

การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

**THE DESIGN OF ANGLE TRANSDUCER USING HALL
EFFECT SENSOR**

ชญภาพ บุญทาศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษาที่ 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

ชญภาพ บุญทาศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษาที่ 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
ชื่อ-นามสกุล	นายชญกพ บุญทาศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมแบบหมุนรอบแกน 360 องศา โดยใช้หลักการตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กถาวร ด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ และประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ในการระบุตำแหน่งมุม

ทรานสดิวเซอร์ที่ออกแบบประกอบด้วย ส่วนตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของมุม โดยแม่เหล็กถาวรติดตั้งที่แกนหมุนของทรานสดิวเซอร์ และฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์แบบเชิงเส้นติดตั้งอยู่กับที่จำนวน 5 ตัว วางทำมุม 72 องศา เพื่อตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ส่วนปรับปรุงสัญญาณแอนะล็อกจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ให้เหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 12 บิต ในการประมวลผล และส่วนแสดงผลค่ามุมตัวเลขดิจิทัลด้วยจอ LCD

ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์ที่นำเสนอ สามารถวัดมุมและแสดงผลได้ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยมีความคลาดเคลื่อน ± 0.2 และ ± 0.5 องศา ที่ความละเอียด 0.1 องศา และ 1 องศา ตามลำดับจากการทดลองนำทรานสดิวเซอร์ที่ออกแบบไปติดตั้งกับเครื่องชั่งสปริงสามารถทำงานได้ในระดับหนึ่งเนื่องจากแกนที่ติดตั้งแม่เหล็กถาวรมีการสั่น

คำสำคัญ: ทรานสดิวเซอร์วัดมุม ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์

Thesis Title	The Design of Angle Transducer Using Hall Effect Sensor
Name - Surname	Mr.Chayapope Boontasri
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Dr. Chatchai Suppitaksakul
Academic Year	2011

ABSTRACT

This thesis presents the design of a 360 degrees angle rotary transducer. Hall-Effect sensors are used to detect the flux density of magnetic field and processed using microcontroller in order to indicate the angle positions.

The designed transducer consists of an angle detecting part using a permanent magnet which attaches on the spindle rotation axis 360 degrees. Five linear Hall-Effect sensors are mounted in place to 72 degree angle for detect the flux density of the magnetic field that rotates around the sensors. The signal modifier part that uses for improving the analog output signals from the sensors then passed to the 12 bits Microcontroller for processing. The display part that the measured angle values as digital numbers are expressed on the LCD screen.

The experimental results, the designed transducer is able to measure and express the angle from 0 to 360 degrees with accuracy of ± 0.2 and ± 0.5 at the resolution of 0.1 and 1 degree, respectively. From the testing results which apply to attach with the spring weight scale, it is found that the designed transducer can working in some degree because of the vibration at the spindle rotation axis.

Keywords: angle transducer, Hall-Effect sensor, microcontroller



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.วิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร ประธานกรรมการ ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า และให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ และสถานที่ทำงานวิจัย ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในหลายๆ เรื่อง

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เชียงราย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านวัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อบัณฑิต บุญทาศรี คุณแม่ทองศรี บุญทาศรี กาญจนา บุญทาศรี (ภรรยา) และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

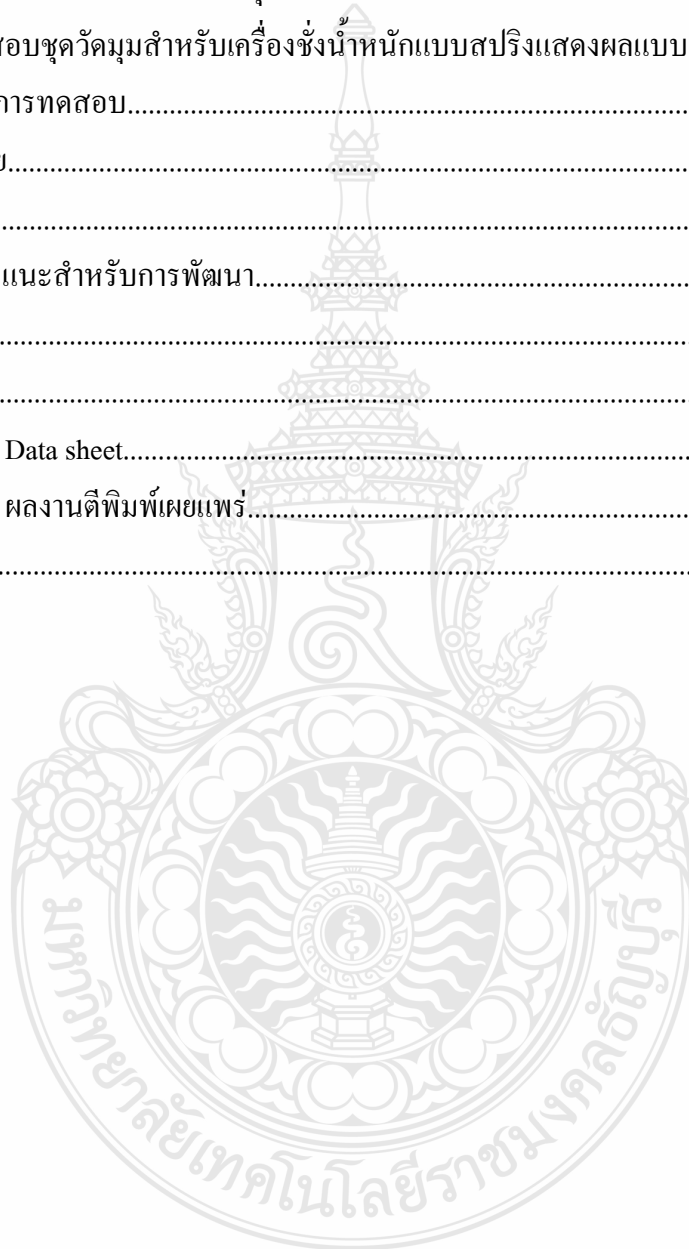
ชญภพ บุญทาศรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แม่เหล็ก.....	4
2.2 ฮอลล์เอฟเฟกต์.....	6
2.3 คำนิยามของการวัด.....	14
2.4 แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล.....	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.6 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม.....	24
3.2 การออกแบบโปรแกรมแปลงสัญญาณและแสดงผล.....	46
3.3 การปรับปรุงโปรแกรมเพื่อเปลี่ยนการแสดงผลมุมเป็นน้ำหนั.....	62
3.4 สรุปการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม โปรแกรมแปลงสัญญาณ และแสดงผล.....	64

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	66
4.1 การทดสอบทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ทำการออกแบบ.....	66
4.2 การทดสอบชุดวัดมุมสำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงแสดงผลแบบดิจิตอล.....	76
4.3 สรุปผลการทดสอบ.....	77
5 สรุปผลการวิจัย.....	78
5.1 สรุป.....	78
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก Data sheet.....	83
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	116



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วใต้กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์.....	35
3.2 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วเหนือกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์.....	36
3.3 ช่วงมุมที่แม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ไม่ทับซ้อนกัน.....	41
3.4 การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้น้อยเมื่อเทียบกับมุมเคลื่อนที่.....	41
3.5 การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่น้อยเมื่อเทียบกับมุมที่แม่เหล็กเคลื่อนที่.....	42
3.6 เงื่อนไขการแปลผลมุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	47
3.7 เงื่อนไขการแปลผลมุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว.....	52
3.8 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปลผล จากเซ็นเซอร์ของโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว.....	61
3.9 แรงดันเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ทำการออกแบบที่ความละเอียด 0.1 องศา.....	62
4.1 ค่าความผิดพลาดการวัดที่ความละเอียด 1 องศา ที่มุม 179 องศา.....	69
4.2 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่ความละเอียด 1 องศา ตั้งแต่ 0 – 10 องศา.....	71
4.3 มุมที่วัดจากทรานสดิวเซอร์วัดมุมกับ แมกเนติกโรตารีเอนโคเดอร์ความละเอียด 1 องศา.....	71
4.4 ความเที่ยงตรงของมุมที่วัด โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ความละเอียด 1 องศา.....	73
4.5 ความผิดพลาดของมุมที่วัด โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุม ที่ความละเอียด 1 องศา.....	73
4.6 การกำหนดค่ามุมจากแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่ความละเอียด 0.1 องศา.....	74
4.7 มุมที่วัด โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุม ที่ความละเอียด 0.1 องศา.....	75

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่.....	5
2.2 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็ก.....	5
2.3 จุดสะเทินเนื่องจากแท่งแม่เหล็กวางใกล้กัน.....	6
2.4 โครงสร้างทางกายภาพของฮอลล์เอฟเฟกต์.....	7
2.5 การเกิดแรงดันไฟฟ้าจากฮอลล์เอฟเฟกต์.....	7
2.6 การเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ตัวกึ่งตัวนำฮอลล์.....	8
2.7 ลักษณะรูปร่างของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์โดยทั่วไป.....	9
2.8 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก แบบยูนิโพลาร์เฮดออน.....	10
2.9 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบยูนิโพลาร์สโไลด์.....	11
2.10 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สโไลด์รูปแบบที่ 1.....	11
2.11 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สโไลด์รูปแบบที่ 2.....	12
2.12 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สโไลด์รูปแบบที่ 3.....	12
2.13 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สโไลด์รูปแบบที่ 4.....	13
2.14 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบพฤษภาคมแอปโพรช.....	13
2.15 ค่าผิดพลาดต่างๆ กับความถี่ของค่าที่วัดได้.....	15
2.16 การเปรียบเทียบลักษณะความแตกต่างระหว่างความแม่นยำและความเที่ยงตรง.....	16
2.17 ค่าผิดพลาดฮิสเตอร์รีซิส.....	18
2.18 ระยะห่างของแรงดันต่อบิตข้อมูล.....	19
2.19 ความเที่ยงตรงของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล.....	20
2.20 อัตราการสุ่มสัญญาณสูงเพียงพอจะได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับอินพุต.....	20
2.21 อัตราการสุ่มสัญญาณต่ำ สัญญาณที่ได้จะเพี้ยนไปจากอินพุต.....	21
2.22 ความไม่เป็นเชิงเส้นของการแปลงสัญญาณ.....	21
3.1 บล็อกไดอะแกรมของทรานสดิวเซอร์วัดมุม.....	24
3.2 โครงสร้างเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน.....	25
3.3 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 0 องศา.....	26
3.4 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 15 องศา.....	26
3.5 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 45 องศา.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 ลักษณะของสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีความสูงเท่ากับ h	27
3.7 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ซ็อนกันใช้แม่เหล็กขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร.....	31
3.8 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ซ็อนกันใช้แม่เหล็กขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร.....	32
3.9 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนแม่เหล็กขั้วคู่ทำมุม 0 องศา.....	33
3.10 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ซ็อนกันใช้แม่เหล็ก 2 ตัว ขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร.....	33
3.11 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ซ็อนกันใช้แม่เหล็ก 2 ตัว ขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร.....	34
3.12 การตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบ ยูนิโพลาร์เฮดออน.....	34
3.13 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วได้กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์.....	35
3.14 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วเหนือกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์.....	36
3.15 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่.....	38
3.16 ความเข้มสนามแม่เหล็ก ใช้แม่เหล็กขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร.....	39
3.17 ความเข้มสนามแม่เหล็ก ใช้แม่เหล็กขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร.....	39
3.18 แรงดันเอาต์พุต ใช้แม่เหล็กขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร.....	40
3.19 แรงดันเอาต์พุต ใช้แม่เหล็กขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร.....	40
3.20 โครงสร้างรัศมี 2 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	42
3.21 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ ที่รัศมี 2 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	43
3.22 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	43
3.23 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	44
3.24 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 4 ตัว.....	44
3.25 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 4 ตัว.....	45
3.26 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 5 ตัว.....	45
3.27 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 5 ตัว.....	46
3.28 โพลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	48
3.29 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปรผล ที่รัศมี 2 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	51
3.30 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปรผล ที่รัศมี 3 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว.....	51
3.31 โพลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว.....	56
3.32 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปรผล ที่รัศมี 3 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 5 ตัว.....	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.33 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์วัดมุมกับแกนหมุนของเครื่องชั่งแบบสปริง.....	63
3.34 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงสำหรับชั่งน้ำหนักขนาด 60 กิโลกรัม.....	63
3.35 น้ำหนักกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ทำการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่า.....	64
4.1 โครงสร้างของแมคเนติกโรตารีเอนโคเดอรีี่ห้อ Avago รุ่น EIAT 6012.....	66
4.2 ติดตั้งแมคเนติกโรตารีเอนโคเดอรีไว้กับแกนหมุนเดียวกันกับทรานสดิวเซอร์.....	67
4.3 แกนหมุนสำหรับทดสอบทรานสดิวเซอร์.....	67
4.4 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัว.....	68
4.5 แรงดันเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 ณ ตำแหน่งมุม 0-360 องศา.....	69
4.6 ค่าความผิดพลาดที่มุม 179 องศา ของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1.....	70
4.7 แปลงอนาล็อกเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 12 บิต.....	70
4.8 มุมที่ได้จาก ทรานสดิวเซอร์วัดมุมเทียบกับ แมคเนติก โรตารีเอนโคเดอรีความละเอียด 1 องศา.....	72
4.9 ค่าความผิดพลาดของมุมที่วัดได้โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุม ที่ความละเอียด 0.1 องศา ที่ มุม 0.5 องศา.....	75
4.10 แปลผลจากมุม 360 องศา เป็นน้ำหนัก 60 กิโลกรัม.....	76
4.11 ชุดทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์และตัวแสดงผล.....	76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ϕ	Magnetic field
A	Accuracy
B	The Intensity of Magnetic Field
E_H	Hall Field
$Error_H$	Hysteresis Error
F_B	Lorentz Force
i	Current
q	Electron Charge
R_H	Hall Coefficient
S	Sensitivity
v	Velocity
V_{FS}	Full Scale Voltage
V_H	Hall Voltage
V_{LSB}	Least Significant Bit Voltage
x_n	Measured
\bar{x}	Measured Average
y_n	True

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีระบบควบคุมอัตโนมัติเข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมรถยนต์หุ่นยนต์และสิ่งประดิษฐ์อื่นๆที่มีลักษณะการทำงานแบบอัตโนมัติการควบคุมอัตโนมัติในระบบทางกายภาพใดๆ คือการบังคับให้ระบบนั้นทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องหรือเป็นไปตามเป้าหมายด้วยตัวเอง ระบบต่างๆ เหล่านี้ประกอบด้วยค่าที่เกี่ยวข้องต่างกันไป เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหล ความเร็ว ตำแหน่ง แรงดัน ความถี่ เป็นต้นอุปกรณ์ตรวจวัด (Measuring Device) เป็นอุปกรณ์ที่ให้สัญญาณขาออก ซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับขนาดตัวแปรของสิ่งที่ต้องการวัดหรือสั่งงาน เช่น เซ็นเซอร์ และทรานสดิวเซอร์ประเภทต่าง ๆ อุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่เชิงมุมเช่นมุมในการยกแขนกล หรือมุมในการหักพวงมาลัยในรถยนต์อัจฉริยะ จะใช้ทรานสดิวเซอร์วัดมุม หรือที่รู้จักกันในชื่อแอบโซลูทเอนโคเดอร์ (Absolute Encoder) ซึ่งราคาจะสูงตามค่าความละเอียด

ผู้วิจัยจึงสนใจและได้ศึกษาวิเคราะห์ห้ออกแบบโครงสร้างทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่สามารถวัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา ทรานสดิวเซอร์วัดมุมได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้หลักการ แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ กระจับวนการทางแสง [1-2] ข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำ และความไวสูง อายุการใช้งานยาวนาน มีข้อเสียคือราคาแพง ที่มีความไวต่อสิ่งสกปรกและฝุ่น กระจับวนการเปลี่ยนค่าความต้านทาน [2] ข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำ ง่ายต่อการนำไปแปลผล ข้อเสีย มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส การตอบสนองช้า การเคลื่อนที่แบบจับปล้นอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ กระจับวนการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า [3] ข้อดีคือการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพื่อกำหนดความถี่ที่เป็นสัดส่วนกับการเคลื่อนที่ ข้อเสีย และมีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส การตอบสนองช้า กระจับวนการฮอลล์เอฟเฟกต์ [4] ข้อดีคือการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่เป็นสัดส่วนกับมุมที่เปลี่ยนไปราคาถูกตอบสนองเร็วและเป็นเชิงเส้น การติดตั้งง่ายไม่จำเป็นต้องยึดแกนหมุนติดกับตัวเซ็นเซอร์โดยตรง และไม่มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส

งานวิจัยนี้จึงนำหลักการฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์มาพัฒนา ทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดมุม เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมสามารถวัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา และราคาถูก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาเทคนิค และอุปกรณ์สำหรับวัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา
- 1.2.2 เพื่อทำการวิจัยหาแนวทางในการออกแบบชุดวัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา
- 1.2.3 เพื่อออกแบบสร้างชุดวัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างทรานสดิวเซอร์วัดมุม แบบรอบแกน 360 องศา
- 1.3.2 ทำการทดสอบทรานสดิวเซอร์วัดมุม แบบรอบแกน 360 องศา
- 1.3.3 ประยุกต์ใช้ทรานสดิวเซอร์วัดมุมสำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงแสดงผลแบบดิจิทัล
- 1.3.4 ทดสอบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงแสดงผลแบบดิจิทัล โดยการสอบเทียบมาตรฐาน

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการของวิทยานิพนธ์

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย
 - 1.4.1.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
 - 1.4.1.2 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับความรู้เบื้องต้นของการวัดและเครื่องมือวัด
 - 1.4.1.3 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับทรานสดิวเซอร์วัดมุม
- 1.4.2 การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม แบบรอบแกน 360 องศา
 - 1.4.2.1 ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
 - 1.4.2.2 ทดสอบความเป็นเชิงมุมของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
 - 1.4.2.3 ออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
- 1.4.3 ทดสอบทรานสดิวเซอร์วัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา
 - 1.4.3.1 ทดสอบความแม่นยำของทรานสดิวเซอร์วัดมุม
 - 1.4.3.2 ทดสอบความเที่ยงตรงของทรานสดิวเซอร์วัดมุม
 - 1.4.3.3 ทดสอบความผิดพลาดฮิสเตอร์รีซิสของทรานสดิวเซอร์วัดมุม
 - 1.4.3.4 ทดสอบทรานสดิวเซอร์วัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา มาแปลผลมุมโดยเทียบกับอุปกรณ์วัดมุมมาตรฐาน
- 1.4.4 ทดสอบเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงแสดงผลแบบดิจิทัล โดยการสอบเทียบมาตรฐาน
- 1.4.5 สรุปและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ทราบสិวดิวเซอร์วีคมุมแบบรอบแกน 360 องศา ทางเลือกชนิดใหม่ที่ต้นทุนต่ำ

1.5.2 สามารถนำทราบสิวดิวเซอร์วีคมุม ไปประยุกต์ใช้งานกับตาชั่งแบบสปริงเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการแสดงผลเป็นแบบดิจิทัล



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยเรียงลำดับตั้งแต่ทฤษฎีเกี่ยวกับแม่เหล็กสอลล์เอฟเฟกต์ ความรู้พื้นฐานทางด้านเรขาคณิตวิเคราะห์สำหรับการออกแบบชุดเซ็นเซอร์ นิยามที่ใช้ในการวัดทางอุตสาหกรรม และไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณ อนุล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อแสดงผล สุดท้ายเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและพัฒนาสำหรับงานวิจัยนี้

2.1 แม่เหล็ก (Magnet)

แม่เหล็กคือ [5-6] วัตถุที่สามารถดูดสารประกอบเหล็กบางชนิดได้ แม่เหล็กเป็นสารประกอบของเหล็กและออกซิเจน เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก (Magnetic field; Φ) จะมีแรงมากระทำต่ออนุภาคนั้น ทำให้มีทิศการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปเรียกแรงที่มากระทำนี้ว่า “แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กหรือแรงลอเรนตซ์ (Lorentz Force; F_B)” แรงนี้จะมากหรือน้อยขึ้นกับเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Lines of Force)

2.1.1 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็ก หมายถึงจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านตั้งฉากบนพื้นที่หนึ่งตารางหน่วย เป็นปริมาณสเกลาร์ พบว่าบริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็กจะมีสนามแม่เหล็กหนาแน่นและสนามแม่เหล็กจะหนาแน่นน้อยลงเมื่ออยู่ห่างจากขั้วแม่เหล็ก อัตราส่วนระหว่างสนามแม่เหล็กต่อพื้นที่ตั้งฉากกับสนามหนึ่งตารางหน่วย เรียกว่า ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2.1)$$

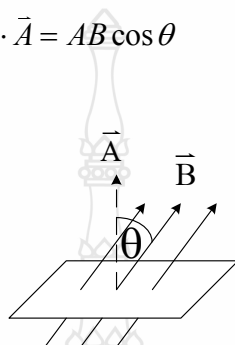
เมื่อ B คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเกาส์ต่อตารางเมตร (G/m²)

ϕ คือสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ มีหน่วยเกาส์ (G)

A คือพื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก มีหน่วยตารางเมตร(m²)

ถ้าสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ ทำให้ทิศสนามแม่เหล็กกับทิศของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยพื้นที่ทำมุมต่อกัน θ ดังภาพที่ 2.1 การหาสนามแม่เหล็ก หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังสมการ

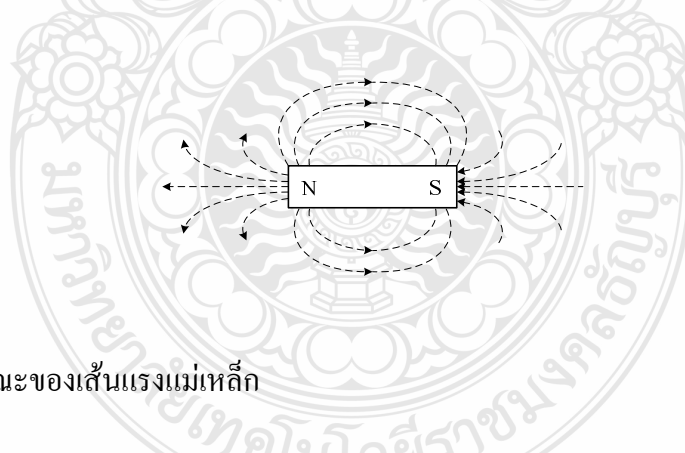
$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{A} = AB \cos \theta \quad (2.2)$$



ภาพที่ 2.1 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่

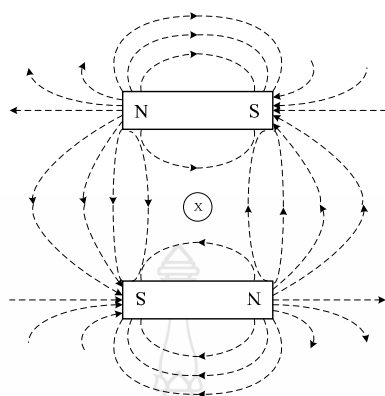
2.1.2 เส้นแรงแม่เหล็ก

เส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นที่แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กในบริเวณหนึ่งโดยเส้นแรงแม่เหล็กภายนอกแท่งแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วเหนือเข้าหาขั้วใต้ภายในแท่งแม่เหล็กเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วใต้เข้าหาขั้วเหนือ เส้นแรงแม่เหล็กแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน

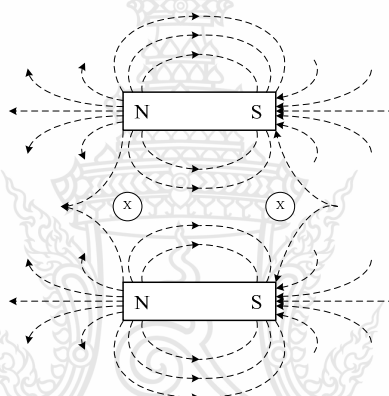


ภาพที่ 2.2 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็ก

จุดสะเทินแม่เหล็ก หมายถึงจุดที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีค่าสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ หรือเป็นจุดที่ไม่มีเส้นแรงแม่เหล็กผ่าน ดังที่ภาพ 2.3



(ก) จุดสะเทินเมื่อแม่เหล็กขั้วเดียวกันวางไว้ใกล้กัน



(ข) จุดสะเทินเมื่อแม่เหล็กต่างขั้วกันวางไว้ใกล้กัน

ภาพที่ 2.3 จุดสะเทินเนื่องจากแท่งแม่เหล็กวางใกล้กัน

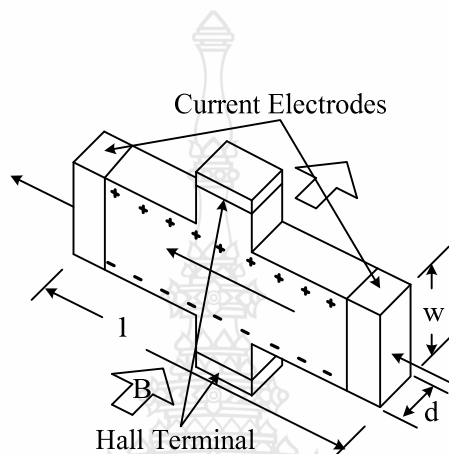
2.2 ฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect)

ฮอลล์เอฟเฟกต์ [7-10] เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับตรวจจับความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่มีขนาดเล็กและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้สำหรับวัดตำแหน่งระยะทาง ความเร็วรอบ หรือการวัดการกระจัดเชิงมุมของเพลลา เป็นต้น

2.2.1 โครงสร้างและพื้นฐานการทำงาน

แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากฮอลล์เอฟเฟกต์ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ไหลผ่านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า “ฮอลล์เอฟเฟกต์” ดังแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในภาพที่ 2.5 ทั้งนี้การเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ทั้งสองด้านของ ตัวกำเนิดสัญญาณฮอลล์ (Hall Generator) ดังภาพที่ 2.4 เป็นตัวนำพา

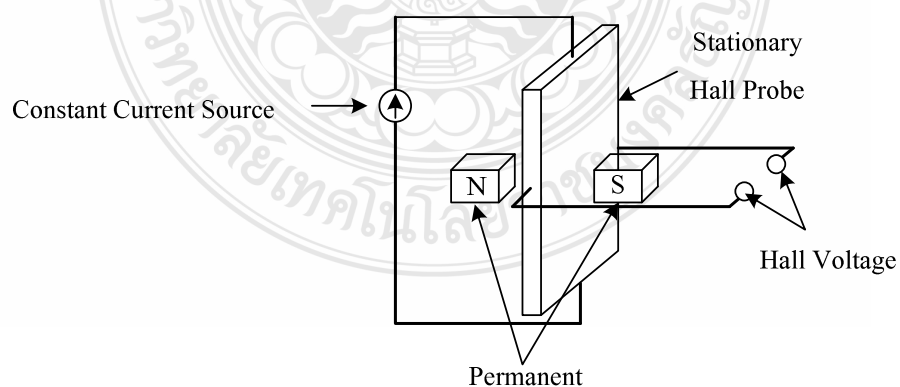
กระแสไฟฟ้า (Current Carrying Conductor) ที่ไหลผ่านตัวกำเนิดสัญญาณฮอลล์ ผลที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะมีขนาดเป็นสัดส่วนของผลคูณระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้การกำหนดแบบแผนของตัวนำไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และการไหลของกระแสไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางกายภาพของฮอลล์เอฟเฟกต์

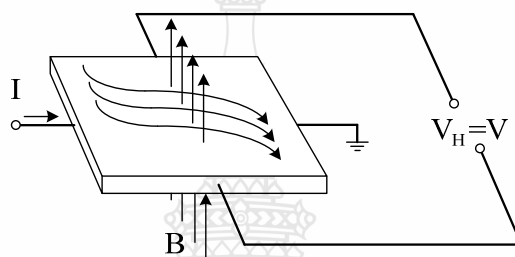
เมื่อประจุของอิเล็กตรอน (Electron Charge; e) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าสุทธิที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว (Velocity; v) ได้แรงลอเรนทซ์ (Lorentz Force; F_B) สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการ 2.3

$$F_B = e(vB) \quad (2.3)$$



ภาพที่ 2.5 การเกิดแรงดันไฟฟ้าจากฮอลล์เอฟเฟกต์

ลักษณะพื้นฐานการทำงาน คือ กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ตัวกึ่งตัวนำชนิดสัญญาณฮอลล์จะถูกบังคับด้วย โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำ และอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้เกิดการหักเหจากค่าความเข้มข้นของ สนามแม่เหล็ก การสร้างประจุที่เพิ่มขึ้นของตัวกึ่งตัวนำชนิดสัญญาณฮอลล์จะเป็นการสร้างสนามไฟฟ้า เรียกว่า “สนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Field; E_H)” และการไหลของกระแสไฟฟ้าจะเป็นไปในทิศทางเดิมอย่างต่อเนื่อง ถ้าไม่มีผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยกำหนดให้สนามไฟฟ้าเท่ากับ



ภาพที่ 2.6 การเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ตัวกึ่งตัวนำชนิดสัญญาณฮอลล์

$$E_H = vB \quad (2.4)$$

ถ้า q หมายถึง ความหนาแน่นและประจุของตัวนำตามลำดับ ดังนั้นความหนาแน่นของ กระแสไฟฟ้า (Current; i) จะ ได้

$$i = qv \quad (2.5)$$

เมื่อสนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกแสดงโดยความเร็วของอิเล็กตรอนเดี่ยวจะได้

$$E_H = \frac{1}{q} iB \quad (2.6)$$

ค่าตัวประกอบซึ่งอยู่ในภาพของ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall Coefficient; R_H) จะเป็นส่วน กลับของความหนาแน่นของพาหะตัวนำตามชนิดสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็น ตัวกึ่งตัวนำชนิดสัญญาณฮอลล์

ด้วยเหตุนี้ ฮอลล์เอฟเฟกต์จึงได้ถูกสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำมากกว่าสร้างจากโลหะจากภาพที่ 2.4 จะเห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall Voltage; V_H) เท่ากับ

$$V_H = wE_H \quad (2.7)$$

$$I = iwd \quad (2.8)$$

ดังนั้น จึงหาได้จากระดับแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์

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

เมื่อ w คือ ความกว้างของตัวกึ่งตัวนำฮอลล์
 d คือ ความหนาของตัวกึ่งตัวนำฮอลล์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลอเรนซ์กับ สนามไฟฟ้าจากปรากฏการณ์ฮอลล์จะเกิดขึ้นได้ เฉพาะกับตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านด้วยความเร็วคงที่ ทั้งนี้กระแสไฟฟ้าใน ชิ้นส่วนฮอลล์ (Hall Element) จะถูกกำหนดด้วยความร้อนที่แผ่กระจายและความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นที่กำลังงานสูงสุดของเอาต์พุตส่วนใหญ่ ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ของฮอลล์เอฟเฟกต์ คือกระแสรบกวนที่เกิดจากเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าทางด้านอินพุต หรือสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสภาวะรอบข้าง ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าผิดพลาดได้



ภาพที่ 2.7 ลักษณะรูปร่างของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์โดยทั่วไป

2.2.2 คำนวณหาความเข้มของสนามแม่เหล็กสำหรับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ใช้ในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดความต่างศักย์ค่าหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทางด้านลบ (-) แต่ถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทางด้านบวก (+) ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กดังนี้

$$B = \frac{V_{out(B)} - V_{out(O)}}{S} \quad (2.10)$$

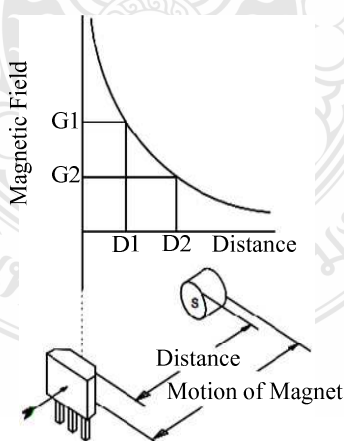
เมื่อ $V_{out(B)}$ คือ ความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

$V_{out(O)}$ คือ ความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

S คือ สัมประสิทธิ์ความไวมีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเกาส์ (V/G)

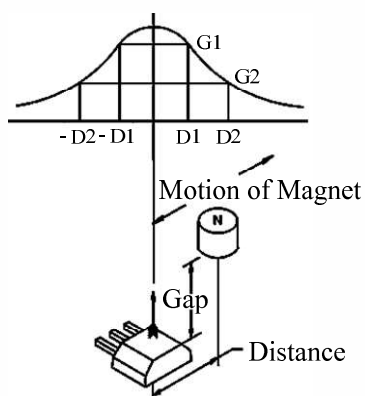
B คือความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นเกาส์ (G)

ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กที่เข้าใกล้บริเวณตัวนำกระแสไฟฟ้าภายในฮอลล์เอฟเฟกต์ ถ้าอยู่ใกล้ค่าความต่างศักย์ที่ได้จะสูง ถ้าอยู่ไกลค่าความต่างศักย์จะต่ำลงจนเหลือเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้ การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กขั้วเดียว แบบตั้งฉากกับตัวเซ็นเซอร์ ต่อผลตอบสนองความเข้มของสนามแม่เหล็กเรียกว่า “แบบยูนิโพลาร์เฮดออน (Unipolar Head-on Mode)” แสดงได้ดังภาพที่ 2.8



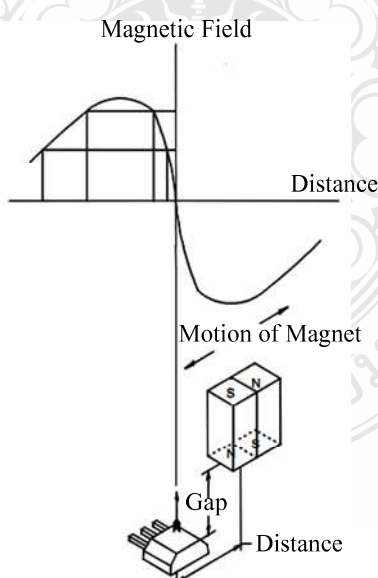
ภาพที่ 2.8 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก แบบยูนิโพลาร์เฮดออน [9]

การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก แบบขนานกับตัวเซ็นเซอร์ ต่อผลตอบสนองความเข้มของสนามแม่เหล็กขั้วเดียว เรียกว่า “แบบยูนิโพลาร์สไลด์ (Unipolar Slide-by Mode)” แสดงได้ดังภาพที่ 2.9

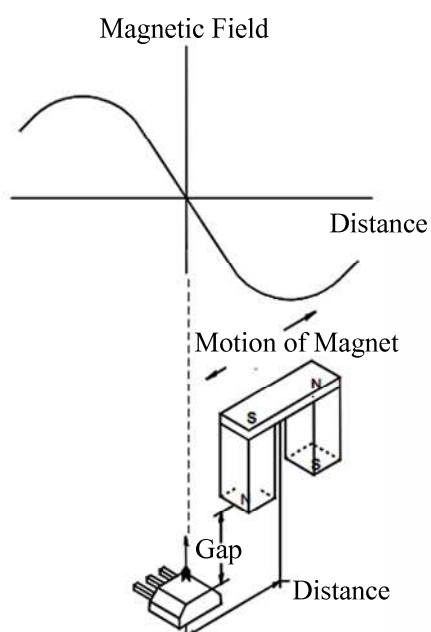


ภาพที่ 2.9 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบยูนิโพลาร์สไลด์ [9]

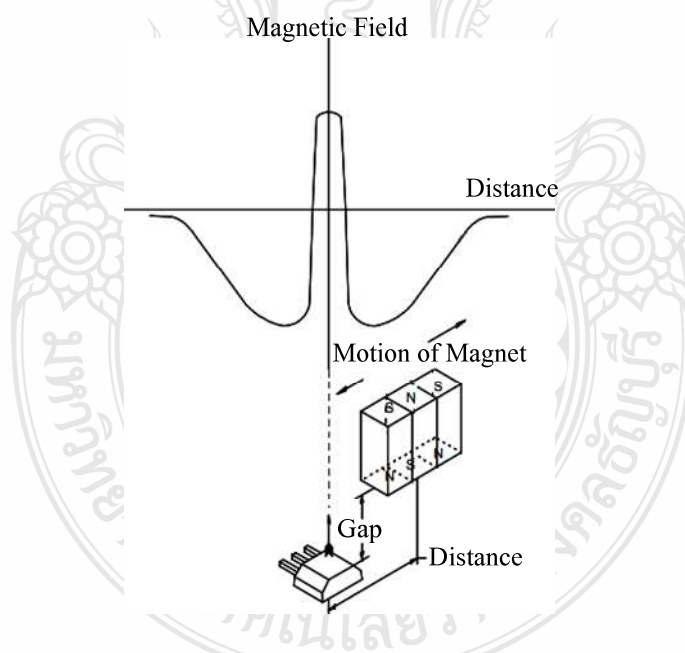
การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก แบบขนานกับตัวเซ็นเซอร์ ต่อผลตอบสนองความเข้มของสนามแม่เหล็กขั้วคู่ เรียกว่า “แบบไบโพลาร์สไลด์ (Bipolar Slide-by Mode)”



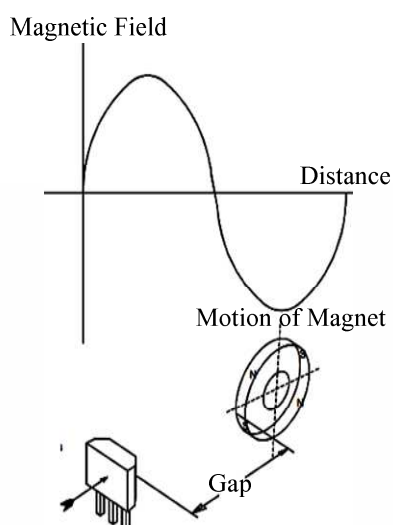
ภาพที่ 2.10 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สไลด์รูปแบบที่ 1 [9]



ภาพที่ 2.11 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สไลด์รูปแบบที่ 2 [9]

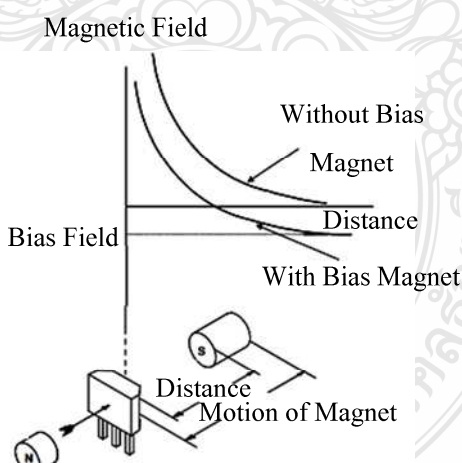


ภาพที่ 2.12 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สไลด์รูปแบบที่ 3 [9]



ภาพที่ 2.13 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์สไลด์รูปแบบที่ 4 [9]

การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กขั้วเดียว เพิ่มแม่เหล็กฐานอยู่กับที่ด้านหลังตัวเซ็นเซอร์ แบบตั้งฉากกับตัวเซ็นเซอร์ ต่อผลตอบสนองความเข้มของสนามแม่เหล็กเรียกว่า “แบบพุชพุชแอปโพรช (Push-Push Approach)” ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบพุชพุชแอปโพรช [9]

ประโยชน์หลักของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ คือ เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยไม่สัมผัสกับชิ้นงาน ที่ต้องการตรวจจับโดยตรง ไม่มีการเสียดสีจึงไม่เกิดการสึกหรอจากการใช้งาน มีความสามารถในการตรวจจับสูง และมีขนาดเล็ก จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.3 คำนิยามของการวัด

การวัด (Measurement) [11, 12] เป็นพื้นฐานสำหรับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกสาขา การวัด คือการกำหนดตัวเลขให้กับคุณสมบัติ (Properties) ของวัตถุหรือเหตุการณ์ดังนั้นมันจึงเป็นการบรรยายถึงคุณสมบัติของวัตถุหรือของเหตุการณ์ ก่อนที่จะลงมือทำการวัด ดังนั้นในขั้นตอนแรก จะต้องมีกำหนดความต้องการ (Need) สำหรับการวัด

2.3.1 ความต้องการในการปรับปรุงคุณภาพของการวัดอย่างต่อเนื่อง

ตามการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คุณภาพไม่ได้เป็นเพียงแต่ความถูกต้อง (Accuracy) ของการวัด คุณภาพของระบบเครื่องวัดจะรวมถึง

- ความเหมาะสมของมันต่องานการวัดที่จำเพาะอย่าง
- ความรู้เกี่ยวกับความไม่แน่นอน (Uncertainties) ที่รวมอยู่กับระบบเครื่องวัด
- ความเชื่อถือได้ (Reliability) ของระบบเครื่องวัด

ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือ จะต้องมีความเข้าใจความสามารถ (Capabilities) และขีดจำกัด (Limitation) ของเครื่องวัด เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่ต้องการ หรือสามารถกำหนดจำเพาะสมรรถนะที่ต้องการแก่ผู้ออกแบบเครื่องวัด

2.3.2 ค่าผิดพลาด (Errors)

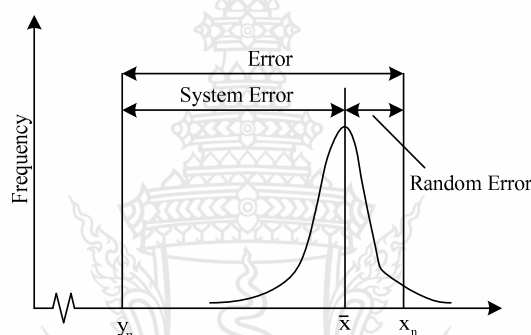
ค่าผิดพลาดหมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณที่แท้จริงของค่าตัวแปรที่ต้องการวัด กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะของปริมาณตัวเลข หรือร้อยละ ทางทฤษฎี ความสัมพันธ์ของเอาต์พุตกับค่าของการวัดจากการใช้งานทรานส์ดิวเซอร์จะอยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ กราฟ หรือตาราง ค่าผิดพลาด (Error) ในหน่วยของการวัดสามารถหาได้จากสมการที่ 2.11 และคิดเป็นร้อยละค่าผิดพลาด ดังสมการที่ 2.13

$$Error = Y_n - X_n \quad (2.11)$$

$$Relative\ Error = \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \quad (2.12)$$

$$\%Error = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100 \quad (2.13)$$

เมื่อ Error	คือ ข้อผิดพลาด
Relative Error	คือ ค่าผิดพลาดสัมพัทธ์
$\%Error$	คือ ร้อยละค่าผิดพลาด
Y_n	คือ ค่าที่แท้จริงของสิ่งที่วัด
X_n	คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด



ภาพที่ 2.15 ค่าผิดพลาดต่างๆ กับความถี่ของค่าที่วัดได้

2.3.3 ความแม่นยำ (Accuracy)

ในการวัดปริมาณใดๆ สิ่งต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการวัดเป็นอย่างมากคือ ค่าผิดพลาดทางสถิติ (Static Error) ค่าผิดพลาดทางพลวัต (Dynamic Error) การเลื่อน (Drift) และความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) ความถูกต้องแม่นยำในที่นี้หมายถึงค่าที่อ่านได้จะต้องมีความใกล้เคียงกันกับค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้หรือค่าจริง

ความแม่นยำของระบบที่สมบูรณ์นั้นมีความสัมพันธ์กับความถูกต้องแม่นยำเฉพาะตัวของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ขั้นปฐมภูมิ (Primary Sensing Element) อุปกรณ์เซ็นเซอร์ขั้นทุติยภูมิ (Secondary Sensing Element) และอุปกรณ์ที่ใช้งานอุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีความถูกต้องแม่นยำในขอบเขตของตนเองถ้า $\pm a_1$, $\pm a_2$ และ $\pm a_3$ เป็นหน่วยความแม่นยำของอุปกรณ์แต่ละชนิดในระบบและ A เป็นค่าความแม่นยำโดยรวมแล้ว ค่าขอบเขตของความแม่นยำต่ำสุดสามารถเขียนได้ว่า

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \quad (2.14)$$

แต่ทางปฏิบัติ รากที่สองของความแม่นยำถูกกำหนดขึ้นมาเนื่องจากเป็นไปได้ที่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบ จะมีค่าผิดพลาดทางสถิติมากที่สุด ณ ตำแหน่งและช่วงเวลาเดียวกันโดยทั่วไปแล้ว ค่าความแม่นยำจะอยู่ในรูปของค่าผิดพลาด ในหน่วยของการวัดที่คิดเป็นร้อยละ ดังสมการที่ 2.15

$$A = 1 - \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100 \quad (2.15)$$

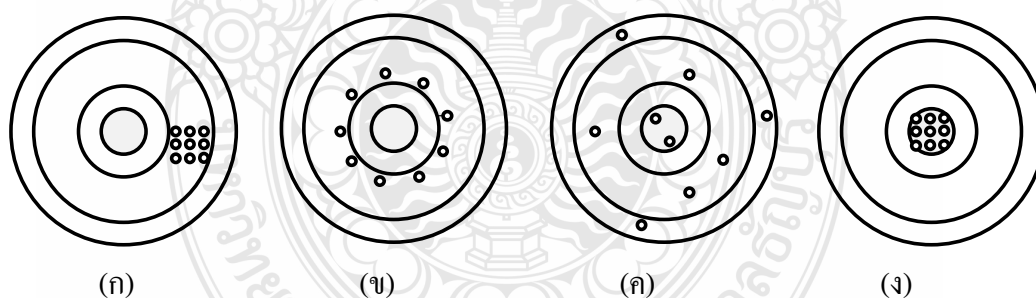
เมื่อ A คือ ร้อยละความแม่นยำ

Y_n คือ ค่าที่แท้จริงของสิ่งที่วัด

X_n คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด

2.3.4 ความเที่ยงตรง (Precision)

ความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด สามารถแบ่งการพิจารณาออกได้เป็นสองความหมาย ความหมายแรกคือความใกล้เคียงกันของค่าที่ได้จากการวัดปริมาณเดียวกัน โดยค่าที่ได้จะต้องอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าเครื่องมือวัดมีความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatability) นั่นเอง เครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงต่ำ



ภาพที่ 2.16 การเปรียบเทียบลักษณะความแตกต่างระหว่างความแม่นยำและความเที่ยงตรง

(ก) ความเที่ยงตรงสูงแต่ความแม่นยำต่ำ

(ข) ความแม่นยำมีการกระจายที่ดีแต่มีความเที่ยงตรงต่ำ

(ค) ความแม่นยำต่ำอีกทั้งยังมีความเที่ยงตรงที่ต่ำด้วยเช่นกัน

(ง) ความแม่นยำสูงและมีความเที่ยงตรงสูงด้วยเช่นกัน

จากภาพที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจวัดนั้นมีความน่าเชื่อถือเพียงใด ส่วนในความหมายที่สองของคำว่า “เที่ยงตรง” คือความละเอียดของการวัดซึ่งอาจจะหมายถึงความถึงเครื่องมือวัดมีสเกล (Scale) ที่ละเอียดมากๆทำให้สามารถอ่านค่าที่ได้จากการวัดได้อย่างละเอียด

โดยจะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนจากสเกลของเครื่องมือวัดที่เป็นแบบอนาล็อก ส่วนเครื่องมือวัดที่เป็นแบบดิจิทัลก็จะมีจุดทศนิยมหลายๆ ตำแหน่งเป็นต้น

$$P = 1 - \left| \frac{x_n - \bar{x}_n}{\bar{x}_n} \right| \quad (2.16)$$

เมื่อ P คือ ความเที่ยงตรง

x_n คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัด

\bar{x}_n คือ ค่าเฉลี่ยของการวัด

2.3.5 ฮิสเตอร์รีซิส (Hysteresis)

ฮิสเตอร์รีซิส หมายถึงผลต่างสูงสุดของค่าแท้จริงที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดในช่วงระหว่างขาขึ้น หรือจุดเริ่มต้นถึงจุดสูงสุด กับขาลง หรือจุดสูงสุดสู่จุดเริ่มต้น ที่จุดๆ เดียวกัน โดยพิจารณาเฉพาะในส่วนของบริเวณที่กว้างที่สุดของวงรอบ (Loop) การใช้เครื่องมือวัดในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นั้นสิ่งที่มีจะพบอยู่บ่อยๆ คือ การเพิ่มค่าขึ้นและลดค่าลงของสัญญาณทางเอาต์พุตที่ได้จากการวัดจะมีความแตกต่างกันอยู่เสมอ สาเหตุสำคัญอาจเกิดขึ้นจากการเสียดทานภายในหรือภายนอกอันเนื่องจากการตอบสนองของอุปกรณ์เช่นเซอร์ชั้มทำการวัด ค่าสูงสุดของความแตกต่างในทุกส่วนของเอาต์พุตที่อ่านได้จะปรากฏทุกๆ หนึ่งรอบของการสอบเทียบซึ่งเป็นฮิสเตอร์รีซิสของอุปกรณ์ จากกราฟภาพที่ 2.17 ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับฮิสเตอร์รีซิสของแม่เหล็กค่าผิดพลาดชนิดนี้สามารถสามารถแก้ไขได้ที่ตัวเซ็นเซอร์ ค่าผิดพลาดจะลดลงเมื่อมีการออกแบบและมีการเลือกส่วนประกอบของเครื่องมือที่เหมาะสม ฮิสเตอร์รีซิสจะอยู่ในรูปร้อยละของค่าเต็มสเกลและมักจะเกิดขึ้นที่ระดับ 50% ของค่าเต็มสเกลของการวัดสัญญาณด้านเอาต์พุต ค่าฮิสเตอร์รีซิสสามารถหาได้จากสมการ 2.21

$$Error_h = y_{up} - y_{dow} \quad (2.17)$$

การคิดเป็นร้อยละค่าผิดพลาด จะนำค่า คลาดเคลื่อน ฮิสเตอร์รีซิส มาเทียบกับค่าความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตทั้งหมดของระบบดังนั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่

$$\%Error_h = \frac{y_{up} - y_{down}}{y_{full} - y_{zero}} \times 100 \quad (2.18)$$

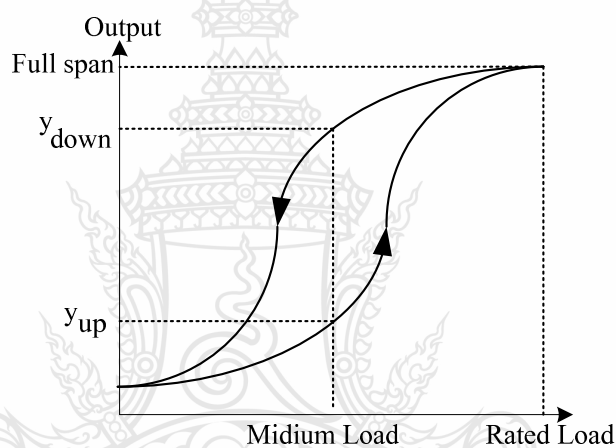
เมื่อ $\%Error$ คือ ค่าผิดพลาดระหว่างสัญญาณเอาต์พุตขาขึ้นกับสัญญาณเอาต์พุตขาลง

y_{up} คือ สัญญาณเอาต์พุตขาขึ้น

y_{down} คือ สัญญาณเอาต์พุตขาลง

y_{full} คือ สัญญาณเอาต์พุตสูงสุด

y_{zero} คือ สัญญาณเอาต์พุตต่ำสุด



ภาพที่ 2.17 ค่าผิดพลาดฮิสเทอริซิส

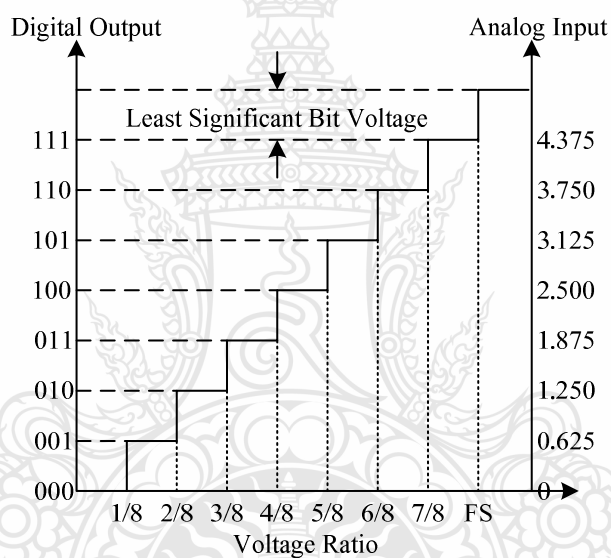
2.4 แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล [13] เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาล็อกกับข้อมูลตัวเลขที่ใช้แทนสัญญาณดิจิทัล ความแม่นยำของการแปลงจะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของข้อมูลดิจิทัล วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด n บิต จะเกิดข้อมูลดิจิทัลจำนวน 2^n ข้อมูล กระบวนการที่ทำหน้าที่ตีความระดับสัญญาณอนาล็อกกว่าตรงกับข้อมูลดิจิทัลใดเรียกว่า กระบวนการควอนไทซิ่ง (Quantizing)

$$V_{LSB} = \frac{V_{Fs}}{2^n} \quad (2.19)$$

- เมื่อ V_{LSB} คือ ระยะห่างของแรงดันต่อบิตข้อมูล
 V_{FS} คือ แรงดันสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวงจร
 n คือ จำนวน บิตข้อมูลที่ต้องการจะแปลง

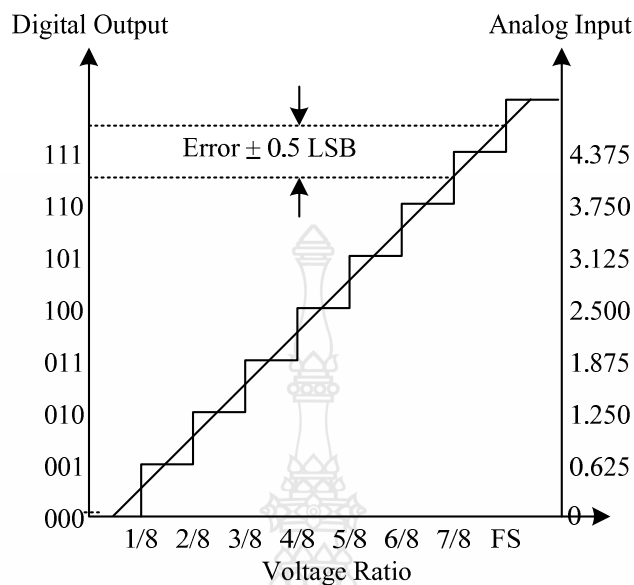
ถ้าหาก V_{FS} ของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกดิจิทัล 3 บิต มีค่าเท่ากับ 5 V ระยะห่างของระดับข้อมูลดิจิทัลเท่ากับ $5/8 = 0.625$ V ข้อมูลดิจิทัลสูงสุด คือ 111 ดังนั้นที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล 3 บิต จะมีค่าเทียบกับแรงดันอนาล็อกทางอินพุตเท่ากับ $(7/8) \times 5 \text{ V} = 4.37 \text{ V}$



ภาพที่ 2.18 ระยะห่างของแรงดันต่อบิตข้อมูล

2.4.1 ความเที่ยงตรงของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

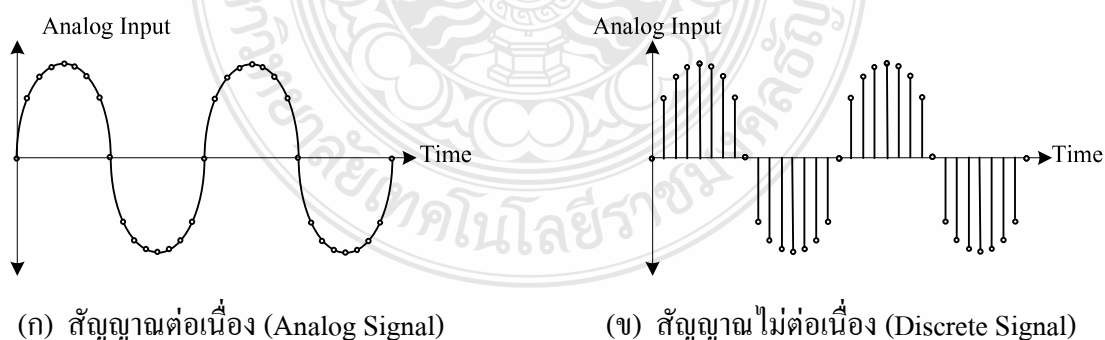
ความเที่ยงตรงของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล มักระบุเป็นจำนวนที่เทียบกับ V_{LSB} ดังนั้นจึงมีค่าความเที่ยงตรง หรือบางที่เรียกเป็นค่าผิดพลาด เป็น $\pm 0.5 \text{ LSB}$



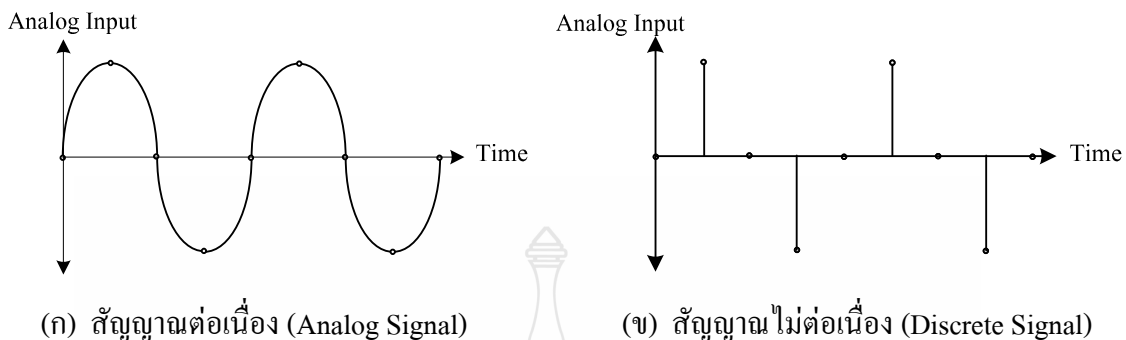
ภาพที่ 2.19 ความเที่ยงตรงของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

2.4.2 อัตราการสุ่มสัญญาณอนาล็อก

อัตราการสุ่มสัญญาณอนาล็อกตามทฤษฎีบทของไนควิสต์นั้น (Nyquist Theorem) [14] กล่าวว่าอัตราการสุ่มสัญญาณจะต้องมีค่าสูงกว่าความถี่สูงสุดของสัญญาณวัดอย่างน้อย 2 เท่า เช่น การวัดความถี่เสียง ซึ่งมีย่านความถี่สูงสุดที่ 20 KHz ดังนั้นต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่มีอัตราการสุ่มสัญญาณอย่างน้อย 40 KHz ซึ่งหากการสุ่มของสัญญาณไม่เร็วพอก็อาจทำให้การอ่านข้อมูลที่เกิดขึ้นคลาดเคลื่อนได้ ดังภาพที่ 2.20 และภาพที่ 2.21



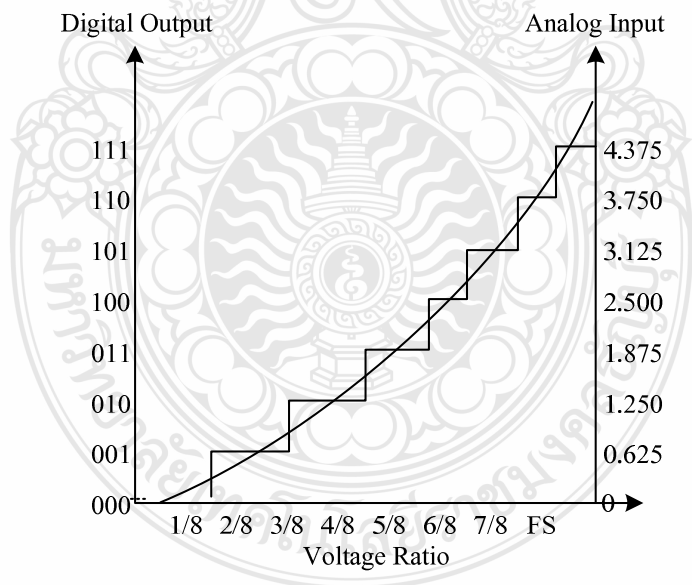
ภาพที่ 2.20 อัตราการสุ่มสัญญาณสูงเพียงพอจะได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับอินพุต



ภาพที่ 2.21 อัตราการสุ่มสัญญาณต่ำ สัญญาณที่ได้จะเพี้ยนไปจากอินพุต

2.4.4 ความไม่เป็นเชิงเส้นของการแปลงสัญญาณ (Differential Nonlinearity; DNL)

การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลที่ได้นั้นต้องแปรผันตรงเมื่อเทียบระหว่างค่าช่วงแรงดันและช่วงแทนค่าดิจิทัล ดังภาพที่ 2.22 แสดงช่วงวัดสัญญาณแรงดัน 5 V กับวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 3 บิต ซึ่งหากไม่มีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นก็จะทำให้คลาดเคลื่อน ค่าผิดพลาดนี้ต้องไม่เกิน ± 0.5 LSB



ภาพที่ 2.22 ความไม่เป็นเชิงเส้นของการแปลงสัญญาณ

2.4.5 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณที่เข้ามารบกวนระบบซึ่งไม่ใช่สัญญาณที่เราต้องการวัดเรียกว่า “สัญญาณรบกวน” เพราะสัญญาณรบกวนสามารถเกิดขึ้นได้ทุกจุดในการวัดค่าสัญญาณ ขึ้นอยู่กับการออกแบบทางฮาร์ดแวร์ที่มีการป้องกันการเกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนได้แน่นอนหาเพียงใดไม่ว่าจะเป็นแผ่นพิมพ์วงจรการซิงค์กราวด์สัญญาณวงจรถ่ายสัญญาณ (Instrumentation Amplifier) เป็นต้น ค่าผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนไม่ควรเกินกว่า ± 0.5 LSB เนื่องจากหากคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ± 0.5 LSB จะยังคงได้สัญญาณดิจิทัลค่าเดิมไม่เป็นการรบกวนระบบ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในด้านงานวิจัยที่ผ่านมา มีผู้พัฒนางานวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม ได้แก่

Marina Diaz-Michelena [15] ได้กล่าวถึงภาพรวมของการนำเซ็นเซอร์แม่เหล็กไปใช้งานในรูปแบบต่าง รวมถึงรูปแบบการพัฒนาคุณสมบัติของแม่เหล็กและเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีในปัจจุบัน ซึ่งเซ็นเซอร์ถูกนำไปประยุกต์ในงานเล็กๆ อย่างในโทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์ทางการแพทย์ จนถึงระบบใหญ่ๆ เช่น อุปกรณ์นำทาง ตรวจสอบความเร็วตำแหน่งเชิงมุม เพื่อให้การเลือกใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ แม่เหล็ก ให้เหมาะสมกับงาน

Andreas H. aberli [16] ได้ออกแบบเซ็นเซอร์ขนาดเล็กสำหรับวัดมุม 360 องศา ที่ความละเอียด 1 องศา ใช้การประมวลผลขนาด 8 บิต โดยวิธีการเปรียบเทียบสัญญาณจากเซ็นเซอร์ 4 ชุด

A. Maberli [17] ได้ออกแบบได้ออกแบบเซ็นเซอร์ขนาดเล็กสำหรับวัดมุม 360 องศา ที่ความละเอียด 1 องศา โดยวิธีการหาผลมุมจาก $\tan \theta = \sin \theta / \cos \theta$ เพื่อลดความยุ่งยากในการเปรียบเทียบสัญญาณ

P.M. Drljaca [18] ได้ทำการปรับปรุงเซ็นเซอร์ขนาดเล็กสำหรับวัดมุม 360 องศา ที่ความละเอียด 1 องศา โดยวิธีการหาผลมุมจาก $\tan \theta = \sin \theta / \cos \theta$ เพื่อลดความยุ่งยากในการเปรียบเทียบสัญญาณ จากเซ็นเซอร์ที่รับแรงจากแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากสัญญาณ sin และ cos ที่ไม่เป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์

2.6 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

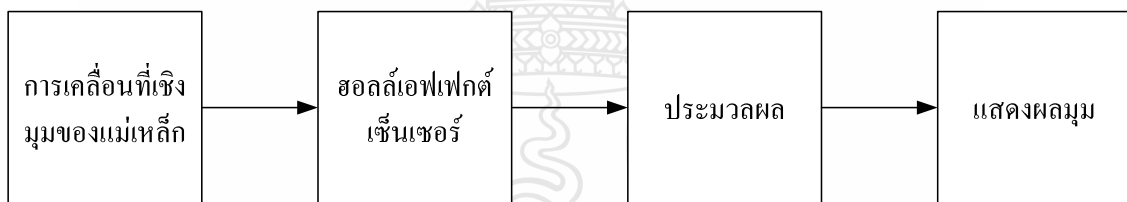
จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในการออกแบบอุปกรณ์รับรู้ โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ทำหน้าที่แปลงค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ต้องใช้ทฤษฎีทางการคำนวณหาปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่เชิงมุมกับทฤษฎีฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์และทฤษฎีวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล เพื่อนำเอาสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์เปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิตอลก่อนส่งไปประมวลผล โดยอาศัยหลักทฤษฎีการประมาณค่าสุดท้ายเป็นการประเมินความสามารถการทำงานของอุปกรณ์หลังการออกแบบจากทฤษฎีคำนวณที่ใช้ในการวัดทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะได้นำไปออกแบบและวิเคราะห์ผลในบทต่อไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

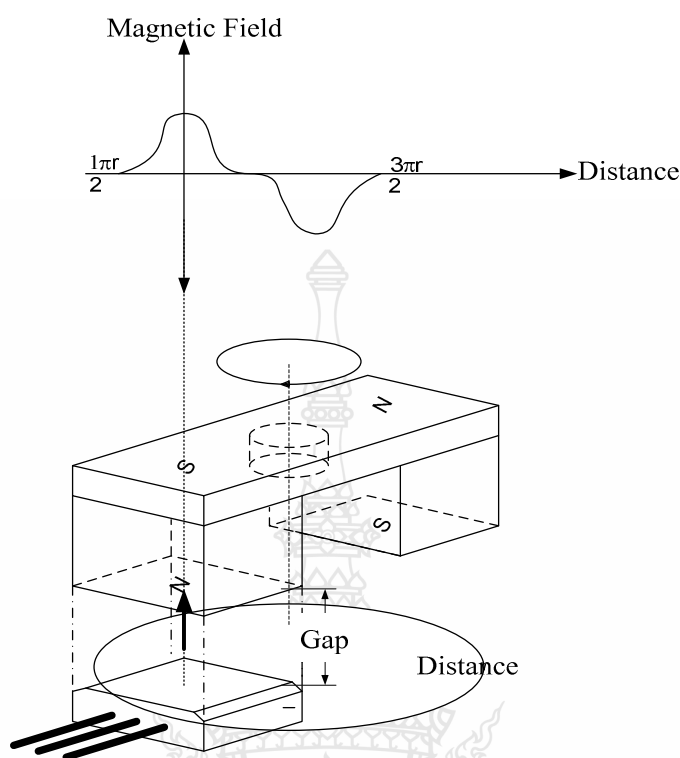
สำหรับบทนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนแรกคือทรานสดิวเซอร์วัดมุมแบบฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์จะใช้แม่เหล็กถาวร จำนวน 2 ก้อนยึดติดกับแกนหมุนเคลื่อนที่ผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุต ต่อการเคลื่อนที่ผ่านแบบหมุนรอบแกนที่มุมการวัดต่าง ๆ ส่งสัญญาณเอาต์พุตไปยังส่วนที่สองซึ่งจะนำสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตจากส่วนแรกมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล และประมวลผลมุมส่งผลมุมที่ประมวลผลแล้วไปแสดงยังจอแสดงผลแบบ แอลซีดี (Liquid crystal display; LCD)



ภาพที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของทรานสดิวเซอร์วัดมุม

3.1 การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม

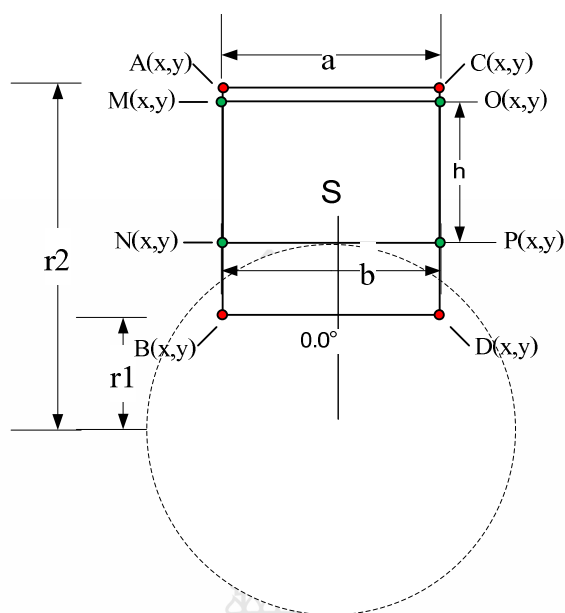
ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กตามการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก โครงสร้างดังภาพที่ 3.2 ได้แก่ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กตามพื้นที่ที่แม่เหล็กเคลื่อนที่ซ็อนฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตั้งแต่มุม 0 จนถึง 360 องศา ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กเกิดจากระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ และปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กเกิดจากสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับ พื้นที่หรือตัวกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ในการออกแบบจำเป็นจะต้องทราบค่าความเปลี่ยนแปลงทั้งหมดตามที่กล่าวมาเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กต่อไป



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน

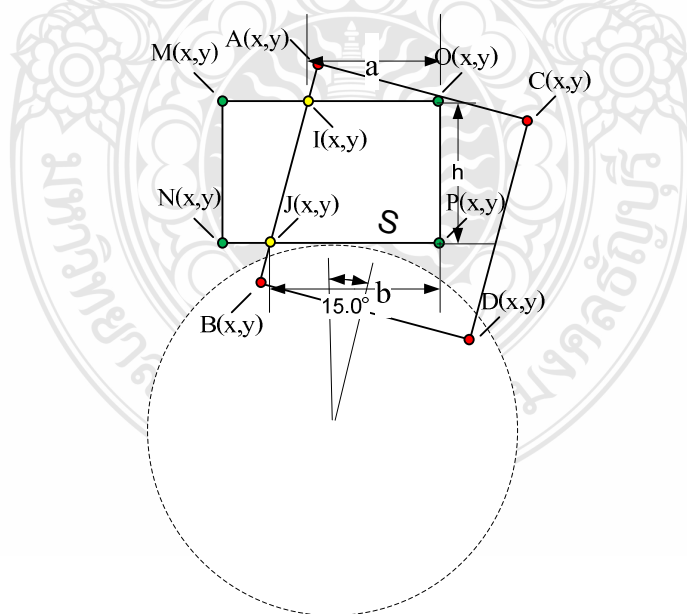
3.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กจากการเคลื่อนที่แม่เหล็กตัดผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์ เซ็นเซอร์

การนำแม่เหล็กที่มีแกนด้านหนึ่งยึดกับแกนหมุนเคลื่อนตัดผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ แสดงดังภาพที่ 3.3 ถึง ภาพที่ 3.5 การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ที่อยู่กับที่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ซึ่งเป็นพื้นที่ในการรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่รับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ก็ จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผกผันตาม ไปด้วย ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ตรวจจับได้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อแม่เหล็กทำมุม 0 องศา กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ดังภาพที่ 3.3 คิด เป็น ร้อยละ 100 ของพื้นที่รับค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก และจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ แม่เหล็กเคลื่อนที่ไปตามมุมการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถหาตำแหน่งของแม่เหล็กเคลื่อนที่ได้จาก สมการที่ 3.2-3.17



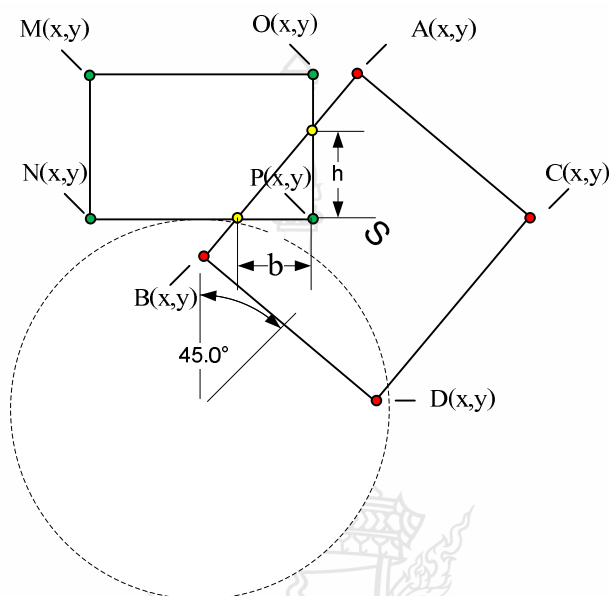
ภาพที่ 3.3 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 0 องศา

การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 15 องศา กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ดังภาพที่ 3.4 จะสังเกตเห็นว่าพื้นที่ที่ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ยิ่งมุมเคลื่อนที่มากเท่าไรพื้นที่จากการคำนวณยิ่งน้อยลง



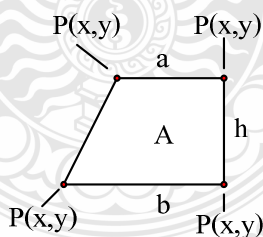
ภาพที่ 3.4 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 15 องศา

เมื่อแม่เหล็กทำมุม 45 องศา กับขอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ พื้นที่รับสนามแม่เหล็กจะน้อยลงจนเป็นรูปสามเหลี่ยมตามลำดับดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กทำมุม 45 องศา

สามารถนำค่าการเปลี่ยนแปลงนี้มาทำการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม พื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวเซ็นเซอร์ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีความสูงเท่ากับ h

$$A = \frac{(a+b)}{2} \times h \quad (3.1)$$

- เมื่อ A คือ พื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์
 a คือ ด้านแคบของเส้นคู่ขนาน
 b คือ ด้านกว้างของเส้นคู่ขนาน
 h คือ ความสูงของสี่เหลี่ยมคางหมู

ก่อนที่จะหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวเซ็นเซอร์จำเป็นต้องทราบตำแหน่งจุดตัด ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กตามมุมต่างๆ ตามลำดับดังนี้

หาตำแหน่งกึ่งกลางของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุนซึ่งจะสามารถหาได้ดังสมการ 3.2-3.5

จุดตัดกลางบน $U_2(x, y)$

$$U_2(x) = r_2 \cos \theta \quad (3.2)$$

$$U_2(y) = r_2 \sin \theta \quad (3.3)$$

จุดตัดกลางล่าง $U_1(x, y)$

$$U_1(x) = r_1 \cos \theta \quad (3.4)$$

$$U_1(y) = r_1 \sin \theta \quad (3.5)$$

เมื่อ U_2 คือ จุดกึ่งกลางของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุนด้านบน

U_1 คือ จุดกึ่งกลางของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุนด้านล่าง

r_2 คือ รัศมีของแกนหมุนด้านบน

r_1 คือ รัศมีของแกนหมุนด้านล่าง

หาตำแหน่งของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนกลางของแม่เหล็กตามองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุนซึ่งจะสามารถหาได้ดังสมการ 3.6-3.13

จุดตัดบนซ้าย $A(x, y)$

$$A(x) = U_2(x) + \left[\frac{w \cos(90 + \theta)}{2} \right] \quad (3.6)$$

$$A(y) = U_2(y) + \left[\frac{w \sin(90 + \theta)}{2} \right] \quad (3.7)$$

จุดตัดล่างซ้าย $B(x, y)$

$$B(x) = U_1(x) + \left[\frac{w \cos(90 + \theta)}{2} \right] \quad (3.8)$$

$$B(y) = U_1(y) + \left[\frac{w \sin(90 + \theta)}{2} \right] \quad (3.9)$$

จุดตัดบนขวา $C(x, y)$

$$C(x) = U_2(x) + \left[\frac{w \cos(270 + \theta)}{2} \right] \quad (3.10)$$

$$C(y) = U_2(y) + \left[\frac{w \sin(270 + \theta)}{2} \right] \quad (3.11)$$

จุดตัดล่างซ้าย $D(x, y)$

$$D(x) = U_1(x) + \left[\frac{w \cos(270 + \theta)}{2} \right] \quad (3.12)$$

$$D(y) = U_1(y) + \left[\frac{w \sin(270 + \theta)}{2} \right] \quad (3.13)$$

- เมื่อ $A(x)$ คือ จุดตัดแกน x มุมด้านบนซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกน
 $A(y)$ คือ จุดตัดแกน y มุมด้านบนซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $B(x)$ คือ จุดตัดแกน x มุมด้านล่างซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $B(y)$ คือ จุดตัดแกน y มุมด้านล่างซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $C(x)$ คือ จุดตัดแกน x มุมด้านบนขวาของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $C(y)$ คือ จุดตัดแกน y มุมด้านบนขวาของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $D(x)$ คือ จุดตัดแกน x มุมด้านล่างขวาของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $D(y)$ คือ จุดตัดแกน y มุมด้านล่างขวาของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 w คือ ความกว้างของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

หาค่าแห่งจุดตัดของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนกลางของแม่เหล็กตามองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุนกับเซ็นเซอร์ที่อยู่กับที่ซึ่งจะสามารถหาได้ดังสมการ 3.14-3.17

จุดตัดบนซ้าย $I(x, y)$

$$I(x) = A(x) - \left[\frac{(A(x) - B(x)) \times (A(y) - I(y))}{A(y) - B(y)} \right] \quad (3.14)$$

$$I(y) = A(y) - \left[\frac{(A(y) - B(y)) \times (A(x) - I(x))}{A(x) - B(x)} \right] \quad (3.15)$$

จุดตัดล่างซ้าย $J(x, y)$

$$J(x) = A(x) - \left[\frac{(A(x) - B(x)) \times (A(y) - J(y))}{A(y) - B(y)} \right] \quad (3.16)$$

$$J(y) = A(y) - \left[\frac{(A(y) - B(y)) \times (A(x) - J(x))}{A(x) - B(x)} \right] \quad (3.17)$$

เมื่อ $I(x)$ คือจุดตัดแกน x มุมด้านบนซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกน
 $I(y)$ คือจุดตัดแกน y มุมด้านบนซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $J(x)$ คือจุดตัดแกน x มุมด้านล่างซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน
 $J(y)$ คือจุดตัดแกน y มุมด้านล่างซ้ายของแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ตามแกนหมุน

หาความกว้างด้านต่างๆก่อนหาพื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างแม่เหล็กกับเซ็นเซอร์ตามองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุน

ด้าน a หาได้จาก

$$a = O(x) - I(x) \quad (3.18)$$

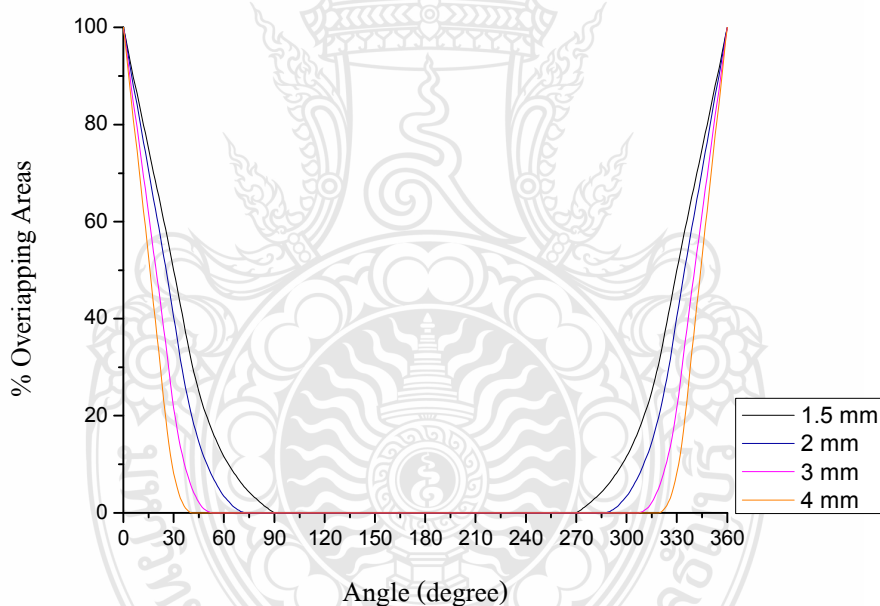
ด้าน b หาได้จาก

$$b = P(x) - J(x) \quad (3.19)$$

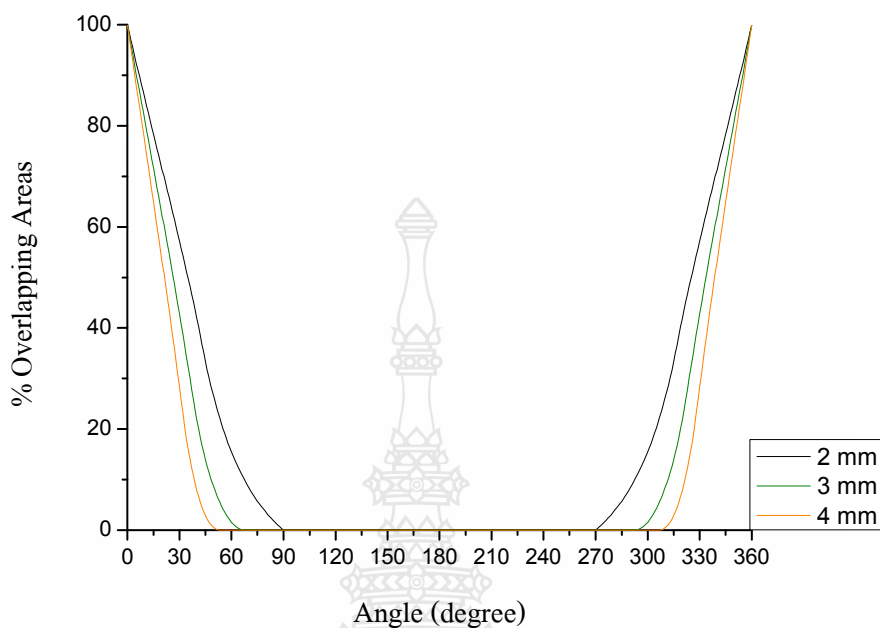
ด้าน h หาได้จาก

$$h = I(y) - P(y) \quad (3.20)$$

นำ a , b และ h แทนลงในสมการที่ 3.1 จะได้พื้นที่ในการรับความเข้มของสนามแม่เหล็กจากการคำนวณหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตามการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน โดยการกำหนดขนาดของแม่เหล็ก ตำแหน่งที่วางเซ็นเซอร์ ในภาพที่ 3.5 เป็นกราฟแสดงพื้นที่ในการรับความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อใช้แม่เหล็กขนาดแม่เหล็ก 3x3 ตารางมิลลิเมตร ที่การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ห่างจากจุดศูนย์กลาง 1.5, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับเซ็นเซอร์ส่วนในภาพที่ 3.6 เป็นกราฟแสดงพื้นที่ในการรับความเข้มสนามแม่เหล็ก ทำการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กเป็นขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร ที่การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ห่างจากจุดศูนย์กลาง 1.5, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับ



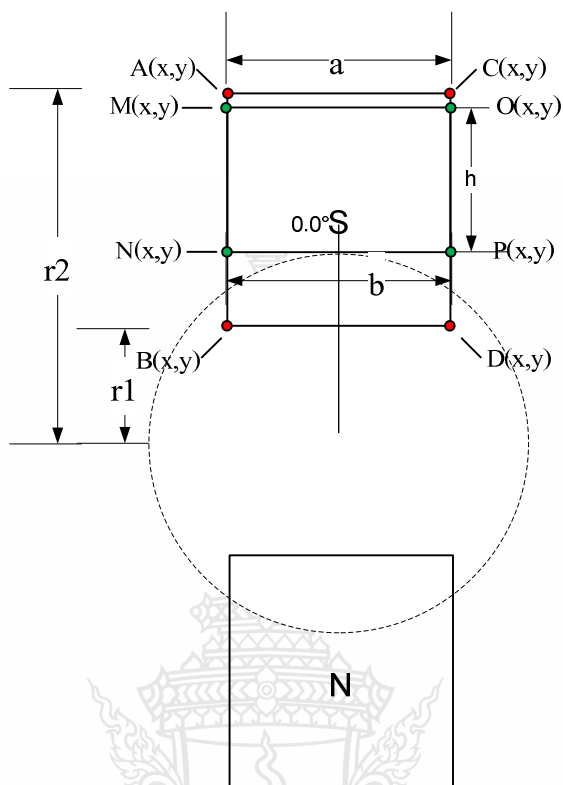
ภาพที่ 3.7 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ซ้อนกันใช้แม่เหล็กขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร



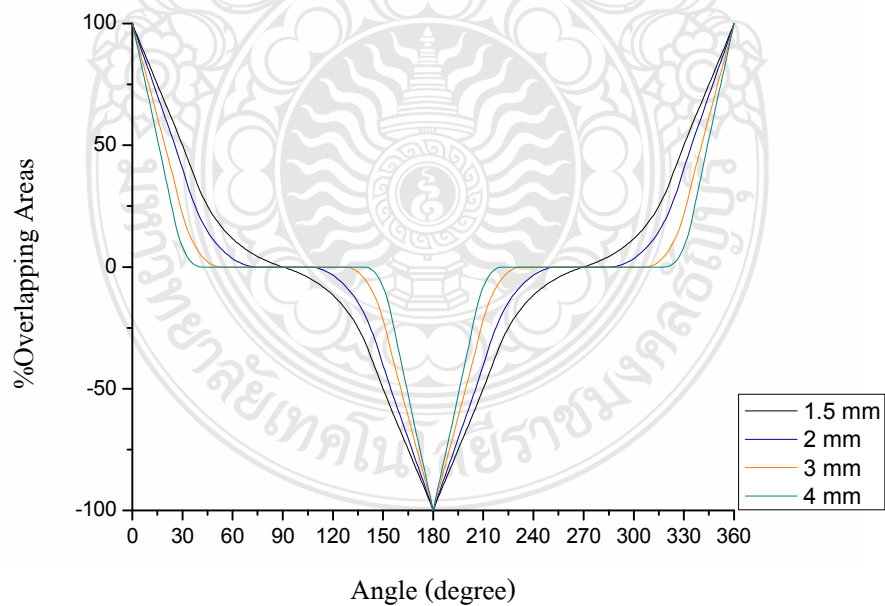
ภาพที่ 3.8 เปอร์เซนต์พื้นที่ซ้อนกันใช้แม่เหล็กขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร

เมื่อทำการเพิ่มแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากันแต่ต่างขั้วเข้าไปอีกด้านหนึ่งของแกนแม่เหล็กเพื่อจะเพิ่มองศาการตรวจจับ ความเข้มสนามแม่เหล็ก ตามพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวเซ็นเซอร์ เมื่อแม่เหล็กทำมุม 0 องศา กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ดังภาพที่ 3.9

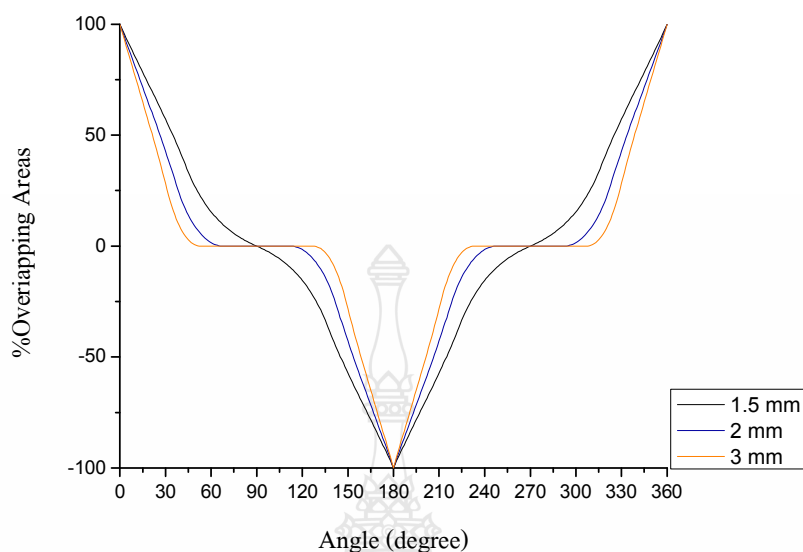
จากการคำนวณหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ เมื่อเพิ่มแม่เหล็กที่มีขนาดเท่ากันแต่ต่างขั้วเข้าไปอีกด้านหนึ่งของแกนแม่เหล็กหมุนตามการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน โดยการกำหนดขนาดของแม่เหล็ก ตำแหน่งที่วางเซ็นเซอร์ ในภาพที่ 3.10 เป็นกราฟแสดงพื้นที่ในการรับความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อใช้แม่เหล็กขนาดแม่เหล็ก 3x3 ตารางมิลลิเมตร ที่การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ห่างจากจุดศูนย์กลาง 1.5, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับเซ็นเซอร์ส่วนในภาพที่ 3.11 เป็นกราฟแสดงพื้นที่ในการรับความเข้มสนามแม่เหล็ก ทำการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็ก เป็นขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร ที่การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ห่างจากจุดศูนย์กลาง 1.5, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 3.9 การเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนแม่เหล็กขั้วคู่ทำมุม 0 องศา



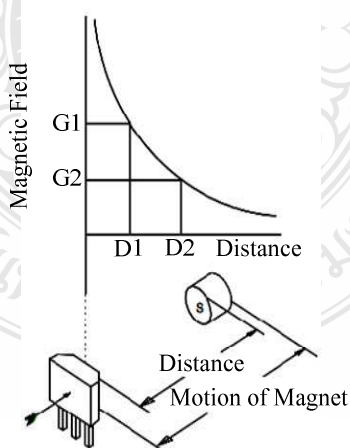
ภาพที่ 3.10 เปอร์เซนต์พื้นที่ซ้อนกันใช้แม่เหล็ก 2 ตัว ขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร



ภาพที่ 3.11 เปอร์เซนต์พื้นที่ที่ซ้อนกันใช้แม่เหล็ก 2 ตัว ขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร

3.1.2 ปัจจัยต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระยะห่างระหว่างฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์กับแม่เหล็ก [19]

ปัจจัยนี้สามารถอธิบายได้จาก วิธีการตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบยูนิโพลาร์เฮดออน โดยการนำเอาขั้วใต้ (S) ของแม่เหล็กถาวรหันเข้าหาด้านหน้าของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ตามทฤษฎีแรงดันฮอลล์ที่ได้จะมีค่าที่แปรผกผันกับระยะความห่างระหว่างขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวรกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

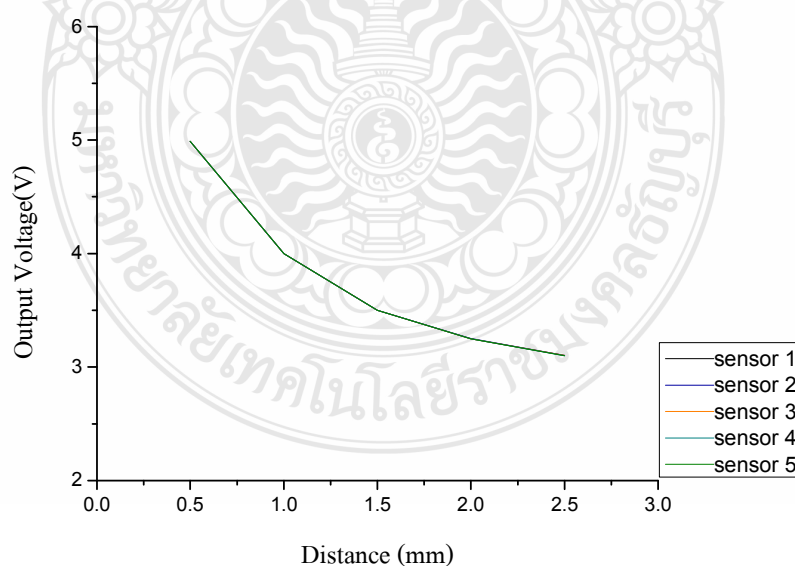


ภาพที่ 3.12 การตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบ ยูนิโพลาร์เฮดออน

ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ของความเข้มของสนามแม่เหล็กกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เป็นไปดังตารางที่ 3.1 ในการทดสอบใช้วิธีการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็กแบบยูนิโพลาร์เฮดออนสำหรับหาระยะห่างที่เหมาะสมตั้งระยะความห่างระหว่างขั้วได้ของแม่เหล็กถาวรกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเพิ่มระยะความห่างขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตรตั้งแต่ 1 จนถึง 2.5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบซ้ำเช่นนี้เป็นจำนวน 5 ครั้งต่อตัว พร้อมกับบันทึกแรงดันเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะความห่างต่างๆ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 Vdc จ่ายให้กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ เบอร์ที่ใช้คือ 1A1302 ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของค่าสัมประสิทธิ์ความไวเท่ากับ 1.3 mV/G

ตารางที่ 3.1 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วได้กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

ระยะ (mm)	เอาต์พุต ตัวที่ 1 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 2 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 3 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 4 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 5 (V)
0.5	4.99	4.991	4.991	4.99	4.991
1	4.001	4	4.002	4.001	4
1.5	3.502	3.501	3.501	3.500	3.499
2	3.251	3.253	3.251	3.250	3.248
2.5	3.101	3.102	3.101	3.100	3.098

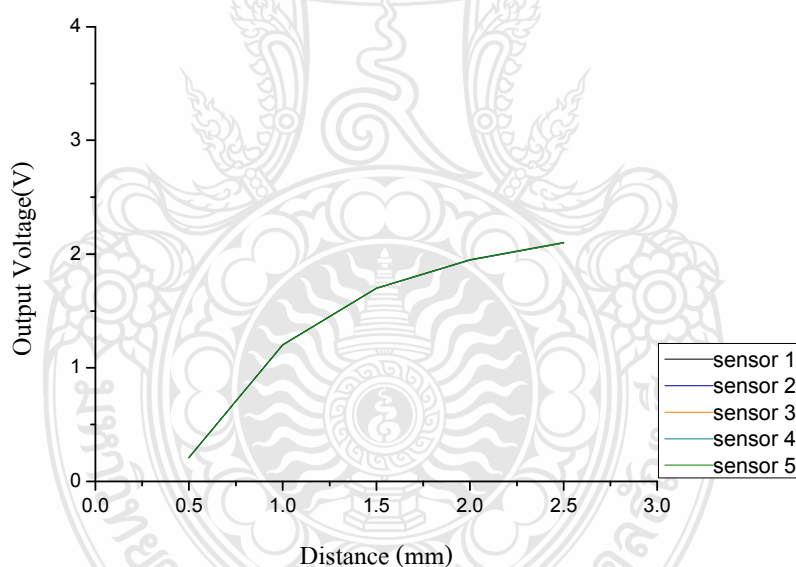


ภาพที่ 3.13 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วได้กับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

ทำการเปลี่ยนขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือแล้วทดสอบซ้ำแบบเดิมของผลปรากฏว่าแม่เหล็กถาวรกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ยิ่งห่างออกไปจะทำให้แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์มีค่ามากขึ้น ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วเหนือกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

ระยะ (mm)	เอาต์พุต ตัวที่ 1 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 2 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 3 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 4 (V)	เอาต์พุต ตัวที่ 5 (V)
0.5	0.21	0.209	0.209	0.21	0.209
1	1.199	1.2	1.198	1.199	1.2
1.5	1.698	1.699	1.699	1.7	1.701
2	1.949	1.947	1.949	1.95	1.952
2.5	2.099	2.098	2.099	2.1	2.102



ภาพที่ 3.14 แรงดันเอาต์พุตกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กขั้วเหนือกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

การคำนวณหาความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ 3.20

$$B = \frac{V_{out(B)} - V_{out(O)}}{S} \quad (3.20)$$

- เมื่อ B คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก
 $V_{out(B)}$ คือแรงดันเอาต์พุตขณะมีสนามแม่เหล็ก
 $V_{out(O)}$ คือแรงดันเอาต์พุตขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก
 S คือค่าสัมประสิทธิ์ความไวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างระหว่างขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวรกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร มีแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $4.99 V_{dc}$ แรงดันเอาต์พุตขณะไม่มีสนามแม่เหล็กเท่ากับ $2.525 V_{dc}$ และค่าสัมประสิทธิ์ความไวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เท่ากับ 1.3 mV/G แทนค่าที่ได้ลงในสมการข้างต้นจะได้ว่า

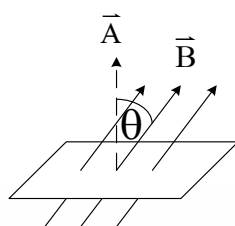
$$B = \frac{4.99V_{dc} - 2.660V_{dc}}{1.3 \text{ mV/G}} = 1896.15 \text{ G}$$

ดังนั้นความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะความห่าง 0.5 มิลลิเมตร ระหว่างขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวรกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ มีค่าเท่ากับ 1896.15 G

3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ ทำให้ทิศสนามแม่เหล็กกับทิศของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยพื้นที่ทำมุม θ ต่อกันดังภาพที่ 3.15 การหาสนามแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและความเข้มสนามแม่เหล็กดังสมการ 2.2

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{A} = AB \cos \theta \quad (3.21)$$

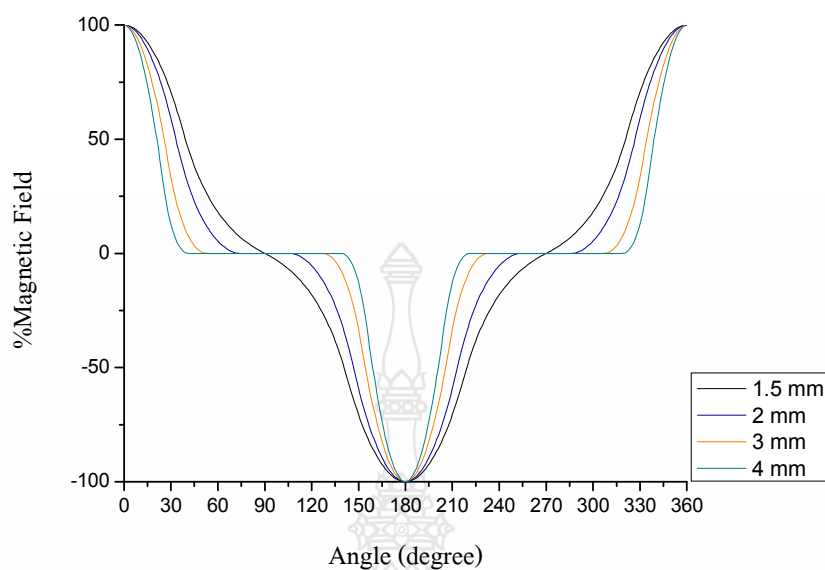
- เมื่อ B คือขนาดของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเกาส์ต่อตารางเมตร (G/m^2)
 φ คือสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ มีหน่วยเกาส์ (G)
 A คือพื้นที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก มีหน่วยตารางเมตร (m^2)



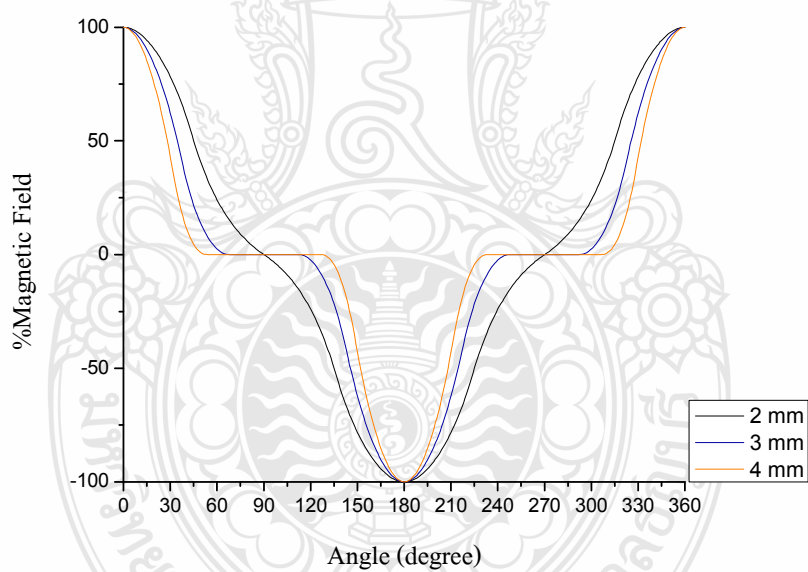
ภาพที่ 3.15 ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่

เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่จุดกึ่งกลางของแม่เหล็ก และจุดกึ่งกลางของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ จะเคลื่อนที่ออกห่างกันก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ เป็นผลทำให้ทิศสนามแม่เหล็กกับทิศของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยพื้นที่ทำมุมต่อกัน θ

เมื่อให้สนามแม่เหล็กดังสมการที่ 3.21 เป็นแหล่งกำเนิด ความเข้มสนามแม่เหล็ก และมีพื้นที่ในการรับแรงเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์จะได้ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตรวจจับได้จากการคำนวณหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ในภาพที่ 3.16 เป็นกราฟแสดงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตรวจจับได้จากการคำนวณหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เมื่อใช้แม่เหล็กขนาดแม่เหล็ก 3x3 ตารางมิลลิเมตร ที่การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ห่างจากจุดศูนย์กลาง 1.5, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตรตามลำดับ เซ็นเซอร์ส่วนในภาพที่ 3.17 เป็นกราฟแสดงความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตรวจจับได้จากการคำนวณหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็ก และตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ทำการเปลี่ยนขนาดแม่เหล็กเป็นขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร ที่การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์ห่างจากจุดศูนย์กลาง 1.5, 2, 3 มิลลิเมตรและ 4 มิลลิเมตรตามลำดับ

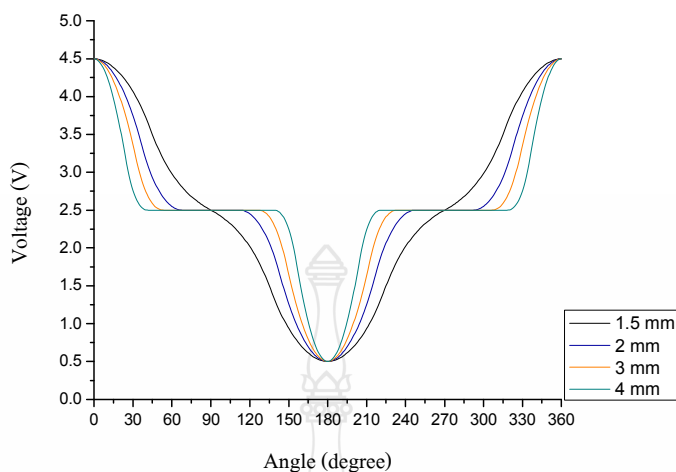


ภาพที่ 3.16 ความเข้มสนามแม่เหล็ก ใช้แม่เหล็กขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร

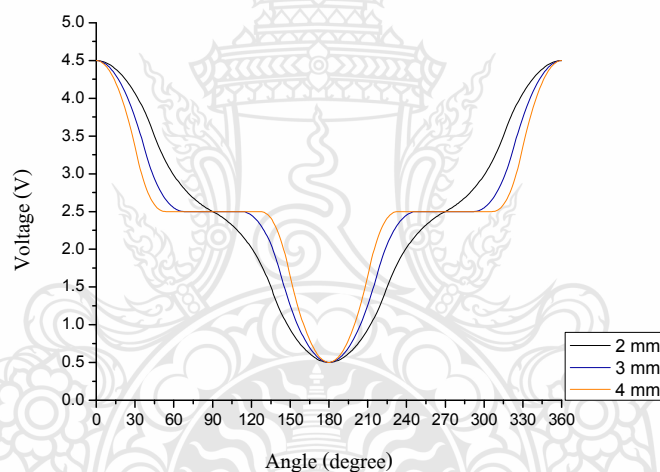


ภาพที่ 3.17 ความเข้มสนามแม่เหล็ก ใช้แม่เหล็กขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร

หากคิดค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่ 2V และแรงดันเอาต์พุตขณะไม่มีสนามแม่เหล็กเท่ากับ 2.5V จะได้กราฟแรงดันเอาต์พุตที่เอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์จากการคำนวณหาพื้นที่ซ้อนกันระหว่างแม่เหล็กและตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ในภาพที่ 3.18 และ 3.19



ภาพที่ 3.18 แรงดันเอาต์พุต ใช้แม่เหล็กขนาด 3x3 ตารางมิลลิเมตร



ภาพที่ 3.19 แรงดันเอาต์พุต ใช้แม่เหล็กขนาด 4x5.5 ตารางมิลลิเมตร

3.1.4 วิเคราะห์ผลและออกแบบโครงสร้าง

จากภาพที่ 3.18 และ ภาพที่ 3.19 ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตรวจจับได้จะเห็นว่าถ้าเราใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวเดียวจะสามารถวัดค่ามุม ได้กว้างที่สุดคือ 0-180 องศาที่ครึ่งหนึ่งของขนาดความกว้างแม่เหล็กเท่ากับรัศมีในการวางฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์และจะลดลงตามลำดับเมื่อ รัศมีในการวางฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น และจะเกิดบริเวณที่การเคลื่อนที่ของแม่เหล็กแบบสี่เหลี่ยมผ่านฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่อยู่กับที่ไม่ทับซ้อนกันและบริเวณนี้จะกว้างมากขึ้น แบบแปลผันตามการวางตำแหน่งฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ช่วงมุมที่แม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ไม่ทับซ้อนกัน

ขนาดแม่เหล็ก (mm ²)	รัศมีการวางเซ็นเซอร์ (mm)	แม่เหล็กขั้วใต้ (องศา)	แม่เหล็กขั้วเหนือ (องศา)	ช่วงไม่ซ้อนกัน (องศา)
3x3	1.5	90 - 90	270 - 270	0
3x3	2	74 - 106	254 - 286	32
3x3	3	54 - 126	234 - 306	72
3x3	4	42 - 138	222 - 318	96
4x5.5	2	90 - 90	180-180	0
4x5.5	3	68 - 112	248 - 292	44
4x5.5	4	54 - 126	234 - 306	72

และความเข้มสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตรวจจับได้ ณ มุม 0 และ 180 องศาไม่สามารถนำมาหาค่ามุมได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็กน้อยมากดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้น้อยเมื่อเทียบกับมุมเคลื่อนที่

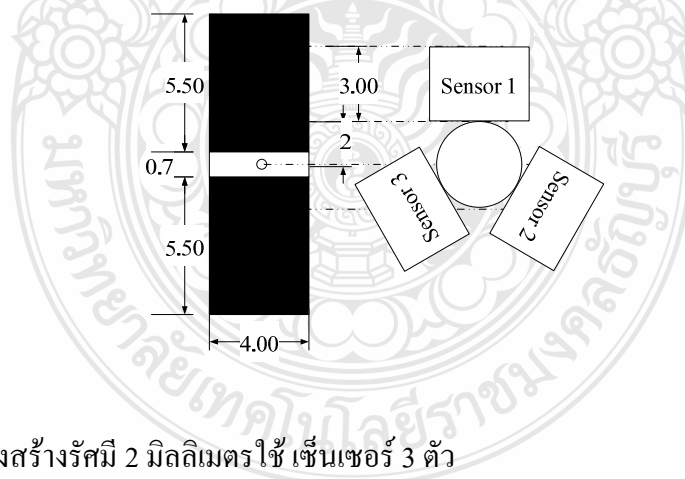
มุม (องศา)	รัศมี 2 mm %สนามแม่เหล็ก	สนามแม่เหล็ก เปลี่ยน %/องศา	รัศมี 3 mm %สนามแม่เหล็ก	สนามแม่เหล็ก เปลี่ยน %/องศา
358	99.887	0.085	99.813	0.140
359	99.972	0.028	99.953	0.047
360	100	0.028	100	0.047
1	99.972	0.028	99.953	0.047
2	99.887	0.085	99.813	0.140
178	-99.887	0.085	-99.813	0.140
179	-99.972	0.028	-99.953	0.047
180	-100	0.028	-100	0.047
181	-99.972	0.028	-99.953	0.047
182	-99.887	0.085	-99.813	0.140

ตารางที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่น้อยเมื่อเทียบกับมุมที่แม่เหล็กเคลื่อนที่

มุม (องศา)	รัศมี 2 mm แรงดันเอาต์พุต (V)	ผลต่างแรงดัน (V)/องศา	รัศมี 3 mm แรงดันเอาต์พุต (V)	ผลต่างแรงดัน (V)/องศา
358	4.498	0.001	4.496	0.003
359	4.499	0.001	4.499	0.001
360	4.5	0.001	4.5	0.001
1	4.499	0.001	4.499	0.001
2	4.498	0.001	4.496	0.003
178	0.502	0.001	0.504	0.003
179	0.501	0.001	0.501	0.001
180	0.5	0.001	0.5	0.001
181	0.501	0.001	0.501	0.001
182	0.502	0.001	0.504	0.003

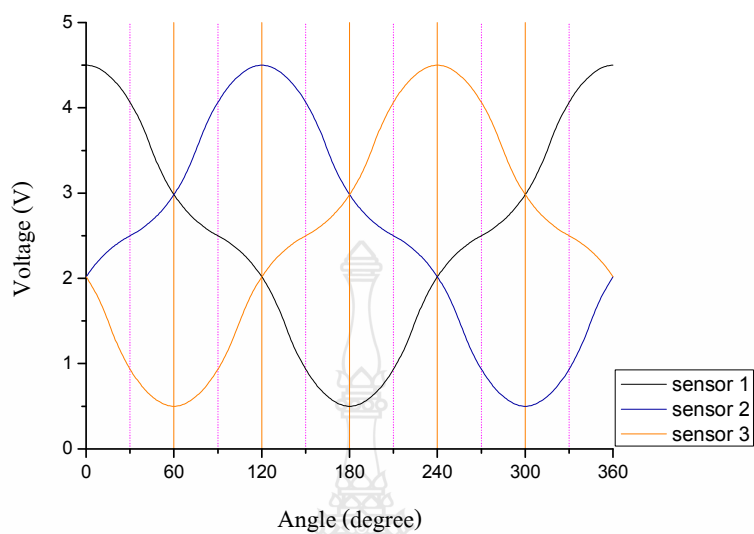
3.1.5 ออกแบบโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลนำมาทดสอบ โครงสร้าง 4 แบบ

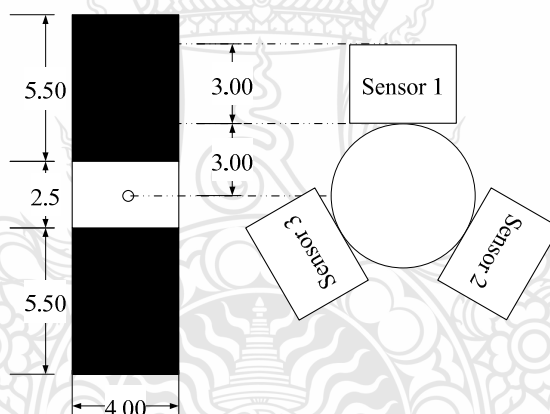


ภาพที่ 3.20 โครงสร้างรัศมี 2 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว

จากภาพที่ 3.20 โครงสร้างรัศมี 2 มิลลิเมตรนำฮอลล์เอฟเฟกต์ เซ็นเซอร์ 3 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศาตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 120 องศาและ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 240 องศาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศา ต่อ แรงดันเอาต์พุต ณ มุมต่างๆ ดังภาพที่ 3.21

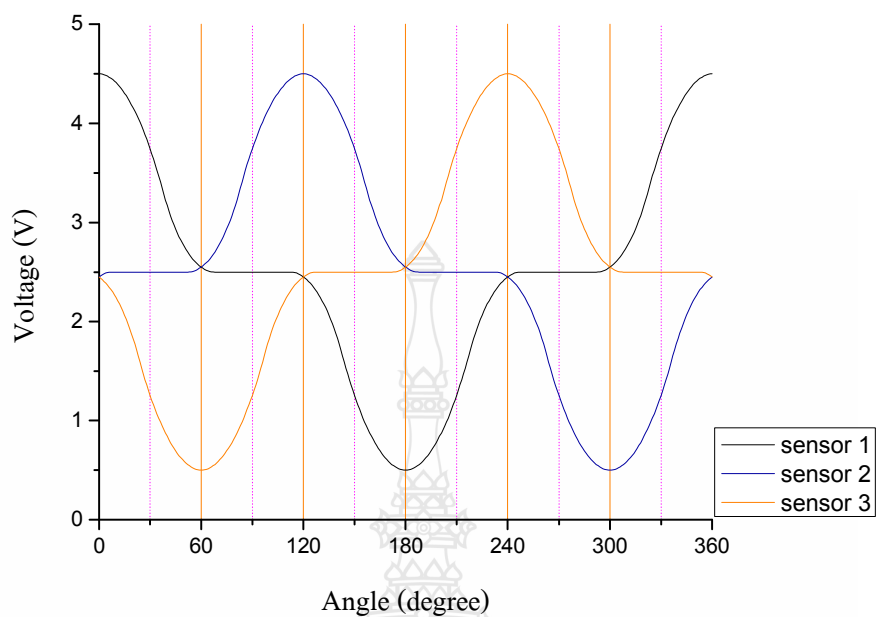


ภาพที่ 3.21 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ ที่รัศมี 2 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว

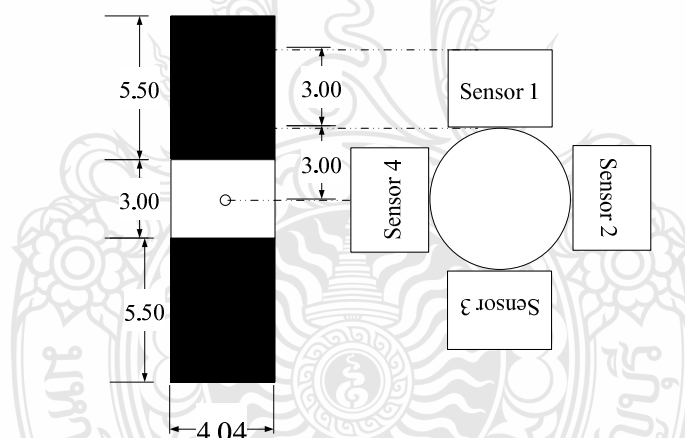


ภาพที่ 3.22 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ 3 ตัวมาวางโดยตัว

จากภาพที่ 3.22 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตรนำฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ 3 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศาตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 120 องศาและ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 240 องศาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศาต่อแรงดันเอาต์พุต ณ มุมต่างๆ ดังภาพที่ 3.23

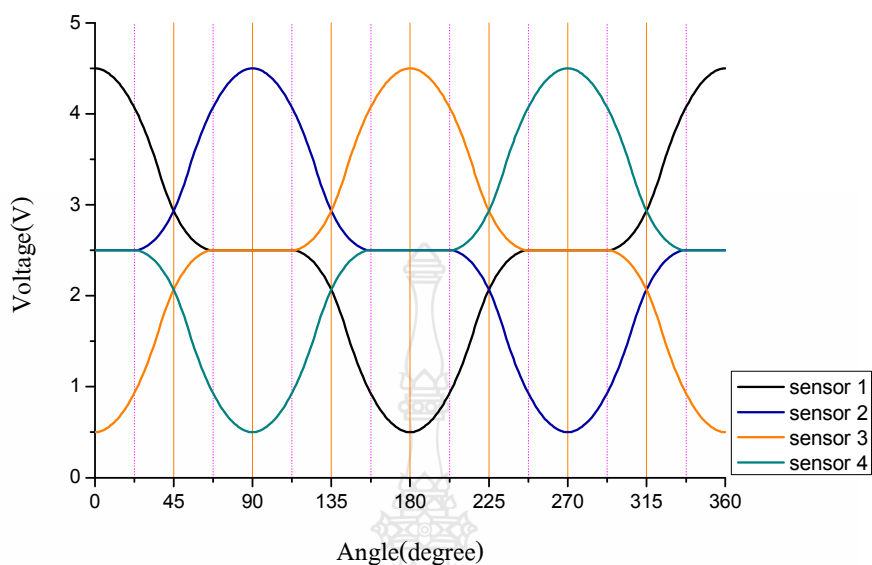


ภาพที่ 3.23 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว

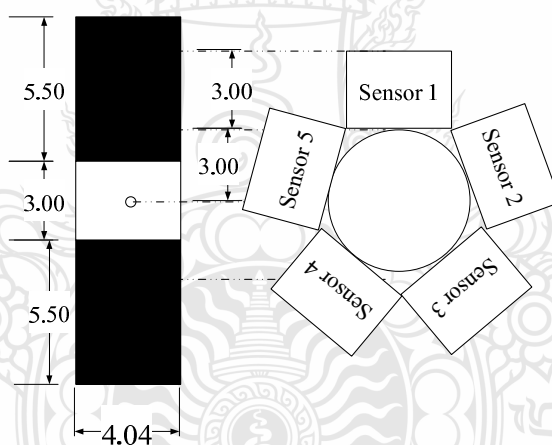


ภาพที่ 3.24 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 4 ตัว

จากภาพที่ 3.24 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ 4 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศาตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 90 องศาและ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 180 องศาตัวที่ 4 จะเริ่มที่มุม 270 องศาจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมหน่วยเป็นองศาต่อแรงดันเอาต์พุต ณ มุมต่างๆ ดังภาพที่ 3.25

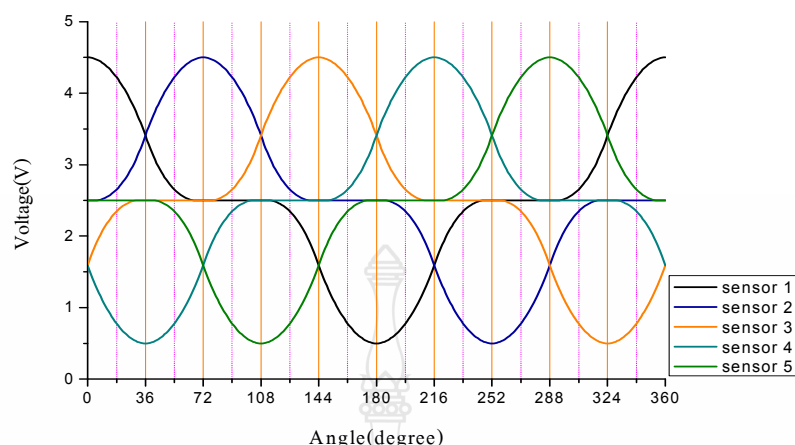


ภาพที่ 3.25 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 4 ตัว



ภาพที่ 3.26 โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ 5 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1

จะเริ่มที่มุม 0 องศา ตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 72 องศา และตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 144 องศา ตัวที่ 4 จะเริ่มที่มุม 216 องศา ตัวที่ 5 จะเริ่มที่มุม 288 องศา จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศาต่อแรงดันเอาต์พุต ณ มุมต่างๆ ดังภาพที่ 3.27



ภาพที่ 3.27 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 5 ตัว

3.2 การออกแบบ โปรแกรมแปลงสัญญาณและแสดงผล

จากการทดสอบการวางโครงสร้างเซ็นเซอร์จะเห็นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่อแรงดันเอาต์พุต ณ มุมต่างๆ ที่โครงสร้างใช้เซ็นเซอร์ 4 ตัว มีค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีรูปแบบเหมือนกัน จำเป็นจะต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง มุมแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์และแรงดันเอาต์พุตเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่สามารถแปลผลค่ามุมได้น้อยมาใช้ทำให้มีค่าความละเอียดต่ำ

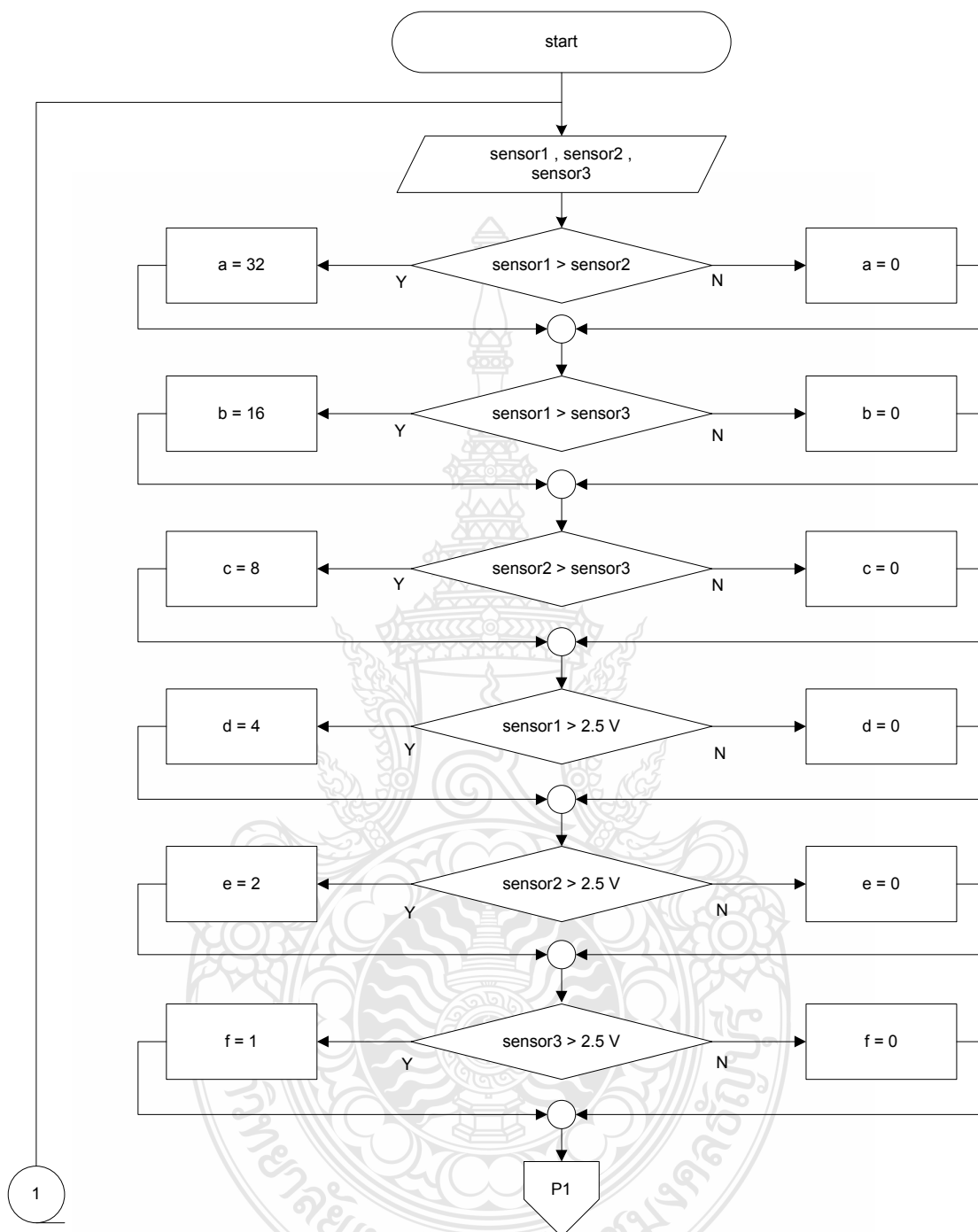
ส่วนโครงสร้างใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว และ 5 ตัว จะมีความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่อแรงดันเอาต์พุต ณ มุมต่างๆ ซึ่งสามารถนำค่าแรงดันเอาต์พุต ณ มุม ต่างๆ ของเซ็นเซอร์แต่ละตัวมาทำการหาค่ามุม ณ มุมต่างๆ โดยวิธีการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันเอาต์พุตแปลผลดังตารางที่ 3.6 และ ตารางที่ 3.7 ตามลำดับ

จากตารางที่ 3.6 สามารถเขียนโพลซาร์ดแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตของเซ็นเซอร์แต่ละตัวในช่วงมุม ทั้ง 12 ช่วง และการเลือกแรงดันเอาต์พุตแปลผล จากเซ็นเซอร์ของโครงสร้าง รัศมี 2 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว ได้ดังภาพที่ 3.20 ได้สัญญาณที่ใช้สำหรับแปลผลมุมดังภาพที่ 3.20 รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว ได้ดังภาพที่ 3.29 ได้สัญญาณที่ใช้สำหรับแปลผลมุมดังภาพที่ 3.30

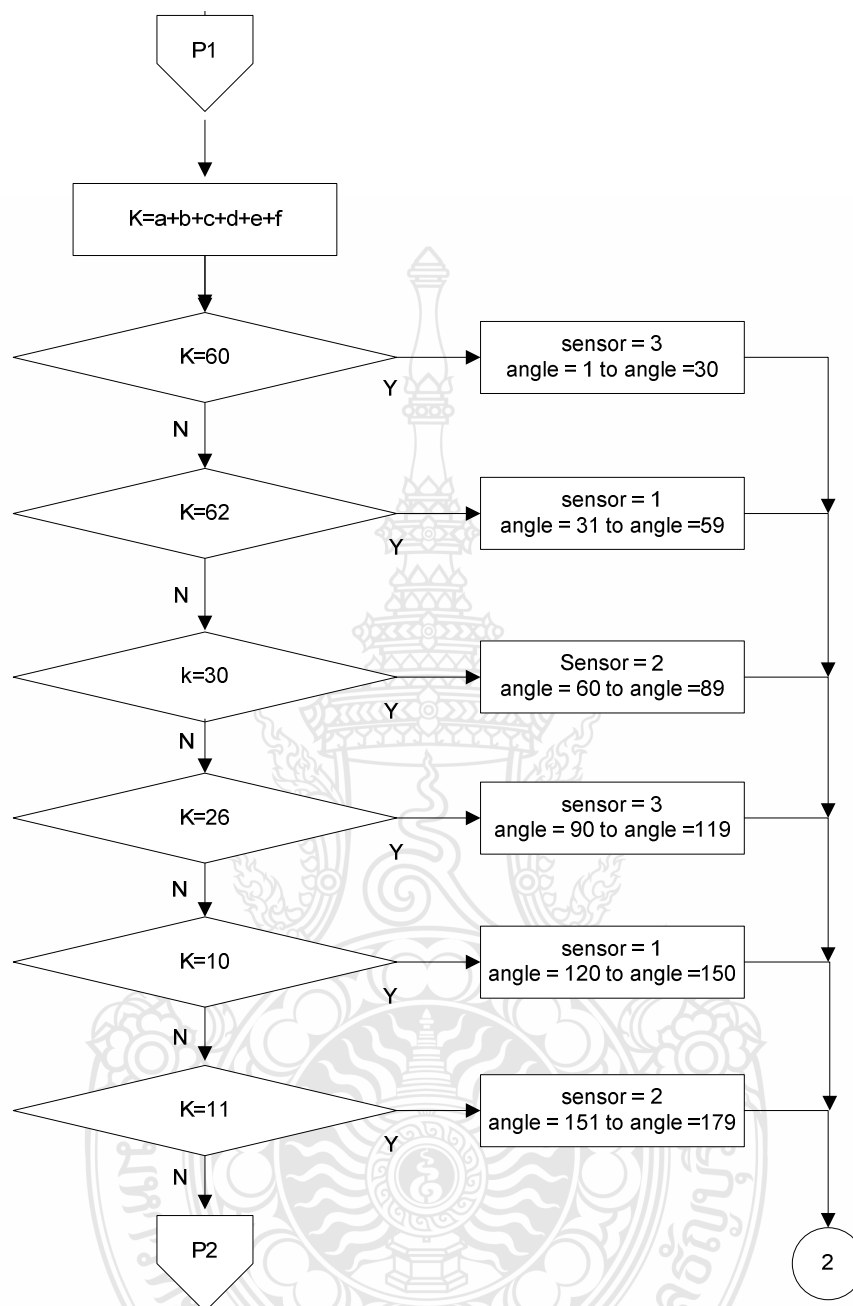
จากตารางที่ 3.7 สามารถเขียนโพลซาร์ดแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตของเซ็นเซอร์แต่ละตัวในช่วงมุม ทั้ง 20 ช่วง และการเลือกแรงดันเอาต์พุตแปลผล จากเซ็นเซอร์ของโครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 5 ตัว ได้ดังภาพที่ 3.31 ได้สัญญาณที่ใช้สำหรับแปลผลมุมดังภาพที่ 3.32

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการแปลผลมุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว

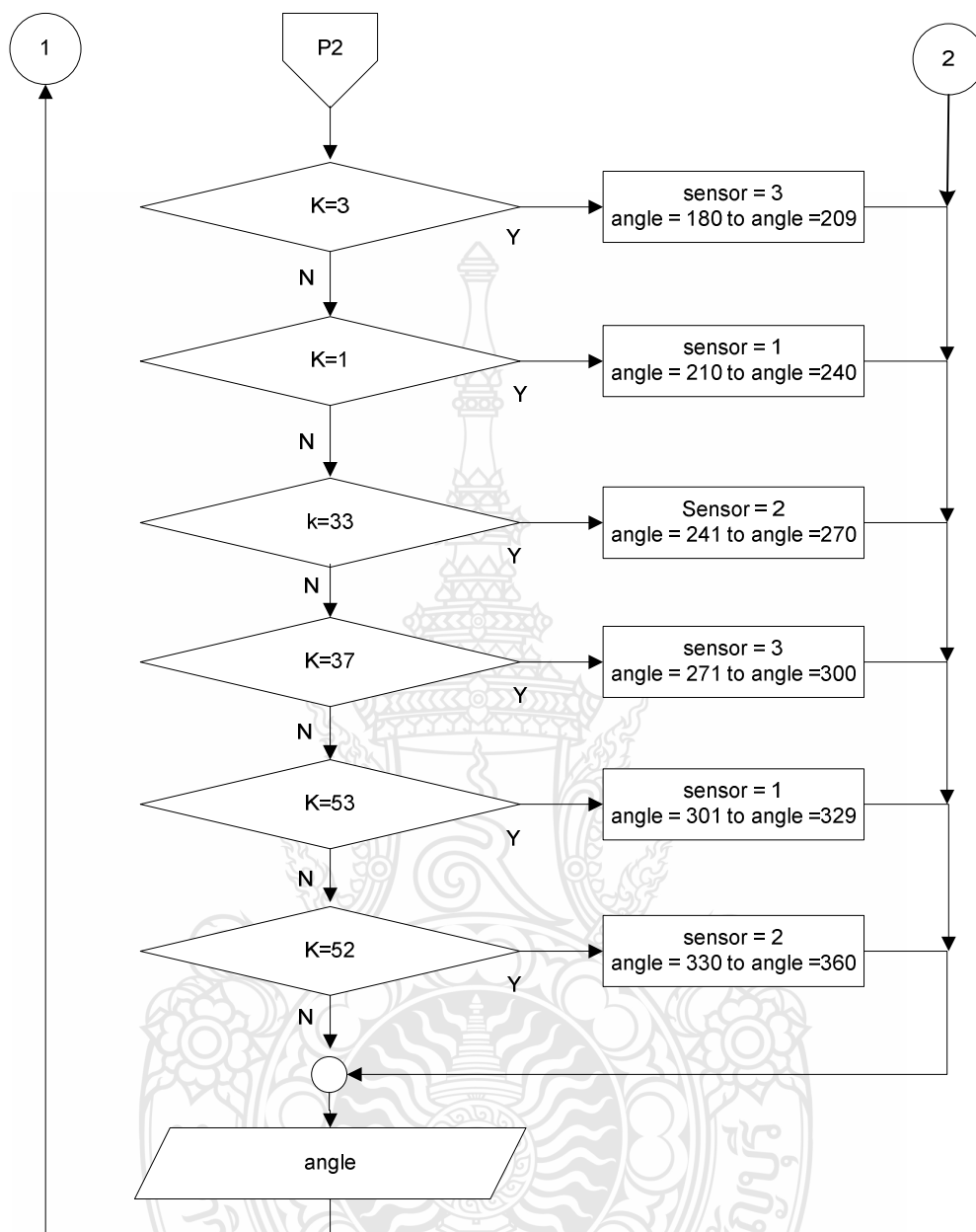
มุม	แรงดันเอาต์พุต			เงื่อนไข						แปลผล
	s 1	s 2	s 3	s1>s2	s1>s3	s2>s3	s1>2.5	s2>2.5	s3>2.5	
0	4.5	2.138	2.138	2 ⁵	2 ⁴	0	2 ²	0	0	sensor 2
1	4.499	2.157	2.117	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	0	0	sensor 3
30	3.914	2.5	1.086	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	0	0	sensor 3
31	3.875	2.507	1.048	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	0	sensor 1
59	2.883	2.843	0.501	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	0	sensor 1
60	2.862	2.862	0.5	0	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	0	sensor 2
89	2.507	3.875	1.048	0	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	0	sensor 2
90	2.5	3.914	1.086	0	2 ⁴	2 ³	0	2 ¹	0	sensor 3
119	2.157	4.499	2.117	0	2 ⁴	2 ³	0	2 ¹	0	sensor 3
120	2.138	4.5	2.138	0	0	2 ³	0	2 ¹	0	sensor 1
150	1.086	3.914	2.5	0	0	2 ³	0	2 ¹	0	sensor 1
151	1.048	3.875	2.507	0	0	2 ³	0	2 ¹	2 ⁰	sensor 2
179	0.501	2.883	2.843	0	0	2 ³	0	2 ¹	2 ⁰	sensor 2
180	0.5	2.862	2.862	0	0	0	0	2 ¹	2 ⁰	sensor 3
209	1.048	2.507	3.875	0	0	0	0	2 ¹	2 ⁰	sensor 3
210	1.086	2.5	3.914	0	0	0	0	0	2 ⁰	sensor 1
240	2.138	2.138	4.5	0	0	0	0	0	2 ⁰	sensor 1
241	2.157	2.117	4.499	2 ⁵	0	0	0	0	2 ⁰	sensor 2
270	2.5	1.086	3.914	2 ⁵	0	0	0	0	2 ⁰	sensor 2
271	2.507	1.048	3.875	2 ⁵	0	0	2 ²	0	2 ⁰	sensor 3
300	2.862	0.5	2.862	2 ⁵	0	0	2 ²	0	2 ⁰	sensor 3
301	2.883	0.501	2.843	2 ⁵	2 ⁴	0	2 ²	0	2 ⁰	sensor 1
329	3.875	1.048	2.507	2 ⁵	2 ⁴	0	2 ²	0	2 ⁰	sensor 1
330	3.914	1.086	2.5	2 ⁵	2 ⁴	0	2 ²	0	0	sensor 2
360	4.5	2.138	2.138	2 ⁵	2 ⁴	0	2 ²	0	0	sensor 2



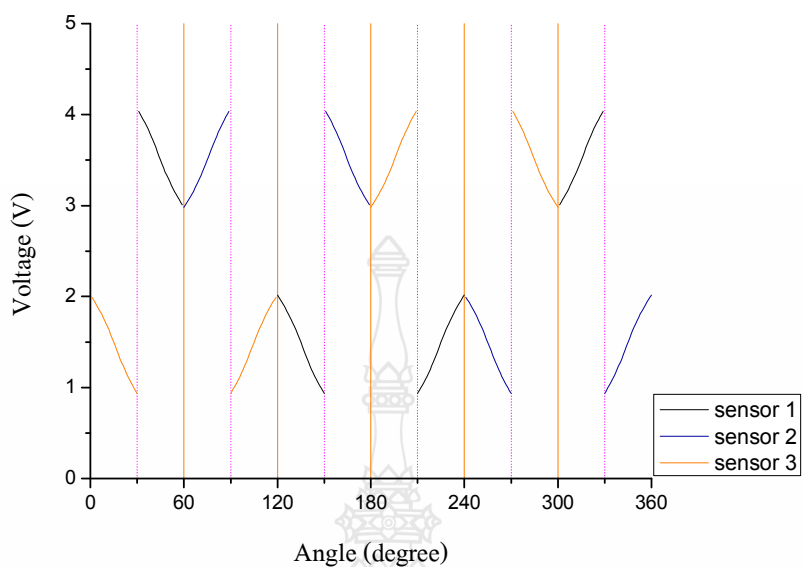
ภาพที่ 3.28 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว



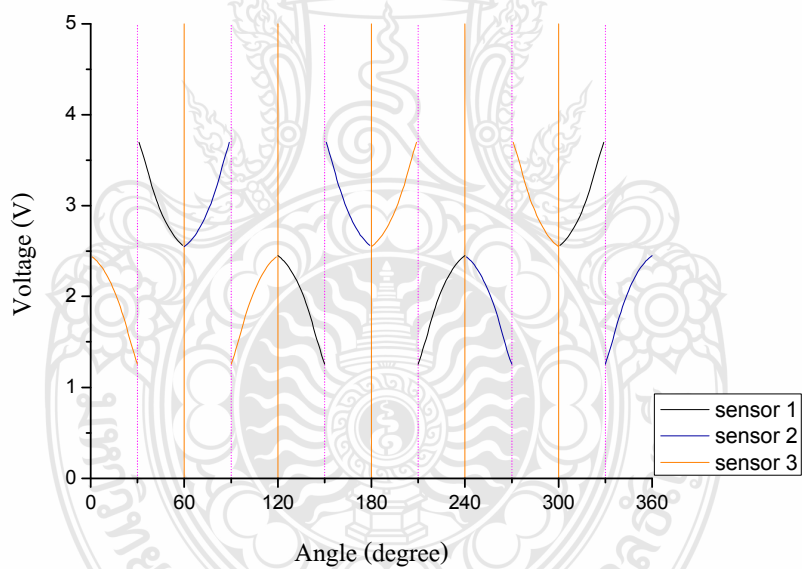
ภาพที่ 3.28 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว (ต่อ)



ภาพที่ 3.28 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว (ต่อ)



ภาพที่ 3.29 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปลผล ที่รัศมี 2 มิลลิเมตร ใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว



ภาพที่ 3.30 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปลผล ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซ็นเซอร์ 3 ตัว

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการแปลผลมุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว

มุม	แรงดันเอาต์พุต					เงื่อนไข					
	s 1	s 2	s 3	s4	s5	s1>s2	s1>s3	s1>s4	s1>s5	s2>s3	s2>s4
0	4.500	2.500	1.590	1.590	2.500	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
1	4.499	2.500	1.653	1.529	2.500	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
17	4.251	2.632	2.323	0.809	2.500	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
18	4.222	2.654	2.346	0.778	2.500	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
35	3.471	3.347	2.500	0.501	2.500	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
36	3.410	3.410	2.500	0.500	2.500	0	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
54	2.654	4.222	2.500	0.778	2.346	0	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
55	2.632	4.251	2.500	0.809	2.323	0	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
72	2.500	4.500	2.500	1.590	1.590	0	0	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
73	2.500	4.499	2.500	1.653	1.529	0	0	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
89	2.500	4.251	2.632	2.323	0.809	0	0	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
90	2.500	4.222	2.654	2.346	0.778	0	0	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
107	2.500	3.471	3.347	2.500	0.501	0	0	0	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
108	2.500	3.410	3.410	2.500	0.500	0	0	0	2 ¹¹	0	2 ⁹
126	2.346	2.654	4.222	2.500	0.778	0	0	0	2 ¹¹	0	2 ⁹
127	2.323	2.632	4.251	2.500	0.809	0	0	0	2 ¹¹	0	2 ⁹
143	1.653	2.500	4.499	2.500	1.529	0	0	0	2 ¹¹	0	0
144	1.590	2.500	4.500	2.500	1.590	0	0	0	0	0	0
161	0.809	2.500	4.251	2.632	2.323	0	0	0	0	0	0
162	0.778	2.500	4.222	2.654	2.346	0	0	0	0	0	0
179	0.501	2.500	3.471	3.347	2.500	0	0	0	0	0	0
180	0.500	2.500	3.410	3.410	2.500	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการแปลผลมุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)

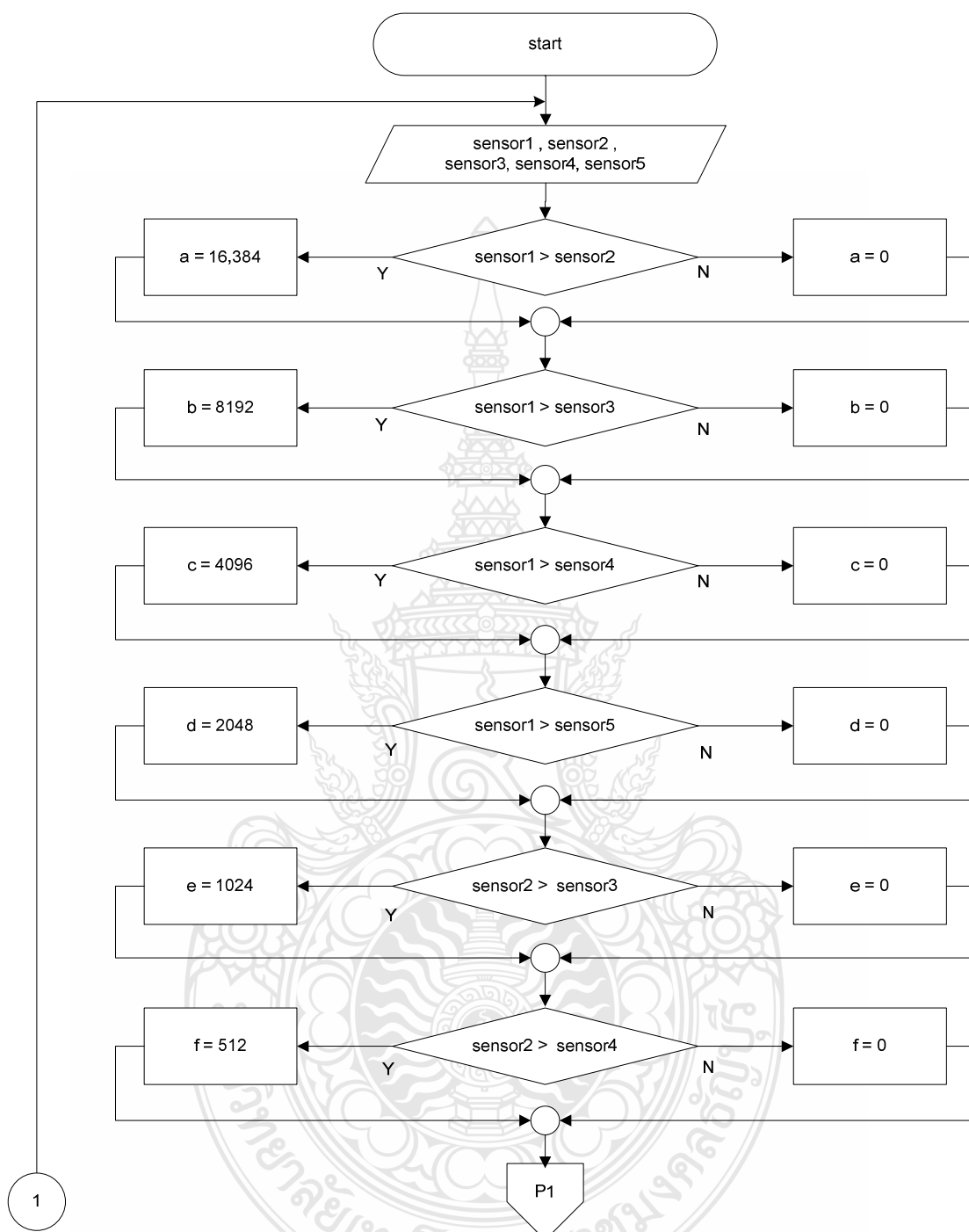
มุม	เงื่อนไข									แปลผล
	s2>s5	s3>s4	s3>s5	s4>s5	S1>	s2>K	s3>K	s4>K	s5>K	
0	0	0	0	0	2^4	2^3	0	0	2^0	sensor 3
1	0	2^7	0	0	2^4	2^3	0	0	2^0	sensor 4
17	2^8	2^7	0	0	2^4	2^3	0	0	2^0	sensor 4
18	2^8	2^7	0	0	2^4	2^3	2^2	0	2^0	sensor 1
35	2^8	2^7	0	0	2^4	2^3	2^2	0	2^0	sensor 1
36	2^8	2^7	0	0	2^4	2^3	2^2	0	2^0	sensor 2
54	2^8	2^7	2^6	0	2^4	2^3	2^2	0	2^0	sensor 2
55	2^8	2^7	2^6	0	2^4	2^3	2^2	0	0	sensor 4
72	2^8	2^7	2^6	0	2^4	2^3	2^2	0	0	sensor 4
73	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	0	0	sensor 5
89	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	0	0	sensor 5
90	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	0	sensor 2
107	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	0	sensor 2
108	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	0	sensor 3
126	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	0	sensor 3
127	2^8	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	0	sensor 5
143	2^8	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	0	sensor 5
144	2^8	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	0	sensor 1
161	2^8	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	0	sensor 1
162	2^8	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	2^0	sensor 3
179	0	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	2^0	sensor 3
180	0	2^7	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	2^0	sensor 4

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการแปลผลมุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)

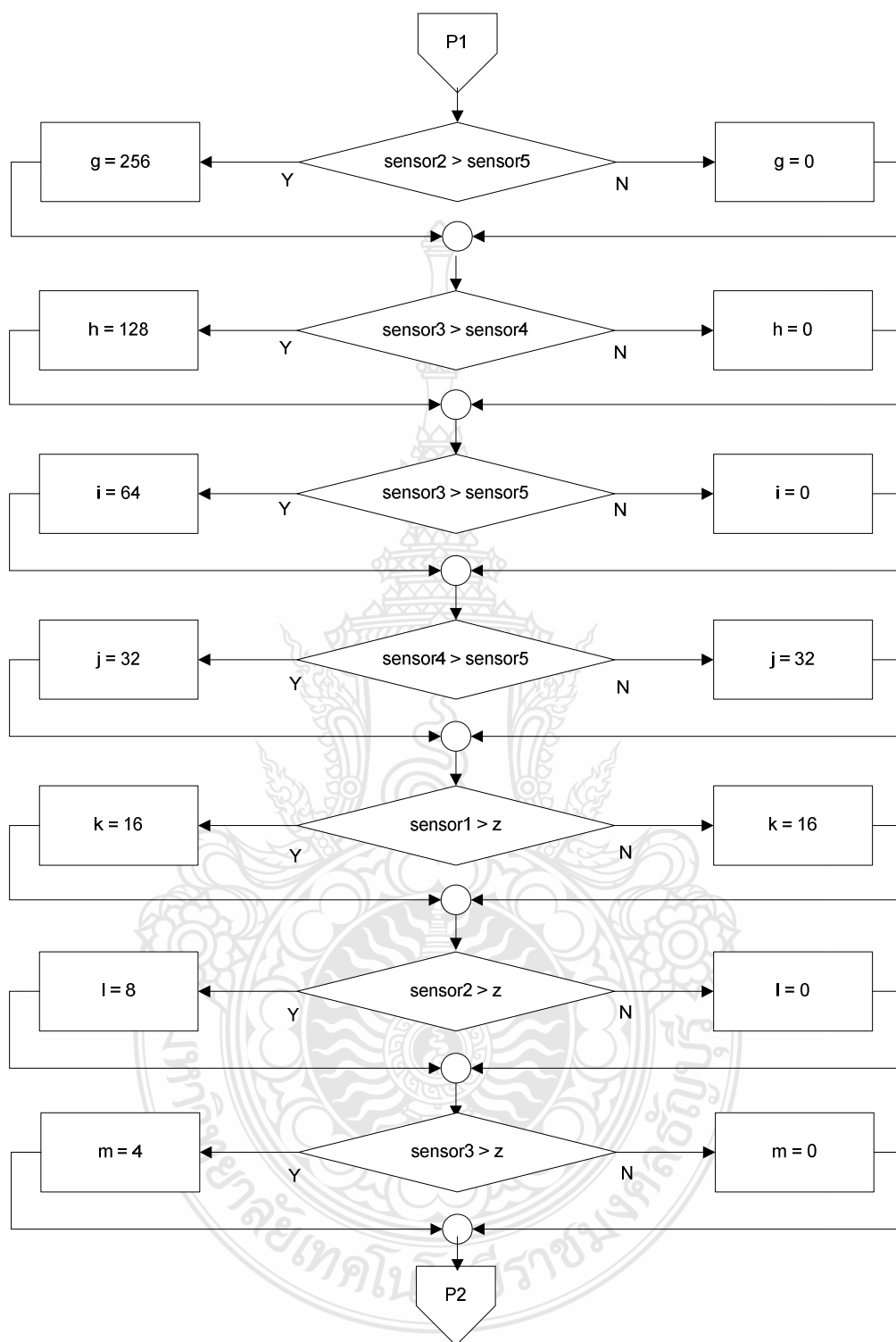
มุม	แรงดันเอาต์พุต					เงื่อนไข					
	s 1	s 2	s 3	s4	s5	s1>s2	s1>s3	s1>s4	s1>s5	s2>s3	s2>s4
198	0.778	2.346	2.654	4.222	2.500	0	0	0	0	0	0
199	0.809	2.323	2.632	4.251	2.500	0	0	0	0	0	0
216	1.590	1.590	2.500	4.500	2.500	0	0	0	0	0	0
217	1.653	1.529	2.500	4.499	2.500	2 ¹⁴	0	0	0	0	0
233	2.323	0.809	2.500	4.251	2.632	2 ¹⁴	0	0	0	0	0
234	2.346	0.778	2.500	4.222	2.654	2 ¹⁴	0	0	0	0	0
251	2.500	0.501	2.500	3.471	3.347	2 ¹⁴	0	0	0	0	0
252	2.500	0.500	2.500	3.410	3.410	2 ¹⁴	0	0	0	0	0
270	2.500	0.778	2.346	2.654	4.222	2 ¹⁴	2 ¹³	0	0	0	0
271	2.500	0.809	2.323	2.632	4.251	2 ¹⁴	2 ¹³	0	0	0	0
288	2.500	1.590	1.590	2.500	4.500	2 ¹⁴	2 ¹³	0	0	0	0
289	2.500	1.653	1.529	2.500	4.499	2 ¹⁴	2 ¹³	0	0	2 ¹⁰	0
305	2.632	2.323	0.809	2.500	4.251	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	0	2 ¹⁰	0
306	2.654	2.346	0.778	2.500	4.222	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	0	2 ¹⁰	0
324	3.410	2.500	0.500	2.500	3.410	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	0	2 ¹⁰	0
325	3.471	2.500	0.501	2.500	3.347	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	0
342	4.222	2.500	0.778	2.346	2.654	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
343	4.251	2.500	0.809	2.323	2.632	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹
360	4.500	2.500	1.590	1.590	2.500	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹

ตารางที่ 3.7 เงื่อนไขการแปลผลมุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)

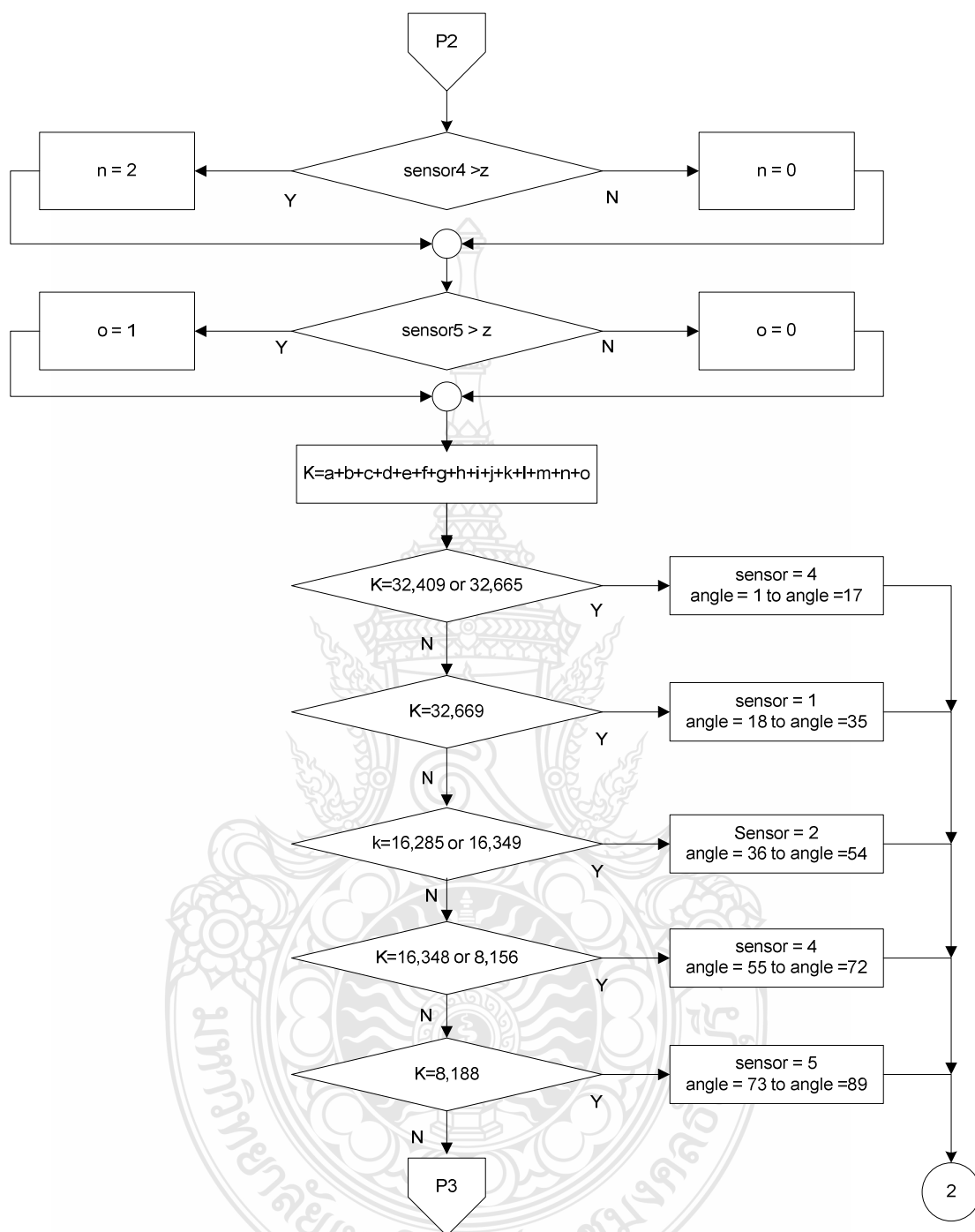
มุม	เงื่อนไข									แปลผล
	s2>s5	s3>s4	s3>s5	s4>s5	S1>Z	s2>Z	s3>Z	s4>Z	s5>Z	
198	0	0	2^6	2^5	0	2^3	2^2	2^1	2^0	sensor 4
199	0	0	2^6	2^5	0	0	2^2	2^1	2^0	sensor 1
216	0	0	0	2^5	0	0	2^2	2^1	2^0	sensor 1
217	0	0	0	2^5	0	0	2^2	2^1	2^0	sensor 2
233	0	0	0	2^5	0	0	2^2	2^1	2^0	sensor 2
234	0	0	0	2^5	2^4	0	2^2	2^1	2^0	sensor 4
251	0	0	0	2^5	2^4	0	2^2	2^1	2^0	sensor 4
252	0	0	0	0	2^4	0	2^2	2^1	2^0	sensor 5
270	0	0	0	0	2^4	0	2^2	2^1	2^0	sensor 5
271	0	0	0	0	2^4	0	0	2^1	2^0	sensor 2
288	0	0	0	0	2^4	0	0	2^1	2^0	sensor 2
289	0	0	0	0	2^4	0	0	2^1	2^0	sensor 3
305	0	0	0	0	2^4	0	0	2^1	2^0	sensor 3
306	0	0	0	0	2^4	2^3	0	2^1	2^0	sensor 5
324	0	0	0	0	2^4	2^3	0	2^1	2^0	sensor 5
325	0	0	0	0	2^4	2^3	0	2^1	2^0	sensor 1
342	0	0	0	0	2^4	2^3	0	2^1	2^0	sensor 1
343	0	0	0	0	2^4	2^3	0	0	2^0	sensor 3
360	0	0	0	0	2^4	2^3	0	0	2^0	sensor 3



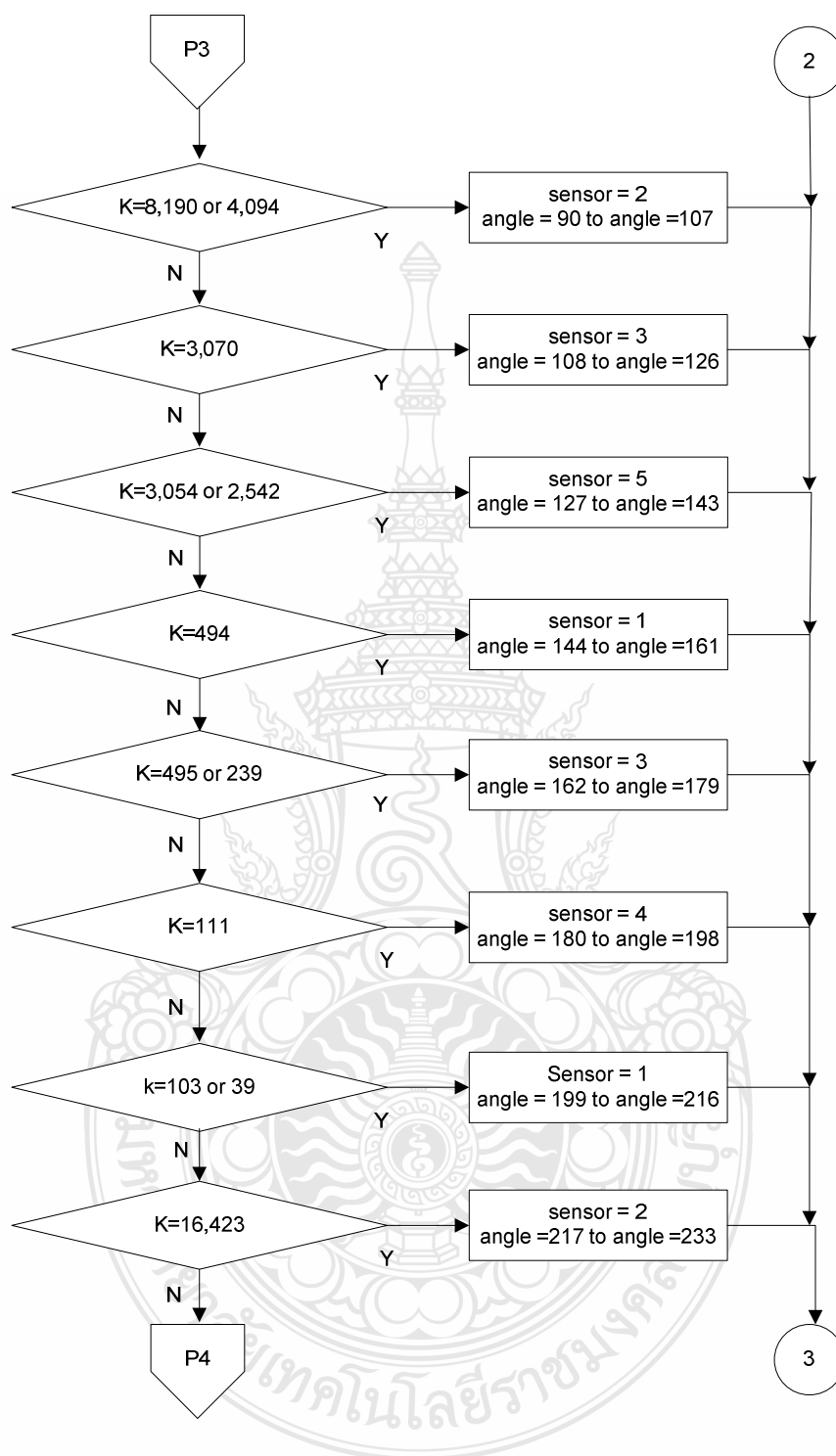
ภาพที่ 3.31 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว



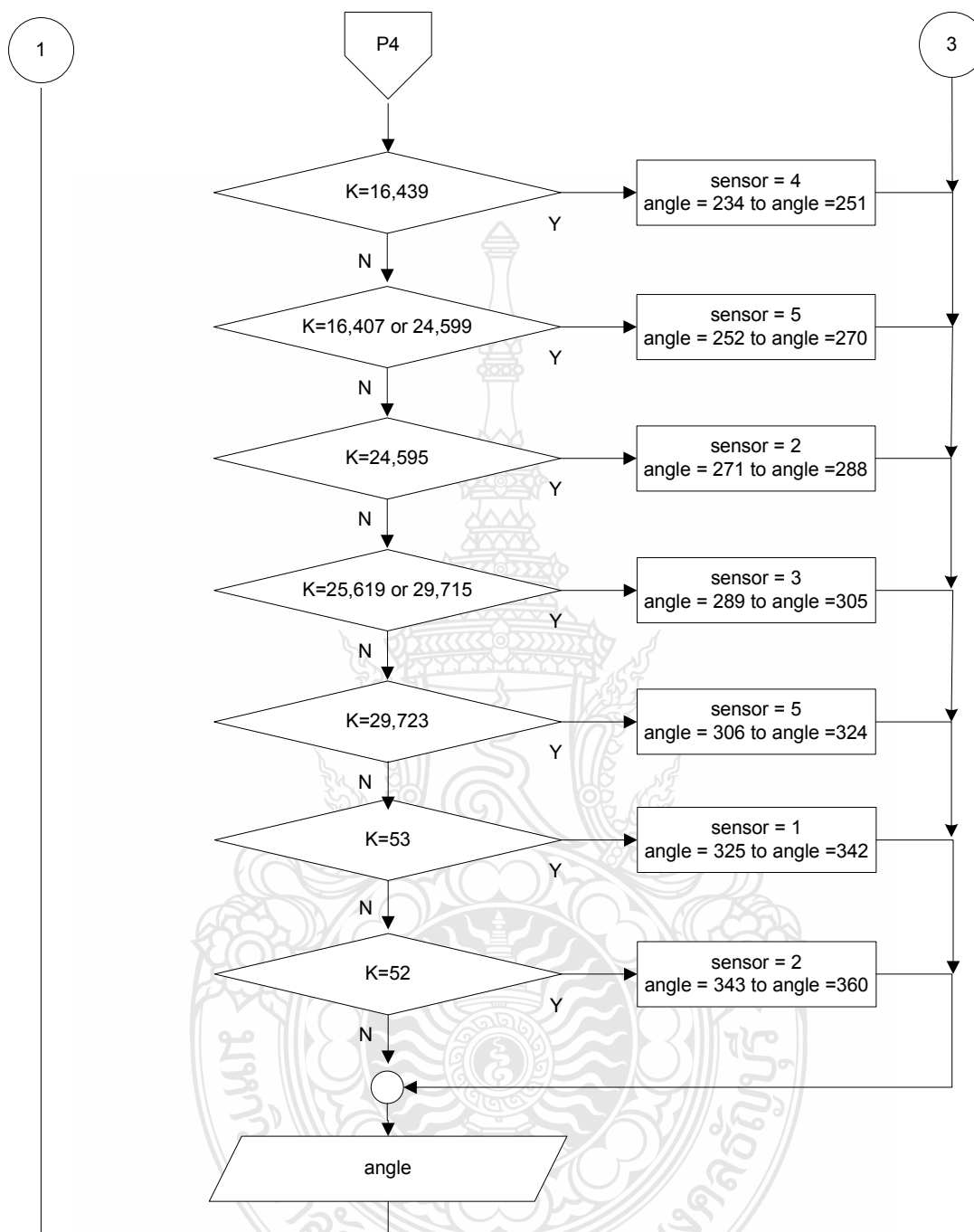
ภาพที่ 3.31 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุม โครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)



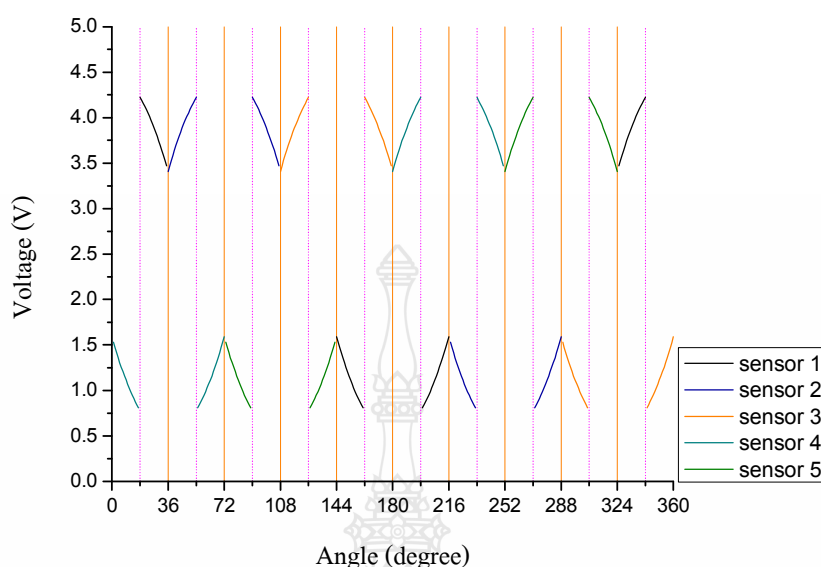
ภาพที่ 3.31 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)



ภาพที่ 3.31 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)



ภาพที่ 3.31 โฟลชาร์ตการทำงานของโปรแกรมการหาค่ามุมโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว (ต่อ)



ภาพที่ 3.32 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปรผล ที่รัศมี 3 มิลลิเมตรใช้ เซ็นเซอร์ 5 ตัว

จากกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ทำการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันเอาต์พุตแปรผล ทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างเซ็นเซอร์ 3 ตัว รัศมี 1.5 มิลลิเมตร กับรัศมี 3 มิลลิเมตร จะเห็นว่าทั้งสองแบบจะสามารถแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันเอาต์พุตแปรผล ได้ทั้งหมด 12 แต่จะสังเกตเห็นว่าที่รัศมี 3 มิลลิเมตร

แต่เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตรเซ็นเซอร์ 3 ตัวกับ เซ็นเซอร์ 5 ตัวจะเห็นว่าโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัวสามารถแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันเอาต์พุตแปรผล ได้ทั้งหมด 20 ช่วงซึ่งทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่เราจะนำไปแปรผลเป็นค่ามุมมีช่วงกว้างมากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างการหาค่าความละเอียด ณ จุดต่ำสุด ที่มุม 0-1 องศาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 การเลือกแรงดันเอาต์พุตแปรผล จากเซ็นเซอร์ของโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัว

มุม	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5
0	3.994	2.691	2.215	2.141	2.686
1	3.991	2.687	2.166	2.195	2.688
ผลต่างแรงดันเอาต์พุต	0.003	0.014	0.049	0.054	0.002

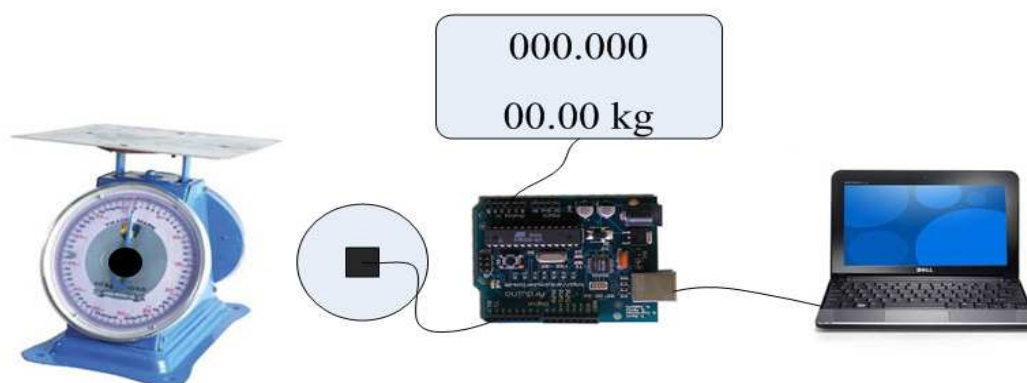
จะเห็นว่า ค่าผลต่างแรงดันเอาต์พุต เท่ากับ 0.049 V ที่ เซ็นเซอร์ตัวที่ 3 ที่เราเลือก หากคิดเป็นค่า ระยะห่างของระดับข้อมูลดิจิทัลในวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลแรงดันเอาต์พุต 0 - 5 V ความละเอียด 12 บิต จะได้ ระยะห่างของแรงดันเอาต์พุตต่อบิตข้อมูล 0.0013 V ต่อ 1 บิต หรือที่ 0.049 V มีค่าเท่ากับ 37 หน่วย ดิจิตอล ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประมวลผลที่ค่าความละเอียด 0.1 องศา

ตารางที่ 3.9 แรงดันเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ทำการออกแบบที่ความละเอียด 0.1 องศา

มุม (องศา)	ครั้งที่ 1 (V)	ครั้งที่ 2 (V)	ครั้งที่ 3 (V)	ครั้งที่ 4 (V)	ครั้งที่ 5 (V)	ครั้งที่ 6 (V)	ครั้งที่ 7 (V)	ครั้งที่ 8 (V)	ครั้งที่ 9 (V)	ครั้งที่ 10 (V)
0	2.215	2.216	2.214	2.215	2.215	2.214	2.215	2.216	2.214	2.215
0.1	2.213	2.214	2.213	2.214	2.215	2.212	2.214	2.215	2.211	2.215
0.2	2.210	2.212	2.209	2.210	2.211	2.209	2.210	2.210	2.210	2.211
0.3	2.206	2.207	2.205	2.208	2.206	2.206	2.207	2.208	2.205	2.207
0.4	2.202	2.203	2.202	2.202	2.202	2.200	2.202	2.203	2.202	2.204
0.5	2.196	2.196	2.196	2.198	2.197	2.195	2.197	2.196	2.194	2.196
0.6	2.190	2.191	2.189	2.191	2.191	2.189	2.191	2.192	2.189	2.191
0.7	2.184	2.185	2.184	2.185	2.184	2.182	2.184	2.185	2.183	2.186
0.8	2.178	2.180	2.178	2.180	2.179	2.178	2.180	2.178	2.178	2.179
0.9	2.172	2.172	2.171	2.173	2.173	2.172	2.173	2.173	2.170	2.172
1	2.166	2.168	2.165	2.167	2.167	2.166	2.167	2.168	2.164	2.167

3.3 การปรับปรุงโปรแกรมเพื่อเปลี่ยนการแสดงผลมุมเป็นน้ำหนักร

จากแนวคิดการเคลื่อนที่ของเข็มแสดงน้ำหนักรของตาชั่งแบบสปริงมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน เช่นเดียวกับทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ทำการออกแบบสามารถนำมาปรับได้โดยการเปรียบเทียบมุมกับน้ำหนักรที่ได้ เพื่อแสดงผล โดยการนำทรานสดิวเซอร์วัดมุมติดตั้งกับแกนหมุนของเครื่องชั่งแบบสปริงดังภาพที่ 3.32



ภาพที่ 3.33 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์วัดมวลกับแกนหมุนของเครื่องชั่งแบบสปริง

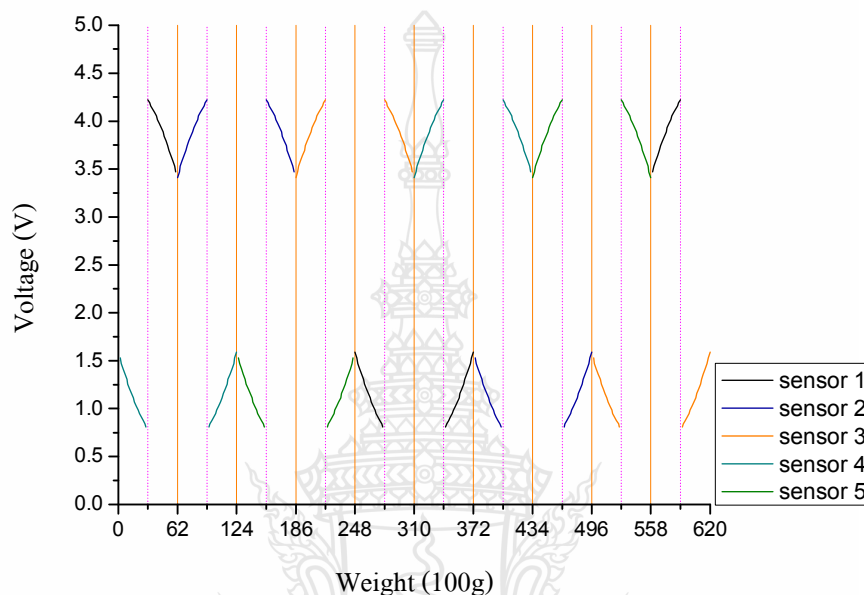
จากโครงสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงสำหรับชั่งน้ำหนักขนาด 60 กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 3.31 จะเห็นว่าภายในหน้าปัดวงกลมจะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 62 ส่วนใหญ่ตามน้ำหนัก กิโลกรัม แต่ถ้าต้องการความละเอียดที่ 100 กรัม จะต้องแบ่งออกเป็นทั้งหมด 620 ส่วน



ภาพที่ 3.34 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงสำหรับชั่งน้ำหนักขนาด 60 กิโลกรัม

จากตาราง 3.7 การเปรียบเทียบแรงดันเอาต์พุตของเซ็นเซอร์แต่ละตัวในช่วงมุม ทั้ง 20 ช่วง และการเลือกแรงดันเอาต์พุตแปรผล จากเซ็นเซอร์ของโครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้เซ็นเซอร์ 5 ตัว ใน 20 ช่วงแรงดันเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ที่ถูกเลือกเพื่อแปรผลจะถูกแบ่งอีกช่วงละ 18 องศา เพื่อ

แสดงผลมุม ตาซึ่งแบบสปริงต้องการความละเอียดที่ 100 กรัม หรือ 1 ชีด จะต้องแบ่งออกเป็นทั้งหมด 620 ชีด แสดงว่าคันเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ที่ถูกเลือกเพื่อแปลผลจะถูกแบ่งอีกช่วงละ 31 ชีด เพื่อแสดงผลที่ความละเอียด 100 กรัม สามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 3.33



ภาพที่ 3.35 นำหนักกับค่าแรงดันเอาต์พุตที่ทำการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่า

3.4 สรุปการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโปรแกรมแปลงสัญญาณ และแสดงผล

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กตามการเคลื่อนที่ของแม่เหล็ก โครงสร้างดังภาพที่ 3.2 พบว่า

ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กตามพื้นที่แม่เหล็กเคลื่อนที่ช้อนฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตั้งแต่มุม 0 จนถึง 360 องศา จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดของแม่เหล็กและรัศมีการวางตำแหน่งฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ถ้าพิจารณาที่ขนาดแม่เหล็กที่มีขนาดความกว้างมากกว่าจะปรากฏพื้นที่ช้อนกันของแม่เหล็กตามองสามารถมากกว่าแต่มีข้อเสียคือ จะเกิดบริเวณการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้น้อยเมื่อเทียบกับมุมเคลื่อนที่มากกว่า

ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กเกิดจากระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ระยะใกล้ๆ จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์มากกว่า แต่ถ้าใกล้มากเกินไปจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กตามองสามารถเคลื่อนที่ได้

ปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กเกิดจากสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับพื้นที่หรือตัวกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ปัจจัยนี้จะเกิดขึ้นจากรัศมีการวางตำแหน่งฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ และระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เพราะเกิดจากจุดกึ่งกลางแม่เหล็กและฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เคลื่อนที่ห่างกันออกไป โดยที่ระยะห่างแกนเท่าเดิม

และการเพิ่มจำนวนและฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตรเซ็นเซอร์ 3 ตัวกับ เซ็นเซอร์ 5 ตัวจะเห็นว่าโครงสร้างเซ็นเซอร์ 5 ตัวสามารถแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันเอาต์พุตแปลผล ได้ทั้งหมด 20 ช่วง ซึ่งทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่เราจะนำไปแปลผลเป็นค่ามุมมีช่วงกว้างมากยิ่งขึ้น หรือมีความละเอียดขึ้น

ในการแปลผลมุมจากโครงสร้างที่ใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัวกับ เซ็นเซอร์ 5 ตัว จะเห็นว่าโครงสร้างที่ใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว มีความซับซ้อนน้อยกว่าโครงสร้างที่ใช้เซ็นเซอร์ 5 ตัวมาก ดังนั้นในการเลือกใช้ควรเลือกตามความละเอียดที่เหมาะสม



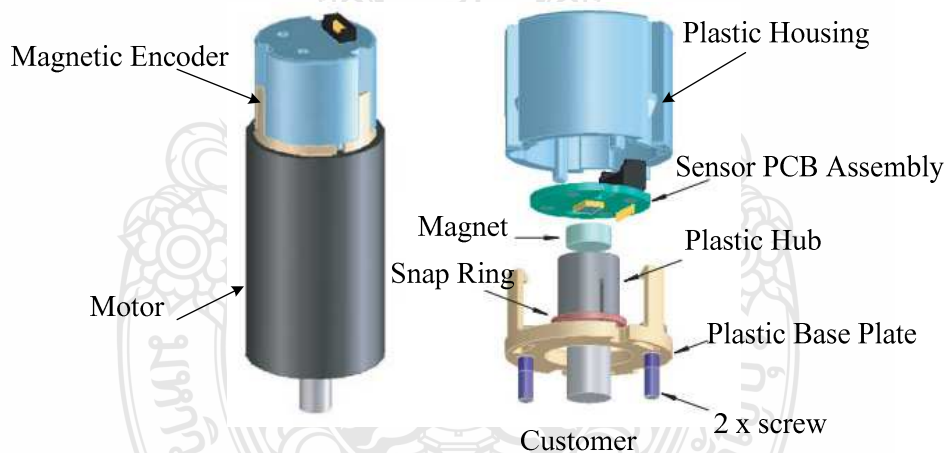
บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

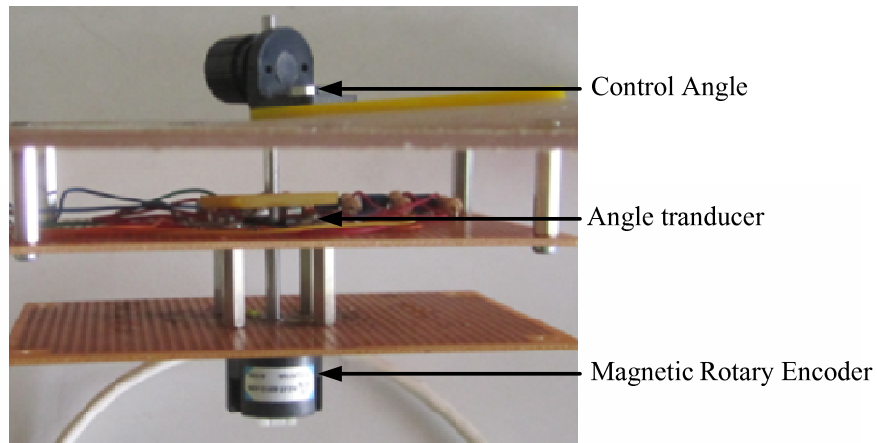
บทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบของทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ได้ออกแบบ โดยทำการทดสอบในสภาวะควบคุมเพื่อให้สามารถนำพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดผลได้มาวิเคราะห์หาค่าความแม่นยำ ค่าความเที่ยงตรง ของระบบที่นำเสนอในการวัดมุม 0-360 องศา

4.1 การทดสอบทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ออกแบบ

การทดสอบใช้แมกเนติกโรตารีเอ็นโคเดอร์ (Magnetic Rotary Encoder) ยี่ห้อ Avago รุ่น EIAT 6012 มีความละเอียดขนาด 12 บิต หรือความละเอียด 0.0879 องศา มีค่าความผิดพลาด ± 1 LSB หรือค่าความผิดพลาด 0.0879 องศา โดยติดตั้งแมกเนติกโรตารีเอ็นโคเดอร์ไว้กับแกนหมุนเดียวกันกับทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ได้ออกแบบ



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างของแมกเนติกโรตารีเอ็นโคเดอร์ยี่ห้อ Avago รุ่น EIAT 6012



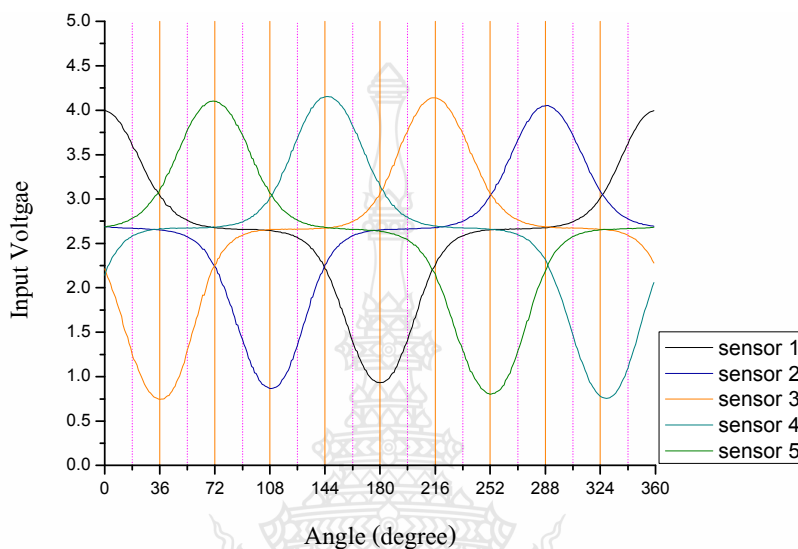
ภาพที่ 4.2 ติดตั้งแมกเนติก โรตารีเอนโคเดอร์ไว้กับแกนหมุนเดียวกันกับทรานสดิวเซอร์

ทำการปรับมุมในการวัดตั้งแต่ 0 - 360 องศา ที่ความละเอียด 1 องศาทำการบันทึกค่าที่ได้ ในตารางที่ 4.4 ทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง ครั้งที่ 1 ถึง 5 เคลื่อนมุมแบบตามเข็มนาฬิกา ครั้งที่ 6 ถึง 10 เคลื่อนมุมแบบทวนเข็มนาฬิกา



ภาพที่ 4.3 แกนหมุนสำหรับทดสอบทรานสดิวเซอร์

ในการทดสอบจะแบ่งการออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่เป็นสัญญาณอนาล็อกที่รับมาจากเซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัว และข้อมูลผลมุมหลังจากประมวลผลมุมเรียบร้อยแล้ว



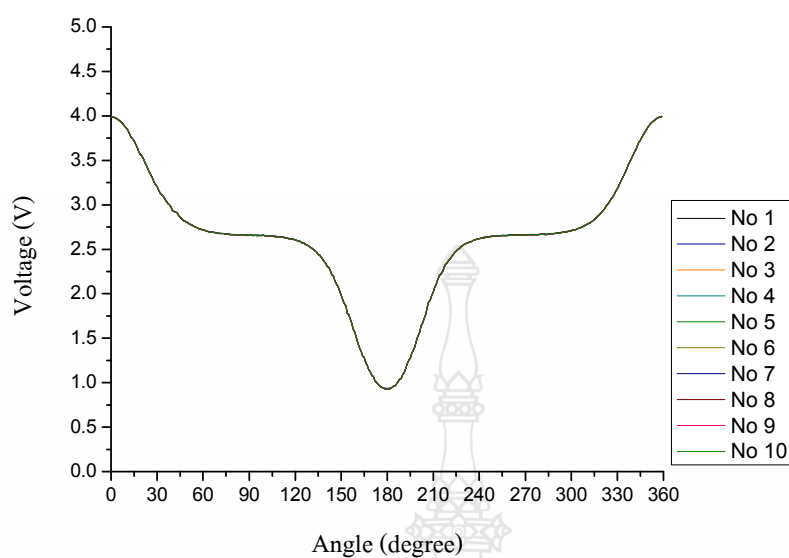
ภาพที่ 4.4 มุมกับแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัว

4.1.1 การทดสอบความสามารถในการซ้ำเติมแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์แต่ละตัว

โดยค่าที่ได้จะต้องอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมดทำการทดสอบ เพื่อหาความเที่ยงตรงการทดสอบนี้จะดูแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์แต่ละตัว ที่นำมาประกอบเป็นทรานสดิวเซอร์วัดมุม ว่ามีความสามารถในการซ้ำเติมมากน้อยเพียงใด โดยจะทำการวัดแยกฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์แต่ละตัว ทำการวัด จำนวน 10 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าตั้งตั้งสมการที่ 2.16

เมื่อทดสอบแล้วได้ค่าความเที่ยงตรง ที่ตำแหน่งมุมใดน้อยที่สุด จะนำแรงดันเอาต์พุต ทั้ง 10 ตัว มุมนั้นมาคำนวณหาค่าความผิดพลาดสูงสุดของทรานสดิวเซอร์วัดมุมตั้งสมการที่ 2.11 และสมการที่ 2.13

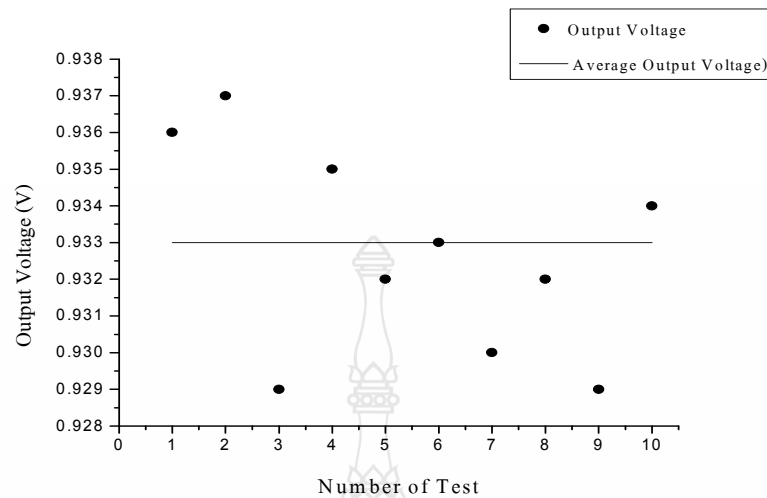
ผลการทดสอบฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 จากกราฟค่าความเที่ยงตรงที่ได้ จะเห็นว่าที่มุม 179 องศา ของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 มีค่าความเที่ยงตรงน้อยที่สุด จึงจะนำแรงดันเอาต์พุตบริเวณนี้ไปหาค่าความผิดพลาดสูงสุดต่อไป



ภาพที่ 4.5 แรงดันเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1 ณ ตำแหน่งมุม 0-360 องศา

ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดการวัดที่ความละเอียด 1 องศา ที่มุม 179 องศา

ครั้งที่	แรงดันเอาต์พุต	ค่าเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาด		
	ที่วัดได้	แรงดันเอาต์พุต	Error	Relative Error	%Error
1	0.936	0.933	-0.003	-0.00322	0.321543
2	0.937	0.933	0.003	0.003215	0.321543
3	0.929	0.933	-0.001	-0.001072	0.107181
4	0.935	0.933	-0.002	-0.00214	0.214362
5	0.932	0.933	0.001	0.001072	0.107181
6	0.933	0.933	0	0	0
7	0.93	0.933	-0.003	-0.00322	0.321543
8	0.932	0.933	0.001	0.001072	0.107181
9	0.929	0.933	0.004	0.004287	0.428725
10	0.934	0.933	0.001	0.001072	0.107181

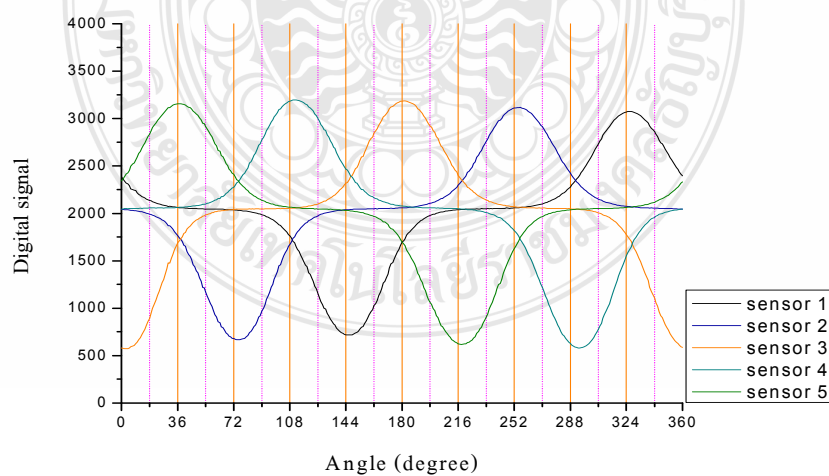


ภาพที่ 4.6 ค่าความผิดพลาดที่มุม 179 องศา ของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ตัวที่ 1

ทำการทดสอบฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่เหลือเช่นเดียวกันกับตัวที่ 1 ค่าความผิดพลาดอนาล็อกเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัวมีค่าสูงสุดที่ ± 0.005 V และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย ± 0.002 V

4.1.2 ทดสอบความสามารถในการซ้ำเติมจากการแปลผลมุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

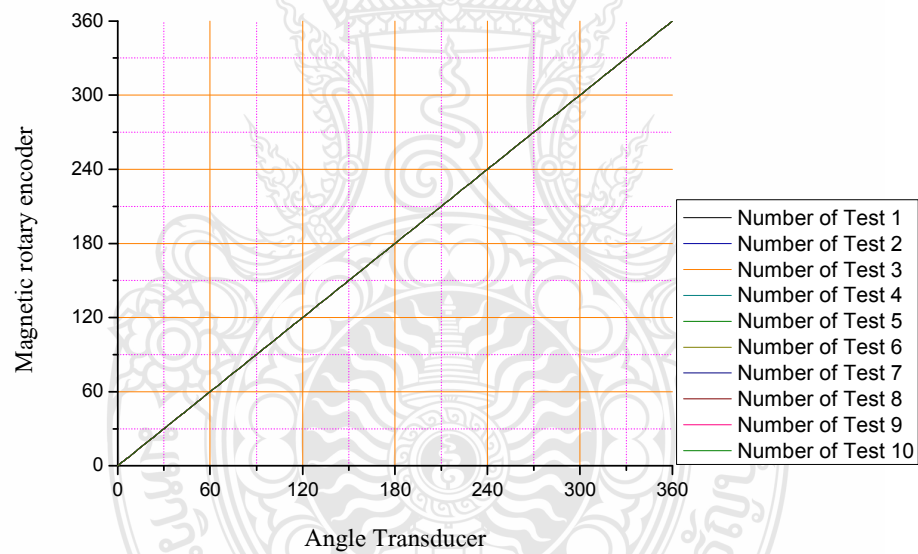
จากสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ทั้ง 5 ตัว มีค่าสัมประสิทธิ์ความไวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เท่ากับ 0.0013 โวลต์ ต่อเกาซ์และเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 - 5 โวลต์ จะมีค่าความเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 3846 ค่า ดังนั้นจึงใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 12 บิต ในการประมวลผล เพื่อแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลได้ข้อมูลดิจิทัลดังภาพที่



ภาพที่ 4.7 แปลงอนาล็อกเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 12 บิต

ตารางที่ 4.3 มุมที่วัดจากทรานสดิวเซอร์วัดมุมกับ แมกเนติก โรตารีเอนโคเดอร์ความละเอียด 1 องศา
(ต่อ)

มุม	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10



ภาพที่ 4.8 มุมที่ได้จาก ทรานสดิวเซอร์วัดมุมเทียบกับ แมกเนติก โรตารีเอนโคเดอร์ความละเอียด 1 องศา

จากการทดสอบและเก็บข้อมูลดังตารางที่ 4.3 นำมุมที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์วัดมุมมาหาว่ามีความสามารถในการซ้ำเดิมมากน้อยเพียงใด ซึ่งหาค่าได้ดังสมการที่ 2.19

ตารางที่ 4.5 ความผิดพลาดของมุมที่วัดโดยทรานส์ดิวเซอร์วัดมุม ที่ความละเอียด 1 องศา (ต่อ)

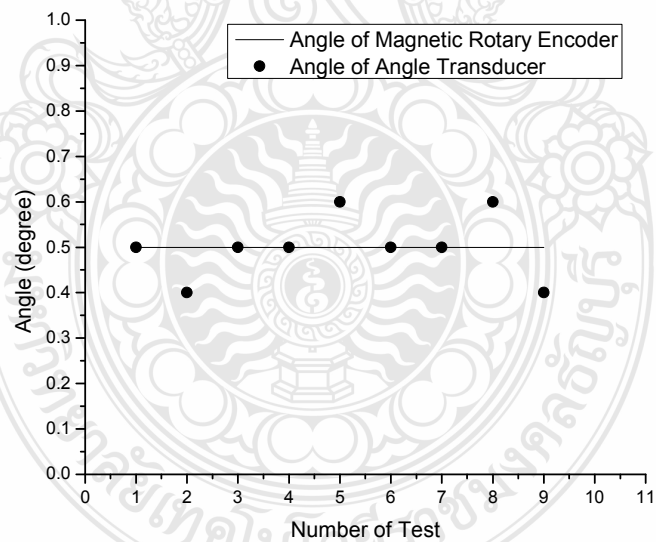
มุม	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 4.6 การกำหนดค่ามุมจากแรงดันเอาต์พุตที่วัดได้ที่ความละเอียด 0.1 องศา

มุม	แรงดันเอาต์พุตที่วัดได้	แปลงเป็นดิจิตอล	แปลงเป็นฐาน 10	ค่าที่กำหนด
0	2.215	011010100110	1704	1703 - 1705
0.1	2.213	011010100100	1702	1702-1701
0.2	2.210	011010100010	1700	1700-1699
0.3	2.206	011010011101	1697	1698 - 1696
0.4	2.202	011010011010	1694	1695 – 1692
0.5	2.196	011010011001	1689	1691 – 1688
0.6	2.190	011010010101	1685	1687 – 1683
0.7	2.184	011010010000	1680	1682 – 1678
0.8	2.178	011010001011	1675	1677 -1674
0.9	2.172	011010000111	1671	1673 – 1669
1	2.166	011010000010	1666	1668 - 1663

ตารางที่ 4.7 มุมที่วัดโดยทรานสดิวเซอร์วัดมุม ที่ความละเอียด 0.1 องศา

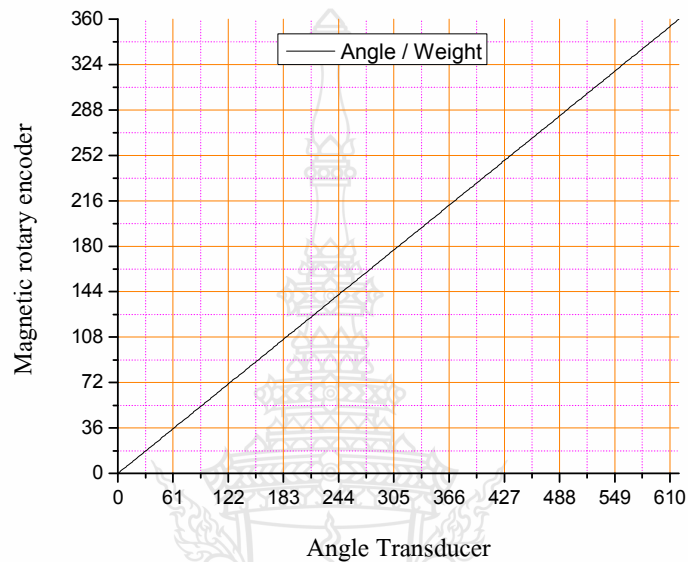
มุม	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10
0	0	0	0	0	0.1	0	0	0.1	0	0
0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0	0.1	0.2	0	0.1
0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2
0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3
0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4
0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5
0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	0.6
0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.6	0.7
0.8	0.7	0.7	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8
0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	1	0.9	0.9	1	0.8	0.9
1	1	0.9	1	1	1.1	1	1	1.1	0.9	1



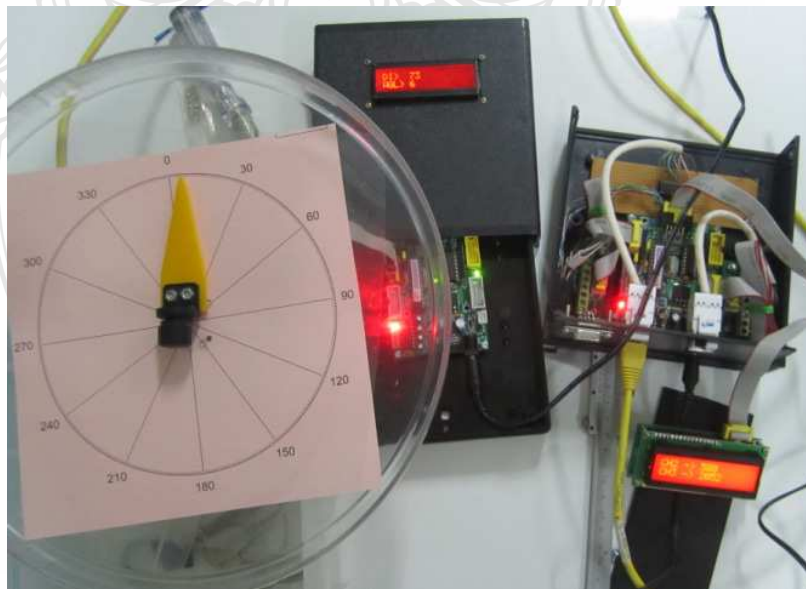
ภาพที่ 4.9 ค่าความผิดพลาดของมุมที่วัดได้โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุม ที่ความละเอียด 0.1 องศา ที่มุม 0.5 องศา

4.2 การทดสอบชุดวัดมุมสำหรับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบสปริงแสดงผลแบบดิจิทัล

จากโปรแกรมแปลผลในหัวข้อ 3.2 นำมาทดสอบการแปลผลมุมกับ แมคเนติกโรตารีเอ็นโคเดอร์ได้ผลการแปลค่าน้ำหนักดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.10 แปลผลจากมุม 360 องศา เป็นน้ำหนัก 60 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.11 ชุดทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์และตัวแสดงผล

ในภาพที่ 4.11 นำทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้ในการแปลงค่าเชิงแบบสปริงให้สามารถแสดงผลแบบดิจิทัล จากการทดสอบไม่สามารถนำทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ออกแบบมาประยุกต์กับเครื่องชั่งแบบสปริงได้เนื่องจาก ตำแหน่งในการติดตั้งแม่เหล็กคือเข็มตาชั่งซึ่งตาชั่งแบบสปริงเมื่อทำการชั่งเข็มจะเคลื่อนที่ตามกลไก และเกิดการสั่นทำให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์และรัศมีการเคลื่อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาไม่สามารถวัดผลการตอบสนองที่แน่นอนได้

4.3 สรุปผลการทดสอบ

ผลจากการทดลองออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ขนาดกว้าง มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร เบอร์ 1A1302 ซึ่งมีคุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์ความไวเท่ากับ 1.3 mV/G ใช้แม่เหล็ก ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร ยาว 5.5 มิลลิเมตร โครงสร้างที่รัศมีการวางเซ็นเซอร์ ห่างจากจุดศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวน 5 ตัววางทำมุมกัน 72 องศา ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 12 บิต ในการประมวลผล สามารถวัดมุมแบบหมุนรอบแกน ได้ตั้งแต่ 0-360 องศา ที่ความละเอียด 1 องศา มีค่าผิดพลาด ± 0.2 องศา เกิดจากแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ตรวจจับได้ มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ ± 0.002 โวลต์ และที่ความละเอียด 0.1 องศา มีค่าผิดพลาด ± 0.5 องศา เกิดจากค่าความผิดพลาดของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

นำทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้ในการแปลงค่าเชิงแบบสปริงให้สามารถแสดงผลแบบดิจิทัล จากการทดสอบไม่สามารถนำทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ออกแบบมาประยุกต์กับเครื่องชั่งแบบสปริงได้เนื่องจากตำแหน่งในการติดตั้งแม่เหล็กคือเข็มตาชั่งซึ่งตาชั่งแบบสปริงเมื่อทำการชั่งเข็มจะเคลื่อนที่ตามกลไก และเกิดการสั่นทำให้ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์และรัศมีการเคลื่อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาไม่สามารถวัดผลการตอบสนองที่แน่นอนได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะทำการสรุปผลการวิจัยในหัวข้อเรื่อง “การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์” เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมสามารถวัดมุมแบบรอบแกน 360 องศา และราคาถูกตามที่ได้ทำการศึกษา และออกแบบในบทที่ 3 และทดสอบคุณสมบัติของทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ทำการออกแบบ ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 เพื่อสรุปผลพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการออกแบบ ผลการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

5.1 สรุป

จากการศึกษา และออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์จะสามารถตรวจจับได้ ที่ทำการศึกษาครั้งนี้ปัจจัยแรกการเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่แม่เหล็กเคลื่อนที่ซ็อนฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ตั้งแต่มุม 0 จนถึง 360 องศา ปัจจัยที่สองเกิดจากระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ และปัจจัยที่สามเกิดจากสนามแม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับ พื้นที่หรือตัวกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ในการออกแบบจำเป็นจะต้องทราบค่าความเปลี่ยนแปลงทั้งหมดตามที่กล่าวมา

ผลจากการทดลองออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร ยาว 3 มิลลิเมตร เบอร์ 1A1302 ซึ่งมีคุณสมบัติของค่าสัมประสิทธิ์ความไวเท่ากับ 1.3 mV/G ใช้แม่เหล็ก ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร ยาว 5.5 มิลลิเมตร โครงสร้างที่รัศมีการวางเซนเซอร์ ห่างจากจุดศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร จำนวน 5 ตัววางทำมุมกัน 72 องศา ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 12 บิต ในการประมวลผล สามารถวัดมุมแบบหมุนรอบแกน ได้ตั้งแต่ 0-360 องศา ที่ความละเอียด 1 องศา มีค่าผิดพลาด ± 0.2 องศา เกิดจากแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ตรวจจับได้ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ ± 0.002 โวลต์ และที่ความละเอียด 0.1 องศา มีค่าผิดพลาด ± 0.5 องศา เกิดจากค่าความคลาดเคลื่อนของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

นำทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ทำการออกแบบมาประยุกต์ใช้ในการแปลงตาชั่งแบบสปริงให้สามารถแสดงผลแบบดิจิตอล จากการทดสอบไม่สามารถนำทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่ออกแบบมาประยุกต์กับเครื่องชั่งแบบสปริงได้เนื่องจาก ตำแหน่งในการติดตั้งแม่เหล็กคือเข็มตาชั่งซึ่งตาชั่งแบบสปริงเมื่อทำการชั่งเข็มจะเคลื่อนที่ตามกลไก และเกิดการสั่นทำให้

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ และรัศมีการเคลื่อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาไม่สามารถ วัดผลการตอบสนองที่แน่นอนได้

วิทยานิพนธ์นี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปช่วยในการศึกษาวิจัย และพัฒนาทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ที่สามารถวัดมุมที่ความละเอียดสูงมากยิ่งขึ้น และสามารถวัดได้มากกว่าระบบระนาบ 2 มิติหรือ ระนาบ x, y เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา

ทรานสดิวเซอร์วัดมุม โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถวัดมุมได้ตั้งแต่ $0 - 360$ องศา ความละเอียดสูงสุดที่วัดได้คือ 0.1 องศาแต่มีค่าความผิดพลาดสูงถึง 0.2 องศา แนวทางการพัฒนาทรานสดิวเซอร์วัดมุมให้ดีขึ้นเช่น

5.2.1 เพิ่มความละเอียดสูงสุดที่วัดได้ โดยการเพิ่มจำนวนฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์หรือเพิ่มจำนวนแม่เหล็ก

5.2.2 ลดค่าความผิดพลาด โดยนำฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ชั้นสูงเข้ามาช่วยในการคำนวณหาค่ามุม

5.2.3 เพิ่มระนาบในการวัดเป็น 3 มิติหรือ ระนาบ x, y, z โดยการเพิ่มเซ็นเซอร์เพื่อวัดความแตกต่างมุมในแกน z

สุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่า ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปช่วยในการศึกษาวิจัย และพัฒนาทรานสดิวเซอร์วัดมุมเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการต่อไป

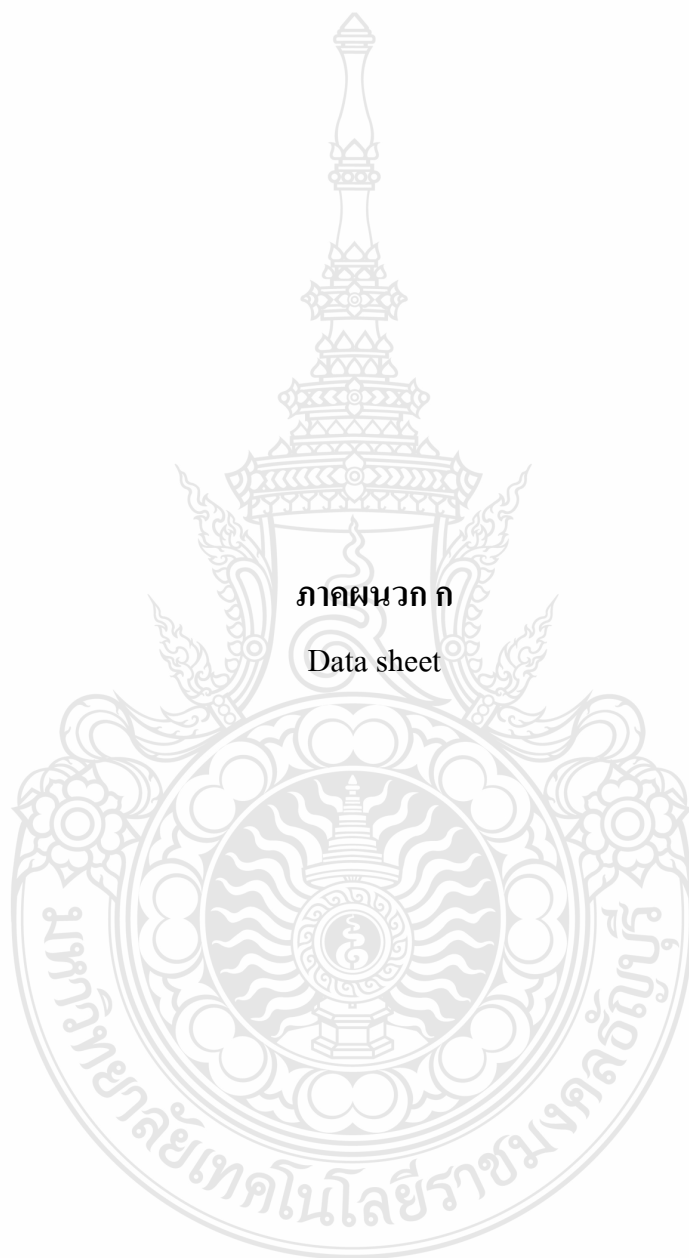
รายการอ้างอิง

- [1] ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล, “คู่มือนักอิเล็กทรอนิกส์” กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2550. หน้า 144-145.
- [2] วิศรุต ศรีรัตนะ, “เซนเซอร์และทรานสดิวเตอร์ในงานอุตสาหกรรม”. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2550. หน้า 137-150.
- [3] David S. Nyce, “**Linear Position Sensors Theory and Applications**”, USA, Wiley-Interscience. 2004
- [4] P. Kejik, S. Reymond, and R.S. Popovic, “**Circular Hall Transducer For Angular Position Sensing**”, France, 2007
- [5] จรัส บุญขรรพมา, “**ฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัยภาคกลศาสตร์**”. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น, 2543. หน้า 267-297.
- [6] มงคล ทองสงคราม, “**พื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า 1**”, กรุงเทพฯ: บรามาการพิมพ์ จำกัด 2542. หน้า 135 -142.
- [7] David, S. N., “**Linear Position Sensors Theory and Applications**”. USA: Wiley-Interscience, 2004.
- [8] Joe G., “**Linear Hall-Effect Sensors**” (Online), 2002. Available: <http://www.allegromicro.com> (20 March 2010).
- [9] Honeywell, “**Hall Effect Sensing And Application**” (Online). Available: http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847 (20 March 2010)
- [10] Ferrazzin D., et al., “**Hall Effect Sensor-Based Linear Transducer**”, International Workshop on Robot and Human Interaction (Electronic), 1999, pp. 219-224. Available: IEEE Organization / IEEE Xploer (20 March 2010).
- [11] สมศักดิ์ กิรติวุฒิสเรษฐ, “**หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**”. พิมพ์ครั้งที่ 18. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2546. หน้า 17-1~17-8.
- [12] พิสมัย สุภัทรานนท์, “**การวัดและการทดสอบทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์**”, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2543. หน้า 277-292.

- [13] วีรบุลย์ หล่อวิเชียรรุ่ง, อรรถพล บุญยะโกคา และชัยวัฒน์ ลี้มพรจิตรวิไล, “ระบบดัดแอกควิชิชั่น”. กรุงเทพฯ: อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์, 2548. หน้า 7-38.
- [14] Steven C. C., Raymond P. C., “**Numerical Methods for Engineers**”. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2006, pp. 447-505.
- [15] นระรา เฉลิมกลิ่น, นัตริชัย สุกพิทักษ์สกุล, “การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดแรงโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกทเซนเซอร์”, ปทุมธานี: EENET2008 ,2551.
- [16] R.S.Popovic, Z.Randjelovic, D.Manic Integrated, “**Hall - effect magnetic sensors**” Sensors and Actuators ELSEVIER 2001
- [17] Andreas H.aberli, Michael Schneider, Piero Malcovati,Ruggero Castagnetti, Franco Maloberti ,Henry Baltes , “**Two-Dimensional Magnetic Microsensor with On-Chip Signal Processing for Contactless Angle Measurement**” IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, No. 12, 1996.
- [18] A. Maberli,P. Malcovati, M. Schneider, R. Castagnetti,, H. Baltes “**Contactless Angle Measurement By C Magnetic Sensor With on Chip Read Out Circuit**” The 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, 1995
- [19] P.M.Drljaca, M.Demierre, C.Schott, R.S.Popovic, “**Nonlinear Effects in Magnetic Angular Position Sensor with Integrated Flux Concentrator**”, 23rd International Conference on Microelectronic (MIEL 2002), Vol 1, YUGOSLAVIA, 2002



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

Data sheet



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Features and Benefits

- Low-noise output
- Fast power-on time
- Ratiometric rail-to-rail output
- 4.5 to 6.0 V operation
- Solid-state reliability
- Factory-programmed at end-of-line for optimum performance
- Robust ESD performance

Packages: 3 pin SOT23W (suffix LH), and 3 pin SIP (suffix UA)



Not to scale

Description

The A1301 and A1302 are continuous-time, ratiometric, linear Hall-effect sensors. They are optimized to accurately provide a voltage output that is proportional to an applied magnetic field. These devices have a quiescent output voltage that is 50% of the supply voltage. Two output sensitivity options are provided: 2.5 mV/G typical for the A1301, and 1.3 mV/G typical for the A1302.

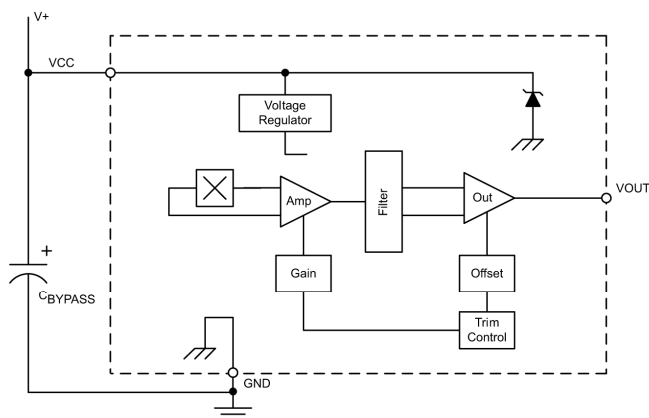
The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall sensing element, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall sensing element and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog signals.

High precision in output levels is obtained by internal gain and offset trim adjustments made at end-of-line during the manufacturing process.

These features make the A1301 and A1302 ideal for use in position sensing systems, for both linear target motion and rotational target motion. They are well-suited for industrial applications over extended temperature ranges, from -40°C to 125°C .

Two device package types are available: LH, a 3-pin SOT23W type for surface mount, and UA, a 3-pin ultramini SIP for through-hole mount. They are lead (Pb) free (suffix, $-T$) with 100% matte tin plated leadframes.

Functional Block Diagram



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Selection Guide					
Part Number	Pb-free ¹	Packing ²	Package	Ambient, T _A	Sensitivity (Typical)
A1301ELHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 85°C	2.5 mV/G
A1301EUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		
A1301KLHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 125°C	
A1301KUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		
A1302ELHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 85°C	1.3 mV/G
A1302EUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		
A1302KLHLT-T	Yes	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	-40°C to 125°C	
A1302KUA-T	Yes	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		

¹Pb-based variants are being phased out of the product line. Certain variants cited in this footnote are no longer in production. The variants should not be purchased for new design applications. Samples are no longer available. Status change: May 1, 2006. These variants include: A1301ELHLT, A1301EUA, A1301KLHLT, A1301KUA, A1302ELHLT, A1302EUA, A1302KLHLT, and A1302KUA.

²Contact Allegro for additional packing options.



Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	V _{CC}		8	V
Output Voltage	V _{OUT}		8	V
Reverse Supply Voltage	V _{RCC}		-0.1	V
Reverse Supply Voltage	V _{RCC}		-0.1	V
Output Sink Current	I _{OUT}		10	mA
Operating Ambient Temperature	T _A	Range E	-40 to 85	°C
		Range K	-40 to 125	°C
Maximum Junction Temperature	T _{J(max)}		165	°C
Storage Temperature	T _{stg}		-65 to 170	°C



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

DEVICE CHARACTERISTICS over operating temperature range, T_A , and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise noted

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Electrical Characteristics						
Supply Voltage	V_{CC}	Running, $T_J < 165^\circ\text{C}$	4.5	–	6	V
Supply Current	I_{CC}	Output open	–	–	11	mA
Output Voltage	$V_{OUT(High)}$	$I_{SOURCE} = -1$ mA, Sens = nominal	4.65	4.7	–	V
	$V_{OUT(Low)}$	$I_{SINK} = 1$ mA, Sens = nominal	–	0.2	0.25	V
Output Bandwidth	BW		–	20	–	kHz
Power-On Time	t_{PO}	$V_{CC(min)}$ to $0.95 V_{OUT}$, $B = \pm 1400$ G; Slew rate = 4.5 V/ μs to 4.5 V/100 ns	–	3	5	μs
Output Resistance	R_{OUT}	$I_{SINK} \leq 1$ mA, $I_{SOURCE} \geq -1$ mA	–	2	5	Ω
Wide Band Output Noise, rms	V_{OUTN}	External output low pass filter ≤ 10 kHz; Sens = nominal	–	150	–	μV
Ratiometry						
Quiescent Output Voltage Error with respect to ΔV_{CC} ¹	$\Delta V_{OUTQ(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Sensitivity Error with respect to ΔV_{CC} ²	$\Delta \text{Sens}_{(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Output						
Linearity	Lin	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 2.5	%
Symmetry	Sym	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Characteristics						
Quiescent Output Voltage	V_{OUTQ}	$B = 0$ G; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.4	2.5	2.6	V
Quiescent Output Voltage over Operating Temperature Range	$V_{OUTQ(\Delta T_A)}$	$B = 0$ G	2.2	–	2.8	V
Magnetic Sensitivity	Sens	A1301; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.0	2.5	3.0	mV/G
		A1302; $T_A = 25^\circ\text{C}$	1.0	1.3	1.6	mV/G
Magnetic Sensitivity over Operating Temperature Range	$\text{Sens}_{(\Delta T_A)}$	A1301	1.8	–	3.2	mV/G
		A1302	0.85	–	1.75	mV/G

¹Refer to equation (4) in Ratiometric section on page 4.

²Refer to equation (5) in Ratiometric section on page 4.



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Characteristic Definitions

Quiescent Output Voltage. In the quiescent state (no significant magnetic field: $B = 0$), the output, V_{OUTQ} , equals one half of the supply voltage, V_{CC} , throughout the entire operating ranges of V_{CC} and ambient temperature, T_A . Due to internal component tolerances and thermal considerations, there is a tolerance on the quiescent output voltage, ΔV_{OUTQ} , which is a function of both ΔV_{CC} and ΔT_A . For purposes of specification, the quiescent output voltage as a function of temperature, $\Delta V_{OUTQ(\Delta T_A)}$, is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ(\Delta T_A)} = \frac{V_{OUTQ(T_A)} - V_{OUTQ(25^\circ\text{C})}}{Sens_{(25^\circ\text{C})}} \quad (1)$$

where Sens is in mV/G, and the result is the device equivalent accuracy, in gauss (G), applicable over the entire operating temperature range.

Sensitivity. The presence of a south-polarity (+B) magnetic field, perpendicular to the branded face of the device package, increases the output voltage, V_{OUT+} , in proportion to the magnetic field applied, from V_{OUTQ} toward the V_{CC} rail. Conversely, the application of a north polarity (-B) magnetic field, in the same orientation, proportionally decreases the output voltage from its quiescent value. This proportionality is specified as the magnetic sensitivity of the device and is defined as:

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

The stability of the device magnetic sensitivity as a function of ambient temperature, $\Delta Sens_{(\Delta T_A)}$ (%) is defined as:

$$\Delta Sens_{(\Delta T_A)} = \frac{Sens_{(T_A)} - Sens_{(25^\circ\text{C})}}{Sens_{(25^\circ\text{C})}} \times 100\% \quad (3)$$

Ratiometric. The A1301 and A1302 feature a ratiometric output. This means that the quiescent voltage output, V_{OUTQ} , and the magnetic sensitivity, Sens, are proportional to the supply voltage, V_{CC} .

The ratiometric change (%) in the quiescent voltage output is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ(\Delta V)} = \frac{V_{OUTQ(V_{CC})} / V_{OUTQ(5V)}}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (4)$$

and the ratiometric change (%) in sensitivity is defined as:

$$\Delta Sens_{(\Delta V)} = \frac{Sens_{(V_{CC})} / Sens_{(5V)}}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (5)$$

Linearity and Symmetry. The on-chip output stage is designed to provide linear output at a supply voltage of 5 V. Although the application of very high magnetic fields does not damage these devices, it does force their output into a nonlinear region. Linearity in percent is measured and defined as:

$$Lin+ = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(+B/2)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (6)$$

$$Lin- = \frac{V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(-B/2)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (7)$$

and output symmetry as:

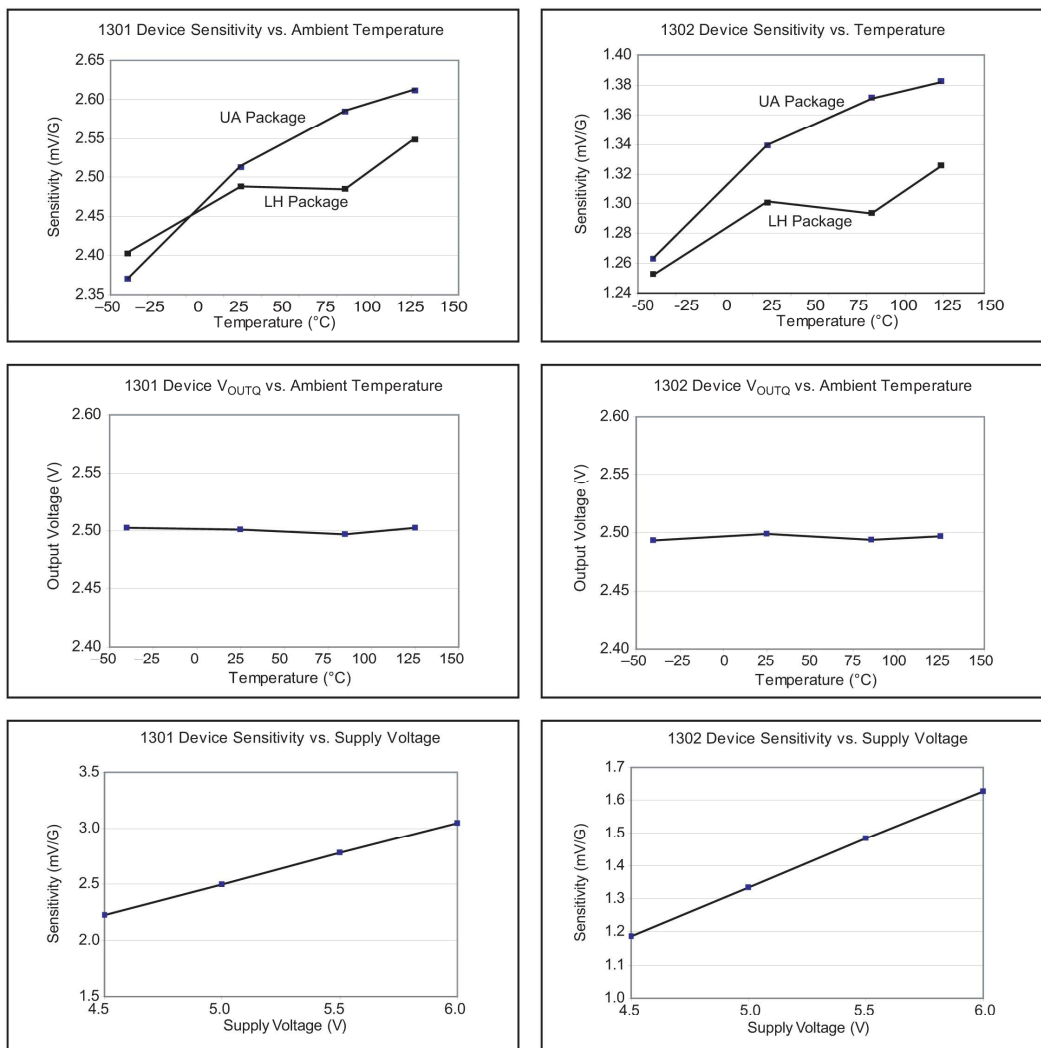
$$Sym = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{V_{OUTQ} - V_{OUT(-B)}} \times 100\% \quad (8)$$



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Typical Characteristics (30 pieces, 3 fabrication lots)



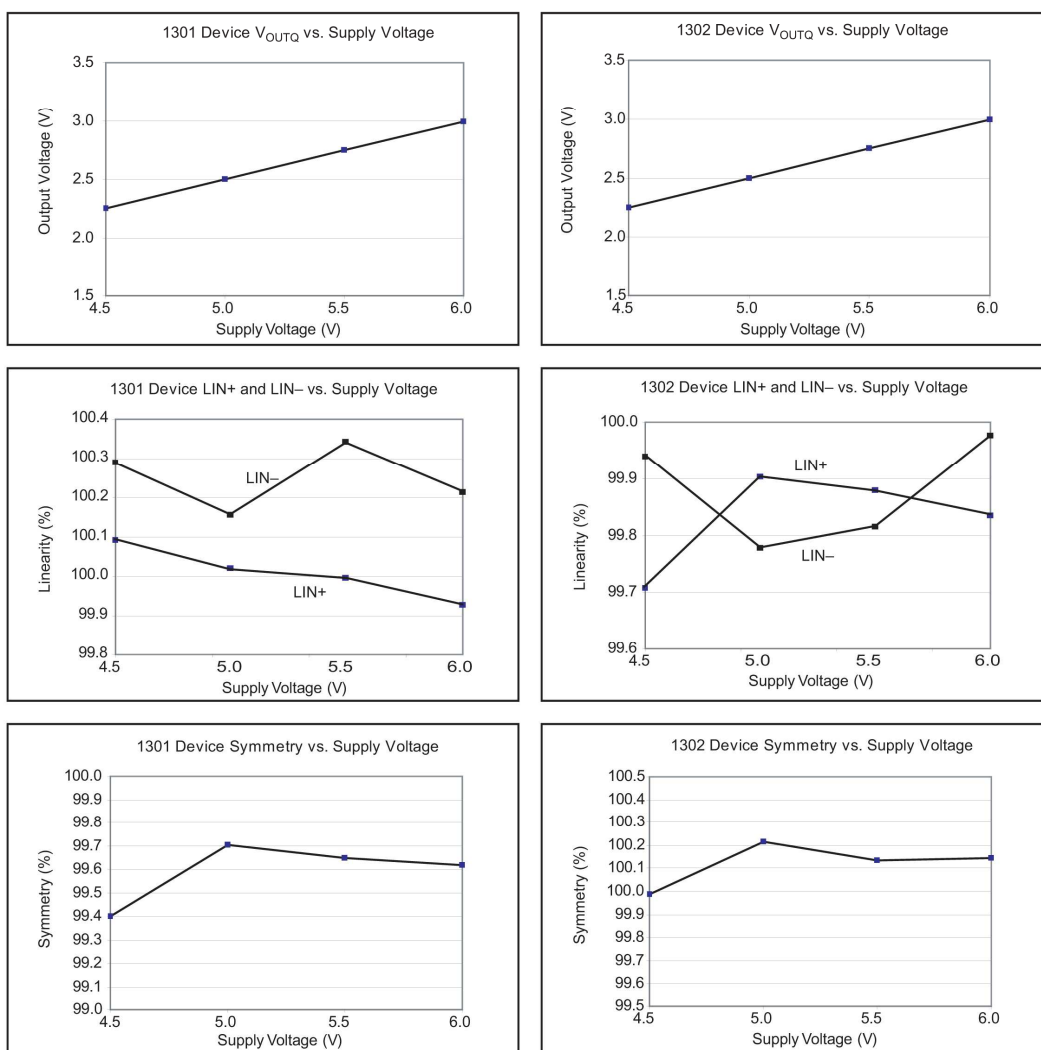
Continued on the next page...



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

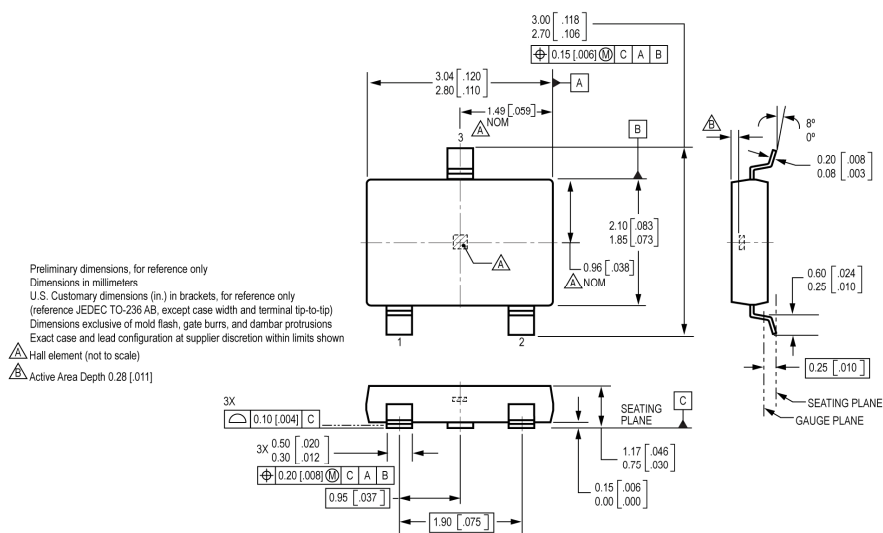
Typical Characteristics, continued
(30 pieces, 3 fabrication lots)



**A1301 and
A1302**

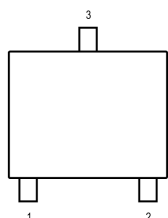
***Continuous-Time Ratiometric
Linear Hall Effect Sensors***

Package LH, 3-Pin; (SOT-23W)

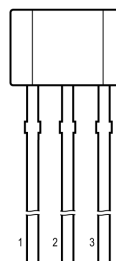


Pin-out Drawings

Package LH



Package UA



Terminal List

Symbol	Number		Description
	Package LH	Package UA	
VCC	1	1	Connects power supply to chip
VOUT	2	3	Output from circuit
GND	3	2	Ground

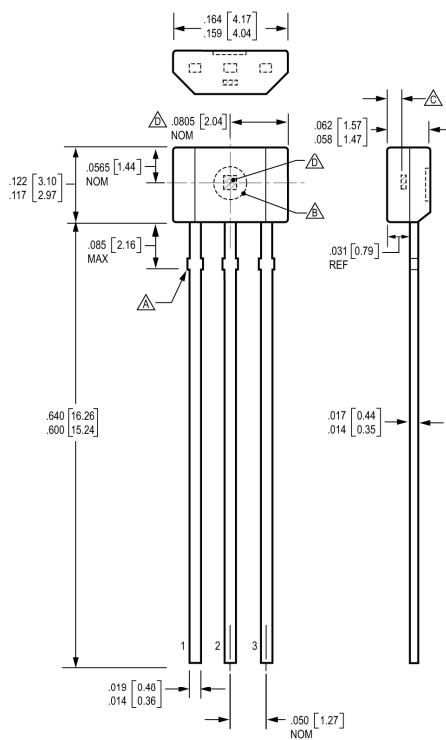


Allegro MicroSystems, Inc.
 115 Northeast Cutoff, Box 15036
 Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
 www.allegromicro.com

A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Package UA, 3-Pin SIP



Dimensions in inches
Metric dimensions (mm) in brackets, for reference only

- Dambar removal protrusion (6X)
- Ejector mark on opposite side
- Active Area Depth .0195 [0.50] NOM
- Hall element (not to scale)

The products described herein are manufactured under one or more of the following U.S. patents: 5,045,920; 5,264,783; 5,442,283; 5,389,889; 5,581,179; 5,517,112; 5,619,137; 5,621,319; 5,650,719; 5,686,894; 5,694,038; 5,729,130; 5,917,320; and other patents pending.

Allegro MicroSystems, Inc. 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 products are not authorized for use as critical components in life-support devices or systems without express written approval.

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

Copyright © 2005, 2006 Allegro MicroSystems, Inc.



Allegro MicroSystems, Inc.
115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
www.allegromicro.com

AEAT-6010/6012 Magnetic Encoder

10 or 12 bit Angular Detection Device

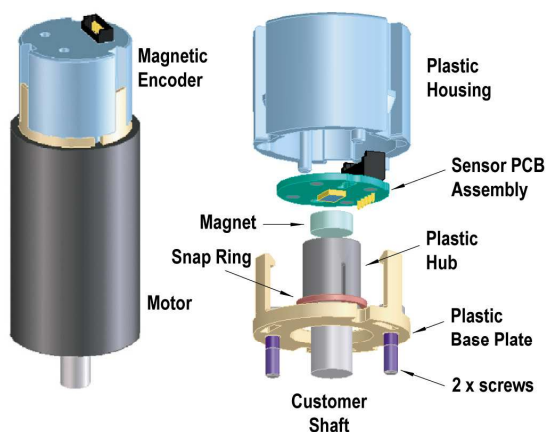


Data Sheet

Description

Avago Technologies' AEAT-60xx series of magnetic encoders provides an integrated solution for angular detection. With ease of use in mind, these magnetic encoders are ideal for angular detection within 360°. Based on magnetic technologies, the device is non-contact and ensures reliable operations. It is able to provide absolute angle detection upon power-up, with a resolution of 0.0879°(12 bits version) or 0.35°(10bits version), which is equivalent to 4096 and 1024 positions per revolution respectively. The positional data is provided in serial bit stream. There is no upper speed limit; the only restriction is that there will be fewer samples per revolution as the speed increases.

Exploded View



Features

- 10 or 12 bits resolution
- Contactless sensing technologies
- Wide temperature range from -40° to 125°C
- Absolute angular position detection
- Synchronous serial interface (SSI) output for absolute position data (binary format)
- Code monotony error = ± 1 LSB
- Single 5V supply
- Easy Assembly, No Signal Adjustment required
- Direct Connectivity through PCB
- RoHS compliant

Applications

- Flow meter
- Angular detection
- Knob control
- Rotary encoder

Note: "This product is not specifically designed or manufactured for use in any specific device. Customers are solely responsible for determining the suitability of this product for its intended application and solely liable for all loss, damage, expense or liability in connection with such use."

Device Selection Guide ^[1]

Part Number	Resolution (bit)	Operating Temperature (°C)	Output Communication	DC Supply Voltage (V), V _{DD}
AEAT-6012	12	-40 to +125	Serial	+5.0
AEAT-6010	10	-40 to +125	Serial	+5.0

Notes:

- For other options of Magnetic Encoder, please refer to factory.

Table 1. Absolute Maximum Ratings ^[1, 2]

Parameter	Symbol	Limits	Units	Notes
DC Supply Voltage at pin V _{DD} = 5V	V _{DD}	-0.3 to +7	V	
Input Voltage	V _i	-0.3 to V _{DD} +0.3	V	
Storage Temperature	T _{STG}	-40 to 125	°C	

Notes:

- Stresses greater than those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.
- Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect reliability.

Table 2. Recommended Operating Condition

Parameter	Symbol	Values	Units	Notes
DC Supply Voltage at pin V _{DD} = 5V	V _{DD}	+4.5 / +5.5	V	
Ambient Temperature	T _{amb}	-40 to +125	°C	
Maximum Read-out Frequency	f _{CLK}	≤1	MHz	>0 MHz

Table 3. DC Characteristics

DC Characteristics over Recommended Operating Range, typical at 25 °C

Parameter	Symbol	Condition	Values			Units	Notes
			Min	Typ.	Max		
VDD Supply Current	I _{DD}			16	20	mA	
Output High Voltage D0	V _{OH}		V _{DD} -0.5			V	
Output Low Voltage D0	V _{OL}				V _{SS} +0.4	V	
Output Current D0	I _O				4	mA	V _{DD} pin = 4.5V
Input High Voltage CLK, CSn	V _{IH}		0.7*V _{DD}				1
Input Low Voltage CLK, CSn	V _{IL}				0.3*V _{DD}		

Notes:

- CSn is internal pull-up.

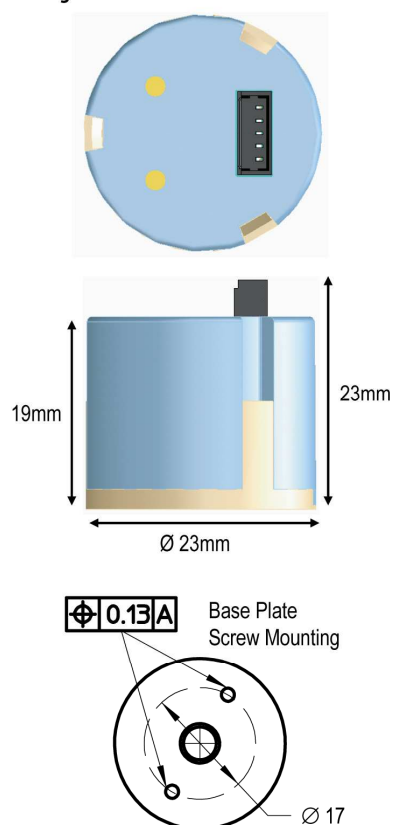
Table 4. Timing Characteristics

Timing Characteristics over Recommended Operating Range, typical at 25 °C

Parameter	Symbol	Condition	Values			Units	Notes
			Min	Typ.	Max		
Data output activated (logic high)	$T_{DO\ active}$				100	ns	2
First data shifted to output register	$t_{CLK\ FE}$		500			ns	3
Start of data output	$T_{CLK/2}$		500			ns	4
Data output valid	$T_{DO\ valid}$				375	ns	5
Data output tristate	$T_{DO\ tristate}$				100	ns	6
Pulse width of CSn	T_{CSn}		500			ns	7
Sampling rate for absolute output	f_{abs}		9.9	10.42	10.94	kHz	8

Notes:

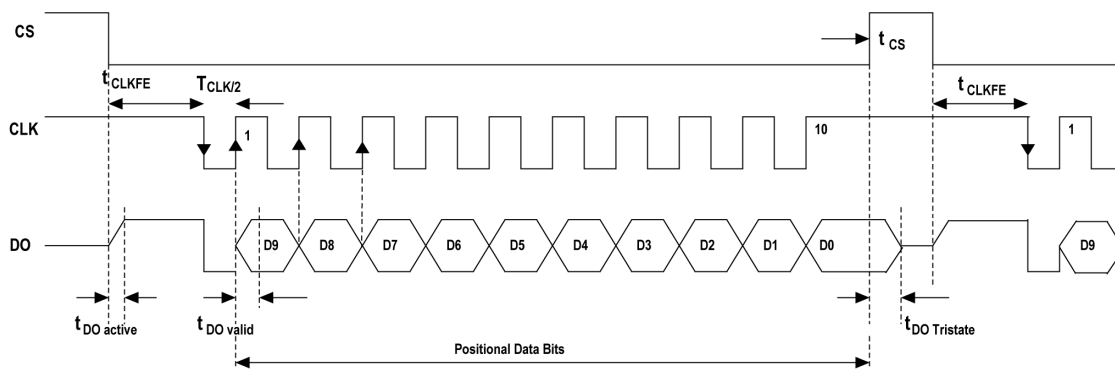
- Time between falling edge of CSn and data output activated
- Time between falling edge of CSn and first falling edge of CLK
- Rising edge of CLK shifts out one bit a time
- Time between rising edge of CLK and data output valid
- After the last bit DO changes back to "tristate"
- CSn=high; To initiate read-out of next angular position
- Internal sampling rate.

Package Dimensions**Figure 1. Package and recommended mounting dimension****Parameters**

No.	Parameter	Value
1	Operating Temp(°C)	- 40 to +125
2	Shaft axial play (mm)	± 0.08
3	Shaft TIR (mm)	0.05
4	Mechanical speed (rpm)	12,000
5	Shaft diameter (mm)	6 + 0 / -0.01
6	Moment inertia (g-cm ²)	0.104
7	Shaft length – (mm)	8.5 ±1.0
8	Mounting screw size (mm)	M2 x 0.4 x 4 (socket head cap screw, head Ø3.8 ± 0.18 mm)
9	Recommended screw torque	0.6 lb.inch
10	Encoder base plate thickness (mm)	2
11	Bolt circle	± 0.13

* Note:- For high temperature application, it is highly recommended that adhesive be applied at least to the screw and the base plate interface. Refer Application Note for further details.

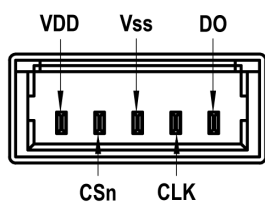
Timing Characteristics



- Notes:
1. Please refer to Table 4 for Timing Characteristics.
 2. For 12 bits version; the Positional Data Bits will start with D11 instead and end at D0.

Figure 2. Timing Diagram for 10 bit Magnetic Encoder

Electrical Connections



Pin	Symbol	Description
1	VDD	5V Supply Voltage
2	CSn	Chip Select – Input (See Figure 2)
3	VSS	Supply Ground
4	CLK	Serial Clock - Input (See Figure 2)
5	DO	Serial Data - Output. (See Figure 2)

Figure 3. Electrical Connections

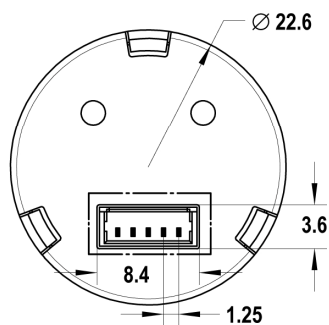


Figure 4. Basic connector dimensions

For product information and a complete list of distributors, please go to our web site: www.avagotech.com

Avago, Avago Technologies, and the A logo are trademarks of Avago Technologies, Limited in the United States and other countries. Data subject to change. Copyright © 2007 Avago Technologies Limited. All rights reserved. AV02-0188EN - March 20, 2007





ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] สรยัณ บุญทาศรี, นัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล. “ออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกทเซ็นเซอร์”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 4 (EENET 2012), โรงแรมแกรนด์พาราไดส์, จังหวัดหนองคาย, 3 - 5 เมษายน, 2555, หน้า 68-71.
- [2] สรยัณ บุญทาศรี, นัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล. “การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกทเซ็นเซอร์”, การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 4 (ECTI-CARD 2012), หอประชุมใหญ่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, จังหวัด, 20 -22 มิถุนายน, 2555

Electrical Engineering Network 2012

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



ดอกแกลด ดอกไม้ประจำมหาวิทยาลัย

CONFERENCE TOPICS

GROUP 1 (PE)

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

GROUP 2 (PW)

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

GROUP 3 (RE)

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

GROUP 4 (TE)

Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

GROUP 5 (CP)

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

GROUP 6 (GN)

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



GRAND PARADISE HOTEL
Nong Khai, THAILAND
April 3-5, 2012

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร.วีระเชษฐ ขันเงิน	
รศ. ดร.วิจิตร กิณเรศ	
รศ. ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	
รศ. ดร.เวคิน ปิยะรัตน์	
รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง	
รศ. ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	
รศ. ดร.เสถียร ธัญญศรีรัตน์	
ผศ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ	
ผศ. ดร.อภิรัตน์ อูร์โสภณ	
ผศ. ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงวิบูล	
ผศ. ดร.อาทิตย์ โสตรโยม	
ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ	
ผศ. ดร.กองพล อารีรักษ์	
ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ	
ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์	
รศ.ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
ดร.อุเทน คำนำน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
นายณรงค์ นันทกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
ผศ.กฤษดา ยิ่งขยัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
นายเอกทัศน์ พฤษวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
ดร.จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
ผศ.ชาญชัย เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่
ดร.จักรกฤษณ์ เคลือบวัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายสมนึก เครือสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายทัศนะ ถมทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
ผศ.อภิศักดิ์ ขันแก้วหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ผศ.สุรสิทธิ์ แสนทอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายเอกสิทธิ์ สุมนพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายปริชาม หาไม้	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายก่อเกียรติ ออดทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
รศ.ดร.ชวช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ประเสริฐ เพ็ญหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.พันธ์พงศ์ อภิชาติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.สุทธินันท์ ดันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ศิริชัย ภาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายกิตติวุฒิ จินนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายรุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายเอกจิต คุ้มวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นางอุษา คงเมือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายชิตติสรณ์ วิจิโต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายบุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายวุฒิวินน์ คงรัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายชูศักดิ์ กุลฉันทิธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายวินัย เมฆาวิท	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายชาญฤทธิ์ ชาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายสมพล โคศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายทัศนพันธ์ สุวรรณทัต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายจตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นัฐโชติ รักรไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิคพันธ์ คุณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายชนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายทอง ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายสมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.พิชญ์ ดาราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายมนัส บุญเพียรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพนา คูลีตากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.กิจจา ถักยงอำนวยการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.โกศล นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิลमित นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายเกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายฉนวนพันธ์ ้วยวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายฉันทวีร์วรินทร์ ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.ศรีศักดิ์ น้อยไรรูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
นางสาวพัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.สรายุทธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.กระจำจ่าง พิทักษ์วงศ์วิทยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ศรีสุดา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.สมพันธ์ อำพวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ผศ.วิสุทธิ์ พงศ์พฤกษธาตุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.เมธา ทัศนกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ผศ.วิชัย ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายเอกวิทย์ หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระ รัตนภักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายรัก สกุลพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายนครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายจงเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤษฎา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายจีระพงษ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระชัย จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นายปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายเฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ผศ.ดร.ปรีชา สาครรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ดร.ภักต์วัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนธรร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
รศ.พันธ์ พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประวิช เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประยงค์ เสาร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุระ ตันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ณรงค์ สีหาจ่อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ณัฐวุฒิ โสมเกษตรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภักดีพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายสมชาย	เปียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพร้อมศักดิ์	เกียรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายนิติพงษ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฐพล	หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.จินตนา	นาคะสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ปราชญ์	คาบบัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวิโรจน์	พิราจเนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายบุญยัง	นบนอบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายอภิรดา	นามแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุทินัน	พรอนุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วินัย	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กิตติวัฒน์	นัมเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.อิฐอรัญญา	ปีติมด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายฉัตรดิพงษ์	อุทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ Angle Transducer Designing Using Hall Effect Sensing Device.

สรชัย บุญทาศรี¹ ฉัตรชัย สุทธิพิทักษกุล¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คลอง 6 อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110 โทร.02-549-3420

E-Mail: son_boon@hotmail.co.th and

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม (Angle transducer) แบบหมุนรอบแกน 360 องศา โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ (Hall effect sensor) ซึ่งมีราคาถูกตอบสนองเร็วและเป็นเชิงเส้น ใช้หลักการตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ทรานสดิวเซอร์ที่ออกแบบประกอบด้วยแกนแม่เหล็กถาวรที่สามารถเคลื่อนที่รอบแกนหมุน 360 องศาและฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ทำหน้าที่ตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตามทิศทางเคลื่อนที่ของแกนหมุน สามารถวัดมุมได้ตั้งแต่ 0 – 360 องศา ความละเอียด 0.1 องศา ค่าความผิดพลาดสูงสุด 0.13 องศา

คำสำคัญ: ทรานสดิวเซอร์วัดมุม, ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์

Abstract

This paper presents the design of angle transducer rotate around the axis 360 degrees using hall effects sensing device to recognize. That is low-cost and provides a linear output and quick response. The principle of measurement is used to detect the density of magnetic field of angle rotate around the axis 360 degrees Translation Dew's design consists Permanent magnet that can move the spindle rotation axis 360 degrees and hall effect sensor mounted in place. Serves to detect the density of magnetic. Can measure the angle from 0-360 degrees, 0.1 degrees of resolution, the highest 0.13 degree of error.

Keywords: Angle transducer, Hall Effect Sensor.

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบอุตสาหกรรมได้พัฒนาไปสู่ระบบควบคุมอัตโนมัติ การทำงานของเครื่องจักรกลถูกรับรู้กระบวนการทำงานผ่านตัวตรวจจับ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ หรือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ถูกต้อง จำเป็นจะต้องมี

ตัวตรวจจับที่แม่นยำ ยิ่งตัวตรวจจับมีความละเอียดมาก การควบคุมก็จะมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นด้วย ตัวตรวจจับมุมได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการต่างๆมากมาย แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ

1. กระบวนการทางแสง[1] [2] ข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำและความไวสูง อาศัยการใช้งานยาวนาน มีข้อเสียราคาที่มีความไวต่อสิ่งสกปรก และฝุ่น

2. กระบวนการเปลี่ยนค่าความต้านทาน[2] ข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำ ง่ายต่อการนำไปแปลผล ข้อเสีย มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส การตอบสนองช้า การเคลื่อนที่แบบฉับพลันอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ มุมที่วัดได้จำกัดที่ 0 – 270 องศา

3. กระบวนการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า[2] [3] ข้อดีคือการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพื่อกำเนิดความถี่ที่เป็นสัดส่วนกับการเคลื่อนที่ ข้อเสีย และมีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส การตอบสนองช้า มุมที่วัดได้จำกัดที่ 0 – 270 องศา

4. กระบวนการฮอลล์เอฟเฟกต์[2][4][5] ข้อดีคือการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นสัดส่วนกับมุมที่เปลี่ยนไปราคาถูกตอบสนองเร็วและเป็นเชิงเส้น การติดตั้งง่ายไม่จำเป็นต้องยึดแกนหมุนติดกับตัวเซ็นเซอร์โดยตรง และไม่มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส จากข้อได้เปรียบนี้ทำให้ถูกนำไปใช้ในระบบควบคุมต่างๆมากมาย

บทความนี้จึงนำหลักการฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์มาพัฒนาทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดมุม 360 องศาเพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัด โดยการแบ่งผลการวัดมุมเป็นช่วงๆ เพื่อลดค่าความผิดพลาดสูงสุด

2. ทฤษฎีและการออกแบบ

งานวิจัยนี้นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ใช้การตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมาออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมแบบหมุนรอบแกน 360 องศา มีทฤษฎีและการออกแบบดังนี้

2.1 ฮอลล์เอฟเฟกต์

ฮอลล์เอฟเฟกต์[6] ใช้ในการตรวจจับความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดความต่างศักย์ค่าหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ค่าความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทางด้านลบ (-) แต่ถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ค่า

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นทางด้านบวก (+) ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กดังนี้

$$B = (V_B - V_O)K^{-1} \quad (1)$$

โดยที่ V_O คือ ความต่างศักย์ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก

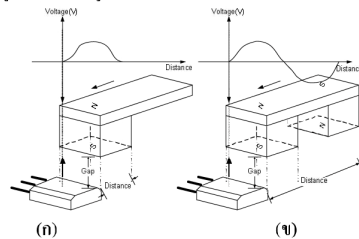
V_B คือ ความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็ก

K คือ สัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเทสลา (V/T);

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่น ฟลักซ์

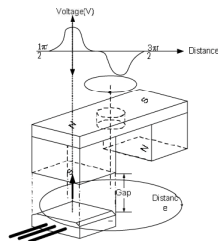
แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

การใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์สำหรับการตรวจสอบตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ผ่าน (Slide-by) ทั้งแบบแม่เหล็ก ขั้วเดี่ยว(Unipolar) และ ขั้วคู่ (Bipola) ดังรูปที่ 1

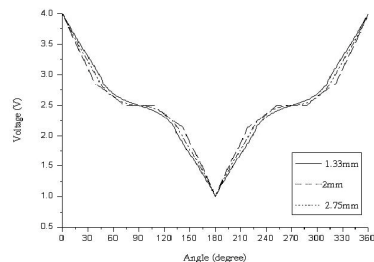


รูปที่ 1 การใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์สำหรับการตรวจสอบตำแหน่ง(ก)เคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กขั้วเดี่ยว (ข)เคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กขั้วคู่

ทดลองเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน โดยมีรัศมีต่างกันซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน กับมุมดังรูปที่ 3 โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เบอร์ A 1302 [7]



รูปที่ 2 การทดลองเคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กขั้วคู่แบบเคลื่อนที่รอบจุดหมุน

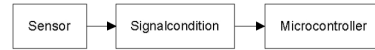


รูปที่ 3 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัดได้ ที่รัศมี 1.3 มิลลิเมตร รัศมี 2 มิลลิเมตร และรัศมี 2.75 มิลลิเมตร

2.2 การออกแบบ

ส่วนประกอบหลักของทรานสดิวเซอร์วัดมุมประกอบไปด้วย

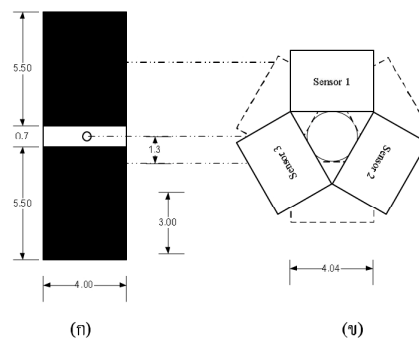
3 ส่วนหลักดังนี้



รูปที่ 4 ส่วนประกอบหลักของทรานสดิวเซอร์วัดมุม

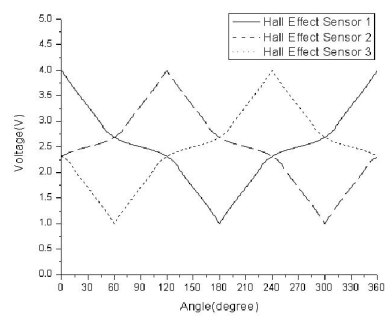
2.2.1 โครงสร้าง

จากผลการทดลองดังรูปที่ 3 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัด จะเห็นว่าที่รัศมี 1.3 มิลลิเมตรซึ่งเป็นรัศมีที่เล็กที่สุดที่สามารถทดลองได้ มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดจึงนำมาประกอบภายในโครงสร้างดังรูปที่ 5



รูปที่ 5(ก) โครงสร้างแม่เหล็กยึดกับวัสดุเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน (ข) โครงสร้างทรานสดิวเซอร์รัศมี 1.3 มิลลิเมตร

ทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างแรงดัน กับมุมซึ่งได้ผลดังรูปที่ 6 ซึ่งสัญญาณที่ได้มีความไม่เป็นเชิงเส้นในบางช่วงสูง จึงจำเป็นต้องเลือกตัดเอาเฉพาะบางช่วงมาประมวลผลโดยใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์

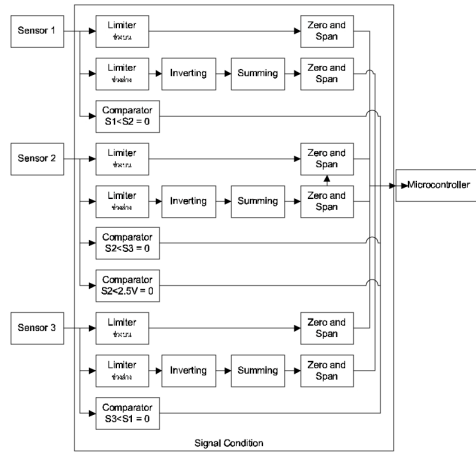


รูปที่ 6 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับมุมที่วัดได้ ที่รัศมี 1.3 มิลลิเมตร

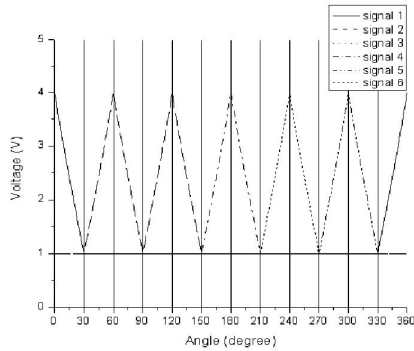
2.2.2 Signal condition

ในส่วนนี้เป็นส่วนเลือกเอาเฉพาะสัญญาณที่มีความเป็นเชิงเส้นและปรับขนาดสัญญาณ จากเซนเซอร์ ก่อนจะส่งไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลออกมาเป็นค่ามุม

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555



รูปที่ 7 ส่วนประกอบหลักของทรานสดิวเซอร์วัดมุม



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับมุมที่หลังจากปรับค่าความชันและจุดเริ่มที่เหมาะสมแล้วก่อนเข้า ส่งไปประมวลผลยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ข้อมูลดิจิตอลขนาด 4 บิตจากวงจรเปรียบเทียบแรงดันสามารถแสดงดังตาราง 1

มุม	ตัวเปรียบเทียบระหว่าง				ข้อมูล			
	H2,H5	H3,H4	H2,H3	H1,H2	A	B	C	D
0-30	>	<	<	>	0	1	1	0
30-60	>	>	<	>	0	0	1	0
60-90	>	>	<	<	0	0	1	1
90-120	>	>	>	<	0	0	0	1
120-150	>	<	<	<	0	1	1	1
150-180	>	<	>	>	0	1	0	0
180-210	>	<	<	>	1	1	1	0
210-240	>	>	<	>	1	0	1	0
240-270	>	>	<	<	1	0	1	1
270-300	>	>	>	<	1	0	0	1
300-330	>	<	<	<	1	1	1	1
330-360	>	<	>	>	1	1	0	0

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขการเปรียบเทียบแรงดันและข้อมูลดิจิตอลขนาด 4 บิตที่ใช้สำหรับควบคุมช่วงการแปลงมุม

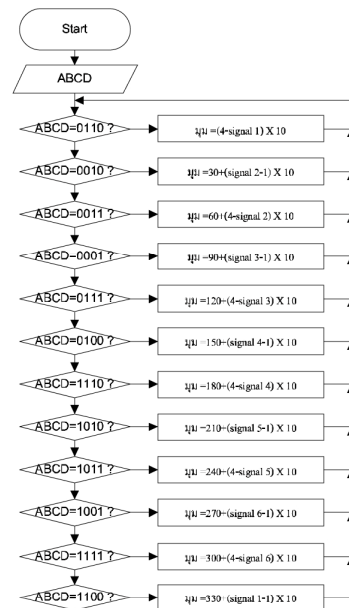
2.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ค่าความละเอียดที่ต้องการ 0.1 องศา วัดมุมตั้งแต่ 0 – 360 องศาต้องการค่าความละเอียดทั้งหมด 3,600

ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 12 บิต ในการประมวลผลมีความละเอียดที่ $2^{12} = 4096$ ซึ่งเพียงพอต่อการแสดงผลค่ามุมทั้งหมด

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การวัดค่ามุมใช้ข้อมูลดิจิตอลจำนวน 4 บิตในการประมวลผล โดยแบ่งเป็นช่วงตามผังงานการออกแบบโปรแกรม



รูปที่ 9 ผังงานการออกแบบโปรแกรมเพื่อหาค่ามุมที่วัดได้จากสัญญาณที่ผ่านการปรับแต่งมาแล้ว

จากการนำค่าแรงดันที่วัดได้จาก เอาต์พุตวงจรปรับค่าความชันและจุดเริ่มที่เหมาะสมมาทำการประมวลผลมุม จะเห็นได้ว่าเกิดค่าผิดพลาด จากความไม่เป็นเชิงเส้นขึ้น จึงทำการแก้ไขโดยวิธีการทางลิเนียร์รีเกรดชัน นิวเมอริคัล เมทอดส์ (Linear Regression Numerical Methods) เพื่อปรับให้ได้ค่าที่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น มุมที่ทำได้จากการวัดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตัวอย่างการแปลงค่ามุมจากแรงดันที่วัดได้

วัดแรงดันที่เข้ามาได้ 3.91 V ข้อมูลดิจิตอล ABCD = 0110

เป็นช่วงมุม ระหว่าง 0 – 30 องศา

$$\text{มุม} = (4 - 3.91) \times 10$$

$$\text{มุม} = 0.8 \text{ องศา}$$

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

แรงดัน			มุม			Max Error	
คำนวณ	จริง	Linear	คำนวณ	จริง	Linear	จริง	Linear
4.00	4.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.90	3.89	3.90	1.00	1.15	1.04	-0.15	-0.04
3.80	3.77	3.79	2.00	2.28	2.07	-0.28	-0.07
3.70	3.66	3.69	3.00	3.39	3.10	-0.39	-0.10
3.60	3.55	3.59	4.00	4.49	4.11	-0.49	-0.11
3.50	3.44	3.49	5.00	5.57	5.12	-0.57	-0.13
3.40	3.34	3.39	6.00	6.64	6.13	-0.64	-0.13
3.30	3.23	3.29	7.00	7.70	7.13	-0.70	-0.13
3.20	3.13	3.19	8.00	8.74	8.13	-0.74	-0.13
3.10	3.02	3.09	9.00	9.78	9.12	-0.78	-0.12
3.00	2.92	2.99	10.00	10.80	10.11	-0.80	-0.11
2.90	2.82	2.89	11.00	11.81	11.10	-0.81	-0.10
2.80	2.72	2.79	12.00	12.82	12.08	-0.82	-0.08
2.70	2.62	2.69	13.00	13.81	13.06	-0.82	-0.06
2.60	2.52	2.60	14.00	14.80	14.04	-0.80	-0.04
2.50	2.42	2.50	15.00	15.79	15.02	-0.79	-0.02
2.40	2.32	2.40	16.00	16.76	16.01	-0.76	-0.01
2.30	2.23	2.30	17.00	17.73	16.99	-0.73	0.01
2.20	2.13	2.20	18.00	18.69	17.97	-0.69	0.03
2.10	2.03	2.10	19.00	19.65	18.95	-0.65	0.05
2.00	1.94	2.01	20.00	20.61	19.93	-0.61	0.07
1.90	1.84	1.91	21.00	21.56	20.92	-0.56	0.08
1.80	1.75	1.81	22.00	22.50	21.91	-0.50	0.09
1.70	1.66	1.71	23.00	23.45	22.90	-0.45	0.10
1.60	1.56	1.61	24.00	24.39	23.90	-0.39	0.10
1.50	1.47	1.51	25.00	25.32	24.90	-0.33	0.10
1.40	1.37	1.41	26.00	26.26	25.90	-0.26	0.10
1.30	1.28	1.31	27.00	27.20	26.91	-0.20	0.09
1.20	1.19	1.21	28.00	28.13	27.93	-0.13	0.07
1.10	1.09	1.10	29.00	29.07	28.95	-0.07	0.05
1.00	1.00	1.00	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00

รูปที่ 11 ตารางแสดงค่ามุมและค่าความผิดพลาดในช่วงมุม 0 – 30 องศา

4. สรุปผล

ผลจากการทดลองของออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร ใช้แม่เหล็ก ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร สูง 5.5 มิลลิเมตร โครงสร้างที่รัศมี 1.3 มิลลิเมตร ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 12 บิต ในการประมวลผล สามารถวัดมุมได้ ตั้งแต่ 0 – 360 องศา แบบหมุนรอบแกน ความละเอียด 0.1 องศา ค่าความผิดพลาดสูงสุดก่อนทำการแก้ไขความไม่เชิงเส้น ที่มุม 12 และ 13 องศาความผิดพลาดสูงสุด 0.82 องศา และหลังจากแก้ไขความไม่เชิงเส้นโดยวิธีการทางลينيียร์เกรดชัน นิวเมอริคัลเมทอดส์ที่มุม 5, 6, 7 และ 8 องศาความผิดพลาดสูงสุด 0.13 องศา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดมุมแบบหมุนรอบแกนหมุน 360 องศา ได้เป็นที่น่าพอใจ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนซอฟต์แวร์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ รวมทั้งขอขอบคุณ คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเพื่อนที่ช่วยวิจัย สำหรับสถานที่ และวัสดุในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Baxter, Larry K., "Capacitive Sensors," IEEE Press, Piscataway N.J., 1997
- [2] Karol Bieliczyk., "Angle Measurement Using a Miniature Hall Effect Position Sensor" IEEE 2009
- [3] Yosuke Saito., "A micro-angle sensor based on laser autocollimation" SPIE--The International Society for Optical Engineering , 2005
- [4] P. Kejik, S. Reymond, and R.S. Popovic, Circular Hall Transducer For Angular Position Sensing, France, 2007
- [5] Joe Gilbert and Ray Dewey ,Linear Hall-Effect Sensors Allegro Micro Systems, Inc.
- [6] นระ เกลิมกลิ่น และฉัตรชัย สุกพิทักษ์สกุล. 2551. การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดแรงโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์, EENET2008 ปทุมธานี
- [7] A1301 and A1302 Linear Hall Effect Sensor Datasheet

ประวัติผู้วิจัย



สรินน บูนุทาศรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ค.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม จาก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเป็นอาจารย์ประจำสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจด้านระบบควบคุม และ ตัวตรวจจับอุตสาหกรรม



ดร.ฉัตรชัย สุกพิทักษ์สกุล สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร Ph.D. Northumbria University, Newcastle England

และเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ การประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัล การออกแบบทรานสดิวเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม เครื่องมือวัดด้านวิศวกรรม การแพทย์



ECTI
Association

ECTI-CARD 2012
การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 4

21 – 22 มิถุนายน 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปทุมธานี



Committee

Steering Committee

รศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกผาลิน (KMUTNB)

รศ.ดร.โกสินทร์ จันทงไทย (KMUTT)

รศ.ดร.วุฒิพงษ์ อารีกุล (KU)

General Chair

ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ (KMITL)

ศ.ดร.ประกาศ จงสถิตวัฒนา (CU)

General Co-Chairs

รศ.ดร.นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ (RMUTT)

ผศ.ดร.สมหมาย ศิวสอาด (RMUTT)

Technical Program Chair

รศ.ดร.ชาติ เจริญลาภนพรัตน์ (SIIT)

Technical Program Co-Chair

ผศ.จินตนา นาคะสุวรรณ (RMUTT)

Local Arrangement Chair

ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ (RMUTT)

Publication Chair

ผศ.ชนะพงศ์ นพวงส์ ณ อุษยา (RMUTT)

Publicity Chair

มาโนช ประชา (RMUTT)

Finance Chairs

วิโรจน์ พิราจนนชัย (RMUTT)

รุจิพรรณ สัมปันณา (BU)

ไพริน แก้วกวย (ECTI)

Exhibition Chair

สมชาย เบียนสูงเนิน (RMUTT)

Workshop Chair

ดร.ฉัตรชัย สุขพิทักษ์สกุล (RMUTT)

General Secretary

ดร.วิสิทธิ์ ถ้อยธรรมจักร (RMUTT)

General Assistant Secretary

ผศ.วัฒนา พันธุ์ล้ำเจียม (RMUTT)

Technical Program Committee

ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ (NPRU)

ดร.จิรนุช เสี่ยงศักดิ์ (KKU)

รศ.ดร.อภิวัฒน์ ธนชานนท์ (KMITL)

ดร.กสิน วิเชียรชม (KMITL)

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ (RMUTI)

ดร.ก้องภพ อยู่เย็น (NASA)

รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช (KMITL)

ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ (KMITL)

รศ.ดร.ธำรงค์ อมรรักษา (KMUTT)

รศ.ดร.จันทนา จันทราพรชัย (SU)

ดร.สุภาภรณ์ เกียรติสิน (MU)

ดร.กิตติวัฒน์ นิ่มเกิดผล (RMUTT)

รศ.ณรงค์ บวบทอง (TU)

ดร.วินัย วิชัยพาณิชย์ (RMUTT)

ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กิริตวินทกร (KMUTNB)

ดร.กมล เขมะรังษี (NECTEC)

ดร.มัชฌิภา อ่องแดง (DPU)

ดร.คามพ์เมษ บุญยะเวศ (TU)

รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ (KMITL)
 ดร.ณัฐพงษ์ ศรีรัตน์ (Skyworks)
 ผศ.ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล (RSU)
 รศ.เวก วิเวก (KMUTNB)
 ดร.สมมาตร แสงเงิน (MUT)
 ดร.ศราวุธ ชัยมูล (KMUTNB)
 ผศ.ดร.เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ (KMUTT)
 ดร.อิทธิเสก นิลกำแหง (SIIT)
 รศ.ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย (CU)
 ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ (KU)
 ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร (RMUTT)
 ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ (RMUTT)
 ผศ.ดร.ณัฐภพ นิ่มปิติวัน (BU)
 ผศ.ดร.ธวัชชัย เดชชอนันต์ (CU)
 ผศ.ดร.ปานจิต คำรงกุลกำจร (KU)
 ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง (RMUTT)
 ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม (RMUTT)
 ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม (RMUTT)
 รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ (KMITL)
 ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์ (RMUTI)
 ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ (KMITL)
 ผศ.ดร.ยุพิน สรรพคุณ (KMUTNB)
 ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง (RMUTT)
 ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม (RMUTT)
 ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม (RMUTT)
 รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ (KMITL)
 ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์ (RMUTI)
 ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ (KMITL)
 ผศ.ดร.ยุพิน สรรพคุณ (KMUTNB)
 ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ (RMUTSB)
 ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร (RMUTT)
 Mr.Lin M.M. Myint (SIU)
 ดร.วิสิทธิ์ สือธรรมจักร (RMUTT)



การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ Angle Transducer Designing Using Hall Effect Sensing Device.

สรชรัตน์ บุญทาศรี

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คลอง 6 อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110 โทร.067-5784412
E-Mail: son_boon@hotmail.co.th and

ชัชรายย์ ศุภพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คลอง 6 อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110 โทร.02-549-3420
E-Mail: schai910@yahoo.co.uk

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุม(Angle transducer)แบบหมุนรอบแกน 360 องศา โดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ (Hall effect sensor)ซึ่งมีราคาถูกออกแบบง่าย ใช้หลักการตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก ทรานสดิวเซอร์ที่ออกแบบประกอบด้วยแกนยึดแม่เหล็กถาวรที่สามารถเคลื่อนที่รอบแกนหมุน 360 องศาและฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ทำหน้าที่ตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตามทิศทางการเคลื่อนที่ของแกน

ประกอบด้วยแกนยึดแม่เหล็กถาวรที่สามารถเคลื่อนที่รอบแกนหมุน 360 องศาและฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ทำหน้าที่ตรวจจับความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กตามทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนหมุน สามารถวัดมุมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา โดยมีความคลาดเคลื่อน ± 0.2 และ ± 0.5 องศา ที่ความละเอียด 0.1 องศา และ 1 องศา ตามลำดับ

คำสำคัญ: ทรานสดิวเซอร์วัดมุม, ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์, แม่เหล็ก

Abstract

This paper presents the design of angle transducer rotate around the axis 360 degrees using hall effects sensing device to recognize. That is low-cost and simple design. The principle of measurement is used to detect the density of magnetic field of angle rotate around the axis 360 degrees Translation Dew's design consists Permanent magnet that can move the spindle rotation axis 360 degrees and hall effect sensor mounted in place. Serves to detect the density of magnetic. Can measure the angle from 0-360 degrees with accuracy of ± 0.2 and ± 0.5 at the resolution of 0.1 and 1 degree, respectively.
Keywords: Angle transducer, Hall Effect Sensor, Magnet.

1. บทนำ

ระบบควบคุมอัตโนมัติ ถูกปรับกระบวนการทำงานผ่านตัวตรวจจับ ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ หรือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ถูกต้อง จำเป็นจะต้องมีตัวตรวจจับที่แม่นยำ ยิ่งตัวตรวจจับมีความละเอียดมาก การควบคุมก็จะ

มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นด้วย ตัวตรวจจับมุมได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการต่างๆมากมาย แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ

1. กระบวนการทางแสง [1] ข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำและความไวสูง แต่มีความไวต่อสิ่งสกปรก และฝุ่น
2. กระบวนการเปลี่ยนค่าความต้านทาน [2] ข้อดีคือมีความถูกต้องแม่นยำ ง่ายต่อการนำไปแปลผล แต่มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส การตอสนของขั้ว การเคลื่อนที่แบบจับพันอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

ถูกต้องแม่นยำ ง่ายต่อการนำไปแปลผล แต่ มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส การตอสนของขั้ว การเคลื่อนที่แบบจับพันอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

3. กระบวนการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้า [3] ข้อดีคือการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพื่อกำเนิดความถี่ที่เปลี่ยนแปลงส่วนกับการเคลื่อนที่

4. กระบวนการฮอลล์เอฟเฟกต์ [4, 5] ข้อดีคือการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นสัดส่วนกับมุมที่เปลี่ยนไปราคาถูก ตบสนองเร็วและเป็นเชิงเส้น การติดตั้งง่ายไม่จำเป็นต้องยึดแกนหมุนติดกับตัวเซ็นเซอร์โดยตรง และไม่มีค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากหน้าสัมผัส

บทความนี้จึงนำหลักการฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์มาพัฒนาทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดมุม 360 องศา เพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัด โดยการแบ่งผลการวัดมุมเป็นช่วงๆ เพื่อลดค่าความผิดพลาดสูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ อาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ทำให้เกิดแรงดันฮอลล์ที่ค่าหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับค่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนี้ [5]

$$B = (VB - VO)K^{-1} \quad (1)$$

โดยที่ VO คือแรงดันฮอลล์ที่ขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก (V)

VB คือแรงดันฮอลล์ที่ขณะมีสนามแม่เหล็ก (V)

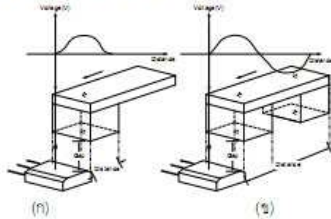
K คือสัมประสิทธิ์ความไว (V/T)

B คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก (T)

เมื่อต้องการหาค่าแรงดัน VB จะได้สมการ(2) ตามการเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

$$V_B = (B / K - 1) + V_O \quad (2)$$

การใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์สำหรับการตรวจสอบตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ผ่าน (Slide-by) ทั้งแบบแม่เหล็ก ขั้วเดียว (Unipolar) และ ขั้วคู่ (Bipolar) ดังรูปที่ 1

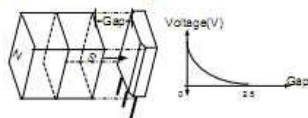


รูปที่ 1 การใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์สำหรับการตรวจสอบตำแหน่ง(ก)เคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กขั้วเดียว (ข)เคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กขั้วคู่

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ และแม่เหล็ก กับค่าแรงดัน

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กเริ่มต้นที่จุด 0 องศาจะเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมากที่สุดทำการทดสอบเพื่อหา ระยะห่างที่เหมาะสมด้วยวิธีการตรวจสอบความเข้มของสนาม แม่เหล็กแบบ Unipolarmead-on mode ดังรูปที่ 1



รูปที่ 2 การทดลองตรวจสอบความเข้มสนามแม่เหล็ก Unipolarmead-on mode

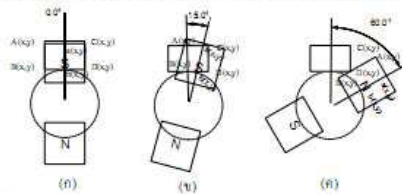
โดยตั้งระยะความห่างระหว่างขั้วได้ของแม่เหล็กถาวรกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ที่ 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเพิ่มระยะความห่างขึ้นทีละ 0.5 มิลลิเมตรจนถึง 2.5 มิลลิเมตร ทำการทดสอบซ้ำเช่นนี้เป็นจำนวน 5 ครั้งต่อตัว พร้อมกับบันทึกค่า เบอร์ที่ใช้คือ 1A1302 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความไวเท่ากับ 1.3 mV/G

ระยะห่าง (mm)	แรงดันตัวที่ 1 (V)	แรงดันตัวที่ 2 (V)	แรงดันตัวที่ 3 (V)
0.5	4.99	4.991	4.991
1	4.001	4	4.002
1.5	3.502	3.501	3.501
2	3.251	3.253	3.251
2.5	3.101	3.102	3.101

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะห่างขั้วแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ และ ค่าแรงดันเอาต์พุตเอาต์พุตเฉลี่ยของกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์แต่ละตัว

3.2 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง มุมเคลื่อนที่(องศา) ของแม่เหล็ก โดยเปลี่ยนรูปแบบการวางฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับค่าแรงดัน

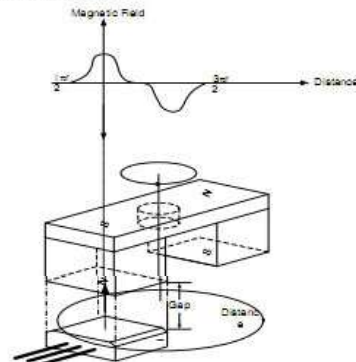
จากสมมุติฐานการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวเซนเซอร์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ตามพื้นที่ซ้อนทับระหว่างแม่เหล็ก และตัวเซนเซอร์



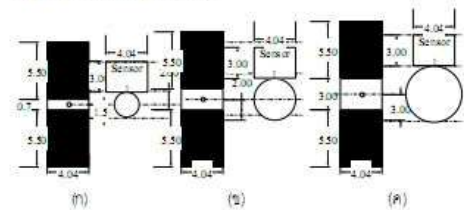
รูปที่ 3 สมมุติฐานการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนเมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านตัวเซนเซอร์

นำมาทดสอบการเคลื่อนที่แบบรอบแกนหมุนเพื่อหาค่าความเหมาะสมในการวัดค่ามุมโดยทดลองดังรูปที่ 3

การทดลอง Bipolar Slide-by Mode แบบเคลื่อนที่รอบแกนหมุนแบบตามเข็มนาฬิกา

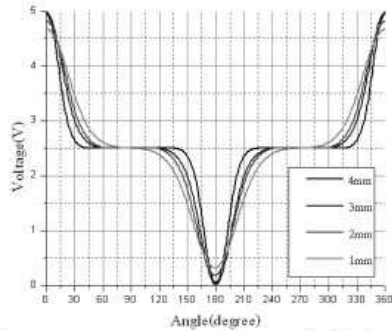


รูปที่ 4 การทดลองตรวจสอบความเข้มสนามแม่เหล็ก Bipolar Slide-by Mode แบบเคลื่อนที่รอบจุดหมุน



รูปที่ 5 (ก) ขนาดของตัวเซนเซอร์และแม่เหล็กคือ 1.5 มิลลิเมตร (ข) ขนาดของตัวเซนเซอร์และแม่เหล็กคือ 2 มิลลิเมตร (ค) ขนาดของตัวเซนเซอร์และแม่เหล็กคือ 3 มิลลิเมตร

ทำการทดลองโดยเริ่มจากวางเซนเซอร์ เส้นรอบวงของวงกลม ขอบนอกรัศมี 1.5 มิลลิเมตร รัศมี 2 มิลลิเมตร รัศมี 3 มิลลิเมตร และ รัศมี 4 มิลลิเมตร จากการวัดจริง และการคำนวณพื้นที่ซึ่งกันมีค่าความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่เป็นไปในทิศทางเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัดได้ ที่รัศมี 1.5 มิลลิเมตร 2 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ตามลำดับ

จากกราฟจะเห็นว่ารัศมีแกนหมุนยิ่งมากค่ามุมที่วัดได้น้อยลง ที่รัศมี 1.5 มิลลิเมตร สามารถเห็นค่าความเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 0 ถึง 75 องศา ที่รัศมี 2 มิลลิเมตร สามารถเห็นค่าความเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 0 ถึง 80 องศา ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร สามารถเห็นค่าความเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 0 ถึง 52 องศา และที่ 4 มิลลิเมตร สามารถเห็นค่าความเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 0 ถึง 40 องศาเท่านั้น

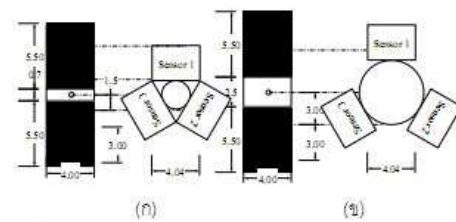
จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าถ้าใช้ ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ตัวเดียวเราไม่สามารถวัดค่ามุม ทั้ง 360 องศาได้ เนื่องจากที่ค่ามุมต่างๆ จะมีค่าแรงดันที่เท่ากันในบางมุม เช่น ที่มุม 30 องศา กับ 330 องศา หรือที่ 80 องศา กับ 300 องศา ในทางอุดมคติ ควรจะวัดได้ 180 องศา แต่จากการทดลองจะเห็นว่า มุมที่สามารถตรวจจับได้จะ ขึ้นอยู่กับรัศมี ด้วย

มุม	รัศมี 1.5 mm แรงดัน (V)	แรงดัน (V)/องศา	รัศมี 3 mm แรงดัน (V)	แรงดัน (V)/องศา
0	4.946	0.005	4.810	0.001
1	4.941	0.020	4.809	0.007
178	0.079	0.020	0.191	0.001
179	0.059	0.005	0.190	0.001
180	0.054	-0.005	0.191	-0.001
181	0.059	-0.020	0.188	-0.001
359	4.941	-0.020	4.809	-0.007
360	4.946	-0.005	4.810	-0.001

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมแม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์และ ค่าแรงดันเอาต์พุตเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ที่สามารถแปลผลค่ามุมได้น้อย

จากการทดลองค่าแรงดัน ณ มุมจุด 0 องศา และ 180 องศา ไม่สามารถนำมาหาค่ามุมได้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันต่อมุม น้อยมากดังแสดงในตารางที่ 2 รวมไปถึงบริเวณมุมที่ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง มุมชี้แม่เหล็กกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์มีผลต่อ ค่าแรงดันเอาต์พุตเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์แต่ละตัวจึงจำเป็นต้องเลือกเซนเซอร์ตัวที่สามารถแปลค่าได้และมีความละเอียดเพียงพอ

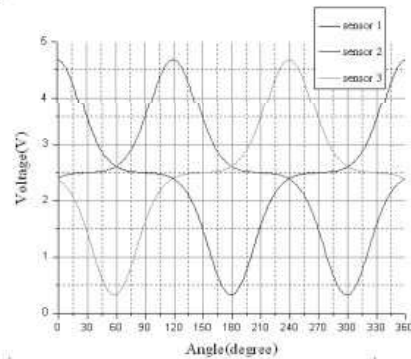
สุดท้ายเป็นการ ทดสอบทรานสดิวเซอร์วัดมุม จากโครงสร้าง



รูปที่ 7 (ก) โครงสร้างรัศมี 1.5 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว

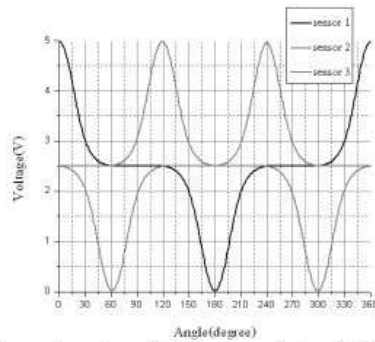
(ข) โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว

จากรูปที่ 7 (ก) โครงสร้างรัศมี 1.5 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ 3 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศา ตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 120 องศา และ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 240 องศา จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศา ต่อ แรงดัน ณ มุมต่างๆดังรูปที่ 8

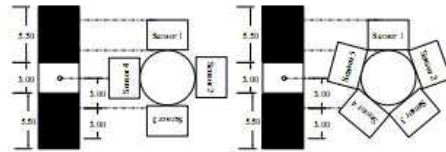


รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัดได้ ที่รัศมี 1.5 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว

จากรูปที่ 7 (ข) โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ 3 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศา ตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 120 องศา และ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 240 องศา จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศา ต่อ แรงดัน ณ มุมต่างๆดังรูปที่ 9



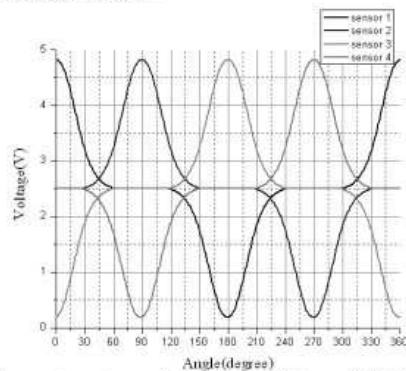
รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัดได้ ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว



รูปที่ 10 (ก) โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 4 ตัว

(ข) โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 5 ตัว

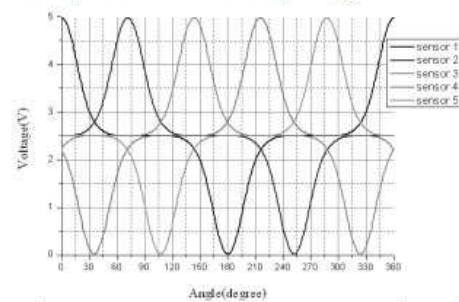
จากรูปที่ 10 (ก) โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ 4 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศา ตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 90 องศา และ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 180 องศา ตัวที่ 4 จะเริ่มที่มุม 270 องศา จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศา ต่อ แรงดัน ณ มุมต่างๆ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัดได้ ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 4 ตัว

จากรูปที่ 10 (ข) โครงสร้างรัศมี 3 มิลลิเมตร นำฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ 5 ตัวมาวางโดยตัวที่ 1 จะเริ่มที่มุม 0 องศา ตัวที่ 2 จะเริ่มที่มุม 72 องศา และ ตัวที่ 3 จะเริ่มที่มุม 144 องศา ตัวที่ 4 จะเริ่มที่มุม

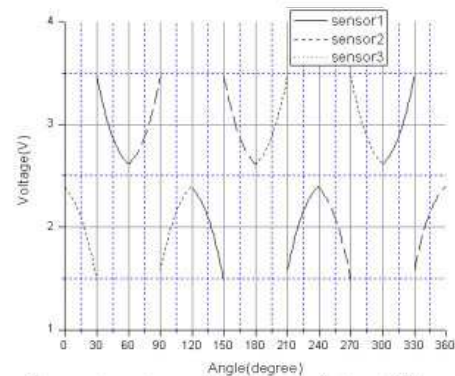
216 องศา ตัวที่ 5 จะเริ่มที่มุม 288 องศา จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง มุมหน่วยเป็นองศา ต่อ แรงดัน ณ มุมต่างๆ ดังรูปที่ 12



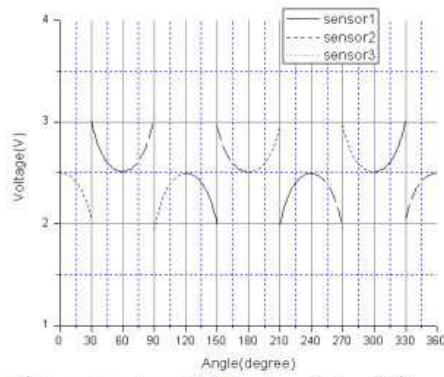
รูปที่ 12 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่วัดได้ ที่รัศมี 3 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 5 ตัว

3.2 นำค่าความสัมพันธ์ระหว่าง มุมเคลื่อนที่(องศา)ของแม่เหล็ก โดยเปลี่ยนรูปแบบการวางฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับค่าแรงดัน ที่เปลี่ยนแปลงมาทำการแบ่งช่วงมุมเลือกแรงดันแปลผลจากเซนเซอร์

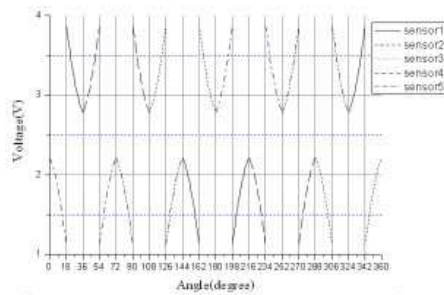
จากการทดสอบการวางโครงสร้างเซนเซอร์จะเห็นว่าโครงสร้างใช้เซนเซอร์ 4 ตัว มีค่าแรงดันที่มีรูปแบบเหมือนกัน ส่วนโครงสร้างใช้เซนเซอร์ 3 ตัว และ 5 ตัวจะมีความสัมพันธ์ระหว่าง มุม ต่อ แรงดัน ณ มุมต่างๆ ซึ่งสามารถนำค่าแรงดัน ณ มุม ต่างๆ ของเซนเซอร์แต่ละตัวมาทำการหาค่ามุม ณ มุมต่างๆ โดยวิธีการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันแปลผล



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่ทำการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันแปลผล ที่รัศมี 1.5 มิลลิเมตร ใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว



รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่ทำการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันแปลผล ที่รัศมี 3 มิลลิเมตรใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว



รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่ทำการแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันแปลผล ที่รัศมี 3 มิลลิเมตรใช้ เซนเซอร์ 5 ตัว

จากกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับค่าแรงดันที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างเซนเซอร์ 3 ตัว รัศมี 1.5 มิลลิเมตรกับรัศมี 3 มิลลิเมตร จะเห็นว่าทั้งสองแบบจะสามารถแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันแปลผล ได้ทั้งหมด 12 ช่วง

โครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตรเซนเซอร์ 4 ตัว ไม่สามารถนำมาหาผลโดยวิธีการนี้ได้เนื่องจากไม่สามารถเลือกส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงที่เหมาะสมได้

แต่เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตรเซนเซอร์ 3 ตัว กับ เซนเซอร์ 5 ตัว จะเห็นว่าโครงสร้างเซนเซอร์ 5 ตัวสามารถแบ่งช่วงมุมและเลือกค่าแรงดันแปลผล ได้ทั้งหมด 20 ช่วง ซึ่งทำให้ค่าแรงดันที่เราจะนำไปแปลผลเป็นค่ามุมมีช่วงกว้างมากขึ้น

ตัวอย่างการหาค่าความแตกต่างแรงดัน ณ จุดต่ำสุด ที่มุม 0 องศาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

มุม	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5
0	4.978	2.500	2.219	2.219	2.500
1	4.970	2.500	2.249	2.189	2.500
ค่าแรงดัน	0.008	0.000	0.030	0.030	0.000

ตารางที่ 3 แสดงตารางการเปรียบเทียบค่าแรงดันของเซนเซอร์แต่ละตัว ในช่วงมุม 0 ถึง 1 องศา และการเลือกแรงดันแปลผล จากเซนเซอร์ของโครงสร้าง รัศมี 3 มิลลิเมตรใช้ เซนเซอร์ 5 ตัว

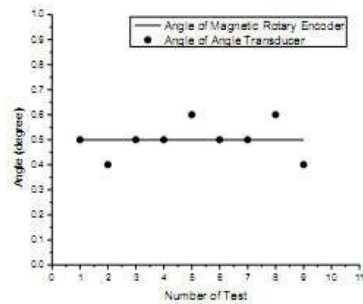
จะเห็นว่า ค่าผลต่างแรงดัน เท่ากับ 0.03 โวลต์ ที่ เซนเซอร์ ตัวที่ 3 และ ตัวที่ 4 ที่เราเลือก หากคิดเป็นค่า ระยะห่างของระดับข้อมูลดิจิทัลในวงจรแปลงสัญญาณจะนำออกเป็นดิจิทัล แรงดัน 0-5 โวลต์ ความละเอียด 12 บิต จะได้ 0.0013 โวลต์ ต่อ 1 หน่วยดิจิทัล หรือมีค่าเท่ากับ 23 หน่วยดิจิทัล ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประมวลผลที่ค่าความละเอียด 0.1 องศา

3.3 การออกแบบ ซอฟต์แวร์

หลังจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าแรงดันเอาต์พุตจากเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวในกระบวนการประมวล โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบแรงดันที่รับเข้ามาทั้งหมด เพื่อ เลือกช่วงการประมวลผลมุม และเลือกแรงดันที่จะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงดัน ณ มุมต่างๆ เพื่อแสดงผล

มุม	เลือกเอาต์พุต			เงื่อนไข						Sensor
	s1	s2	s3	s1>	s1>	s2>	s1>	s2>	s3>	
0	4.900	2.138	2.138	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	0	2
1	4.499	2.157	2.117	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	0	0	3
30	3.914	2.5	1.086	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	0	0	3
31	3.875	2.507	1.048	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	0	1
59	2.883	2.843	0.501	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	0	1
60	2.862	2.862	0.5	0	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	0	2
89	2.807	3.875	1.048	0	2 ¹	2 ¹	2 ¹	2 ¹	0	2
90	2.5	3.914	1.086	0	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	3
119	2.157	4.499	2.117	0	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	3
120	2.138	4.5	2.138	0	0	2 ¹	0	2 ¹	0	1
150	1.086	3.914	2.5	0	0	2 ¹	0	2 ¹	0	1
151	1.048	3.875	2.507	0	0	2 ¹	0	2 ¹	2 ¹	2
179	0.501	2.883	2.843	0	0	2 ¹	0	2 ¹	2 ¹	2
180	0.5	2.862	2.862	0	0	0	0	2 ¹	2 ¹	3
209	1.048	2.807	3.875	0	0	0	0	2 ¹	2 ¹	3
210	1.086	2.5	3.914	0	0	0	0	0	2 ¹	1
240	2.138	2.138	4.5	0	0	0	0	0	2 ¹	1
241	2.157	2.117	4.499	2 ¹	0	0	0	0	2 ¹	2
270	2.5	1.086	3.914	2 ¹	0	0	0	0	2 ¹	2
271	2.507	1.048	3.875	2 ¹	0	0	0	2 ¹	0	3
300	2.862	0.5	2.862	2 ¹	0	0	0	2 ¹	0	3
301	2.883	0.501	2.843	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	2 ¹	1
329	3.875	1.048	2.507	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	2 ¹	1
330	3.914	1.086	2.5	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	0	2
360	4.5	2.138	2.138	2 ¹	2 ¹	0	2 ¹	0	0	2

ตารางที่ 4 แสดงตารางการเปรียบเทียบค่าแรงดันของเซนเซอร์ในแต่ละตัว ในช่วงมุม ทั้ง 12 ช่วง และการเลือกแรงดันแปลผล จากเซนเซอร์ของโครงสร้าง รัศมี 1.5 และ 3 มิลลิเมตรใช้ เซนเซอร์ 3 ตัว



ภาพที่ 4.9 ค่าความผิดพลาดของมุมที่วัดได้โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่มีความละเอียด 0.1 องศา ที่มุม 0.5 องศา

จากกราฟแสดงค่าผิดพลาดของมุมที่วัดได้โดยทรานสดิวเซอร์วัดมุมที่มีความละเอียด 0.1 องศา ประมาณ ± 0.1 องศา คือช่วงที่มีความคลาดต่างแรงดันน้อย ทำให้การกำหนดช่วงการแปลผลมม่น้อยไปด้วย เมื่อเกิดการแกว่งของแรงดันเมื่อผ่านวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล

4. สรุปผล

จากการทดลองออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์ ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร ใช้แม่เหล็กขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร สูง 5.5 มิลลิเมตร โครงสร้างที่รัศมี 3 มิลลิเมตร เซ็นเซอร์ 5 ตัว ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 12 บิตในการประมวลผล สามารถวัดมุมได้ตั้งแต่ 0 - 360 องศา แบบหมุนรอบแกน ความละเอียด 0.1 องศา ค่าความผิดพลาดสูงสุด 1 องศา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดมุมแบบหมุนรอบแกนหมุน 360 องศา ได้เป็นที่น่าพอใจ

5. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองหากมีการขยับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก กับ เซ็นเซอร์แม่เหล็กเล็กน้อย เช่นเกิดการสั่น ความไม่เที่ยงของแรงดันที่เกิดจากระยะห่างของแม่เหล็กจะทำให้ค่าแปลผลมุมที่ได้จะเกิดการผิดพลาด การยึดแม่เหล็กกับเซ็นเซอร์ติดกับแน่นเพื่อให้ได้ค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก กับเซ็นเซอร์ที่แน่นอนเป็นการลดปัญหานี้ได้ส่วนหนึ่ง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนซอฟต์แวร์ เครื่องมือและสถานที่ในการทดสอบ รวมทั้งขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนสถานที่และวิทยากรในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ZMT 32 Magnetic Field Angle Sensor Datasheet, ZETEX Semiconductors
 [2] P. Kejlik, S. Raymond, and R.S. Popovic, Circular Hall Transducer For Angular Position Sensing, Fmce, 2007
 [3] จ่านพุ่มคำ 2536. คณิตศาสตร์ช่างอุตสาหกรรม : สยามคองสแตเบิลเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ หน้า 18,21-23 และ 37-38
 [4] David S. Nyce, Linear Position Sensors Theory and Applications Wiley-interscience, USA, 2004
 [5] Joe Gilbert and Ray Dewey ,Linear Hall-Effect Sensors Allegro Micro Systems, Inc.
 [6] ษธา เจริญกลิน และชัชวรัย สุภพิทักษ์กุล. 2551. การออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดแรงโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์. EENET2008 ปทุมธานี
 [7] ษธา บัญหาศรี และชัชวรัย สุภพิทักษ์กุล. 2555. ออกแบบทรานสดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์. EENET2012 หนองคาย
 [8] A1301 and A1302 Linear Hall Effect Sensor Datasheet

ประวัติผู้วิจัย



สรณ์ บัญหาศรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ค.บ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โครินนาคมจาก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าแขนงอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจด้านระบบควบคุม และ ตัวตรวจจับอุตสาหกรรม



ดร. ชัชวรัย สุภพิทักษ์กุล สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรม (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร Ph.D. Northumbria University, Newcastle England

และ เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ การประมวลผลสัญญาณภาพดิจิทัล การออกแบบทรานสดิวเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม เครื่องมือวัดด้านวิศวกรรม การแพทย์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายชญภพ บุญทาศรี
วัน เดือน ปีเกิด	2 กุมภาพันธ์ 2519
ที่อยู่	503 หมู่ 11 ต.บ้านต้อม อ.เมือง จ.พะเยา
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ ปี พ.ศ. 2541
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2542 – พ.ศ. 2543	ตำแหน่งอาจารย์สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3 (พะเยา)
พ.ศ. 2543 – ปัจจุบัน	ตำแหน่งอาจารย์สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

