทำกับตัวฮอลล์ซึ่งมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง โดยค่านี้จะเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง [1]

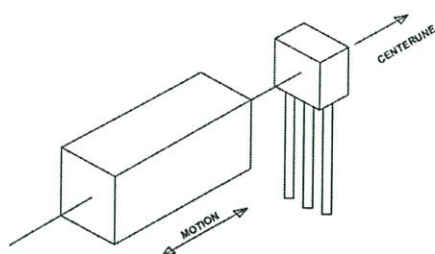


รูปที่ 2.1 ตัวรับรู้ฮอลล์ [1]



รูปที่ 2.2 การต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและโวลต์มิเตอร์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก [1]

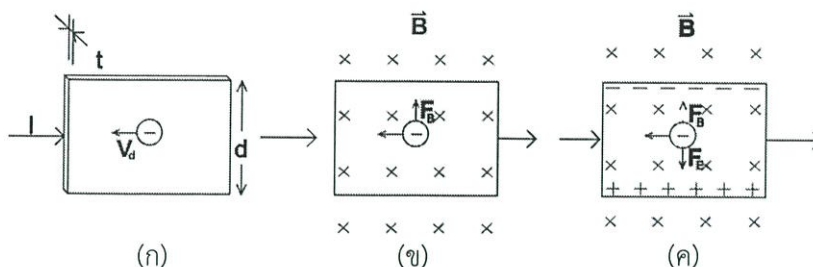
จากรูปที่ 2.3 เมื่อนำแม่เหล็กมาเข้าใกล้พื้นที่การทำงานของตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์ที่ขาเอาต์พุต จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับตัวรับรู้ฮอลล์ หรือก็คือถ้านำแม่เหล็กขั้วใต้เข้าใกล้ตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้านำแม่เหล็กขั้วเหนือเข้าใกล้ตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์จะมีค่าลดลง และความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ดังสมการต่อไปนี้

$$B = \frac{V_{out(B)} - V_{out(O)}}{S} \quad (2.1)$$

เมื่อ	B	คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)
	$V_{out(O)}$	คือ ความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากระทำกับตัวรับรู้ฮอลล์ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
	$V_{out(B)}$	คือ ความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็กมากระทำกับตัวรับรู้ฮอลล์ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)
	S	คือ สัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเทสลา (V/T)

ในปี ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปคินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุ 24 ปี ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (Charge Carriers) ในตัวนำสามารถเบี่ยงเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบี่ยงเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในแผ่นตัวนำบางในทิศที่ตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กการค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์ [1]

- (ก) อธิบายถึงความหมายของตัวแปรต่าง ๆ และลักษณะของตัวแปร  
 (ข) การเกิดสนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบของแผ่นตัวนำบาง  
 (ค) การเกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field) ขึ้นในแผ่นตัวนำ

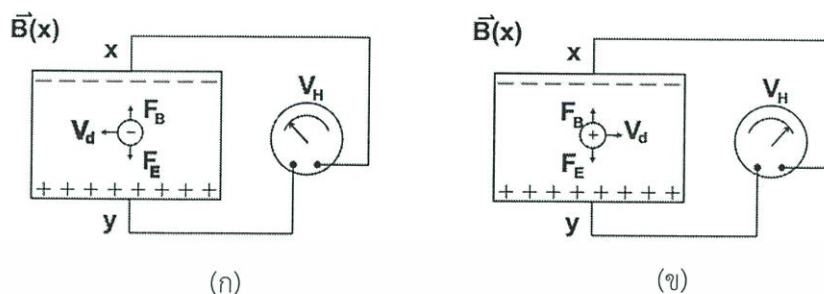
การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.4 (ก) ถึง (ค) โดยรูปจะแสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง  $d$  หน่วย หนา  $t$  หน่วย และมีกระแสไฟฟ้า (ไหลแบบปกติ)  $I$  ไหลผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวาของแผ่นตัวนำ พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน ( $V_0$ ) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า  $I$  จากด้านขวาไปด้านซ้ายของแผ่นตัวนำ ถัดมาในรูปที่ 2.4 (ข) คือ ผลจากการนำสนามแม่เหล็ก  $B$  มีทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบของแผ่นตัวนำบาง จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก  $F_B$  มากระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง และรูปสุดท้าย รูปที่ 2.4 (ค) หลังจากการเกิดสนามแม่เหล็ก ในเวลาต่อมาจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบางจำนวนมากขึ้น ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field)  $E_H$  ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน ซึ่งสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า  $F_E$  กระทำกับอิเล็กตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่างของแผ่นตัวนำบาง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบนไปทางบนหรือล่าง

จากสนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางนั้นมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ  $V$  ตามสมการที่ (2.2) โดยความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Potential Difference หรือ Hall Voltage)  $V_H$  พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อแผ่นตัวนำบางทำมาจากสารกึ่งตัวนำเช่น ซีลีคอนหรือเจอร์เมเนียม หากใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ตีความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามาก จากสมการที่ (2.2) จะได้ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ดังสมการที่ (2.3)

$$E_H = \frac{V}{d} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = E_H d \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์  $V_H$  [1]

จากรูป 2.5 ค่า  $V_H$  ที่วัดได้จากมิลลิโวลต์มิเตอร์ที่ต่อเข้ากับจุด  $x$  และ  $y$  บ่งบอกถึงสภาพชั่วของสนามแม่เหล็ก โดยสามารถทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จากมิลลิโวลต์มิเตอร์ จากรูป 2.5 (ก) พาหะประจุคืออิเล็กตรอนจึงมีสภาพเป็นประจุลบ ถ้าพาหะประจุมีสภาพเป็นประจุบวก ทิศของ  $V_d$  และ  $E_H$  จะตรงข้ามกันกับในรูป 2.5 (ก) แต่ทิศของ  $F_B$  และ  $F_E$  ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป 2.5 (ข) ซึ่งประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพชั่วของ  $V_H$  จะตรงข้ามกับกรณีที่พาหะประจุที่มีประจุลบ ในขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน ดังสมการที่ 2.4

$$\begin{aligned} (-e)E_H &= (-e)V_d B \\ E_H &= V_d B \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

$$V_H = V_d B d \quad (2.5)$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน ( $V_d$ ) มีค่าเท่ากับ

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $n$  คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (ความหนาแน่นของพาหะประจุ) และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง นำสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.5) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2.7)$$

และเนื่องจากพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) ของแผ่นตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $d \times t$  ดังนั้น  $t = \frac{A}{d}$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2.8)$$

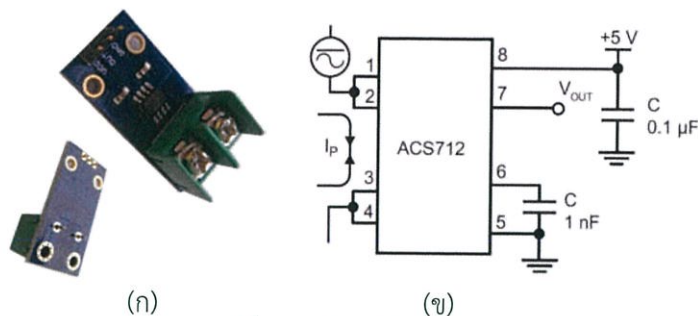
ดังนั้นค่าสนามแม่เหล็ก  $B$  สามารถหาได้จากสมการ

$$B = \frac{netV_H}{I} \quad (2.9)$$

ปริมาณ  $V_H$ ,  $I$  และ  $t$  ในสมการที่ (2.9) สามารถหาได้จากการวัด ส่วนค่า  $n$  นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนอนวนจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยมากแต่ก็ยังยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในปริมาณเล็กน้อย จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำจะมีค่าสิ่งเจือปน  $n \leq 10^{22} \text{ m}^{-3}$  และโลหะทั่วไปจะมีค่าสิ่งเจือปน  $n \leq 10^{28} \text{ m}^{-3}$  ดังนั้น จึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าได้จากสมการ (2.9) มีหน่วยในระบบเอสไอเป็น เทสลา (Tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์  $T$  โดยหน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (Gauss) แทนด้วยสัญลักษณ์  $G$  โดยที่  $1T = 10^4 G$

## 2.2 โมดูลวัดกระแส

โมดูลวัดกระแสและวงจรภายใน แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งโครงงานนี้จะใช้ไอซีเบอร์ ACS712 เป็นไอซีวัดกระแสขนาด 5 แอมแปร์ โดยการให้กระแสไหลผ่านเส้นลวดทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเนื่องจากกระแสไหลผ่านเส้นลวดผ่านขา 1 และ 2 ไปยัง ขา 3 และ ขา 4 โดยมีฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ในตัวไอซีเป็นตัวจับค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซนเซอร์



(ก)

(ข)

## รูปที่ 2.6 โมดูลวัดกระแส

(ก) ลักษณะทั่วไปของโมดูลวัดกระแส

(ข) วงจรโมดูลวัดกระแส

(ที่มา: <http://www.ebay.com/itm/New-5A-20A-30A-Range-Current-Sensor-Module-ACS712-For-Arduino-Raspberry-Pi-UNO-/112275500486>)

(ที่มา:datasheet ACS712-ALLEGRO)

จากเอกสารข้อมูลจำเพาะของ ACS712 ในตารางที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นว่าจากการใช้ไอซีวัดกระแสขนาด 5 แอมแปร์ (ACS712ELCTR-05B-T) จะมีค่าความไว (Sensitivity) คือขนาดที่น้อยที่สุดในการเปลี่ยนแปลงของปริมาณที่วัด เท่ากับ 185 mV/A

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าความไวที่ใช้ในการแปลงระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า

Part Number	Packing*	$T_A$ (°C)	Optimized Range, $I_P$ (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	66

\*Contact Allegro for additional packing options.

(ที่มา: <http://www.ebay.com/itm/New-5A-20A-30A-Range-Current-Sensor-ModuleACS712-For-Arduino-Raspberry-Pi-UNO-/112275500486>)

(ที่มา:datasheet ACS712-ALLEGRO)

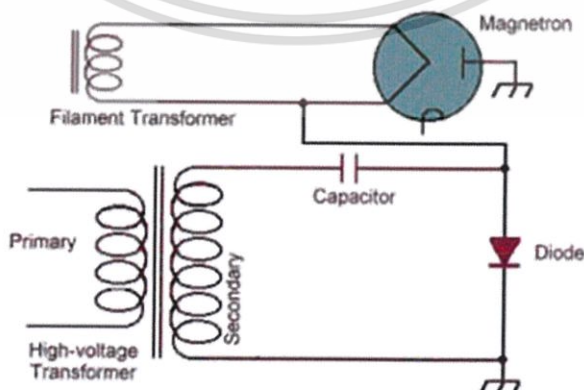
## 2.3 คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟ คือ คลื่นที่อยู่ในรูปแบบของการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความถี่ใกล้เคียงกับช่วงความถี่ของคลื่นที่ใช้ในการสื่อสารของระบบวิทยุโทรทัศน์ มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.3 GHz (1 มิลลิเมตร) ถึง 300 GHz (1 เมตร) ส่วนในการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1 GHz ถึง 60 GHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ [2-5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

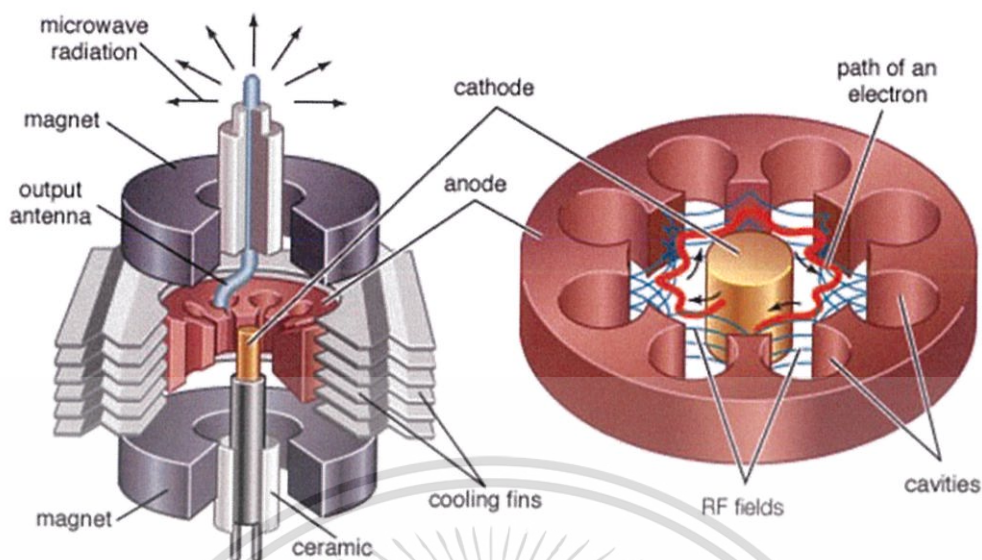
### 2.3.1 แหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูง

ทฤษฎีการทำงานของแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูง (Magnetron) ใช้หลักการสร้างสนามไฟฟ้าโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ภายในเตาไมโครเวฟ รูปแบบวงจรมาตรฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าดังรูปที่ 2.7 มีขดลวดทางปฐมภูมิ (Primary Winding) 1 ขด และ ขดลวดทางทุติยภูมิ (Secondary Winding) 2 ขด ในช่วงเริ่มต้นไฟฟ้ากระแสสลับที่ถูกป้อนเข้าที่ขดลวดทางปฐมภูมิ ทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันทางด้านขดลวดทางทุติยภูมิ ขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบขดลวดน้อยกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าด้านขดลวดทางปฐมภูมิจะถูกเรียกว่า หม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันลง (Step Down Transformer) ซึ่งจะถูกต่อเข้ากับไส้หลอด (Filament) ส่วนขดลวดทางทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบขดลวดมากกว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าด้านขดลวดทางปฐมภูมิจะถูกเรียกว่า หม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันขึ้น (Step Up Transformer) ซึ่งจะต่อกับ ไดโอด และตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.7 ถัดมาไส้หลอดจะถูกกระตุ้นให้ร้อนโดยกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณมากจากหม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันลง ซึ่งจะทำให้ภายในไส้หลอดมีอิเล็กตรอนจำนวนมากไหลผ่าน ส่วนหม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันขึ้นนั้นจะต่อกับวงจรแรงดันสองเท่าแบบครึ่งคลื่น ซึ่งจะทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นเป็นสองเท่าจากแรงดันเดิมของหม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันขึ้น โดยจะป้อนไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าที่ขั้วลบ (Cathode) ซึ่งเป็นแกนอยู่ศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูง ผลคือจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขั้วลบเกิดการเคลื่อนที่วิ่งเข้าหาขั้วบวก (Anode) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นเรียงซ้อนกันเป็นทรงกระบอกแบ่งเป็นช่อง ๆ แต่เนื่องจากโครงสร้างของแหล่งกำเนิดพลังงานความถี่สูงที่มีแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) จึงมีแรงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กถาวรซึ่งวางประกบไว้ด้านบนและด้านล่าง ทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากขั้วลบถูกเบี่ยงเบนจนเกิดการหมุนไป รอบ ๆ แกนกลางของขั้วลบ และการหมุนของอิเล็กตรอนไปตามรูปทรงที่เป็นช่องของขั้วบวกดังรูปที่ 2.8 เมื่อมีพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่มากพอไปอิเล็กตรอนจะปล่อยคลื่นออกมาผ่านเสาอากาศและส่งไปยังภายในของเตาไมโครเวฟเพื่ออุ่นอาหารในลำดับต่อไป [2-5]



รูปที่ 2.7 วงจรแสดงรูปแบบการจำลองการทำงานของแมกนีตรอน [16]

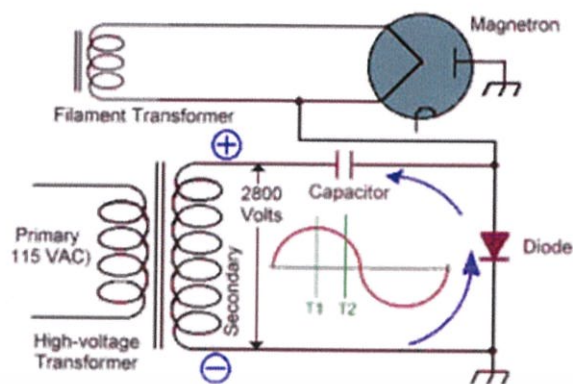
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



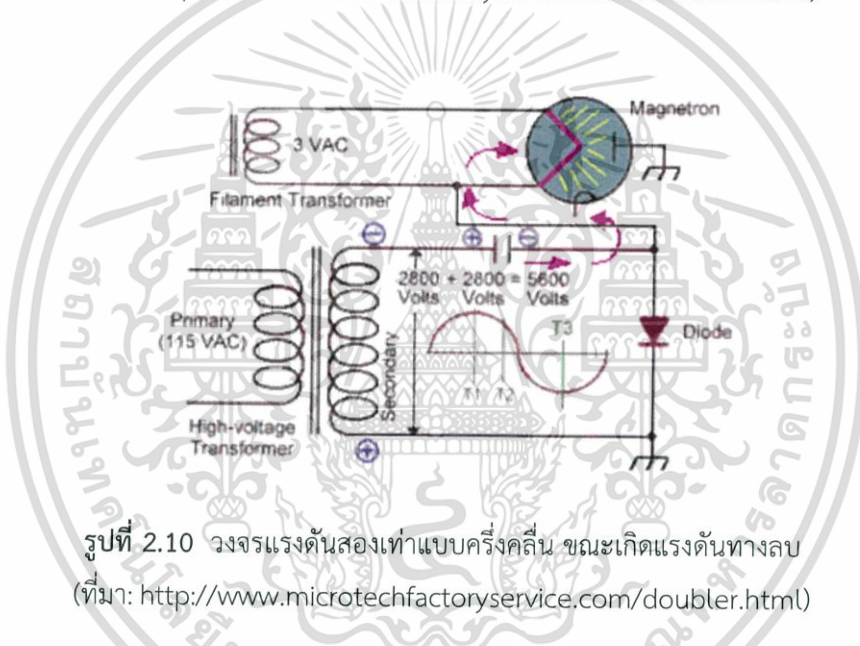
รูปที่ 2.8 อิเล็กตรอนวิ่งวนรอบแกนกลางผ่านช่องว่างของแมกนีตรอน ไปยังแอนโนดที่จุดต่าง ๆ  
(ที่มา: <https://www.britannica.com/technology/magnetron>)

ทางด้านหม้อแปลงชนิดแปลงแรงดันขึ้นซึ่งต่อกับ วงจรแรงดันสองเท่าแบบครึ่งคลื่น (The Half-Wave Voltage Doubler) ทำให้เกิดแรงดันด้านเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จากรูปที่ 2.9 ในช่วงแรกเวลาที่เป็นครึ่งลูกคลื่นสูงสุดทางฝั่งบวก (T1) ค่าแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสไฟฟ้าวิ่งไปตามลูกศรโดยพบกับไดโอดก่อนจะส่งกระแสไฟฟ้าไปเก็บที่ตัวเก็บประจุ ในระหว่างเวลาที่ตัวเก็บประจุกำลังเก็บประจุอยู่ จะไม่มีแรงดันเกิดขึ้นที่ตัวแมกนีตรอนเพราะว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลไปยังเส้นทางที่มีตัวต้านทานต่ำสุด แรงดันที่ผ่านตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นและถูกส่งไปยังหม้อแปลงด้านทุติยภูมิ แต่จะเป็นแรงดันทางลบด้วยค่าแรงดันสูงสุด เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงหลังจากที่เป็นครึ่งลูกคลื่นสูงสุดทางฝั่งบวก (T2) ตัวเก็บประจุจะพยายามที่จะปล่อยกระแสไหลกลับผ่านไดโอดแต่คุณสมบัติของไดโอดคือ ให้กระแสไหลผ่านได้เพียงทางเดียว ดังนั้นเส้นทางการปล่อยกระแสกลับมาจึงถูกปิดกั้นไว้ จึงทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับเดิมเหมือนกับในช่วงเวลา T1 ซึ่งเป็นในช่วงแรกที่เป็นครึ่งลูกคลื่นทางฝั่งบวก จากรูปที่ 2.10 ในช่วงเวลาครึ่งลูกคลื่นต่ำสุดทางฝั่งลบ (T3) แรงดันของหม้อแปลงด้านทุติยภูมิจะเป็นแรงดันทางลบ เพราะเป็นครึ่งลูกคลื่นทางฝั่งลบ เมื่อนำแรงดันหม้อแปลงด้านทุติยภูมิและแรงดันที่ตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับมารวมกัน จึงทำให้ผลรวมของแรงดันมีค่าเป็นเป็นสองเท่าจากปกติ จากนั้นจะถูกส่งไปยังแมกนีตรอนเพื่อนำไปสร้างคลื่นไมโครเวฟต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรแรงดันสองเท่าแบบครึ่งคลื่น ขณะเกิดแรงดันทางบวก  
(ที่มา: <http://www.microtechfactoryservice.com/doubler.html>)



รูปที่ 2.10 วงจรแรงดันสองเท่าแบบครึ่งคลื่น ขณะเกิดแรงดันทางลบ  
(ที่มา: <http://www.microtechfactoryservice.com/doubler.html>)

### 2.3.2 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุ

- 1) การทะลุผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านวัสดุจำพวกโลหะได้ดี เช่น แก้ว พลาสติก กระดาษ และถ้วยกระดาษ (ไม่เคลือบสารที่มีส่วนผสมของโลหะ)
- 2) การสะท้อนกลับ (Reflection) คลื่นไมโครเวฟสามารถสะท้อนกลับวัสดุประเภทโลหะ กระดาษพอยล์ (ตะกั่วหรือดีบุกผสมปรอท) ได้ดี เพราะฉะนั้น วัสดุจำพวกโลหะ จึงไม่ถูกนำมาเป็นภาชนะใส่อาหารอุ่นในเตาไมโครเวฟ เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านโลหะได้เพียงเล็กน้อย ทำให้อาหารไม่ร้อนและเกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ทำให้ตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟเกิดความเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การดูดคลื่น (Absorption) คลื่นไมโครเวฟจะถูกดูดกลืนได้ดี เมื่อกระทบกับวัสดุที่มีความชื้นภายใน เช่น น้ำ และสารอาหารประเภทต่าง ๆ (ชีวมOLEกุล โปรตีน ไขมัน) คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟมีความถี่ 2,450 GHz แต่แต่ละครั้งรอบจะมีการกลับขั้ว ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลา เมื่อผ่านเข้าไปในอาหารจะไปเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำ ในอาหารมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยความถี่สูงตามจังหวะการกลับขั้วของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้น ในเวลา 1 นาที โมเลกุลจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาด้วยจำนวน 4,900 ล้านครั้ง ก่อให้เกิดการสั่นระหว่างโมเลกุลขนาดเล็ก และก่อให้เกิดเป็นความร้อนออกมาจากการเสียดสีของโมเลกุล (เปลี่ยนจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อน) โดยความร้อนจะแผ่จากด้านในอาหารออกมาสู่ด้านนอกของอาหาร ทว่าการกลับขั้วของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ เหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free Radicals) ซึ่งมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมี จนเกิดผลเสียหายทางชีววิทยาต่อไป

## 2.4 ตัวเรียงกระแส (Rectifier)

เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติในการแปลงค่ากระแสไฟฟ้า จากไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วงจรที่เรียกว่าวงจรเรียงกระแส ซึ่งเป็นวงจรที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น นิยมใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นตัวยึดทิศทางกระแสไฟฟ้า สำหรับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ทั่วไปคือ ไดโอด (diode)

### 2.4.1 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) คือ วงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) ที่ขั้วขาออกของวงจร มีทั้งแบบเฟสเดียวและแบบหลายเฟส วงจรเรียงกระแสพลังงานต่ำ ส่วนใหญ่มักใช้กับอุปกรณ์ภายในบ้านซึ่งจะเป็นแบบเฟสเดียว แต่แบบสามเฟสจะถูกนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมและงานที่มีการใช้การส่งผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (HVDC) ซึ่งในโครงการนี้จะใช้วงจรเรียงกระแสแบบเฟสเดียว [6]

#### 2.4.1.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

ครึ่งคลื่นที่จะกล่าวนี้ หมายถึง ครึ่งคลื่นบวกหรือครึ่งคลื่นลบของไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็นอินพุตเท่านั้นที่ผ่านไปได้ ในขณะที่อีกครึ่งของลูกคลื่นจะถูกกั้นไว้ ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตจะลดลงไปด้วย ในรูปที่ 2.11 มีไดโอด 1 ตัวใช้สำหรับไฟฟ้าเฟสเดียว โดยตามรูปจะเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นบวก หลักการทำงานคือ ในครึ่งคลื่นที่เป็นบวก ขาหม้อแปลงด้านบนเป็นบวกและขาด้านล่างเป็นลบซึ่งกระแสไหลผ่านได้ แต่เมื่ออีกครึ่งคลื่นที่เป็นลบ ขาบนจะเป็นลบแล้วขาด้านล่างจะเป็นบวกจะทำให้กระแสไหลไม่ได้ เอาต์พุตจึงมีแต่ครึ่งบวก เมื่อเทียบกับขาล่างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หม้อแปลง ถ้าต้องการได้โฟลบ ซึ่งหมายถึงเอาต์พุตต้องเป็นคลื่นลบจะต้องต่อไดโอดไปฝั่งตรงกันข้าม จะทำให้วงจรเรียงกระแสมีเอาต์พุตเป็นกระแสตรงที่กระเพื่อม แบบครึ่งคลื่นจะมียอดคลื่นที่กระเพื่อม หรือที่เรียกว่า การกระเพื่อม (Ripple) สูงกว่าแบบเต็มคลื่น แต่ทั้งสองแบบต้องใช้วงจรการกรองเพื่อลดฮาร์มอนิกของความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับจากเอาต์พุต ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่ไม่มีโหลดตามทฤษฎี คือ

$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{2} \quad (2.10)$$

$$V_{dc} = \frac{V_{peak}}{\pi} \quad (2.11)$$



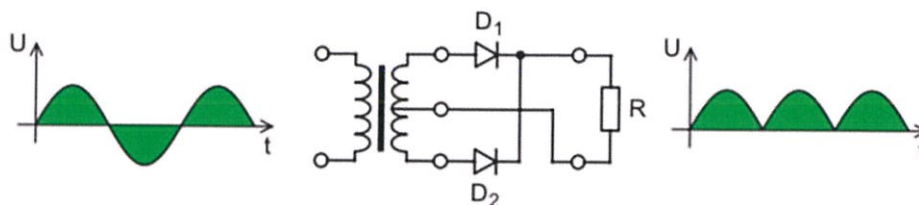
#### 2.4.1.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น

ในวงจรเรียงกระแสแบบเฟสเดียวจะทำได้ 2 ตัวในวงจร หลักการทำงานคือ เหมือนแบบครึ่งคลื่น แต่หม้อแปลงมีเซ็นเตอร์แทป ดังรูปที่ 2.12 จึงทำให้เหมือนมีวงจรครึ่งคลื่น 2 วงจร กล่าวคือ เมื่อครึ่งคลื่นที่เป็นบวกหมายถึง ขาบนเป็นบวก ที่เซ็นเตอร์แทปด้านบนเป็นลบ เมื่อเทียบกับขาบน แต่เป็นบวกเมื่อเทียบกับขาล่าง ขาล่างสุดจึงเป็นลบ เมื่อเทียบกับขาบนสุดและเซ็นเตอร์แทป กระแสไหลผ่านไดโอด D1 กลับมาที่เซ็นเตอร์แทป แคครึ่งเดียวของแรงดันทั้งหมด ในทางกลับกัน ในรูปคลื่นลบหมายถึงขาบนสุดเป็นลบ ขาล่างสุดเป็นบวก กระแสไหลผ่านไดโอด D2 อีกครึ่งหนึ่งค่าเฉลี่ยและค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root-mean-square) ของแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่ไม่มีโหลดตามทฤษฎี คือ

$$V_{dc} = V_{av} = \frac{2V_{peak}}{\pi} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

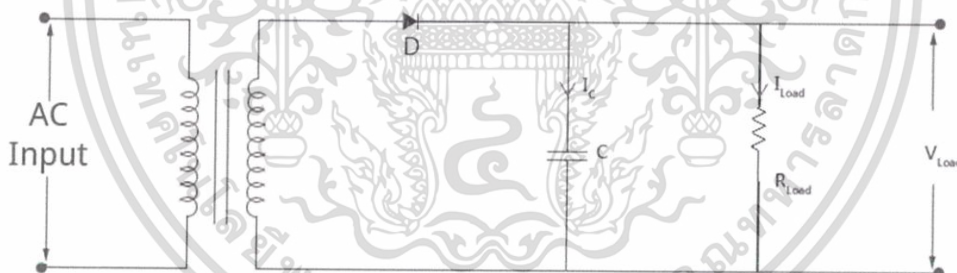
$$V_{rms} = \frac{V_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.12 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น [6]

#### 2.4.2 การใช้ตัวเก็บประจุในการกรองแรงดันให้คงที่

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรข้างต้นมีค่าที่คงที่ โดยการเพิ่มตัวเก็บประจุไปในวงจรทางฝั่งเอาต์พุตของตัวเรียงกระแส ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งขนาดของตัวเก็บประจุมีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ ถ้าตัวเก็บประจุขนาดใหญ่จะช่วยลดการกระเพื่อมได้ แต่ก็จะจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงตามมาเช่นกัน รวมไปถึงการทำให้ได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดมีค่าที่สูงขึ้นในหม้อแปลงด้านทุติยภูมิของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก จะถูกกำหนดตามหลักการการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าในขอบขาขึ้นของคลื่นรูปไซน์ แต่ในทางปฏิบัติแรงดันไฟฟ้าจะลดลงตามค่าความต้านทานของชุดขดลวดของหม้อแปลง



รูปที่ 2.13 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่ใช้ตัวเก็บประจุในการกรองแรงดัน

### 2.5 ขอตต์กีไดโอด (Schottky Diode)

ขอตต์กีไดโอด คือ ไดโอดสารกึ่งตัวนำที่มีแรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแส (Forward Voltage Drop) ที่ต่ำและมีการสลับการทำงานเร็วมาก ไดโอดธรรมดาจะมีแรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.7 โวลต์ ขณะที่แรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสของขอตต์กีไดโอดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.45 โวลต์ เนื่องจากมีแรงดันตกคร่อมในขณะให้นำกระแสต่ำกว่าไดโอดธรรมดาทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีกว่าและความเร็วในการสลับการทำงานที่สูงกว่าในรอยต่อของขอตต์กีไดโอด ประกอบไปด้วย สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และโลหะ (Metal) ในด้านสารกึ่งตัวนำชนิด N จะทำหน้าที่เสมือนเป็น ขั้วลบ (Cathode) ของไดโอดและในด้านของโลหะจะทำหน้าที่เสมือนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้วบวก (Anode) ของไดโอด ซึ่งสัญลักษณ์ของไดโอดตัวนี้แสดงดังรูป 2.14 ด้วยความสามารถที่ทำให้แรงดันตกคร่อมเมื่อนำกระแสมีขนาดที่ต่ำ จะทำให้สูญเสียพลังงานน้อยลง และยังสามารถป้องกันการอิมพัลส์ของทรานซิสเตอร์เนื่องจากกระแสแรงดันสูงได้ จึงทำให้ขอตักไดโอดเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพในการใช้งาน และยังสามารถใช้ในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (Stand-alone Photovoltaic System) และยังสามารถใช้กับวงจรเรียงกระแสในการเปลี่ยนโหมดของแหล่งจ่ายกระแสได้อีกด้วย เมื่อต้องการที่จะเลือกขอตักไดโอดสิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วยก็คือ ค่าเฉลี่ยสูงสุดของกระแสไฟฟ้าหลังจากแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ค่ากระแสสูงสุด และค่าแรงดันขั้วเคลื่อน



รูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ของขอตักไดโอด [7]

## 2.6 สายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสามารถแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน ในการสื่อสารนั้นใช้อากาศเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อในการรับส่งข้อมูล หรือสามารถเรียกได้ว่าเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย โดยสายอากาศมีหน้าที่แผ่กระจายคลื่นในการส่งสัญญาณออกไป และการกรองคลื่นเพื่อรับสัญญาณที่ถูกส่งมา [8]

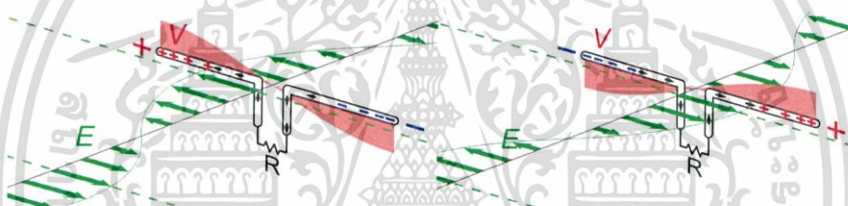


รูปที่ 2.15 สายอากาศ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 ลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของสายอากาศ

สายอากาศเป็นส่วนประกอบสำคัญของทุกอุปกรณ์ที่ใช้การสื่อสารทางวิทยุ สายอากาศถูกใช้ในระบบต่าง เช่น สถานีวิทยุกระจายเสียง สถานีโทรทัศน์ วิทยุสองทาง เครื่องรับสื่อสารเรดาร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ และการสื่อสารดาวเทียม นอกจากนี้ยังใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยปกติสายอากาศจะประกอบด้วยโครงสร้างของตัวนำโลหะเรียกว่า อิลิเมนต์ ในทางไฟฟ้าจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่งหรือเครื่องรับ โดยเครื่องส่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่เป็นคลื่นของอิเล็กตรอนไหลผ่านสายอากาศ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนั้นจะสร้างสนามไฟฟ้าในรูปคลื่นตามอิลิเมนต์ โดยสนามไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกแพร่กระจายออกไปจากสายอากาศ และเข้าสู่อากาศในรูปของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนทางด้านรับคลื่นเหล่านี้จะรวมกันอยู่ที่สายอากาศ จากนั้นสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มากับคลื่นจะสร้างแรงและส่งแรงไปยังอิเล็กตรอนในอิลิเมนต์ของสายอากาศ ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลับไปกลับมาบนสายอากาศ จึงเป็นที่มาของการเกิดกระแสในสายอากาศตัวอย่างของสายอากาศแสดงทั่วไปดังรูปที่ 2.16

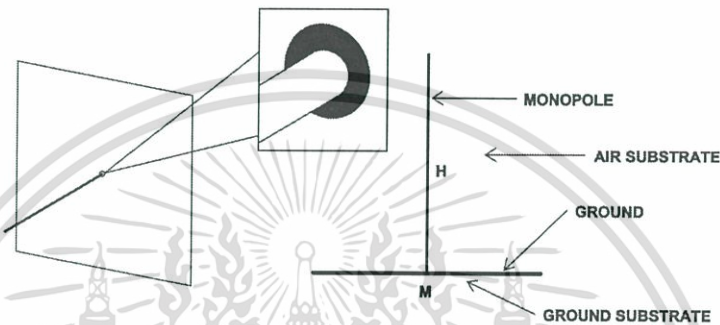


รูปที่ 2.16 พลังงานจากคลื่นวิทยุที่ได้รับบนสายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่น [12]

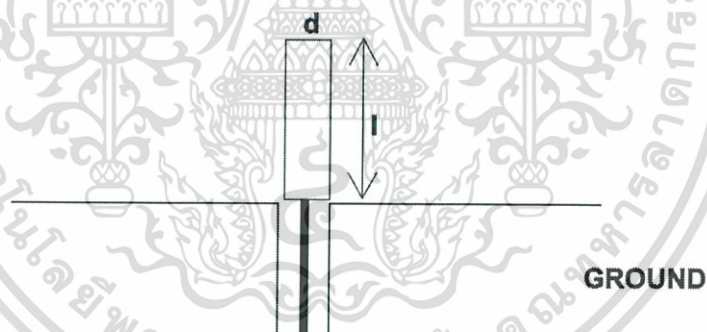
### 2.6.2 สายอากาศแบบโมโนโพล

สายอากาศโมโนโพล พัฒนารูปแบบและการทำงานมาจากเสาอากาศไดโพล (Dipole Antenna) ปัจจุบันนิยมนำมาใช้ในระบบสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการออกแบบ และมีน้ำหนักเบา ส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่ในการแผ่กระจายคลื่นจะถูกติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ แต่จะสามารถใช้งานได้เพียงแถบคลื่นความถี่เดียว สายอากาศโมโนโพลอาศัยหลักการทำงานครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล และมีระบบกราวด์เข้ามาทดแทนอีกครึ่งหนึ่ง เพื่อให้กระบวนการทำงานสมบูรณ์ โดยสายอากาศโมโนโพลจะป้อนสัญญาณเพียงขั้วเดียว และจะใช้ระบบกราวด์แทนขั้วที่เหลือ จากรูปที่ 2.16 สายอากาศแบบไดโพลจะประกอบไปด้วยแท่งโลหะสองแท่งต่อเข้ากับเครื่องรับ (แสดงด้วยตัวต้านทาน R) สนามไฟฟ้า (E ลูกศรเขียว) ของคลื่นที่เข้ามาทำให้เกิดแรงไปกระทำบนอิเล็กตรอนในแท่งโลหะ ซึ่งแรงจะไปทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาในแท่งโลหะทั้งสอง สร้างประจุบวก (+) และประจุลบ (-) ที่ปลายของแท่งโลหะสลับกันทั้งสองด้านของปลายแท่งโลหะ เนื่องจากความยาวของสายอากาศเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของคลื่นที่รับเข้ามา สนามไฟฟ้าที่สลับไปมาจะเหนี่ยวนำให้เกิดคลื่นอยู่กับที่ (Standing Wave) ของแรงดัน (V) แสดงด้วย

แถบสีแดง และกระแสในแท่งโลหะ กระแสรูปคลื่น (ลูกศรสีดำ) จะไหลลงไปตามสายส่งแล้วผ่านไป ที่ตัวรับ ดังนั้นสายอากาศแบบโมโนโพลจะมีรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นรอบทิศทาง ซึ่งแสดงได้ว่าสายอากาศโมโนโพลสามารถแผ่กระจายความถี่ได้ทุกทิศทาง โดยโครงสร้างของสายอากาศแบบโมโนโพล และลักษณะโดยรวมของสายอากาศแบบโมโนโพลแสดงดังในรูปที่ 2.17 และ 2.18 โดยโครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศโมโนโพลจะมีอยู่ 3 ส่วน คือเสาโมโนโพล ชั้บสเตรต และกราวด์ [9-12]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสายอากาศ [11]

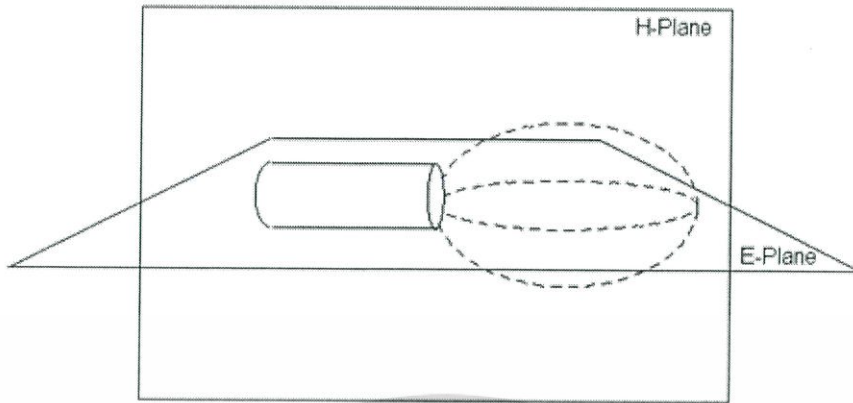


รูปที่ 2.18 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศ

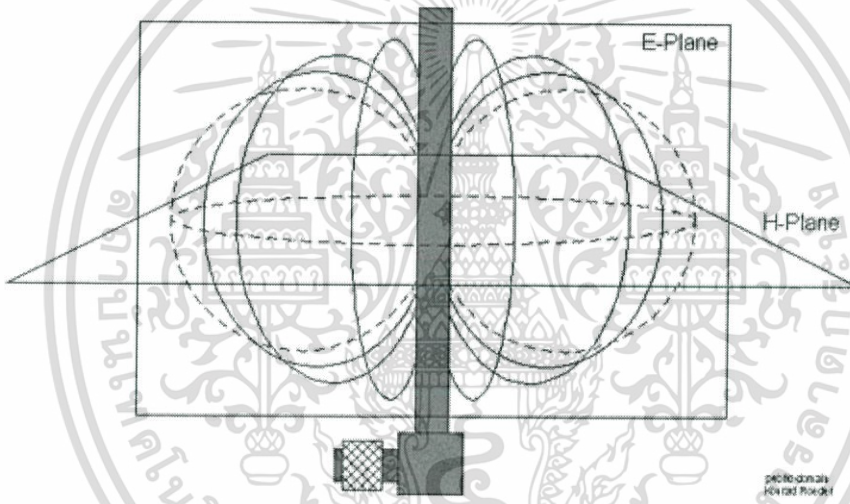
### 2.6.3 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่น

คลื่นสัญญาณที่กระจายออกมาประกอบไปด้วยระนาบ 2 ระนาบคือ ระนาบสนามไฟฟ้า (Electric Field หรือ E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field หรือ H-plane) โดยที่ระนาบสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับระนาบสนามแม่เหล็กเสมอ ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 โดย จะแสดงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่อยู่ในลักษณะแนวนอนและแนวตั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระนาบไฟฟ้านั้นจะอยู่แนวเดียวกับความยาวของสายอากาศเสมอ ไม่ว่าจะสายอากาศจะอยู่ในลักษณะแนวนอนหรือแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อสายอากาศวางแนวนอน

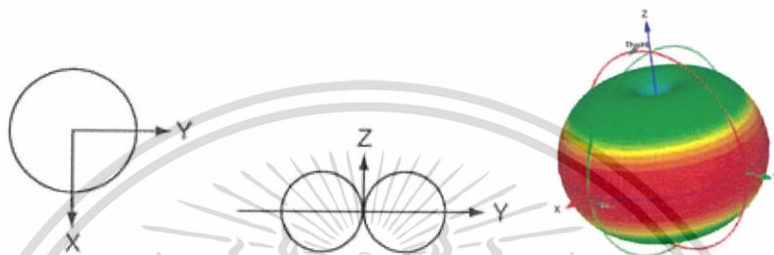


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อสายอากาศวางแนวตั้ง

สายอากาศแบบโมโนโพล และสายอากาศแบบไดโพล จะมีรูปแบบการแผ่กระจายคลื่น คล้ายกัน แต่ต่างกันที่กราวด์ รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ ไดโพลในรูปที่ 2.21 (ก) แสดงภาพตัดขวางของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลเมื่อมองจากด้านบนหรือ แกน Z ถัดมารูปที่ 2.21 (ข) แสดงภาพตัดขวางของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลเมื่อมองจาก ด้านหน้าหรือแกน X และในรูปที่ 2.21 (ค) แสดงภาพสามมิติของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ไดโพล สำหรับสายอากาศแบบโมโนโพลในทางอุดมคติระนาบกราวด์ของสายอากาศจะเป็นระนาบ กราวด์สมบูรณ์แบบหรือเป็นอนันต์ ส่งผลให้รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นมีเพียงด้านบนหรือครึ่งด้าน ของสายอากาศแบบไดโพลเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัติจริงไม่สามารถสร้างระนาบกราวด์ที่เป็นอนันต์ได้ แต่คุณลักษณะในทางทฤษฎีของสายอากาศโมโนโพลอุดมคติ จะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับ สายอากาศที่มีขนาดเล็ก ฉะนั้นในทางปฏิบัติการทำสายอากาศโมโนโพลมีขนาดเล็กกว่าในทาง

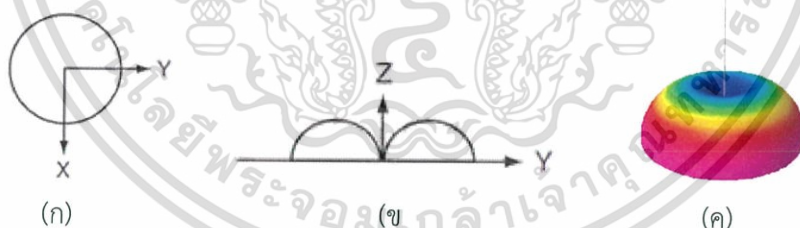
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีคือออกแบบให้ระนาบกราวด์มีขนาดที่ใหญ่กว่าสายอากาศมาก ๆ จึงจะส่งผลให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นไปเพียงด้านบนของระนาบกราวด์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.22 โดยรูปที่ 2.22 (ก) แสดงภาพตัดขวางของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพลเมื่อมองจากด้านบนหรือแกน Z ถัดมารูปที่ 2.22 (ข) แสดงภาพตัดขวางของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพลเมื่อมองจากด้านหน้าหรือแกน X และรูปที่ 2.22 (ค) แสดงภาพสามมิติของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพล



รูปที่ 2.21 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล

- (ก) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติเมื่อมอง จากแกน Z  
 (ข) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสองมิติเมื่อมอง จากแกน X  
 (ค) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลในรูปแบบสามมิติ



รูปที่ 2.22 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพล

- (ก) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพลในรูปแบบสองมิติเมื่อมองจากแกน Z  
 (ข) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพลในรูปแบบสองมิติเมื่อมองจากแกน X  
 (ค) รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโมนโพลในรูปแบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การสื่อสารแบบเอสพีไอ

การสื่อสารแบบเอสพีไอ (Serial Peripheral Interface: SPI) เป็นการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส (Synchronous) การทำงานของการสื่อสารจะเป็นแบบ มาสเตอร์ (Master) – สลาฟ (Slave) ซึ่งจะให้อุปกรณ์ตัวหนึ่งเป็นมาสเตอร์ ในขณะที่อุปกรณ์อีกตัวหนึ่งเป็นสลาฟ ซึ่งมีการสื่อสารแบบฟลูตเพล็กซ์ (Full-duplex) การสื่อสารแบบนี้จะเป็นการสื่อสารที่สามารถส่งข้อมูลหากันได้อย่างต่อเนื่องระหว่างมาสเตอร์และสลาฟ ซึ่งรูปแบบการสื่อสารไม่มีรูปแบบตายตัวหรือก็คือไม่มีการกำหนดว่าต้องส่งข้อมูลหากันในรูปแบบใด โดยอุปกรณ์มาสเตอร์เป็นตัวควบคุมการสื่อสารทั้งหมด ควบคุมตามสัญญาณนาฬิกาและใช้สัญญาณจากขา \SS (Slave Select) หรือ CS (Chip Select) เป็นตัวเลือกในการรับหรือส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์สเลฟ รูปที่ 2.23 แสดงการเชื่อมต่อการสื่อสารแบบเอสพีไอระหว่างอุปกรณ์มาสเตอร์กับสลาฟ โดยมีสายสัญญาณ 4 เส้น (Four Wire)



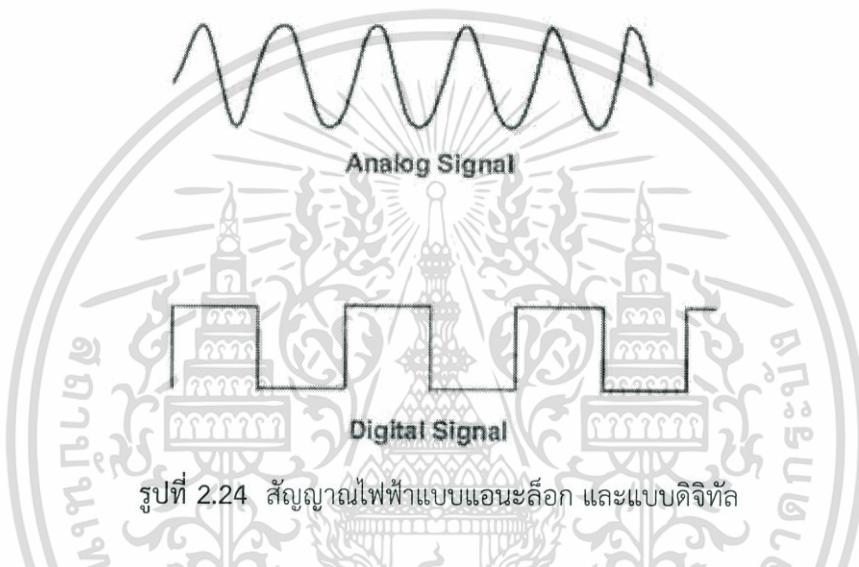
รูปที่ 2.23 การเชื่อมต่อการสื่อสารแบบเอสพีไอ

เมื่อ	SCLK (Serial Clock)	คือ ขาสำหรับส่งสัญญาณนาฬิกาจากอุปกรณ์มาสเตอร์ไปยังสลาฟเพื่อกำหนดช่วงเวลาของการส่งข้อมูล
	MOSI (Master Out Slave In)	คือ ขาที่ใช้ส่งข้อมูลจากอุปกรณ์มาสเตอร์ไปยังสลาฟ
	MISO (Master In Slave Out)	คือ ขาที่รับข้อมูลที่ส่งมาจากอุปกรณ์สลาฟ
	\SS (Slave Select)	คือ ขาที่ใช้ส่งสัญญาณลอจิก “0” (Active Low) ไปยังอุปกรณ์สลาฟที่ต้องการรับส่งข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

สัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อกคือ สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) มีขนาดของสัญญาณไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณแบบค่อยเป็นค่อยไป แปรผันตามเวลา เนื่องจากสัญญาณนั้นคือข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสาร หากถูกรบกวนจะทำให้ข้อมูลนั้นไม่ถูกต้อง โดยการส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกจะถูกรบกวนได้ง่าย ส่วนสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัลคือ สัญญาณข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่มีขนาดแน่นอน ซึ่งขนาดดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างค่าสัญญาณระดับสูงสุดและค่าสัญญาณระดับต่ำสุด



รูปที่ 2.24 สัญญาณไฟฟ้าแบบแอนะล็อก และแบบดิจิทัล

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลคือ การแปลงสัญญาณข้อมูลที่มีมนุษย์รับรู้สัมผัสได้ เป็นข้อมูลทางไฟฟ้า เพื่อป้อนเข้าสู่การประมวลผล จึงเป็นกระบวนการหนึ่งของการรับข้อมูล (Input Unit) เป็นกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สัญญาณแปรผันต่อเนื่อง (Analog) ได้รับการแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยไม่มีการลบข้อมูลสำคัญ จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่เรียกว่า อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital converter) โดยอุปกรณ์นี้จะตรวจจับสัญญาณที่ได้จากหัววัดสัญญาณ จากนั้นจะแปลงค่าต่าง ๆ ที่สุ่มได้เป็นค่านับวัดในระบบดิจิทัลตามระดับที่กำหนดด้วยค่าบิต (Bit) ที่ใช้ เรียกการแปลงค่านี้ว่าดิจิติเซชัน (Digitization) และค่าบิตที่ใช้ในการกำหนดจำนวนระดับของค่าดิจิทัลที่ต้องการเรียกว่าความลึกของบิต (Bit depth) ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกความละเอียดของสัญญาณ (Spatial resolution) [15]

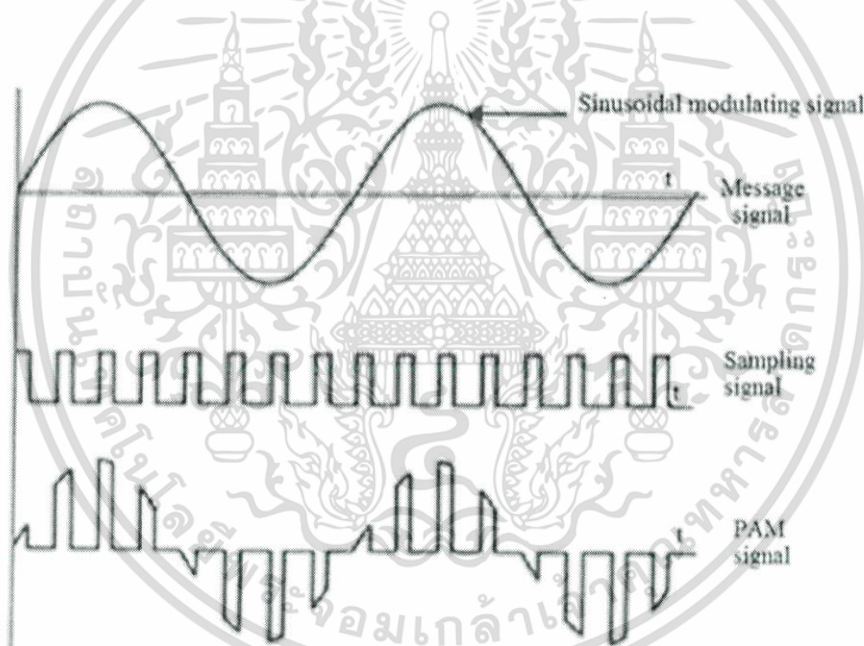
### 2.8.1 การแปลงโดยวิธีการสุ่มตัวอย่าง

ในกระบวนการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) นั้น มีอยู่ 2 วิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1.1 การสุ่มตัวอย่างแบบพีเอเอ็ม

การสุ่มตัวอย่างแบบพีเอเอ็ม (Pulse Amplitude Modulation: PAM) เป็นการแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้การสุ่มตัวอย่างของสัญญาณแอนะล็อกตามช่วงเวลาที่เหมาะสม ๆ กันและนำตัวอย่างที่ได้มาใช้แทนสัญญาณ แอนะล็อก ในหลักการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณที่เป็นแอนะล็อกตามช่วงเวลาให้สัญญาณนั้นขาดจากกันเป็นพัลส์ ๆ โดยขนาดของแต่ละพัลส์จะเท่ากับขนาดของสัญญาณเดิมในช่วงเวลานั้น ๆ แสดงในรูปที่ 2.25 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่างกล่าวว่า “สัญญาณที่มีแบนด์จำกัดที่  $B$  Hz สามารถที่จะแทนด้วยกลุ่มตัวอย่างของตัวเอง โดยที่แต่ละตัวอย่างมีระยะห่างเท่าๆกันและระยะห่างระหว่างตัวอย่างจะต้องไม่เกิน  $1/2B$  วินาที” (อัตราการสุ่มตัวอย่าง =  $2B$  Hz) ยิ่งถ้าสุ่มตัวอย่างสัญญาณด้วยอัตราที่น้อยสัญญาณพัลส์ที่ได้ก็จะใกล้เคียงกับสัญญาณเดิมมากที่สุด แต่ถ้าอัตราน้อยเกินไป สัญญาณก็จะกลับไปเป็นสัญญาณ แอนะล็อกเหมือนเดิม [17]



รูปที่ 2.25 การแปลงสัญญาณโดยใช้การสุ่มตัวอย่าง

### 2.8.1.2 การสุ่มตัวอย่างแบบพีซีเอ็ม

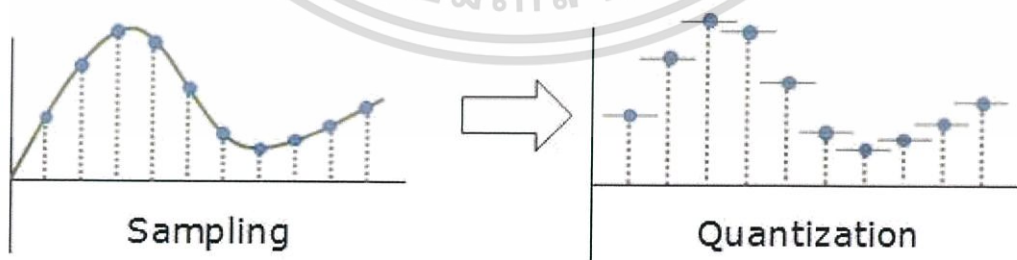
การสุ่มตัวอย่างแบบพีซีเอ็ม (Pulse Code Modulation: PCM) เป็นการแปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้การจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing) สัญญาณ PCM ใช้หลักการของเลขฐานสองในการแปลงมี 2 สถานะ คือ สถานะสูงแสดงด้วยลอจิก 1 และ สถานะต่ำ แสดงด้วยลอจิก 0 เพราะฉะนั้นจึงต้องมีขั้นตอนในการทำให้ขนาดของสัญญาณของข้อมูลเป็นแบบไม่ต่อเนื่องก่อน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) เป็นขั้นตอนการวัดขนาดของสัญญาณแอนะล็อกเป็นจุด ๆ โดยแต่ละจุดมีระยะห่างที่เท่ากัน ทำให้สัญญาณแอนะล็อกจะกลายมาเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-Time Signal) ดังรูปที่ 2.26
- 2) ขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing) เป็นขั้นตอนการจัดระดับความสูงของกลุ่มตัวอย่างสัญญาณ (Sampling) ที่ได้จากขั้นตอนแรก ให้อยู่ในระดับที่จำกัดค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.27
- 3) ขั้นตอนการเข้ารหัส (Encoding) เป็นขั้นตอนการแทนระดับของสัญญาณต่างๆในขั้นตอนที่สอง การจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing) ด้วยกลุ่มของ บิต (Bit) โดยจำนวนบิตที่ใช้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของสัญญาณที่ต้องการ ดังรูปที่ 2.28 เช่น ถ้าต้องการความละเอียด 4 บิต ต้องจัดระดับสัญญาณในขั้นตอนที่สองเป็นทั้งหมดเท่ากับ  $2^3 = 8$  ระดับ เป็นต้น

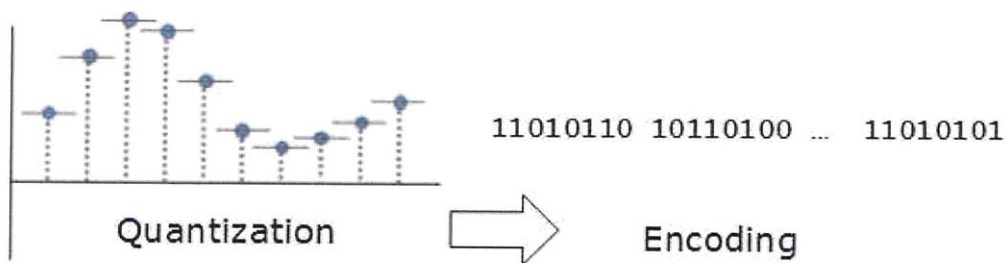


รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) [18]



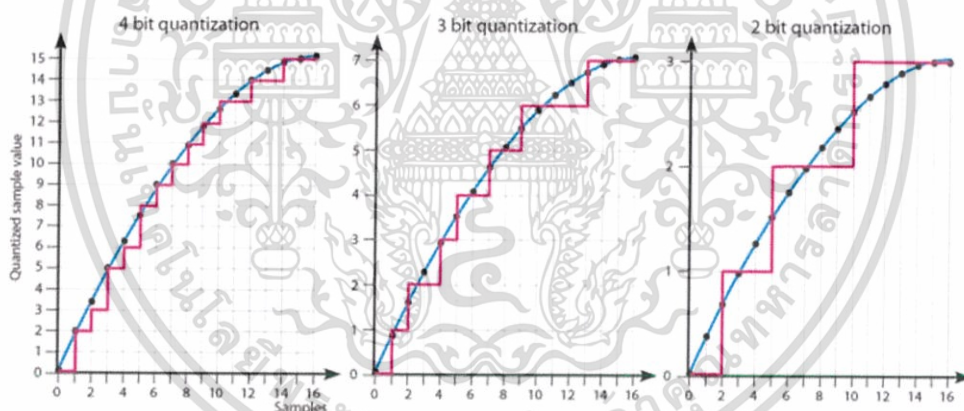
รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการเข้ารหัส (Encoding) [18]

หลังจากขั้นตอนการสุ่มตัวอย่าง (Sampling) จะต้องทำการกำหนดความละเอียดของขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing) ดังรูปที่ 2.29 โดยถ้ากำหนดให้มีความละเอียดมาก ค่าที่แปลงออกมาก็จะมีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากกว่าความละเอียดต่ำ แต่ถ้ากำหนดให้มีความละเอียดมากเกินไป ก็ไม่เกิดประโยชน์ในการวัด เพราะเครื่องมือที่ใช้วัดนั้น ไม่สามารถแยกแยะความละเอียดที่มากเกินไปได้



รูปที่ 2.29 การจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ที่มีความละเอียด 4 bit 3 bit และ 2 bit [19]

### 2.8.2 วิธีการคำนวณการแปลงแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

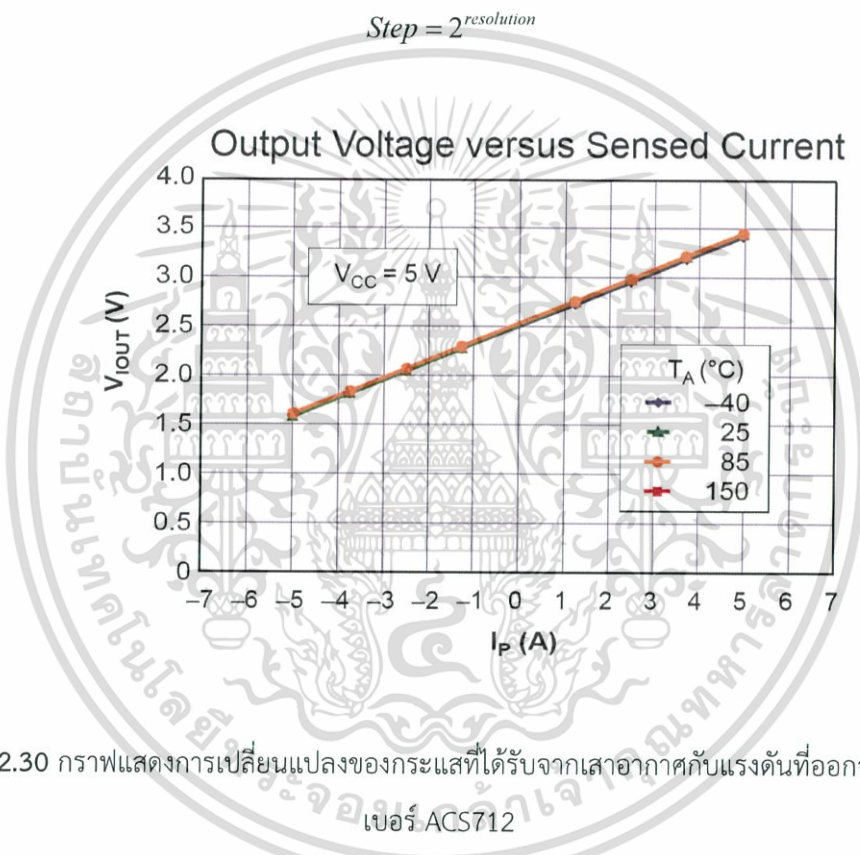
ใน Arduino Uno R3 จะใช้หลักการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยวิธีการ PCM ในการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า (สัญญาณแอนะล็อก) เป็นกระแสไฟฟ้า (สัญญาณดิจิทัล) จากรูปที่ 2.30 สังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากเสาอากาศและแรงดันที่ออกจากไอซีเบอร์ ACS712 นั้นเป็นเส้นตรง (Linear) ค่า LRV (Lower Range Values) คือค่าที่ต่ำที่สุดในย่านการวัดหนึ่ง และมีค่า URV (Upper Range Values) คือค่าที่สูงที่สุดในย่านการวัดเดียวกัน โดยย่านการวัด (Span) หาได้จากสมการที่ 2.14 ซึ่งก็คือผลต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่านการวัดนั้นๆ เช่นกระแสไฟฟ้ามีค่าระหว่าง -5 ถึง 5 แอมแปร์ จะมีย่านการวัดเท่ากับ 10 แอมแปร์ ในลำดับถัดมา Arduino Uno R3 จะใช้หลักการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยวิธีการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing) เริ่มแรกจะต้องกำหนดค่าความละเอียด (Resolution) ที่ต้องการ จากนั้นคำนวณหาจำนวนขั้น (Step) จากสมการที่ 2.15 เช่น กำหนดให้มีความละเอียดที่ 10 บิต จะมีจำนวนขั้นทั้งหมดเท่ากับ 1024 ขั้น (ขั้นที่ 0 ถึง ขั้นที่ 1023)

$$Span = URV - LRV \quad (2.14)$$

$$Step = 2^{resolution} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.30 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่ได้รับจากเสาอากาศกับแรงดันที่ออกจากไอซีเบอร์ ACS712

(ที่มา: <http://www.ebay.com/itm/New-5A-20A-30A-Range-Current-Sensor-Module-ACS712-For-Arduino-Raspberry-Pi-UNO-/112275500486>)

(ที่มา:datasheet ACS712-ALLEGRO)

จากสมการที่ 2.14 และ 2.15 จะใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำการแปลงจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ออกมาเป็นสมการที่ 2.16 และ 2.17

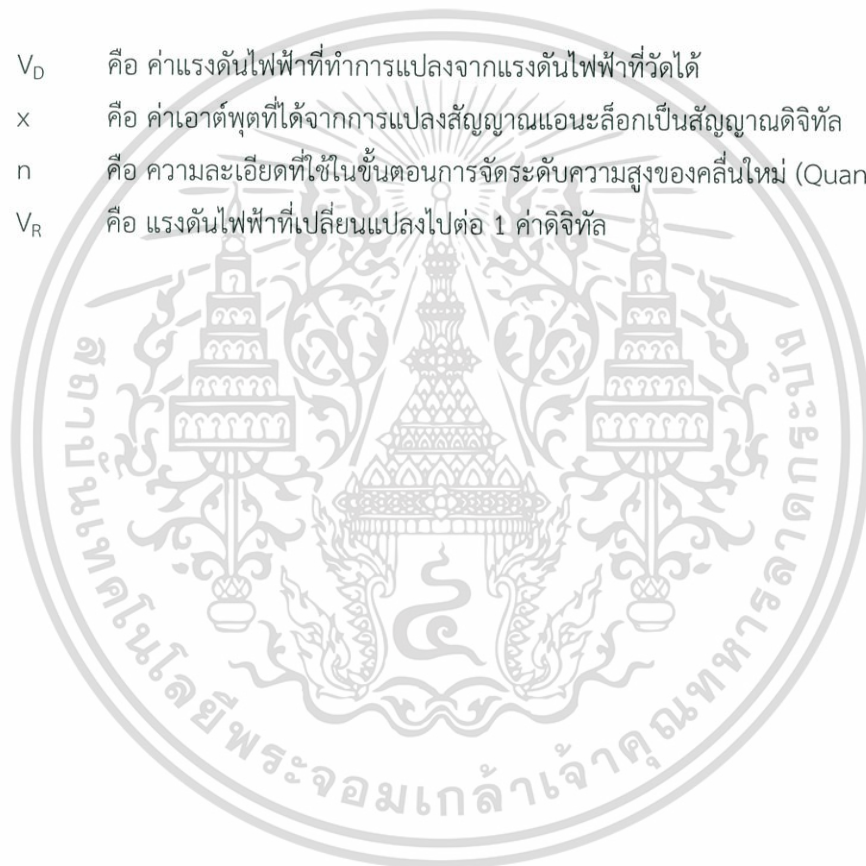
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_R = \frac{S_V}{2^n} \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $V_R$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปต่อ 1 ค่าดิจิทัล  
 $S_V$  คือ ย่านการวัดของแรงดันไฟฟ้าที่สามารถวัดได้  
 $n$  คือ ความละเอียดที่ใช้ในขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing)

$$V_D = V_R (x - 2^{n-1}) \quad (2.17)$$

- เมื่อ  $V_D$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำการแปลงจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้  
 $x$  คือ ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล  
 $n$  คือ ความละเอียดที่ใช้ในขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ (Quantizing)  
 $V_R$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปต่อ 1 ค่าดิจิทัล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

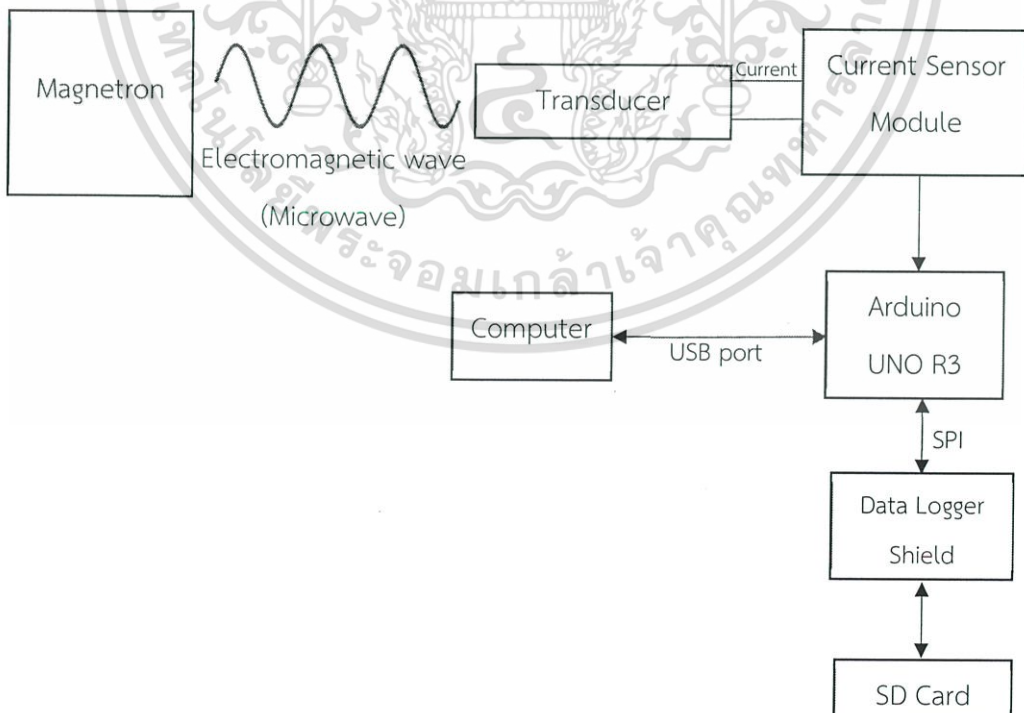
## บทที่ 3

### การออกแบบและวิธีดำเนินการ

ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบและวิธีการดำเนินงานของโครงงานนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบโครงงาน การติดตั้งอุปกรณ์ทางฝั่งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ขั้นตอนในการทดลอง และ ยังรวมถึงการอธิบายการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในโครงงาน ซึ่งจะแสดงเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

#### 3.1 การออกแบบโครงงาน

โครงงานนี้จะทำการออกแบบอุปกรณ์การวัด และเก็บค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในคลื่นความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้การเขียนโปรแกรมผ่านทาง Arduino IDE และใช้บอร์ดอาดูโนในการรับค่าจากไอซีวัดกระแส แล้วจึงนำค่าที่ได้บันทึกลงในการ์ด (SD Card) จากรูปที่ 3.1 ในส่วนของภาพรวมการทำงาน ซึ่งเริ่มมาจากการที่แมกนีตรอนสร้างและปล่อยคลื่นไมโครเวฟไปยังเซนเซอร์ซึ่งทำหน้าที่แปลงคลื่นไมโครเวฟให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าและส่งต่อไปยังโมดูลวัดกระแส โดยบอร์ดอาดูโนจะทำหน้าที่รับค่าที่ส่งมาจากโมดูลวัดกระแส ผ่านการแปลงแรงดันไฟฟ้าโดยใช้การแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล จากนั้นนำค่าที่แปลงได้มาบันทึกลงในการ์ด ผ่านทางอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บค่าต่างๆ (Data Logger Shield) และแสดงค่าบนคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตอนุกรมด้วย



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการดำเนินงานของโครงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ฮาร์ดแวร์

ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะเป็นการออกแบบเซนเซอร์ที่ใช้ติดตั้งในเตาไมโครเวฟ การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่เซนเซอร์ที่ใช้รับคลื่นไมโครเวฟ โมดูลวัดกระแส อาวุธ และอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บค่าต่าง ๆ โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งสามารถแสดงในหัวข้อย่อยต่อไป

### 3.2.1 การออกแบบเซนเซอร์

เซนเซอร์ที่ใช้สำหรับการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านคลื่นความถี่ไมโครเวฟ เป็นเซนเซอร์ที่ออกแบบบนพื้นฐานของสายอากาศแบบโมโนโพล ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ตัวสายอากาศและฐานซึ่งจะใช้ตัวถังของเตาไมโครเวฟมาทำหน้าที่เป็นกราวด์ ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ส่วนหนึ่งจะเป็นส่วนของกราวด์และต่อกับตู้ไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นกราวด์ของเซนเซอร์ โดยการต่อกราวด์จะนำสายกราวด์จากเซนเซอร์ไปต่อเข้ากับส่วนฐานที่อยู่ข้างใต้เตาไมโครเวฟ จากรูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์ในเตาไมโครเวฟ เพื่อให้เซนเซอร์สามารถรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟในเตาไมโครเวฟได้ดี โดยจุดที่ติดตั้งเซนเซอร์จะเป็นตำแหน่งที่สามารถรับคลื่นไมโครเวฟได้ดีที่สุดเนื่องจากอยู่ในทิศทางที่คลื่นถูกปล่อยออกมาจากท่อนำคลื่น (Wave Guide)



รูปที่ 3.2 เซนเซอร์

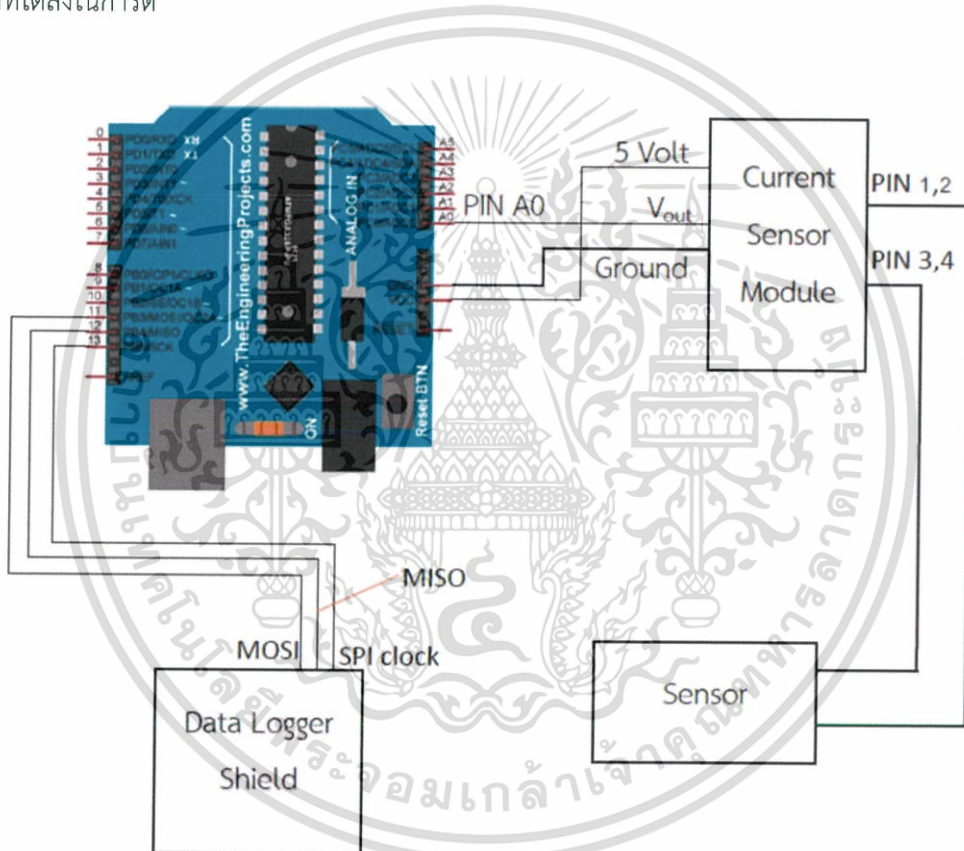


รูปที่ 3.3 การติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับตู้ไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ

การเชื่อมต่อจะเป็นไปตามรูปที่ 3.4 ซึ่งกระแสที่ใช้นั้นได้มาจากเซนเซอร์ที่รับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนคลื่นนั้นเป็นกระแสไฟฟ้าออกมา จากรูปที่ 3.4 การทำงานจะเริ่มจากการที่เซนเซอร์รับคลื่นไมโครเวฟและทำการเปลี่ยนไปเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อส่งไปยังโมดูลวัดกระแส เมื่อโมดูลวัดกระแสได้รับกระแสไฟฟ้าที่มาจากเซนเซอร์จะทำการส่งออกจากขา 7 ( $V_{out}$ ) ของโมดูลไปยังบอร์ดอาดูโนที่ขา A0 (Analog 0 หรือขาอนาล็อก 14) ซึ่งค่าที่แสดงบนคอมพิวเตอร์เป็นค่า 10 บิต ซึ่งแปลงมาจากแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 5 โวลต์ โดยที่ 0 คือค่า 0 โวลต์และที่ 1023 คือค่า 5 โวลต์ จากนั้นทำการบันทึกค่าลงการ์ด โดยใช้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บค่าต่างๆ (Data Logger Shield) ในการเขียนค่าที่ได้ลงในการ์ด



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

### 3.3 ซอฟต์แวร์

การออกแบบโปรแกรมบันทึกค่าลงการ์ด จากแผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมในรูปที่ 3.5 ขั้นแรกโปรแกรมจะทำการสร้างไฟล์สำหรับบันทึกค่าในการ์ด จากนั้นจะทำการกำหนดตัวแปรที่ใช้รับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากอนาล็อกขา A0 บนบอร์ดอาดูโน และกำหนดตัวแปรสำหรับรับสัญญาณในการเริ่มบันทึกข้อมูล ซึ่งจะใช้เป็นสัญญาณจากปุ่มกด (Push Button Switch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในโปรแกรมมีการกำหนดสมการ สำหรับใช้ในการแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของค่าที่เป็นกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการอ่านค่าที่โมดูลส่งมาจะเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่ากลับไปให้อยู่ในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าก่อนบันทึกค่าลงการ์ด โดยใช้สมการในบทที่ 2 เป็นสมการพื้นฐาน ซึ่งจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$I_R = \frac{S_I}{2^n} \quad (3.1)$$

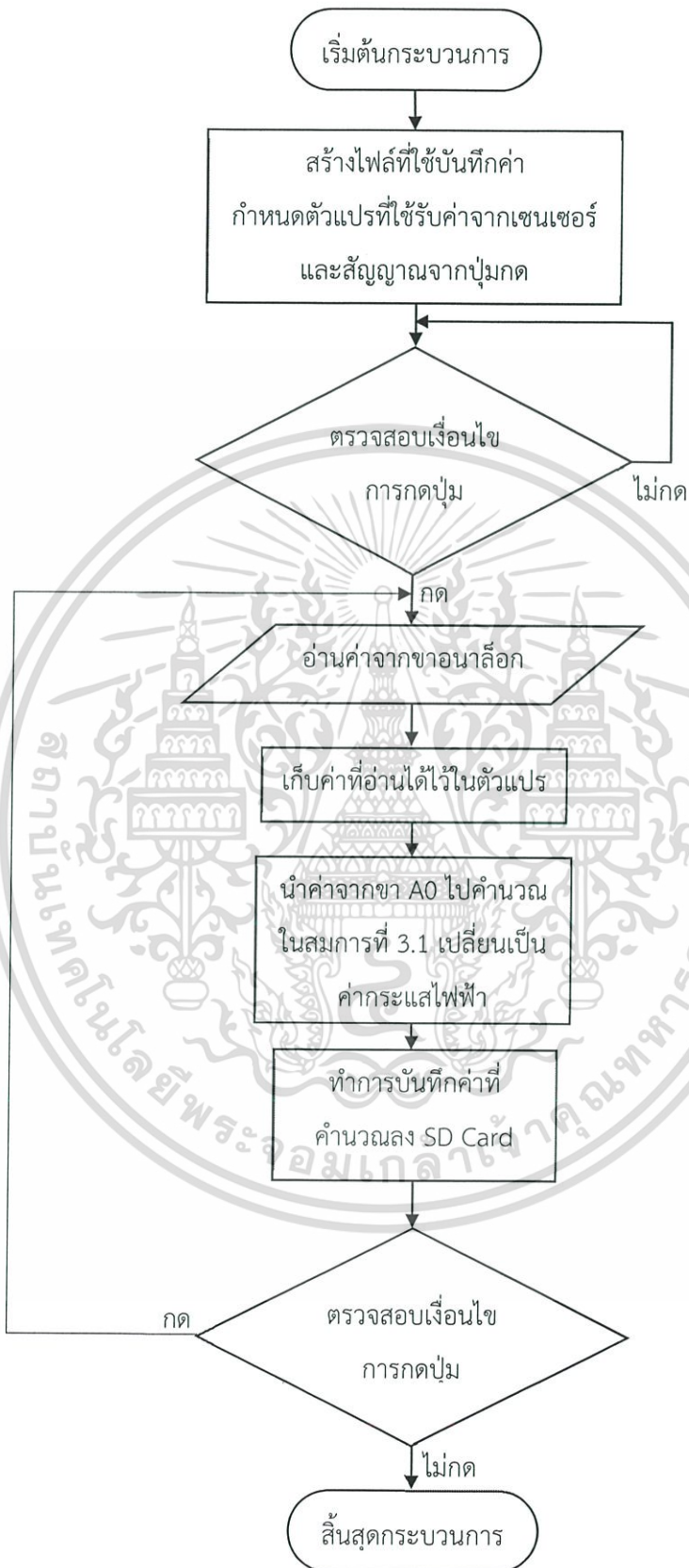
เมื่อ	$I_R$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปต่อ 1 ค่าดิจิทัล
	$S_I$	คือ ย่านการวัดของกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้
	$n$	คือ ความละเอียดในขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่

$$I_D = I_R (x - 2^{n-1}) \quad (3.2)$$

เมื่อ	$I_D$	คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการแปลงจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้
	$x$	คือ ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล
	$n$	คือ ความละเอียดในขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่
	$I_R$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปต่อ 1 ค่าดิจิทัล

จากสมการที่ 3.1 กำหนดให้ย่านการวัดของกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้หาได้จากสมการที่ 2.14 โดย LVR จะมีค่า -5 แอมแปร์ และ UVR จะมีค่า 5 แอมแปร์ ทำให้  $S_I$  มีค่าเท่ากับ 10 แอมแปร์ และความละเอียดที่ 10 bit ในขั้นตอนการจัดระดับความสูงของคลื่นใหม่ ทำให้  $n$  มีค่าเท่ากับ 10 แทนค่าลงในสมการที่ 3.1 จากนั้นนำค่า  $I_R$  ไปแทนในสมการที่ 3.2 จะได้เป็นสมการที่สามารถนำไปคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ โดยค่า  $I_D$  เมื่อความละเอียดเท่ากับ 10 บิต จะแสดงตามสมการที่ 3.3

$$I_D = 0.009765625(x - 512) \quad (3.3)$$

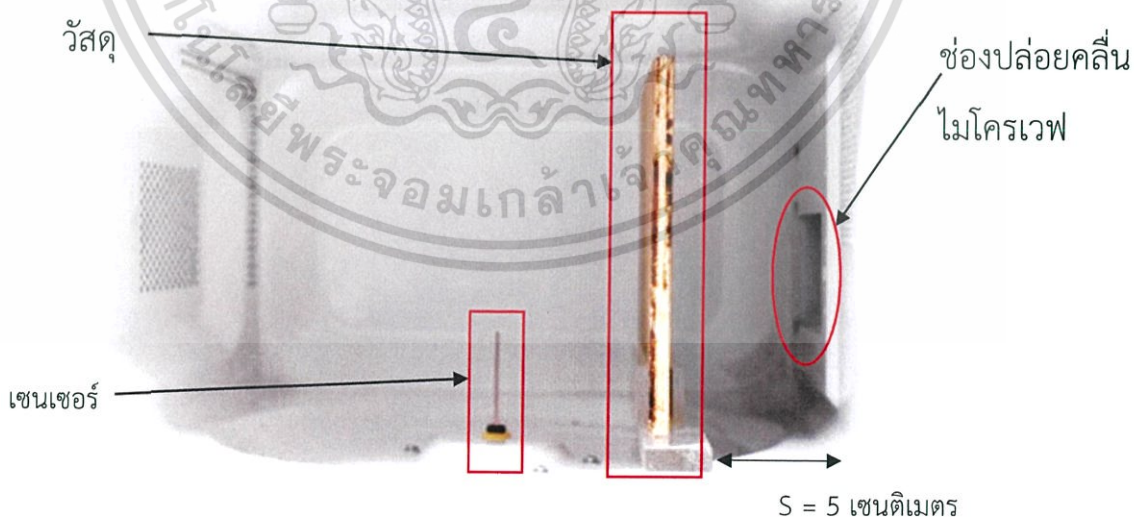


รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมบันทึกค่าลงการ์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

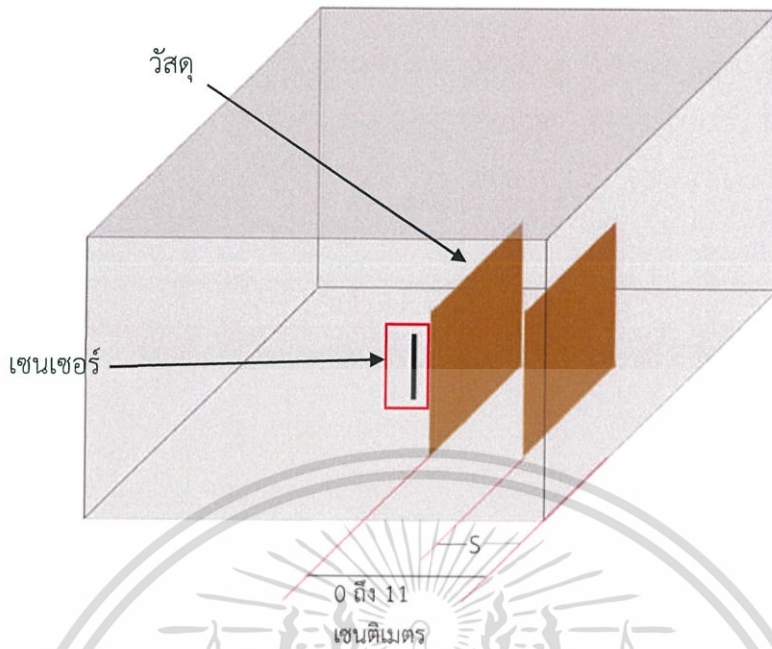
### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

1. เชื่อมต่อบอร์ดอาดูโนเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB Port และทำการเปิด Serial Monitor ใน Arduino IDE เพื่อดูค่าที่เปลี่ยนแปลง
2. นำวัสดุที่ใช้ในการทดลองใส่เข้าไปในเตาไมโครเวฟดังแสดงในรูปที่ 3.6 ในการทดลองจะใช้วัสดุ 3 ชนิด ประกอบไปด้วย แผ่นไม้ แผ่นอะคริลิก และแผ่นเซรามิก ที่มีขนาดเท่ากัน โดยจะมีขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 19.5 เซนติเมตร และความหนา 7 มิลลิเมตร
3. หลังจากติดตั้งวัสดุเรียบร้อยแล้วไปทำการเปิดเตาไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 3 วินาที ซึ่งหากใช้เวลาน้อยกว่านี้ จะไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากกระบวนการกำเนิดคลื่นไมโครเวฟนั้นต้องรอให้ไส้หลอดร้อนเพียงพอก่อนที่ไฟฟ้าแรงดันสูง จะมาทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมาจากไส้หลอดได้
4. กดปุ่มเพื่อเริ่มการเขียนข้อมูลลง SD Card ในขณะที่เตาไมโครเวฟทำงาน จากนั้นเปิดฝาดูและพักตู้ไมโครเวฟไว้ 10 นาที เป็นการระบายความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของไส้หลอดกลับมาใกล้เคียงกัน และเป็นการควบคุมให้ตัวแมกนีตรอนมีสถานะเริ่มต้นเหมือนเดิมทุกครั้งที่ทำกรทดลอง ซึ่งจะช่วยลดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดลงได้
5. ทำการทดลอง 10 ครั้งต่อระยะที่วางวัสดุ ดังรูปที่ 3.7 ระยะที่วางวัสดุ คือ S โดยเพิ่มระยะจาก 0 ถึง 11 เซนติเมตรซึ่งวางห่างจากช่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟ
6. นำค่าที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อจำแนกวัสดุต่อไป



รูปที่ 3.6 การติดตั้งวัสดุห่างจากช่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟ 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการวางวัตถุในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

จากการทดลองวัดคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบนคลื่นความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ ในการแปลงคลื่นไมโครเวฟให้เป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้งต่อหนึ่งระยะ โดยใน ขั้นตอนแรกทำการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขณะที่ไม่มีวัสดุมาขวางกั้น และจากนั้นทำการวัดโดยเลื่อน แผ่นวัสดุประเภทต่าง ๆ ที่มีความหนา 7 มิลลิเมตร กว้าง 15 เซนติเมตร และยาว 19.5 เซนติเมตร อันได้แก่ แผ่นไม้ แผ่นอะคริลิก และแผ่นเซรามิก ที่ตั้งอยู่ด้านหน้าของเซนเซอร์ไปตามระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตร โดยเริ่มนับจากช่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟทางด้านขวาเป็น 0 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.7 เป็น เวลา 3 วินาที เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ และดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน การวางวัสดุไว้ที่ระยะต่าง ๆ จากนั้นค้นหาระยะที่มีค่าที่แตกต่างกันชัดเจนที่สุด

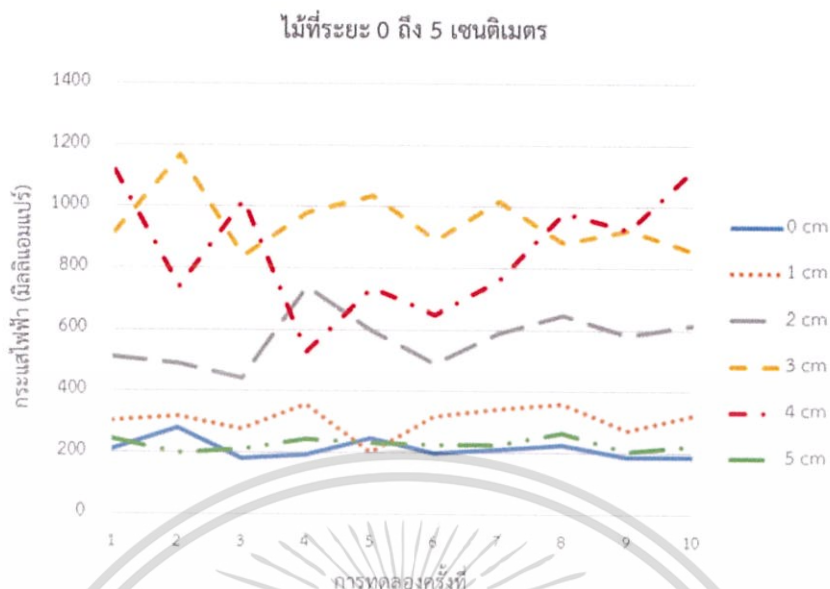
#### 4.1 การทดลองเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตรของวัสดุต่าง ๆ

##### 4.1.1 การทดลองของแผ่นไม้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร

การทดลอง ครั้งที่	กระแสที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร (มิลลิแอมแปร์)					
	0	1	2	3	4	5
1	211.35	303.82	510.78	915.87	1118.42	244.38
2	280.04	317.03	488.76	1167.74	739.74	198.15
3	179.65	277.40	442.52	838.82	1019.79	211.36
4	191.54	356.66	739.74	981.92	528.39	244.38
5	246.58	202.55	598.84	1036.96	734.46	232.49
6	198.15	317.03	488.76	892.98	649.16	224.56
7	211.36	343.45	587.83	1017.15	759.56	224.56
8	224.59	361.06	649.92	882.41	982.80	264.19
9	184.94	273.00	581.23	924.68	924.68	204.75
10	184.94	322.32	616.45	855.99	1122.82	221.92
ค่าเฉลี่ย	211.31	307.43	570.48	951.45	857.98	227.07
ค่า SD	31.80	47.26	89.19	100.72	204.22	20.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

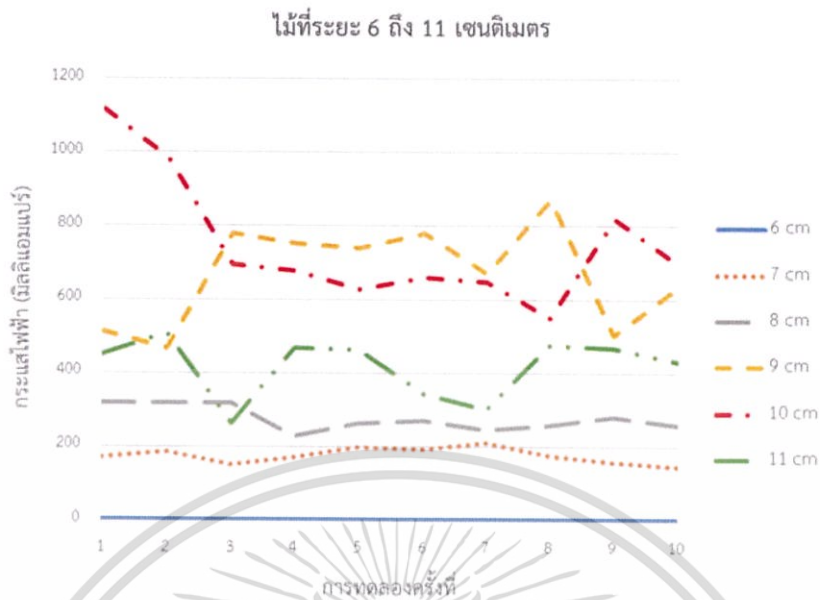


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 – 5 เซนติเมตรกับจำนวนการทดลองของแผ่นไม้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร

การทดลอง ครั้งที่	กระแสที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร (มิลลิแอมแปร์)					
	6	7	8	9	10	11
1	0	171.73	317.03	512.54	1116.22	449.13
2	0	184.94	317.03	468.95	984.12	508.58
3	0	151.92	317.03	779.38	695.71	264.20
4	0	171.73	228.97	752.96	678.10	466.74
5	0	198.15	264.19	739.74	627.46	462.34
6	0	193.75	270.8	779.37	660.48	343.46
7	0	211.36	246.58	669.29	647.28	301.18
8	0	176.13	257.59	871.84	549.52	475.55
9	0	158.52	281.8	501.97	819.00	466.75
10	0	145.31	257.59	634.06	695.71	431.52
ค่าเฉลี่ย	0	176.35	275.86	671.01	747.36	416.95
ค่า SD	0	21.08	31.63	137.90	175.90	83.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 6 – 11 เซนติเมตรกับจำนวนการทดลองของแผ่นไม้

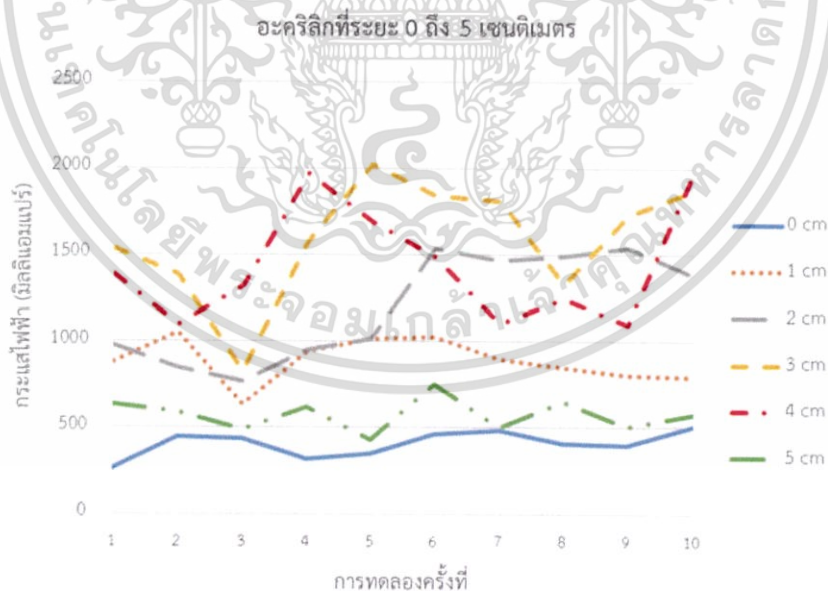
จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ได้ในแต่ละระยะของแผ่นไม้จะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่ เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ และทิศทางของคลื่นไมโครเวฟภายในเตา ซึ่งผลกระทบจากคุณสมบัติของคลื่นที่ส่งผลมากที่สุดคือ การแทรกสอดของคลื่นที่ทำให้คลื่นมีพลังงานที่สูงขึ้น โดยที่การแทรกสอดนี้จะมีปัจจัยของคุณสมบัติอื่น ๆ ของคลื่นมาเกี่ยวข้องประกอบไปด้วย การหักเหหรือเบี่ยงเบนของคลื่นเมื่อผ่านวัสดุหรือก็คือมองวัสดุเป็นตัวกลางอีกตัวหนึ่ง que เพิ่มเข้ามา ซึ่งการหักเหจะขึ้นกับความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุทั้งสอง และการสะท้อนของคลื่นเมื่อกระทบพื้นผิวของวัสดุรวมไปถึงลักษณะการเดินทางของคลื่น จากเหตุที่ได้กล่าวไปทำให้ที่ระยะต่าง ๆ ของการวางวัสดุมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การทดลองของอะคริลิก

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร

การทดลอง ครั้งที่	กระแสที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร (มิลลิแอมแปร์)					
	0	1	2	3	4	5
1	264.20	880.65	977.52	1532.33	1382.61	634.06
2	443.85	1051.49	845.42	1382.61	1092.00	590.03
3	435.92	634.07	766.16	824.28	1320.97	488.76
4	317.04	940.53	951.10	1569.31	1968.24	618.21
5	350.06	1012.74	1014.50	2021.08	1690.84	429.32
6	462.34	1025.07	1532.32	1838.03	1483.89	748.55
7	484.36	898.26	1463.63	1809.73	1099.05	497.56
8	409.50	849.82	1492.70	1326.25	1241.71	651.68
9	396.29	805.79	1541.13	1728.58	1096.41	501.97
10	501.97	792.58	1379.09	1869.17	1981.45	575.94
ค่าเฉลี่ย	406.55	889.10	1196.36	1590.14	1435.72	573.61
ค่า SD	76.09	127.27	311.58	348.88	341.41	95.19

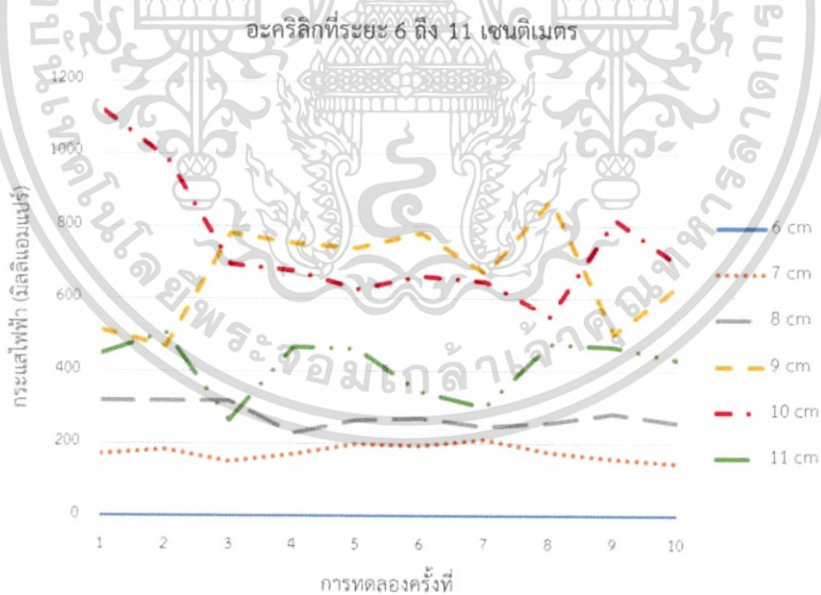


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 – 5 เซนติเมตรกับจำนวนการทดลองของแผ่นอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร

การทดลอง	กระแสที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร (มิลลิแอมแปร์)					
	6	7	8	9	10	11
1	198.15	264.19	660.49	1307.76	1083.52	352.26
2	193.74	290.61	369.88	1490.05	1792.12	255.39
3	246.58	211.36	627.46	1262.85	1329.78	228.97
4	184.94	257.59	537.20	1336.07	1351.79	281.80
5	220.16	255.39	515.18	1294.55	1554.34	220.16
6	202.55	264.19	660.48	1537.61	1737.07	217.96
7	189.34	258.91	523.98	1287.00	1564.03	299.42
8	216.64	264.19	488.76	1699.65	1334.18	363.27
9	220.16	248.34	638.47	1733.11	1638.00	237.78
10	211.35	264.19	620.85	1669.71	1453.07	158.52
ค่าเฉลี่ย	208.36	257.90	564.28	1461.84	1483.79	261.55
ค่า SD	18.50	19.70	93.97	187.85	215.79	63.52



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 6 – 11 เซนติเมตรกับจำนวนการทดลองของแผ่นอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

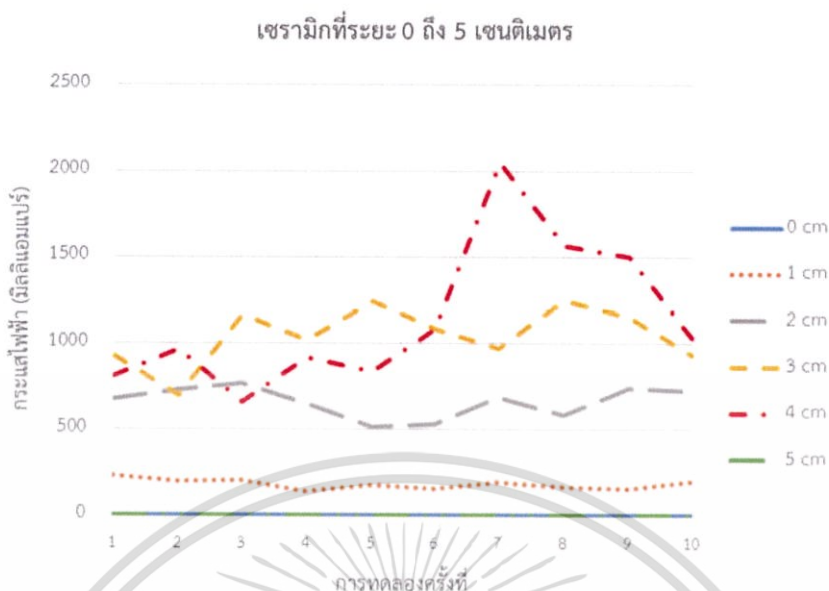
จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ได้ในแต่ละระยะของแผ่นอะคริลิกจะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่และยังมีค่ามากกว่าแผ่นไม้ เนื่องมาจากคุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟทิศทางของคลื่นไมโครเวฟภายในเตา และพื้นผิวของอะคริลิกที่มีความมันวาวและเรียบ ซึ่งผลกระทบจากคุณสมบัติของคลื่นที่ส่งผลมากที่สุดคือ การแทรกสอดของคลื่นที่ทำให้คลื่นมีพลังงานที่สูงขึ้น โดยที่การแทรกสอดนี้จะมีปัจจัยของคุณสมบัติอื่น ๆ ของคลื่นมาเกี่ยวข้องประกอบไปด้วย การหักเหหรือเบี่ยงเบนของคลื่นเมื่อผ่านวัสดุ และการสะท้อนของคลื่นเมื่อกระทบพื้นผิวของวัสดุ ซึ่งอะคริลิกมีพื้นผิวที่เรียบและความมันวาวทำให้เกิดการสะท้อนได้ดีกว่าไม้ จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่น จากเหตุที่ได้กล่าวไปทำให้ที่ระยะต่าง ๆ ของการวางวัสดุมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน

#### 4.1.3 การทดลองของเซรามิก

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร

การทดลอง ครั้งที่	กระแสที่ระยะ 0 ถึง 5 เซนติเมตร (มิลลิแอมแปร์)					
	0	1	2	3	4	5
1	0	228.97	673.69	929.08	812.4	0
2	0	198.15	730.94	697.47	964.31	0
3	0	202.55	766.16	1162.45	660.48	0
4	0	138.71	649.91	1017.15	918.08	0
5	0	178.33	512.54	1241.71	838.82	0
6	0	158.52	532.79	1083.2	1083.2	0
7	0	193.74	686.9	972.23	2047.5	0
8	0	169.09	585.63	1247	1565.35	0
9	0	158.52	739.74	1154.9	1500.62	0
10	0	198.15	726.53	933.49	1030.4	0
ค่าเฉลี่ย	0	182.47	660.48	1043.87	1142.11	0
ค่า SD	0	26.76	89.17	169.82	429.19	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

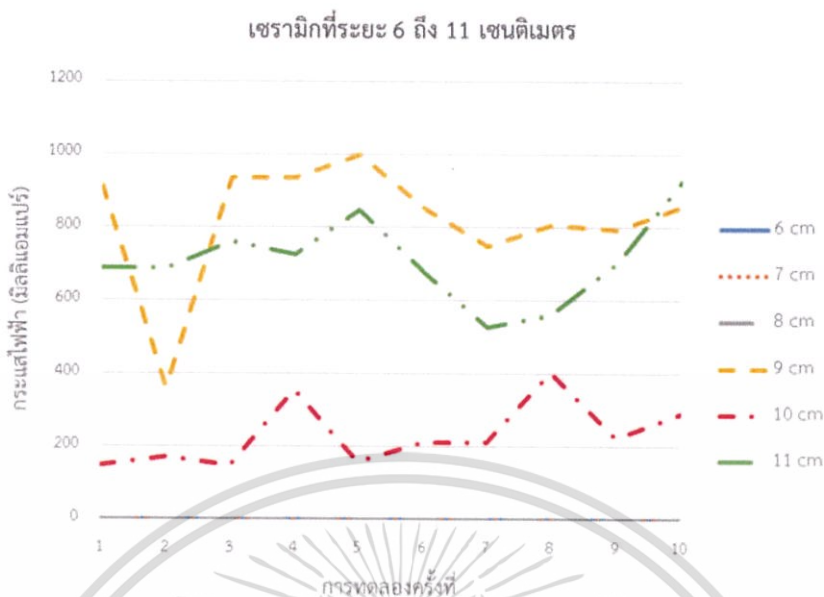


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 0 – 5 เซนติเมตรกับจำนวนการทดลองเซรามิก

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าของกระแสไฟฟ้าของไม้ที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสที่ระยะ 6 ถึง 11 เซนติเมตร (มิลลิแอมแปร์)					
	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	911.47	149.71	686.91
2	0	0	0	361.06	171.73	686.9
3	0	0	0	933.48	147.95	759.56
4	0	0	0	933.49	356.66	723.89
5	0	0	0	997.34	158.52	845.42
6	0	0	0	852.03	211.36	678.1
7	0	0	0	748.55	211.36	528.39
8	0	0	0	805.79	405.1	560.09
9	0	0	0	792.58	224.57	702.75
10	0	0	0	855.99	290.61	924.68
ค่าเฉลี่ย	0	0	0	819.18	232.76	709.67
ค่า SD	0	0	0	177.82	89.88	117.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ระยะ 6 – 11 เซนติเมตรกับจำนวนการทดลองเซรามิก

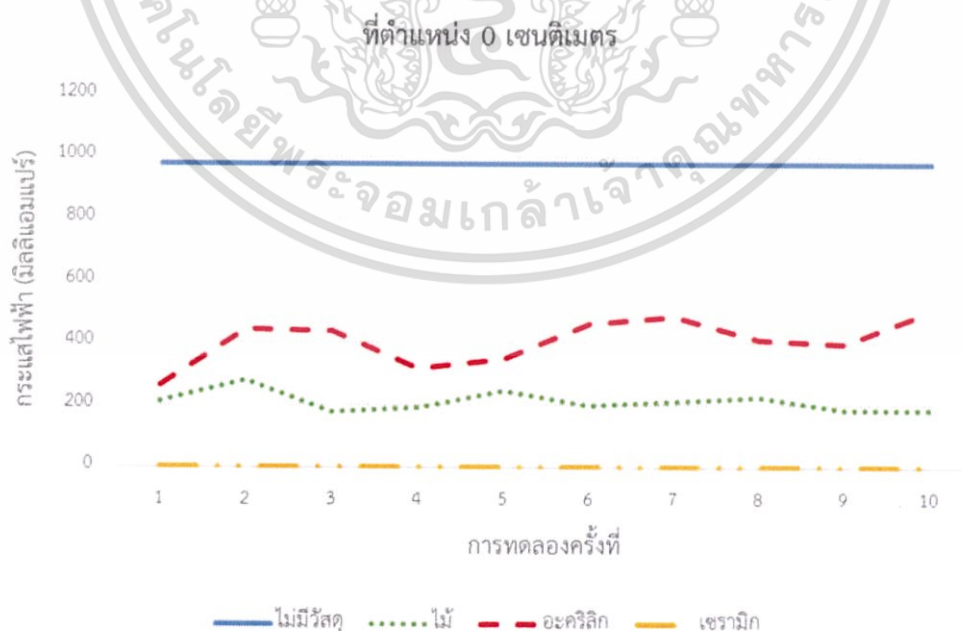
จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 ค่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ได้ในแต่ละระยะของแผ่นเซรามิกจะเห็นได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าของเซรามิกมีค่า 0 แอมแปร์มากที่สุดใน 3 วัสดุที่ทำการทดลองเนื่องมาจากแผ่นเซรามิกมีการเคลือบสารที่มีส่วนผสมของโลหะเคลือบอยู่ทำให้คลื่นเกิดการสะท้อนเมื่อกระทบกับแผ่นเซรามิกมากกว่าแผ่นไม้และแผ่นอะคริลิก จึงทำให้เซนเซอร์ที่อยู่อีกด้านไม่สามารถรับคลื่นได้ในระยะที่วางวัสดุไว้ใกล้ช่องปล่อยคลื่นไมโครเวฟ และในระยะ 5 ถึง 8 เซนติเมตรที่ค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 0 มิลลิแอมแปร์จะนำไปอธิบายในรูปที่ 4.19 เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้นว่าทำไมกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งผลกระทบจากคุณสมบัติของคลื่นที่ส่งผลมากที่สุดคือ การสะท้อนของคลื่นและปัจจัยของคุณสมบัติอื่น ๆ ของคลื่นที่เกี่ยวข้องอีกอย่าง คือ การหักเหหรือเบี่ยงเบนของคลื่นเมื่อผ่านวัสดุหรือก็คือมองวัสดุเป็นตัวกลางอีกตัวหนึ่งที่เพิ่มเข้ามา จากเหตุที่ได้กล่าวไปทำให้ที่ระยะต่าง ๆ ของการวางวัสดุมีค่ากระแสไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน

## 4.2 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ ที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตร

### 4.2.1 การเปรียบเทียบที่ระยะ 0 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 0 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	211.35	264.20	0
2	975.99	280.04	443.85	0
3	975.99	179.65	435.92	0
4	975.99	191.54	317.04	0
5	975.99	246.58	350.06	0
6	975.99	198.15	462.34	0
7	975.99	211.36	484.36	0
8	975.99	224.59	409.50	0
9	975.99	184.94	396.29	0
10	975.99	184.94	501.97	0
ค่าเฉลี่ย	975.99	211.31	406.55	0
ค่า SD	0	31.80	76.09	0



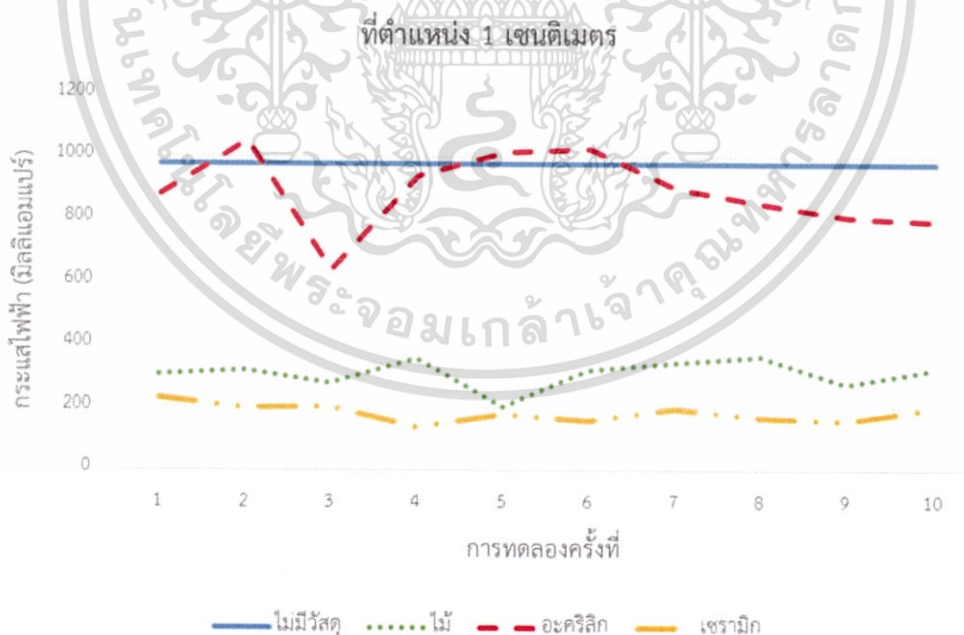
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 0 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบที่ระยะ 1 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 1 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	303.82	880.65	228.97
2	975.99	317.03	1051.49	198.15
3	975.99	277.40	634.07	202.55
4	975.99	356.66	940.53	138.71
5	975.99	202.55	1012.74	178.33
6	975.99	317.03	1025.07	158.52
7	975.99	343.45	898.26	193.74
8	975.99	361.06	849.82	169.09
9	975.99	273.00	805.79	158.52
10	975.99	322.32	792.58	198.15
ค่าเฉลี่ย	975.99	307.43	889.10	182.47
ค่า SD	0.00	9928.60	127.27	26.76



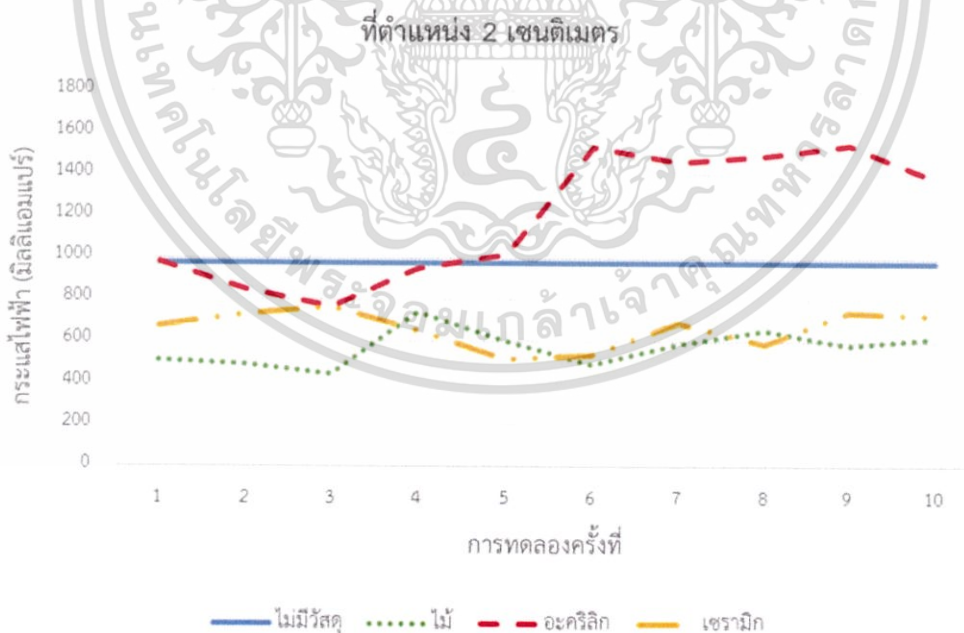
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 1 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 การเปรียบเทียบที่ระยะ 2 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 2 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	510.78	977.52	673.69
2	975.99	488.76	845.42	730.94
3	975.99	442.52	766.16	766.16
4	975.99	739.74	951.10	649.91
5	975.99	598.94	1014.50	512.5
6	975.99	488.76	1532.32	532.79
7	975.99	587.83	1463.63	686.90
8	975.99	649.92	1492.70	585.63
9	975.99	581.23	1541.13	739.7
10	975.99	616.45	1379.09	726.53
ค่าเฉลี่ย	975.99	570.48	1196.36	660.48
ค่า SD	0.00	89.19	311.58	89.17



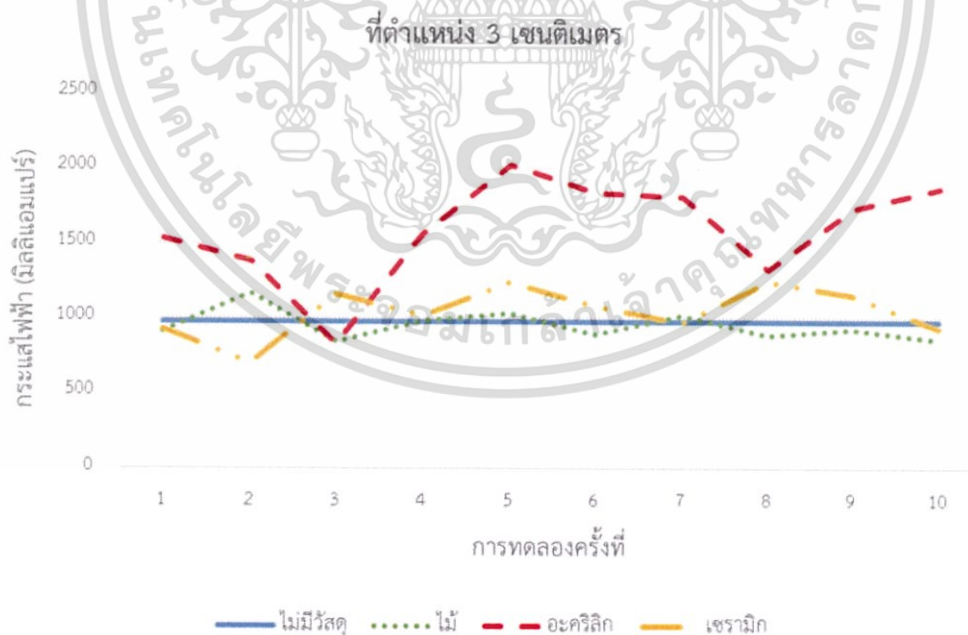
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 2 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 การเปรียบเทียบที่ระยะ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 3 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	915.87	1532.33	929.08
2	975.99	1167.74	1382.61	697.47
3	975.99	838.82	824.28	1162.45
4	975.99	981.92	1569.31	1017.15
5	975.99	1036.96	2021.08	1241.71
6	975.99	892.98	1838.03	1083.20
7	975.99	1017.15	1809.73	972.23
8	975.99	882.41	1326.25	1247.00
9	975.99	924.68	1728.58	1154.90
10	975.99	855.99	1869.17	933.49
ค่าเฉลี่ย	975.99	951.45	1590.14	1043.87
ค่า SD	0.00	100.72	348.88	169.82



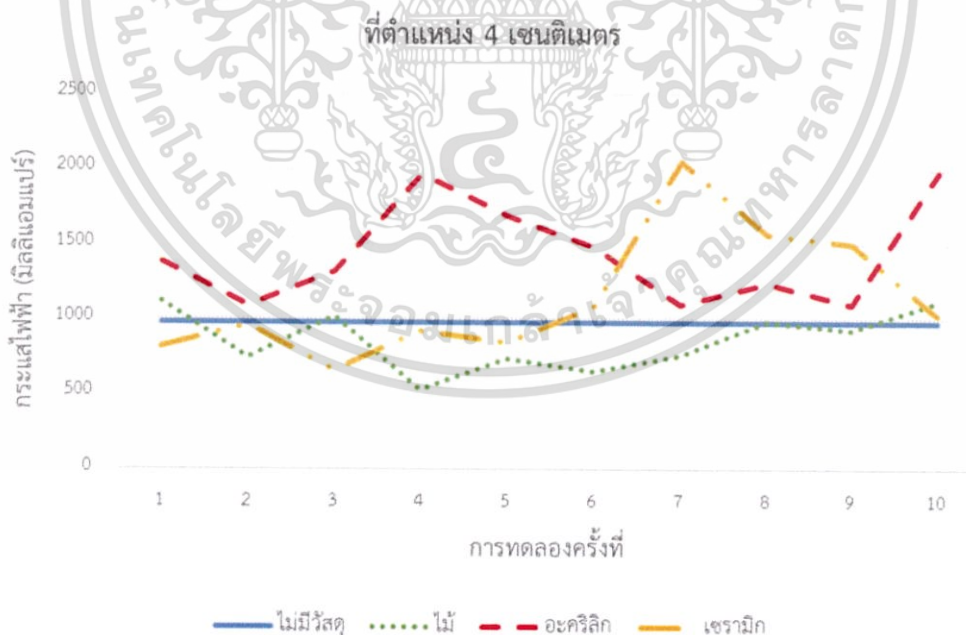
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 3 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 การเปรียบเทียบที่ระยะ 4 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 4 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	1118.42	1382.61	812.40
2	975.99	739.74	1092.00	964.31
3	975.99	1019.79	1320.97	660.48
4	975.99	528.39	1968.24	918.08
5	975.99	734.46	1690.84	838.82
6	975.99	649.16	1483.89	1083.20
7	975.99	759.56	1099.05	2047.50
8	975.99	982.80	1241.71	1565.35
9	975.99	924.68	1096.41	1500.62
10	975.99	1122.82	1981.45	1030.39
ค่าเฉลี่ย	975.99	857.98	1435.72	1142.11
ค่า SD	0.00	204.22	341.41	429.19



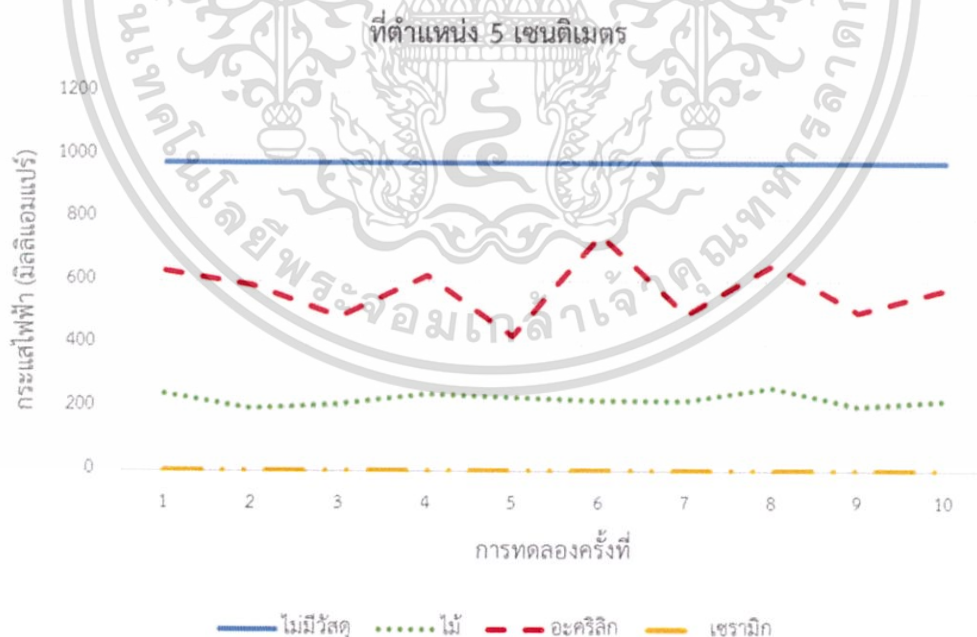
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 4 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.6 การเปรียบเทียบที่ระยะ 5 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 5 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	244.38	634.06	0
2	975.99	198.15	590.03	0
3	975.99	211.36	488.76	0
4	975.99	244.38	618.21	0
5	975.99	232.49	429.32	0
6	975.99	224.56	748.55	0
7	975.99	224.56	497.56	0
8	975.99	264.19	651.68	0
9	975.99	204.75	501.97	0
10	975.99	221.92	575.94	0
ค่าเฉลี่ย	975.99	227.07	573.61	0
ค่า SD	0.00	20.07	95.19	0.00



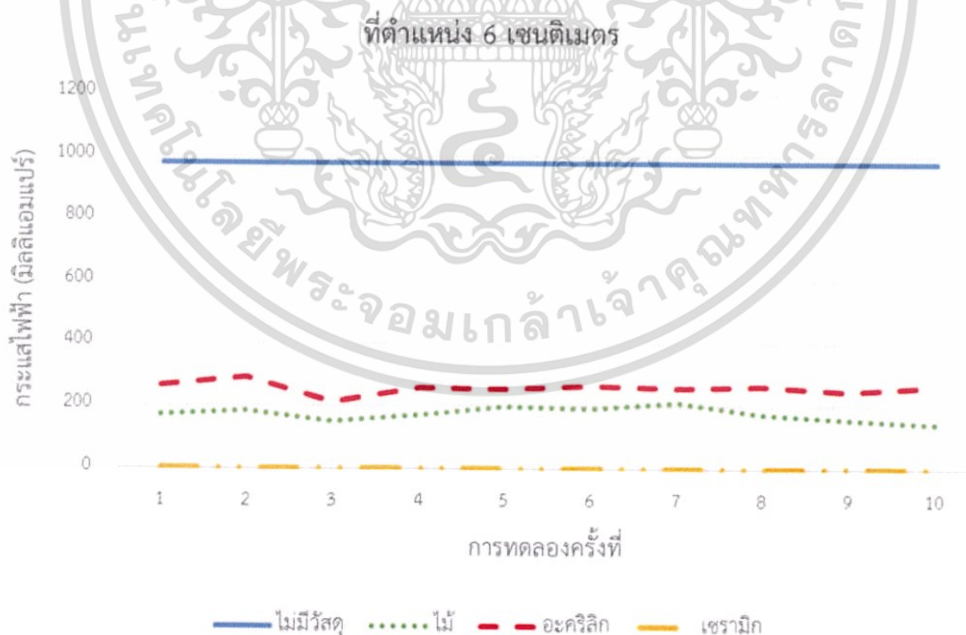
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.7 การเปรียบเทียบที่ระยะ 6 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 6 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	0	198.15	0
2	975.99	0	193.74	0
3	975.99	0	246.58	0
4	975.99	0	184.94	0
5	975.99	0	220.16	0
6	975.99	0	202.55	0
7	975.99	0	189.34	0
8	975.99	0	216.64	0
9	975.99	0	220.16	0
10	975.99	0	211.35	0
ค่าเฉลี่ย	975.99	0	208.36	0
ค่า SD	0.00	0.00	18.50	0.00



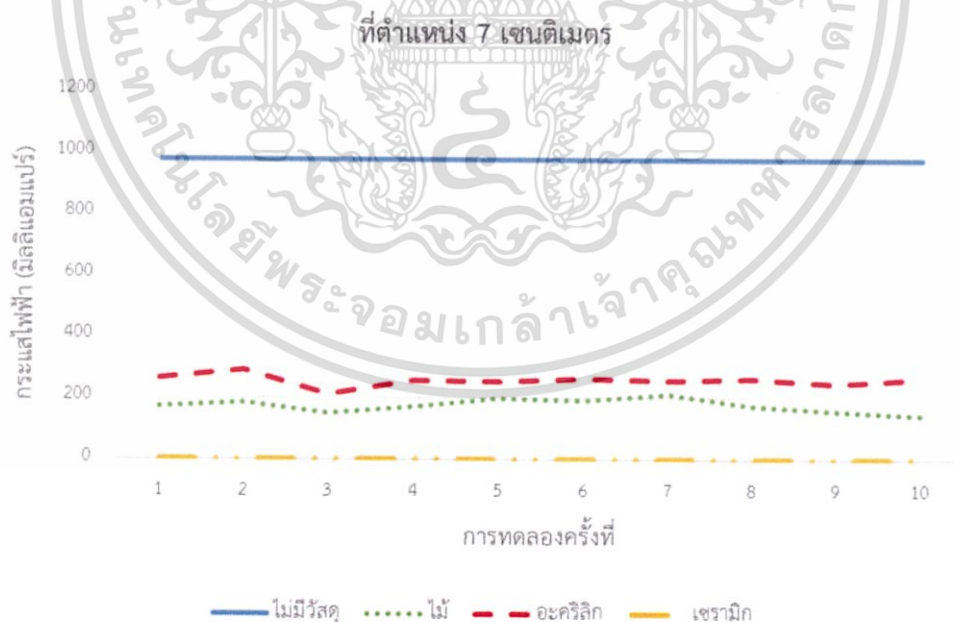
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 6 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.8 การเปรียบเทียบที่ระยะ 7 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 7 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	171.73	264.19	0
2	975.99	184.94	290.61	0
3	975.99	151.92	211.36	0
4	975.99	171.73	257.59	0
5	975.99	198.15	255.39	0
6	975.99	193.75	264.19	0
7	975.99	211.36	258.91	0
8	975.99	176.13	264.19	0
9	975.99	158.52	248.32	0
10	975.99	145.31	264.19	0
ค่าเฉลี่ย	975.99	176.35	257.89	0
ค่า SD	0.00	21.08	19.70	0.00



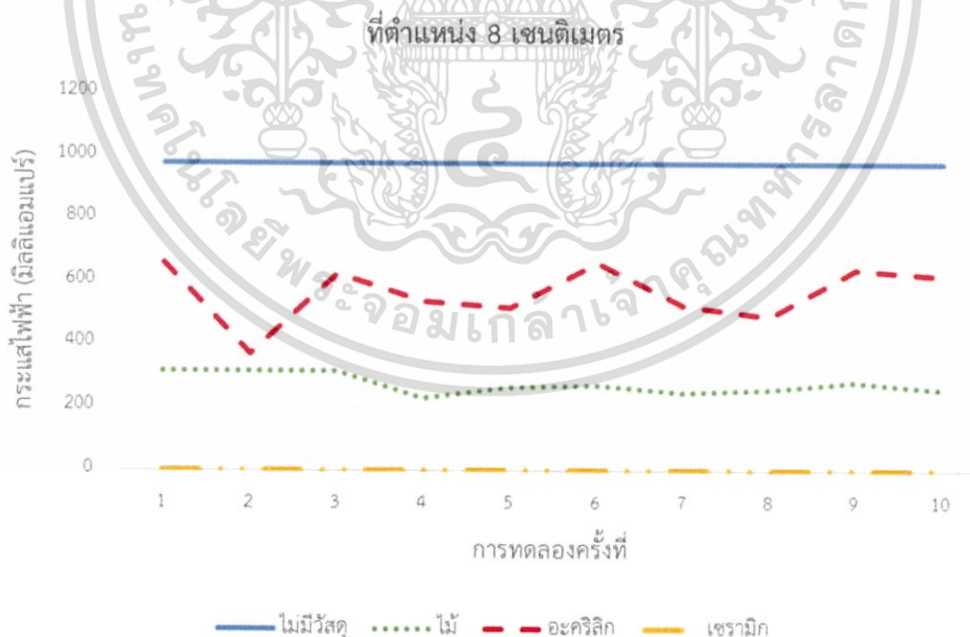
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 7 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.9 การเปรียบเทียบที่ระยะ 8 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 8 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	317.03	660.49	0
2	975.99	317.03	369.88	0
3	975.99	317.03	627.46	0
4	975.99	228.97	537.20	0
5	975.99	264.19	515.18	0
6	975.99	270.80	660.48	0
7	975.99	246.58	523.98	0
8	975.99	257.59	488.76	0
9	975.99	281.80	638.47	0
10	975.99	257.59	620.85	0
ค่าเฉลี่ย	975.99	275.86	564.27	0
ค่า SD	0.00	31.63	93.97	0.00



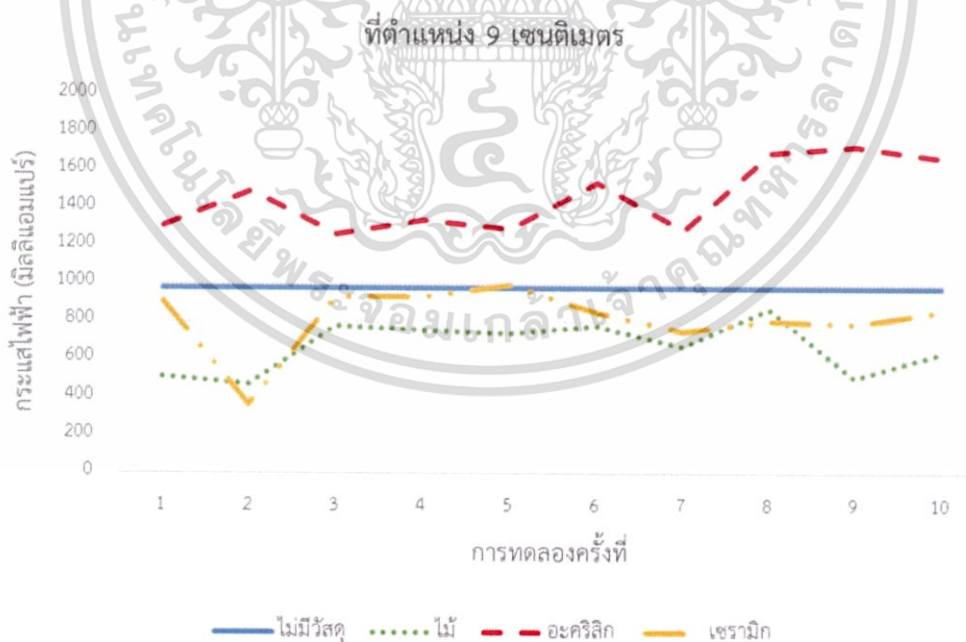
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.10 การเปรียบเทียบที่ระยะ 9 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 9 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	512.54	1307.76	911.47
2	975.99	468.95	1490.05	361.06
3	975.99	779.38	1262.85	933.48
4	975.99	752.96	1336.07	933.49
5	975.99	739.74	1294.55	997.34
6	975.99	779.37	1537.61	852.03
7	975.99	669.29	1287.00	748.355
8	975.99	871.84	1699.65	805.79
9	975.99	501.97	1733.11	792.58
10	975.99	634.06	1669.71	855.99
ค่าเฉลี่ย	975.99	671.09	1461.84	819.17
ค่า SD	0.00	214.13	187.85	2112.33



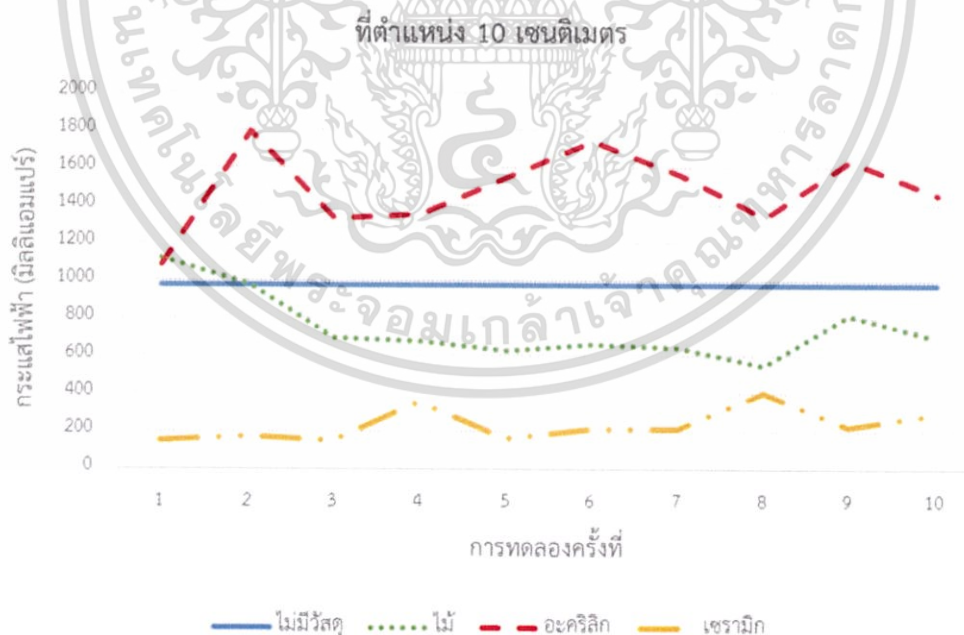
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 9 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.11 การเปรียบเทียบที่ระยะ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 10 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	1116.22	1083.52	149.71
2	975.99	984.12	1792.12	171.73
3	975.99	695.71	1329.78	147.95
4	975.99	678.10	1351.79	356.66
5	975.99	627.46	1554.34	158.52
6	975.99	660.48	1739.07	211.36
7	975.99	647.28	1564.03	211.36
8	975.99	549.52	1334.18	405.10
9	975.99	819.00	1638.00	224.57
10	975.99	695.71	1453.07	290.61
ค่าเฉลี่ย	975.99	747.36	1483.79	232.76
ค่า SD	0.00	175.90	216.05	89.88



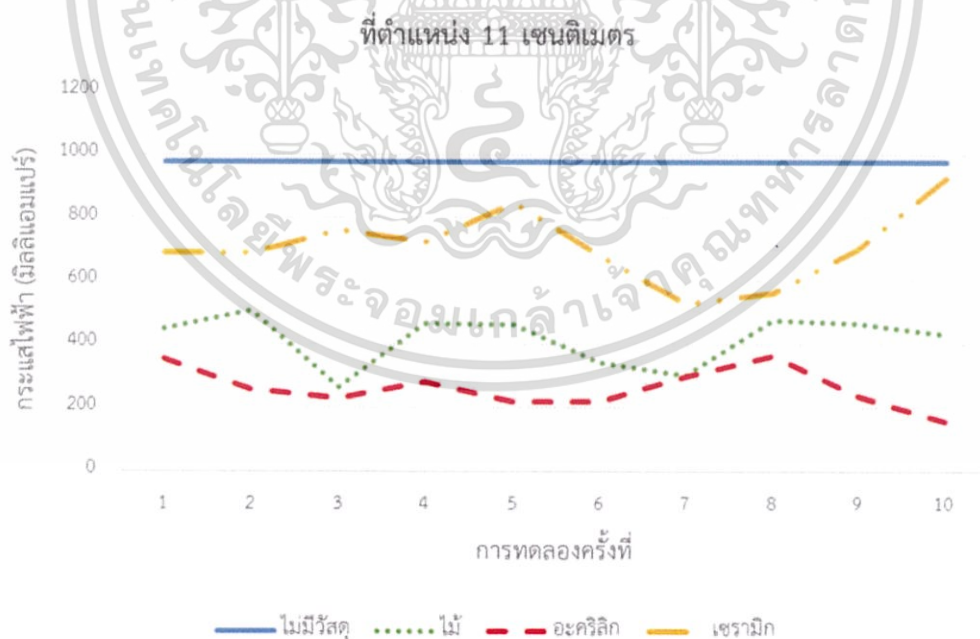
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.12 การเปรียบเทียบที่ระยะ 11 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบที่ระยะ 11 เซนติเมตร

การทดลองครั้งที่	กระแสไฟฟ้าของวัสดุ (มิลลิแอมแปร์)			
	ไม่มีวัสดุ	ไม้	อะคริลิก	เซรามิก
1	975.99	449.13	352.26	686.91
2	975.99	508.58	255.36	686.90
3	975.99	264.20	228.97	759.56
4	975.99	466.74	281.80	723.89
5	975.99	462.34	220.16	845.42
6	975.99	343.46	217.96	678.10
7	975.99	301.18	299.42	528.39
8	975.99	475.55	363.27	560.09
9	975.99	466.75	237.78	702.75
10	975.99	431.52	158.52	924.68
ค่าเฉลี่ย	975.99	416.94	261.55	709.66
ค่า SD	0.00	83.16	63.52	117.69



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ใช้งานที่ระยะ 11 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ จากการทดลองนำวัสดุไปวางที่ตำแหน่ง 0 ถึง 11 เซนติเมตร ซึ่งในการทดลองได้ทำบนพื้นฐานเดียวกัน คือ ใช้เตาไมโครเวฟเครื่องเดียวกัน เซนเซอร์ตัวเดียวกัน วัสดุขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 19.5 เซนติเมตร หนา 7 มิลลิเมตรค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดโดยที่ไม่มีวัสดุมีค่า 975.99 มิลลิแอมแปร์ โดยค่าจากการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของแผ่นเซรามิกที่มีค่าเท่ากับ 0 มิลลิแอมแปร์ เนื่องจากเซรามิกนั้นจะมีสารเคลือบผิวที่ผสมโลหะอยู่ทำให้คลื่นไมโครเวฟที่มากกระทบเกิดการสะท้อนกลับทำให้เซนเซอร์ไม่สามารถรับค่าคลื่นไมโครเวฟได้ และเหตุผลอีกข้อที่ทำให้คลื่นสะท้อนกลับหมด คือ ตำแหน่งที่วางวัสดุมีความใกล้กับช่องปล่อยคลื่นทำให้ไม่มีคลื่นที่สามารถผ่านแผ่นเซรามิกไปได้ ในขณะที่วัสดุเป็นแผ่นไม้เมื่อทำการทดลองที่ระยะ 6 เซนติเมตร ดังตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยที่แสดงมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิแอมแปร์ สาเหตุเนื่องจากตำแหน่งที่วางวัสดุตรงกับช่วงที่คลื่นมีพลังงานน้อยและแผ่นไม้สามารถซึมซาบ (Permeability) สนามแม่เหล็กได้ดี ทำให้คลื่นไมโครเวฟที่ผ่านไปสู่เซนเซอร์มีค่าน้อยหรือถูกดูดกลืนไป และจากการเปรียบเทียบที่ระยะต่าง ๆ เห็นได้ว่าแผ่นไม้จะซึมซาบสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุด เหตุผลสำคัญมาจากการแทรกสอดของคลื่นไมโครเวฟทำให้ค่ากระแสมีค่ามากขึ้น และสาเหตุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย การหักเหหรือการเบี่ยงเบนของคลื่น ความซึมซาบของวัสดุแต่ละชนิด และลักษณะการเดินทางของคลื่นจึงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าไม่คงที่ตลอดทั้งการทดลอง 10 ครั้ง

4.2.13 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง ๆ กับระยะการทดลอง ตารางที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่ระยะการทดลองตั้งแต่ 0 ถึง 11 เซนติเมตร

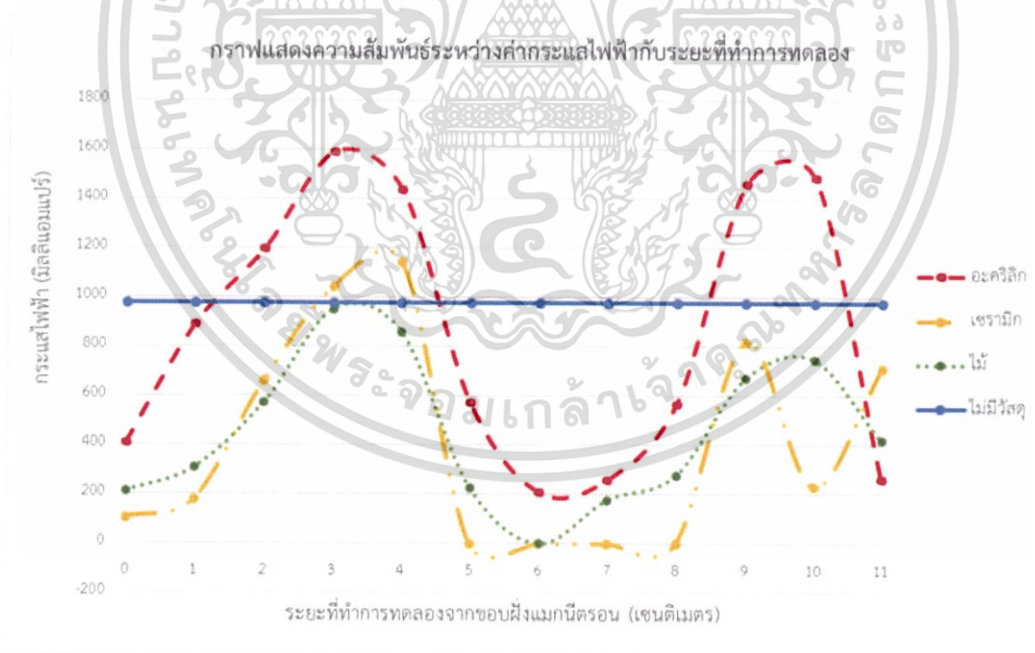
ระยะการทดลอง (เซนติเมตร)	ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าของวัสดุต่าง (มิลลิแอมแปร์)			
	อะคริลิก	เซรามิก	ของไม้	ไม่มีวัสดุ
0	406.5518	105.68	211.3146	975.9986
1	889.0998	180.731	307.4328	975.9986
2	1196.357	660.4843	570.4828	975.9986
3	1590.138	1043.868	951.4501	975.9986
4	1435.717	1142.11	857.9829	975.9986
5	573.6072	0	227.074	975.9986
6	208.3615	0	0	975.9986
7	257.8965	0	176.3535	975.9986
8	564.2732	0	275.8617	975.9986
9	1461.835	819.1771	671.009	975.9986
10	1483.789	232.7562	747.3606	975.9986
11	261.5517	709.6699	416.9442	975.9986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละระยะห่างของวัสดุในการทดลองนั้น ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าขณะไม่มีวัสดุนั้นมีค่าเดียวคือ 975.9986 มิลลิแอมแปร์ จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่ากราฟของไม่มีวัสดุนั้นเป็นกราฟเส้นตรงตั้งแต่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตร

ส่วนค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละระยะห่างใน ขณะที่วัสดุวางกั้นระหว่างเซนเซอร์ กับช่องที่ปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมา โดยในการทดลองนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามระยะต่าง ๆ ซึ่ง ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดของอะคริลิกนั้นมีค่า 1590.138 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดของเซรามิกนั้นมีค่า 1142.11 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 4 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าที่มากที่สุดของไม้มีค่า 951.4501 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 3 เซนติเมตร จากค่ากระแสไฟฟ้าทำให้เป็นไปจามสมมติฐานที่ตั้งขึ้นในตอนต้นที่กล่าวไว้ว่าจะชิมชาบสนามแม่เหล็กได้ดีที่สุดและอริลิกจะชิมชาบได้น้อยสุด

ส่วนค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของอะคริลิกนั้นมีค่า 208.3615 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของเซรามิกนั้นมีค่า 0 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดของไม้มีค่า 0 มิลลิแอมแปร์ ที่ระยะห่าง 6 เซนติเมตร จึงสามารถคาดเดาได้ว่าระยะที่ไม่สามารถจำแนกวัสดุที่ทำการทดลองได้อยู่ที่ 5 ถึง 6 เซนติเมตร



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและวัสดุที่ใช้งานที่ระยะ 0 ถึง 11 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และระยะห่างของวัสดุในการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของคลื่นสนามแม่เหล็กที่ผ่านแผ่นวัสดุมาหาเซนเซอร์นั้นอยู่ในรูปแบบของไซน์เวฟ (Sin Wave) โดยมีสันคลื่นอยู่ที่ระยะ 3 - 4 เซนติเมตรและท้องคลื่นอยู่ที่ระยะ ในช่วงลูกคลื่นแรกของระยะ 5 - 6 เซนติเมตรจึงทำให้เป็นช่วงที่คลื่นอยู่ในส่วนของคลื่นที่มีพลังงานน้อยทำให้คลื่นไมโครเวฟที่กระทบแผ่นเซรามิกเกิดการสะท้อนกลับทำให้ค่าที่ออกมาในช่วงนี้เท่ากับ 0 มิลลิแอมป์ พอเริ่มช่วงคลื่นลูกใหม่กราฟจะเกิดการบิดเบี้ยวแล้วก็ยังเป็นทรนชั้นเช่นเดิม สาเหตุคาดว่าอาจเกิดจากสมบัติของคลื่นซึ่งมี การสะท้อนหรือก็คือคลื่นจะมีการเปลี่ยนทิศทางเมื่อมีการกระทบกับพื้นผิว การหักเหหรือก็คือการที่คลื่นเปลี่ยนทิศทางเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง การเลี้ยวเบนหรือก็คือการที่คลื่นเคลื่อนที่ขยายวงออกเรื่อย ๆ เช่น คลื่นไมโครเวฟที่วิ่งผ่านออกจากช่องว่างข้างแผ่นวัสดุจะมีลักษณะการขยายขนาดของคลื่นเกิดขึ้น การแทรกสอดที่เกิดจากการซ้อนทับกันของคลื่นเมื่อวิ่งมาตัดกันเลยทำให้คลื่นสนามแม่เหล็กนั้นมีความเพิ่มขึ้นและลดลง และ การกระจายที่จะทำให้คลื่นมีความกว้างมากขึ้นและเกิดการซ้อนทับกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz โดยที่คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านวัสดุต่าง ๆ ที่ได้นำมาทำการทดลองซึ่งได้แก่ แผ่นไม้ แผ่นอะคริลิก และแผ่นเซรามิก ที่มีความหนา 7 มิลลิเมตร และมีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 19.5 เซนติเมตร โดยในการทดลองได้นำวัสดุต่าง ๆ ที่เตรียมไว้วางหน้าเซนเซอร์ที่ระยะต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ตั้งแต่ 0 ถึง 11 เซนติเมตรซึ่งในแต่ละระยะจะทำการทดลองซ้ำ 10 ครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น จากนั้นจะทำการเก็บค่าที่ได้ทั้ง 10 ครั้งในรูปแบบของตารางก่อนนำไปเฉลี่ยค่าเพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์ และนำไปสร้างกราฟเพื่อดูความแตกต่างของวัสดุทั้งสามชนิดที่นำมาทำการทดลอง

จากการอ้างอิงผลการทดลอง จะเป็นช่วงของกระแสที่ได้รับมาจากเซนเซอร์แบบโมโนโพล โดยกระแสที่ได้มานั้นจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามวัสดุในการทดลองดังแสดงในผลการทดลอง จากนั้นนำกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากวัสดุต่าง ๆ ทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งจะให้เห็นถึงความแตกต่างของช่วงกระแสไฟฟ้าของวัสดุนั้น ๆ กับระยะห่างที่ทำการทดลอง จะเห็นได้ว่าในช่วง 2 ถึง 4 เซนติเมตรนั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนที่สุด ซึ่งถ้าระยะที่นอกเหนือจาก 2 ถึง 4 เซนติเมตรจะทำให้ค่าที่ได้จากการวัดนั้นมีความใกล้เคียงกันหรือค่าที่ออกมากลายเป็นศูนย์ และในระยะที่มีความใกล้กับเซนเซอร์ (9 ถึง 11 เซนติเมตร) จะทำให้ค่าที่ได้นั้นมีความถูกต้องน้อยลง โดยในส่วนของ 2 ถึง 3 เซนติเมตรนั้นจะมีความเป็นเส้นตรง ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นดังนี้

1. แผ่นไม้
  - ที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 570.4828 มิลลิแอมแปร์
  - ที่ระยะ 3 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 951.4501 มิลลิแอมแปร์
  - ที่ระยะ 4 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 857.9829 มิลลิแอมแปร์
2. แผ่นอะคริลิก
  - ที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1196.357 มิลลิแอมแปร์
  - ที่ระยะ 3 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1590.138 มิลลิแอมแปร์
  - ที่ระยะ 4 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1435.717 มิลลิแอมแปร์
3. แผ่นเซรามิก
  - ที่ระยะ 2 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 660.4843 มิลลิแอมแปร์
  - ที่ระยะ 3 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1043.868 มิลลิแอมแปร์
  - ที่ระยะ 4 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1142.11 มิลลิแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการทดลองมีการกำหนดให้คงที่ ทั้งขนาดของตู้ไมโครเวฟและขนาดของชิ้นงานที่นำมาทดลอง ยิ่งรวมไปถึงเซนเซอร์ที่ใช้ก็ยังต้องรอให้อุณหภูมิของเซนเซอร์เย็นตัวลง เนื่องจากเซนเซอร์เกิดอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟที่ตกกระทบจะทำให้เกิดความผิดพลาดของกระแสที่ได้รับออกมา ทำให้ในการทดลองนั้น ต้องใช้เวลาในการรอประมาณ 10 นาที ก่อนที่จะทำการทดลองในครั้งถัดไป เพื่อเป็นการระบายความร้อนให้อุณหภูมิของไส้หลอดกลับมาใกล้เคียงกัน และควบคุมให้แมกนีตรอนมีสถานะเริ่มต้นเหมือนกันทุกครั้ง ที่ทำการทดลอง ซึ่งจะช่วยลดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดลงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] รังสรรค์ ศรีสาคร "เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก"  
Available: <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/hall/hall.htm>  
(Retrieved: 1 January 2017)
- [2] Ratanadecho, P., "Microwave Heating Using a Rectangular Wave Guide",  
Ph.D Dissertation, Nagaoka University of Technology, Japan, (2002).
- [3] Micro Denshi Co.Ltd., "Technical Guidance for Microwave Continuous  
Vulcanization", Saitama, Japan.
- [4] "Radiation Emissions [Online]" from Microwave Ovens. Web site:  
<http://www.nst.or.th/article/article494/article49401.html>  
(Retrieved: 10 July 2016)
- [5] Schubert, H. and Regier, M., "The Microwave Processing of Foods", Taylor  
and Francis Group, (2005).
- [6] "ตัวเรียงกระแส" From Wikipedia.org  
Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ตัวเรียงกระแส>  
(Retrieved: 10 March 2017)
- [7] "Schottky Diode [Online]." From Wikipedia.org  
Available: <http://www.futureelectronics.com/en/diodes/schottky-diodes.aspx>  
(Retrieved: 1 February 2017)
- [8] "สายอากาศ [Online]" From Wikipedia.org  
Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/สายอากาศ>  
(Retrieved: 1 February 2017)
- [9] "Monopole Antenna [Online]." From antenna-theory.com  
Available: <http://www.antenna-theory.com/antennas/monopole.php>  
(Retrieved: 14 February 2017)
- [10] "Monopole Antenna [Online]." Available: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Monopole\\_antenna](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Monopole_antenna)  
(Retrieved: 14 February 2017)
- [11] นายปารเมศ คุ้มพลาย "สายอากาศโมโนโพล [Online]"  
Available: <http://monopoleth.blogspot.com>  
(Retrieved: 1 February 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] “Antenna (Radio)” From Wikipedia.org

Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_\(radio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_(radio))

(Retrieved: 3 March 2017)

[13] Balanis Constantine A 1938, “Antenna Theory: Analysis and Design”

[14] สมยศ เพ็ญศรีสิริกุล, “บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาดิจิตอลประยุกต์”

[15] “การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล”

Available: <https://movableprojecter.wordpress.com/2010/07/17/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%81%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%8D%E0%B8%B2%E0%B8%93%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B9%87/>

(Retrieved: 10 June 2017)

[16] “Magnetron”

Available: <http://www.microtechfactoryservice.com/magnetron.html>

(Retrieved: 10 June 2017)

[17] “การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล”

Available: <https://digitalcpe2.wordpress.com/pam-pulse-amplitude-modulation-pcm-pulse-code-modulation/>

(Retrieved: 21 June 2017)

[18] “อะนาล็อกเป็นดิจิตอลแปลง”

Available: [http://www.w3ii.com/th/computer\\_networking/digital\\_transmission.html](http://www.w3ii.com/th/computer_networking/digital_transmission.html)

(Retrieved: 21 June 2017)

[19] “analog to digital converter”

Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/190824/sampling-rate-analog-to-digital-converter>

(Retrieved: 21 June 2017)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โค้ดของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

File myFile; //กำหนดตัวแปรไฟล์
const int chipSelect = 10;

int b = 0; //input from microwaves wen microwaves open

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  Serial.println("Initializing SD card...");

  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    return;
  }
  Serial.println("initialization done.");

  myFile = SD.open("Hall.csv", FILE_WRITE);
  myFile.println("Voltage Hall,Current(mA),Time");
  myFile.close();

  pinMode(8, INPUT);
}

void loop() {
  float a = analogRead(A0);
  int c = analogRead(A0);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

switch (c)
{
case 508 :
{
Serial.print(c);
Serial.print(",");
Serial.print((((c - 508) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
Serial.println();
}
break;
case 509 :
{
Serial.print(c);
Serial.print(",");
Serial.print((((c - 509) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
Serial.println();
}
break;
case 511 :
{
Serial.print(c);
Serial.print(",");
Serial.print((((c - 511) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
Serial.println();
}
break;
default:
{
Serial.print(a);
Serial.print(",");
Serial.print((((a - 510) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
Serial.println();
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        break;
    }

    b = digitalRead(8);
    Serial.println(b);

    if (b == 1)
    {
        myFile = SD.open("Hall.csv", FILE_WRITE);
        Serial.print(" Writing to database.csv...");
        create_table(1); //ฟังก์ชันการสร้างตาราง
        Serial.println("done.");
        myFile.close();
    }
}

void create_table(int long_table)
{
    float a = analogRead(A0);
    int c = analogRead(A0);

    switch (c)
    {
        case 508 :
        {
            myFile.print(c);
            myFile.print(",");
            myFile.print((((c - 508) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
            myFile.println();
        }
        break;
        case 509 :
        {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

myFile.print(c);
myFile.print(",");
myFile.print((((c - 509) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
myFile.println();
}
break;
case 510 :
{
myFile.print(c);
myFile.print(",");
myFile.print((((c - 510) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
myFile.println();
}
break;
case 511 :
{
myFile.print(c);
myFile.print(",");
myFile.print((((c - 511) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
myFile.println();
}
break;
default:
{
myFile.print(a);
myFile.print(",");
myFile.print((((a - 510) * 5) / 1023) / 0.185) * 1000);
myFile.println();
}
break;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

*Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC  
with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

---

## Not for New Design

These parts are in production but have been determined to be NOT FOR NEW DESIGN. This classification indicates that sale of this device is currently restricted to existing customer applications. The device should not be purchased for new design applications because obsolescence in the near future is probable. Samples are no longer available.

Date of status change: June 5, 2017

### Recommended Substitutions:

*For existing customer transition, and for new customers or new applications, use ACS723.*

---

NOTE: For detailed information on purchasing options, contact your local Allegro field applications engineer or sales representative.

---

*Allegro MicroSystems, LLC reserves the right to make, from time to time, revisions to the anticipated product life cycle plan for a product to accommodate changes in production capabilities, alternative product availabilities, or market demand. The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, LLC assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.*

---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

### Features and Benefits

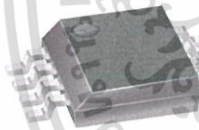
- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5  $\mu$ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at  $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m $\Omega$  internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



TUV America  
Certificate Number:  
U8V 06 05 54214 010



### Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1



### Description

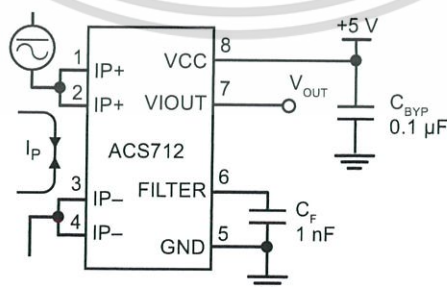
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ( $>V_{IOUT(Q)}$ ) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m $\Omega$  typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

*Continued on the next page...*

### Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal,  $V_{OUT}$ , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current,  $I_P$ , within the range specified.  $C_F$  is recommended for noise management, with values that depend on the application.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

# ACS712

## Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

### Description (continued)

the device at up to 5× overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the signal leads (pins 5 through 8). This allows the ACS712 to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS712 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

### Selection Guide

Part Number	Packing*	T <sub>A</sub> (°C)	Optimized Range, I <sub>p</sub> (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	Tape and reel, 3000 pieces/reel	-40 to 85	±30	66

\*Contact Allegro for additional packing options.

### Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>		8	V
Reverse Supply Voltage	V <sub>RCC</sub>		-0.1	V
Output Voltage	V <sub>IOUT</sub>		8	V
Reverse Output Voltage	V <sub>RIOUT</sub>		-0.1	V
Output Current Source	I <sub>IOUT(SOURCE)</sub>		3	mA
Output Current Sink	I <sub>IOUT(SINK)</sub>		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	I <sub>p</sub>	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	T <sub>A</sub>	Range E	-40 to 85	°C
Maximum Junction Temperature	T <sub>J(max)</sub>		165	°C
Storage Temperature	T <sub>stg</sub>		-65 to 170	°C

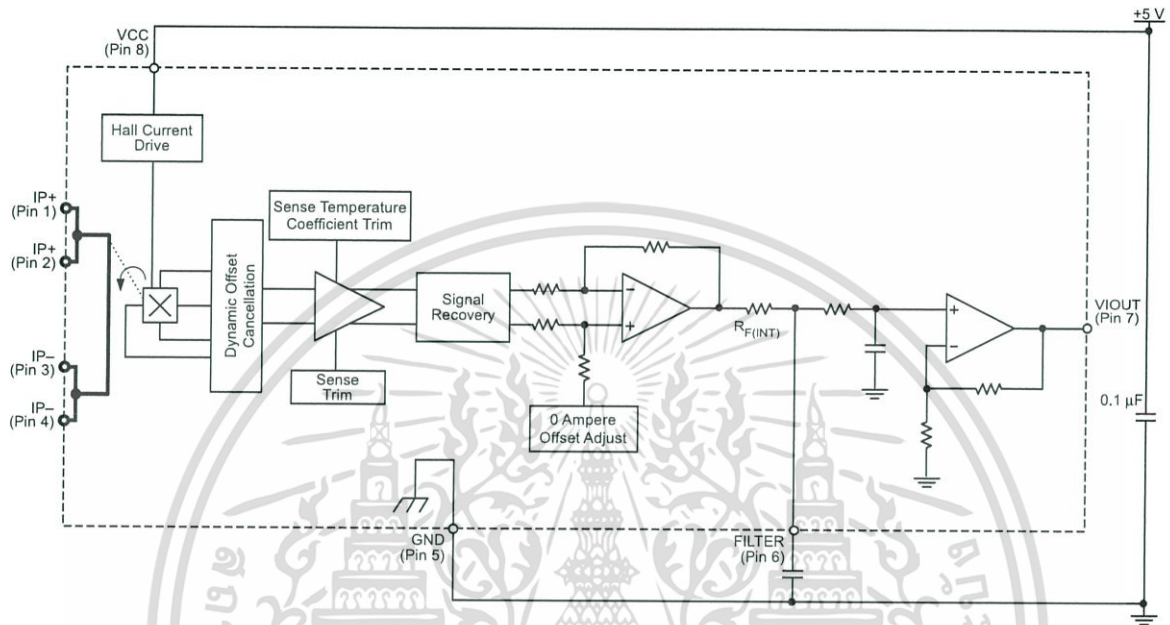
### Isolation Characteristics

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Unit
Dielectric Strength Test Voltage*	V <sub>ISO</sub>	Agency type-tested for 60 seconds per UL standard 60950-1, 1st Edition	2100	VAC
Working Voltage for Basic Isolation	V <sub>WFSI</sub>	For basic (single) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	354	VDC or V <sub>pk</sub>
Working Voltage for Reinforced Isolation	V <sub>WFRI</sub>	For reinforced (double) isolation per UL standard 60950-1, 1st Edition	184	VDC or V <sub>pk</sub>

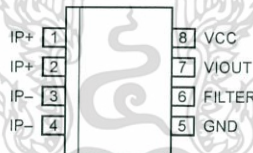
\* Allegro does not conduct 60-second testing. It is done only during the UL certification process.

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001

## Functional Block Diagram



## Pin-out Diagram



## Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sampled; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sampled; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal

### COMMON OPERATING CHARACTERISTICS<sup>1</sup> over full range of $T_A$ , $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
<b>ELECTRICAL CHARACTERISTICS</b>						
Supply Voltage	$V_{CC}$		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	$I_{CC}$	$V_{CC} = 5.0$ V, output open	–	10	13	mA
Output Capacitance Load	$C_{LOAD}$	VIOUT to GND	–	–	10	nF
Output Resistive Load	$R_{LOAD}$	VIOUT to GND	4.7	–	–	k $\Omega$
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	1.2	–	m $\Omega$
Rise Time	$t_r$	$I_P = I_P(\text{max})$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $C_{OUT} = \text{open}$	–	3.5	–	$\mu\text{s}$
Frequency Bandwidth	$f$	–3 dB, $T_A = 25^\circ\text{C}$ ; $I_P$ is 10 A peak-to-peak	–	80	–	kHz
Nonlinearity	$E_{LIN}$	Over full range of $I_P$	–	1.5	–	%
Symmetry	$E_{SYM}$	Over full range of $I_P$	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; $I_P = 0$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	$V_{CC} \times 0.5$	–	V
Power-On Time	$t_{PO}$	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^\circ\text{C}$ , 20 A present on leadframe	–	35	–	$\mu\text{s}$
Magnetic Coupling <sup>2</sup>			–	12	–	G/A
Internal Filter Resistance <sup>3</sup>	$R_{F(INT)}$			1.7		k $\Omega$

<sup>1</sup>Device may be operated at higher primary current levels,  $I_P$ , and ambient,  $T_A$ , and internal leadframe temperatures,  $T_A$ , provided that the Maximum Junction Temperature,  $T_J(\text{max})$ , is not exceeded.

<sup>2</sup>1G = 0.1 mT.

<sup>3</sup> $R_{F(INT)}$  forms an RC circuit via the FILTER pin.

### COMMON THERMAL CHARACTERISTICS<sup>1</sup>

			Min.	Typ.	Max.	Units
Operating Internal Leadframe Temperature	$T_A$	E range	–40	–	85	$^\circ\text{C}$
					Value	Units
Junction-to-Lead Thermal Resistance <sup>2</sup>	$R_{\theta JL}$	Mounted on the Allegro ASEK 712 evaluation board			5	$^\circ\text{C/W}$
Junction-to-Ambient Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	Mounted on the Allegro 85-0322 evaluation board, includes the power consumed by the board			23	$^\circ\text{C/W}$

<sup>1</sup>Additional thermal information is available on the Allegro website.

<sup>2</sup>The Allegro evaluation board has 1500 mm<sup>2</sup> of 2 oz. copper on each side, connected to pins 1 and 2, and to pins 3 and 4, with thermal vias connecting the layers. Performance values include the power consumed by the PCB. Further details on the board are available from the Frequently Asked Questions document on our website. Further information about board design and thermal performance also can be found in the Applications Information section of this datasheet.

### x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS<sup>1</sup> $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $85^\circ\text{C}$ , $C_F = 1\text{ nF}$ , and $V_{CC} = 5\text{ V}$ , unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	$I_P$		-5	-	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of $I_P$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	180	185	190	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$ , 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$ , $C_{\text{OUT}} = \text{open}$ , 2 kHz bandwidth	-	21	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$	-	-0.26	-	mV/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	-	-0.08	-	mV/ $^\circ\text{C}$
Sensitivity Slope	$\Delta\text{Sens}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$	-	0.054	-	mV/A/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	-	-0.008	-	mV/A/ $^\circ\text{C}$
Total Output Error <sup>2</sup>	$E_{\text{TOT}}$	$I_P = \pm 5\text{ A}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	$\pm 1.5$	-	%

<sup>1</sup>Device may be operated at higher primary current levels,  $I_P$ , and ambient temperatures,  $T_A$ , provided that the Maximum Junction Temperature,  $T_{J(\text{max})}$ , is not exceeded.

<sup>2</sup>Percentage of  $I_P$ , with  $I_P = 5\text{ A}$ . Output filtered.

### x20A PERFORMANCE CHARACTERISTICS<sup>1</sup> $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $85^\circ\text{C}$ , $C_F = 1\text{ nF}$ , and $V_{CC} = 5\text{ V}$ , unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	$I_P$		-20	-	20	A
Sensitivity	Sens	Over full range of $I_P$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	96	100	104	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$ , 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$ , $C_{\text{OUT}} = \text{open}$ , 2 kHz bandwidth	-	11	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$	-	-0.34	-	mV/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	-	-0.07	-	mV/ $^\circ\text{C}$
Sensitivity Slope	$\Delta\text{Sens}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$	-	0.017	-	mV/A/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	-	-0.004	-	mV/A/ $^\circ\text{C}$
Total Output Error <sup>2</sup>	$E_{\text{TOT}}$	$I_P = \pm 20\text{ A}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	$\pm 1.5$	-	%

<sup>1</sup>Device may be operated at higher primary current levels,  $I_P$ , and ambient temperatures,  $T_A$ , provided that the Maximum Junction Temperature,  $T_{J(\text{max})}$ , is not exceeded.

<sup>2</sup>Percentage of  $I_P$ , with  $I_P = 20\text{ A}$ . Output filtered.

### x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS<sup>1</sup> $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $85^\circ\text{C}$ , $C_F = 1\text{ nF}$ , and $V_{CC} = 5\text{ V}$ , unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	$I_P$		-30	-	30	A
Sensitivity	Sens	Over full range of $I_P$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	63	66	69	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$ , 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$ , $C_{\text{OUT}} = \text{open}$ , 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$	-	-0.35	-	mV/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	-	-0.08	-	mV/ $^\circ\text{C}$
Sensitivity Slope	$\Delta\text{Sens}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $25^\circ\text{C}$	-	0.007	-	mV/A/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to $150^\circ\text{C}$	-	-0.002	-	mV/A/ $^\circ\text{C}$
Total Output Error <sup>2</sup>	$E_{\text{TOT}}$	$I_P = \pm 30\text{ A}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	-	$\pm 1.5$	-	%

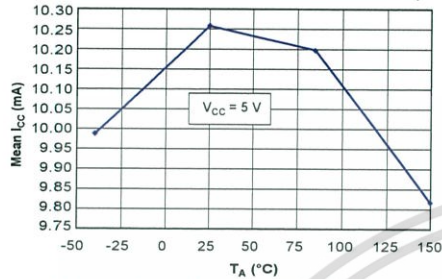
<sup>1</sup>Device may be operated at higher primary current levels,  $I_P$ , and ambient temperatures,  $T_A$ , provided that the Maximum Junction Temperature,  $T_{J(\text{max})}$ , is not exceeded.

<sup>2</sup>Percentage of  $I_P$ , with  $I_P = 30\text{ A}$ . Output filtered.

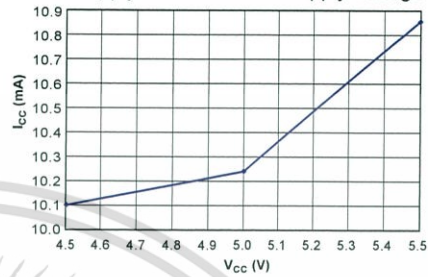
### Characteristic Performance

$I_p = 5\text{ A}$ , unless otherwise specified

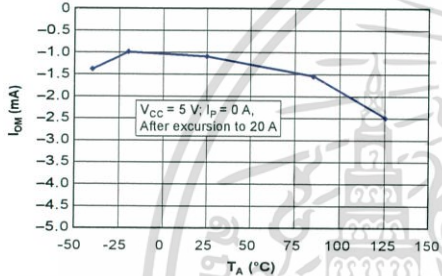
Mean Supply Current versus Ambient Temperature



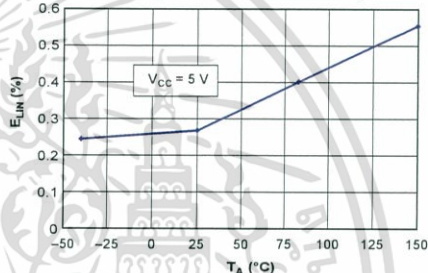
Supply Current versus Supply Voltage



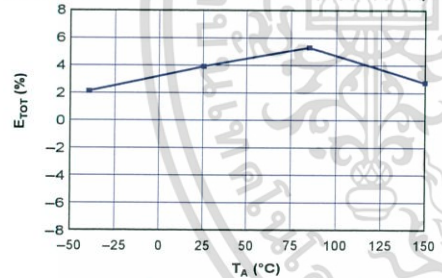
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



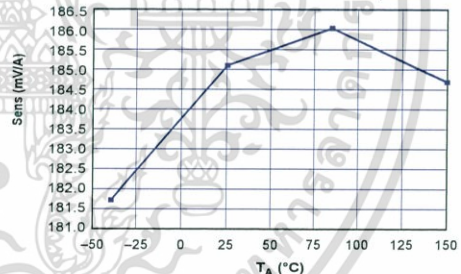
Nonlinearity versus Ambient Temperature



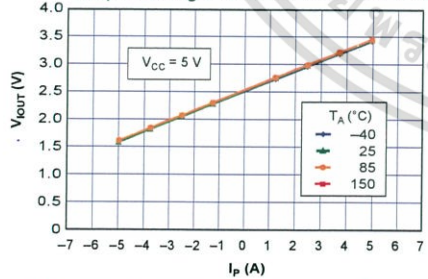
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



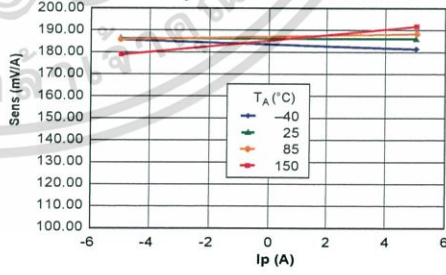
Sensitivity versus Ambient Temperature



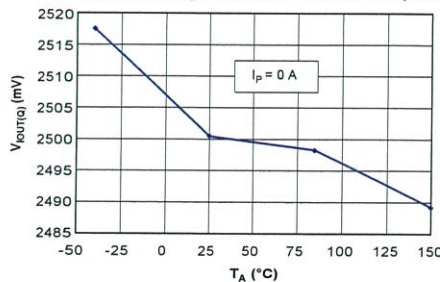
Output Voltage versus Sensed Current



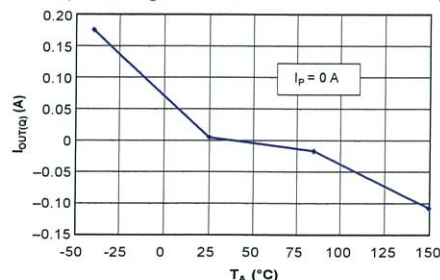
Sensitivity versus Sensed Current



0 A Output Voltage versus Ambient Temperature



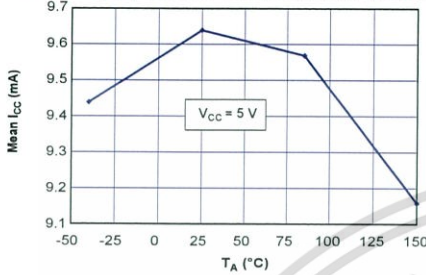
0 A Output Voltage Current versus Ambient Temperature



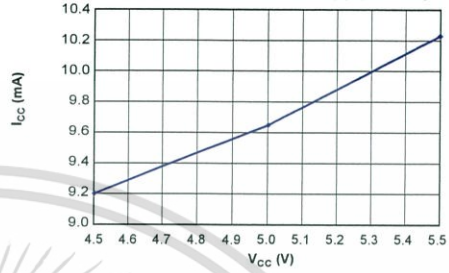
### Characteristic Performance

$I_p = 20$  A, unless otherwise specified

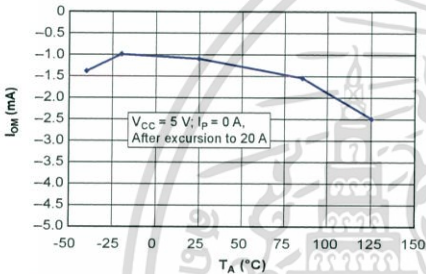
Mean Supply Current versus Ambient Temperature



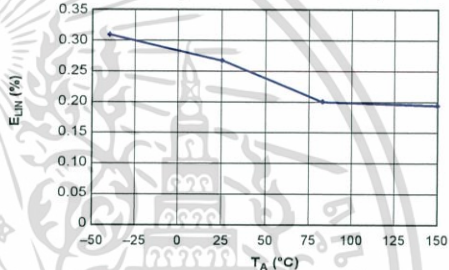
Supply Current versus Supply Voltage



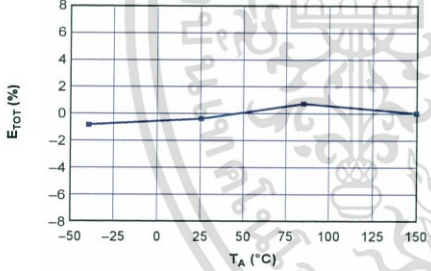
Magnetic Offset versus Ambient Temperature



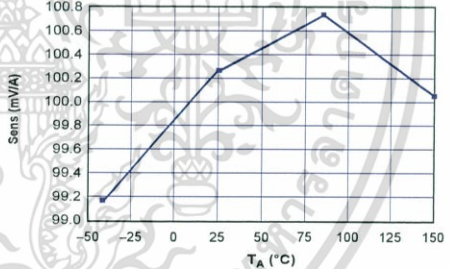
Nonlinearity versus Ambient Temperature



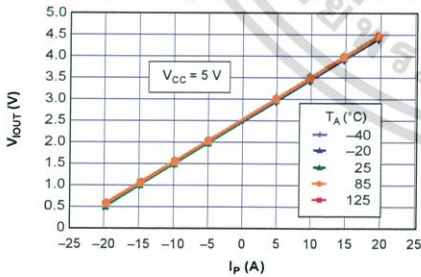
Mean Total Output Error versus Ambient Temperature



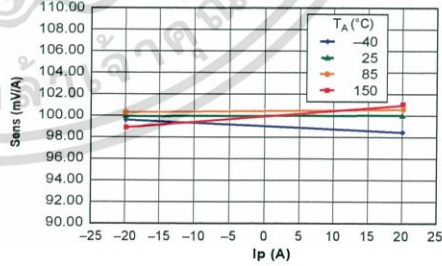
Sensitivity versus Ambient Temperature



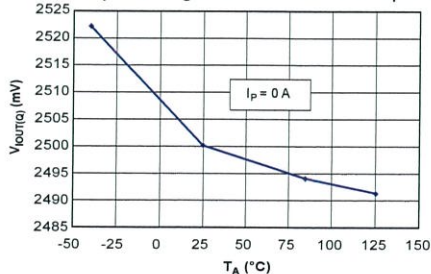
Output Voltage versus Sensed Current



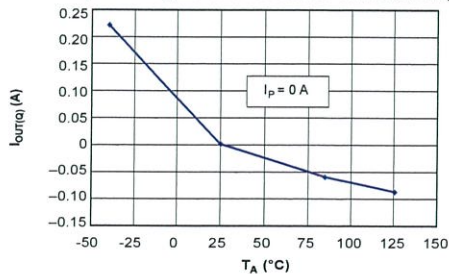
Sensitivity versus Sensed Current



0 A Output Voltage versus Ambient Temperature



0 A Output Voltage Current versus Ambient Temperature





### Definitions of Accuracy Characteristics

**Sensitivity (Sens).** The change in device output in response to a 1 A change through the primary conductor. The sensitivity is the product of the magnetic circuit sensitivity (G/A) and the linear IC amplifier gain (mV/G). The linear IC amplifier gain is programmed at the factory to optimize the sensitivity (mV/A) for the full-scale current of the device.

**Noise (V<sub>NOISE</sub>).** The product of the linear IC amplifier gain (mV/G) and the noise floor for the Allegro Hall effect linear IC (≈1 G). The noise floor is derived from the thermal and shot noise observed in Hall elements. Dividing the noise (mV) by the sensitivity (mV/A) provides the smallest current that the device is able to resolve.

**Linearity (E<sub>LIN</sub>).** The degree to which the voltage output from the IC varies in direct proportion to the primary current through its full-scale amplitude. Nonlinearity in the output can be attributed to the saturation of the flux concentrator approaching the full-scale current. The following equation is used to derive the linearity:

$$100 \left\{ 1 - \left[ \frac{\Delta \text{gain} \times \% \text{ sat} (V_{\text{IOUT\_full-scale amperes}} - V_{\text{IOUT(Q)}})}{2 (V_{\text{IOUT\_half-scale amperes}} - V_{\text{IOUT(Q)}})} \right] \right\}$$

where  $V_{\text{IOUT\_full-scale amperes}}$  = the output voltage (V) when the sampled current approximates full-scale  $\pm I_p$ .

**Symmetry (E<sub>SYM</sub>).** The degree to which the absolute voltage output from the IC varies in proportion to either a positive or negative full-scale primary current. The following formula is used to derive symmetry:

$$100 \left( \frac{V_{\text{IOUT\_+ full-scale amperes}} - V_{\text{IOUT(Q)}}}{V_{\text{IOUT(Q)}} - V_{\text{IOUT\_ -full-scale amperes}}} \right)$$

**Quiescent output voltage (V<sub>IOUT(Q)</sub>).** The output of the device when the primary current is zero. For a unipolar supply voltage, it nominally remains at  $V_{CC}/2$ . Thus,  $V_{CC} = 5 \text{ V}$  translates into  $V_{\text{IOUT(Q)}} = 2.5 \text{ V}$ . Variation in  $V_{\text{IOUT(Q)}}$  can be attributed to the resolution of the Allegro linear IC quiescent voltage trim and thermal drift.

**Electrical offset voltage (V<sub>OE</sub>).** The deviation of the device output from its ideal quiescent value of  $V_{CC}/2$  due to nonmagnetic causes. To convert this voltage to amperes, divide by the device sensitivity, Sens.

**Accuracy (E<sub>TOT</sub>).** The accuracy represents the maximum deviation of the actual output from its ideal value. This is also known as the total output error. The accuracy is illustrated graphically in the output voltage versus current chart at right.

Accuracy is divided into four areas:

- **0 A at 25°C.** Accuracy at the zero current flow at 25°C, without the effects of temperature.
- **0 A over  $\Delta$  temperature.** Accuracy at the zero current flow including temperature effects.
- **Full-scale current at 25°C.** Accuracy at the the full-scale current at 25°C, without the effects of temperature.
- **Full-scale current over  $\Delta$  temperature.** Accuracy at the full-scale current flow including temperature effects.

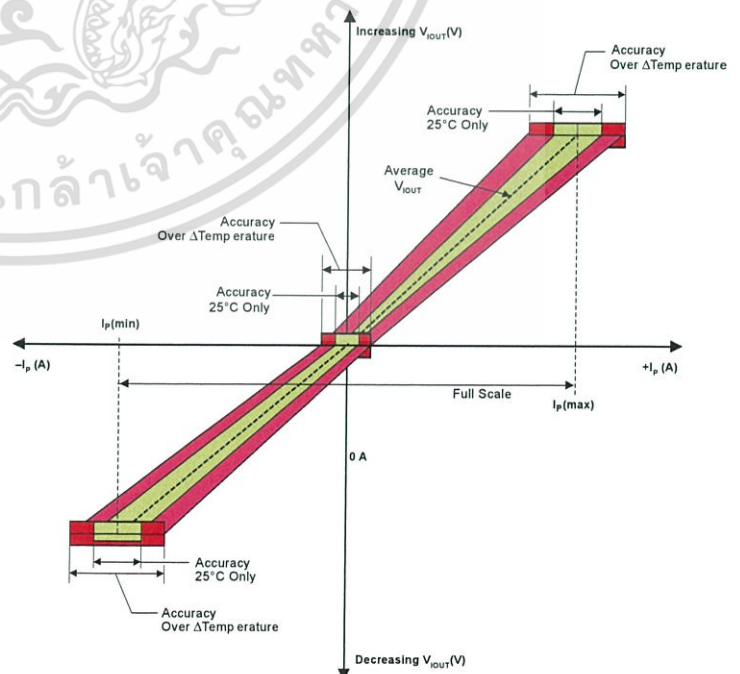
**Ratiometry.** The ratiometric feature means that its 0 A output,  $V_{\text{IOUT(Q)}}$ , (nominally equal to  $V_{CC}/2$ ) and sensitivity, Sens, are proportional to its supply voltage,  $V_{CC}$ . The following formula is used to derive the ratiometric change in 0 A output voltage,  $\Delta V_{\text{IOUT(Q)RAT}} (\%)$ .

$$100 \left( \frac{V_{\text{IOUT(Q)VCC}} / V_{\text{IOUT(Q)5V}}}{V_{CC} / 5 \text{ V}} \right)$$

The ratiometric change in sensitivity,  $\Delta \text{Sens}_{\text{RAT}} (\%)$ , is defined as:

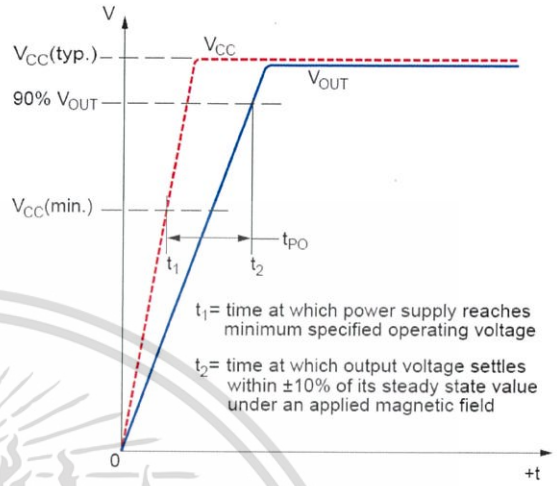
$$100 \left( \frac{\text{Sens}_{V_{CC}} / \text{Sens}_{5V}}{V_{CC} / 5 \text{ V}} \right)$$

**Output Voltage versus Sampled Current**  
Accuracy at 0 A and at Full-Scale Current

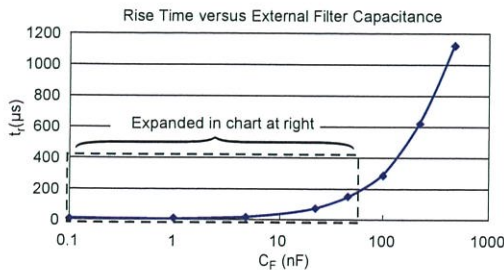
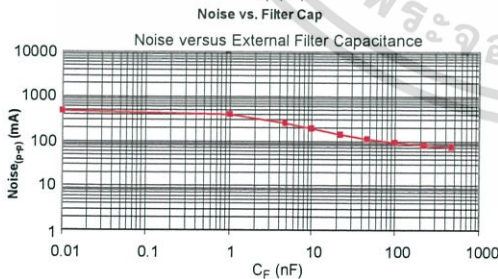
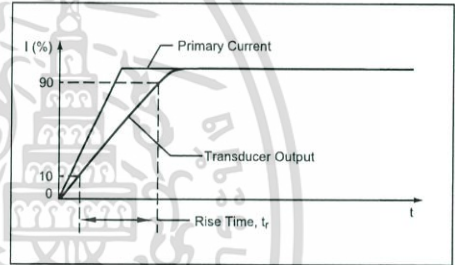


### Definitions of Dynamic Response Characteristics

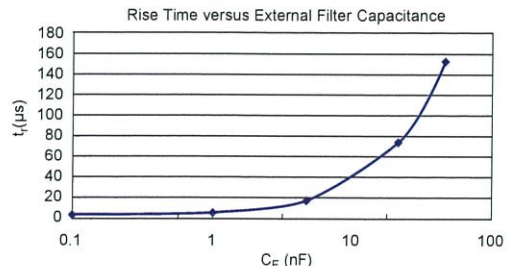
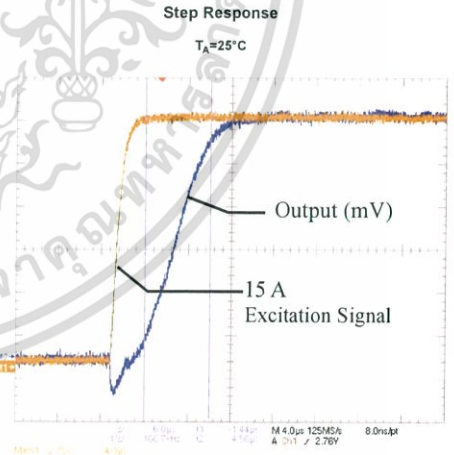
**Power-On Time ( $t_{PO}$ ).** When the supply is ramped to its operating voltage, the device requires a finite time to power its internal components before responding to an input magnetic field. Power-On Time,  $t_{PO}$ , is defined as the time it takes for the output voltage to settle within  $\pm 10\%$  of its steady state value under an applied magnetic field, after the power supply has reached its minimum specified operating voltage,  $V_{CC(min)}$ , as shown in the chart at right.



**Rise time ( $t_r$ ).** The time interval between a) when the device reaches 10% of its full scale value, and b) when it reaches 90% of its full scale value. The rise time to a step response is used to derive the bandwidth of the device, in which  $f(-3 \text{ dB}) = 0.35/t_r$ . Both  $t_r$  and  $t_{RESPONSE}$  are detrimentally affected by eddy current losses observed in the conductive IC ground plane.



$C_F$ (nF)	$t_r$ ( $\mu$ s)
Open	3.5
1	5.8
4.7	17.5
22	73.5
47	88.2
100	291.3
220	623
470	1120

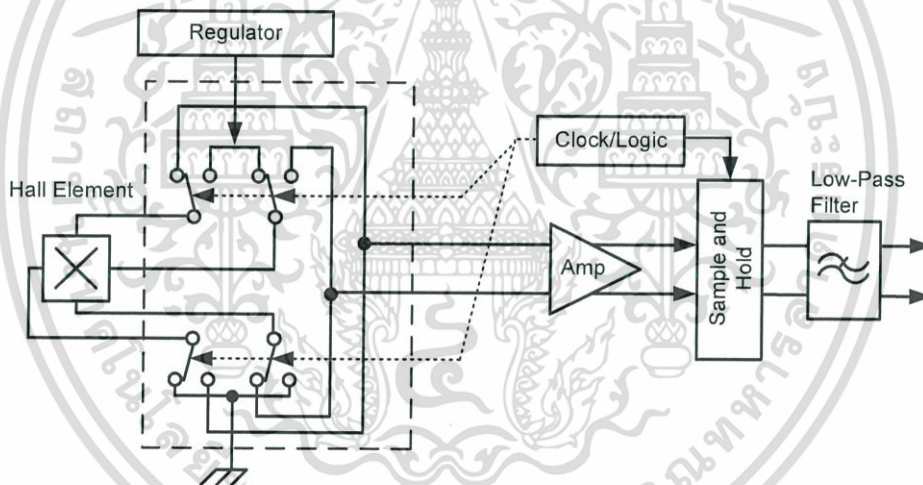


## Chopper Stabilization Technique

Chopper Stabilization is an innovative circuit technique that is used to minimize the offset voltage of a Hall element and an associated on-chip amplifier. Allegro has a Chopper Stabilization technique that nearly eliminates Hall IC output drift induced by temperature or package stress effects. This offset reduction technique is based on a signal modulation-demodulation process. Modulation is used to separate the undesired DC offset signal from the magnetically induced signal in the frequency domain. Then, using a low-pass filter, the modulated DC offset is suppressed while the magnetically induced signal passes through

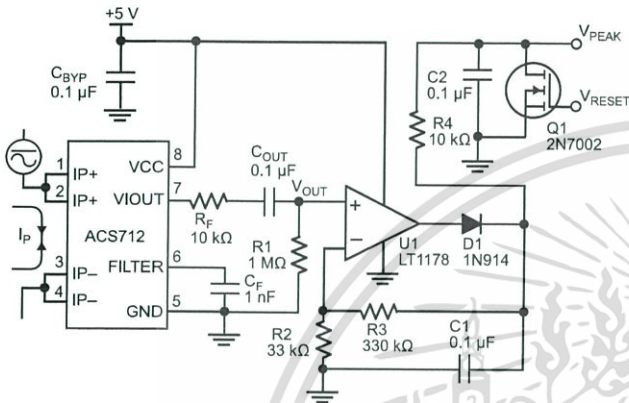
the filter. As a result of this chopper stabilization approach, the output voltage from the Hall IC is desensitized to the effects of temperature and mechanical stress. This technique produces devices that have an extremely stable Electrical Offset Voltage, are immune to thermal stress, and have precise recoverability after temperature cycling.

This technique is made possible through the use of a BiCMOS process that allows the use of low-offset and low-noise amplifiers in combination with high-density logic integration and sample and hold circuits.

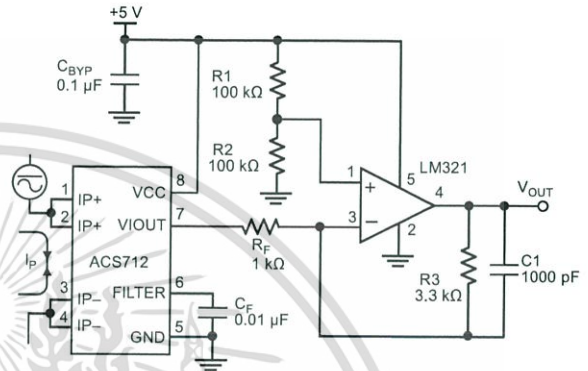


Concept of Chopper Stabilization Technique

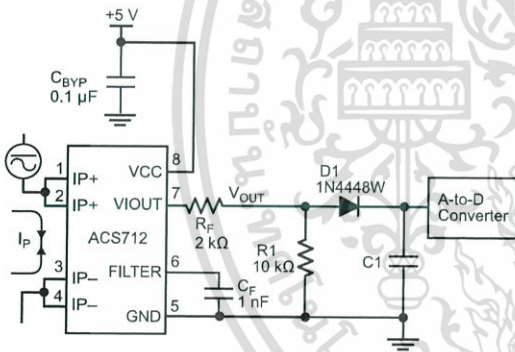
## Typical Applications



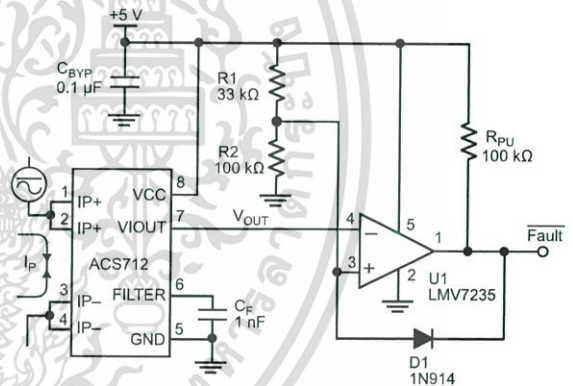
Application 2. Peak Detecting Circuit



Application 3. This configuration increases gain to 610 mV/A (tested using the ACS712ELC-05A).



Application 4. Rectified Output. 3.3 V scaling and rectification application for A-to-D converters. Replaces current transformer solutions with simpler ACS circuit. C1 is a function of the load resistance and filtering desired. R1 can be omitted if the full range is desired.



Application 5. 10 A Overcurrent Fault Latch. Fault threshold set by R1 and R2. This circuit latches an overcurrent fault and holds it until the 5 V rail is powered down.

### Improving Sensing System Accuracy Using the FILTER Pin

In low-frequency sensing applications, it is often advantageous to add a simple RC filter to the output of the device. Such a low-pass filter improves the signal-to-noise ratio, and therefore the resolution, of the device output signal. However, the addition of an RC filter to the output of a sensor IC can result in undesirable device output attenuation — even for DC signals.

Signal attenuation,  $\Delta V_{ATT}$ , is a result of the resistive divider effect between the resistance of the external filter,  $R_F$  (see Application 6), and the input impedance and resistance of the customer interface circuit,  $R_{INTFC}$ . The transfer function of this resistive divider is given by:

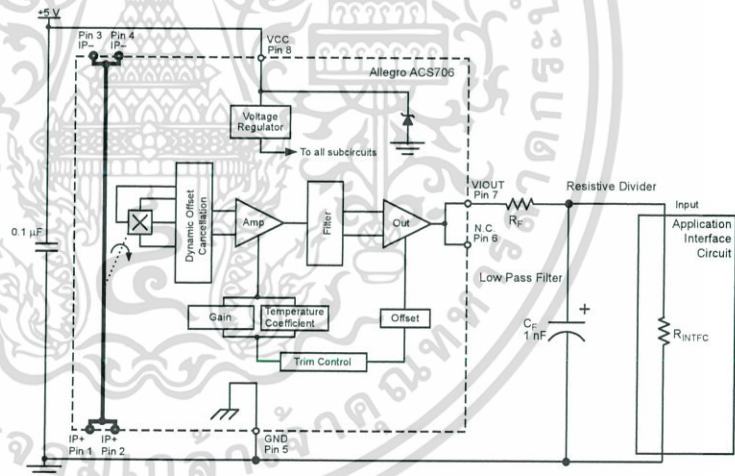
$$\Delta V_{ATT} = V_{IOUT} \left( \frac{R_{INTFC}}{R_F + R_{INTFC}} \right)$$

Even if  $R_F$  and  $R_{INTFC}$  are designed to match, the two individual resistance values will most likely drift by different amounts over

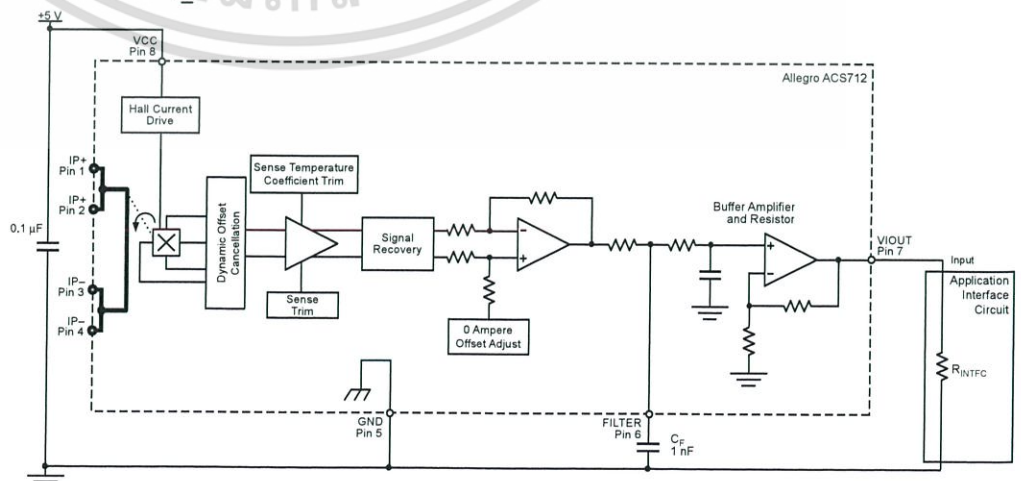
temperature. Therefore, signal attenuation will vary as a function of temperature. Note that, in many cases, the input impedance,  $R_{INTFC}$ , of a typical analog-to-digital converter (ADC) can be as low as 10 k $\Omega$ .

The ACS712 contains an internal resistor, a FILTER pin connection to the printed circuit board, and an internal buffer amplifier. With this circuit architecture, users can implement a simple RC filter via the addition of a capacitor,  $C_F$  (see Application 7) from the FILTER pin to ground. The buffer amplifier inside of the ACS712 (located after the internal resistor and FILTER pin connection) eliminates the attenuation caused by the resistive divider effect described in the equation for  $\Delta V_{ATT}$ . Therefore, the ACS712 device is ideal for use in high-accuracy applications that cannot afford the signal attenuation associated with the use of an external RC low-pass filter.

Application 6. When a low pass filter is constructed externally to a standard Hall effect device, a resistive divider may exist between the filter resistor,  $R_F$ , and the resistance of the customer interface circuit,  $R_{INTFC}$ . This resistive divider will cause excessive attenuation, as given by the transfer function for  $\Delta V_{ATT}$ .



Application 7. Using the FILTER pin provided on the ACS712 eliminates the attenuation effects of the resistor divider between  $R_F$  and  $R_{INTFC}$ , shown in Application 6.



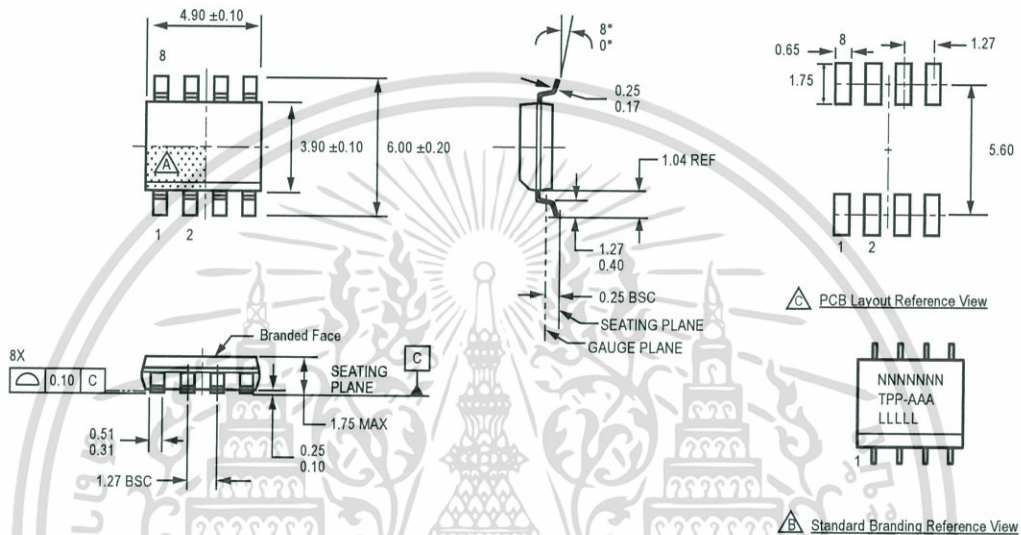
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากทาง Allegro

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก



Allegro MicroSystems, LLC  
115 Northeast Cutoff  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.  
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

### Package LC, 8-pin SOIC



For Reference Only; not for tooling use (reference MS-012AA)  
 Dimensions in millimeters  
 Dimensions exclusive of mold flash, gate burrs, and dambar protrusions  
 Exact case and lead configuration at supplier discretion within limits shown

- ⚠ Terminal #1 mark area
- ⚠ Branding scale and appearance at supplier discretion
- ⚠ Reference land pattern layout (reference IPC7351)
- ⚠ SOIC127P600X175-8M; all pads a minimum of 0.20 mm from all adjacent pads; adjust as necessary to meet application process requirements and PCB layout tolerances

- ⚠ PCB Layout Reference View
- ⚠ Standard Branding Reference View
- N = Device part number
- T = Device temperature range
- P = Package Designator
- A = Amperage
- L = Lot number
- Bally Brand = Country of Origin

## Revision History

Revision	Revision Date	Description of Revision
15	November 16, 2012	Update rise time and isolation, I <sub>OUT</sub> reference data, patents
16	June 5, 2017	Updated product status



Copyright ©2006-2017, Allegro MicroSystems, LLC

The products described herein are protected by U.S. patents: 5,621,319; 7,598,601; and 7,709,754.

Allegro MicroSystems, LLC reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in life support devices or systems, if a failure of an Allegro product can reasonably be expected to cause the failure of that life support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, LLC assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

For the latest version of this document, visit our website:

[www.allegromicro.com](http://www.allegromicro.com)