

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ

THE METAL CRACK DETECTOR



โดย  
นายเกษมปัญญา ชัยศรี  
นายดำเนิน กล้ายทอง

เลขหมู่.....72764.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี...2.2.สิ.ย. 2550

b. 11742010  
j. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ  
**THE METAL CRACK DETECTOR**



โดย  
นายเกษมปัญญา ชัยศรี 47015865  
นายดำเนิน คล้ายทอง 47015872

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ขนิษฐา แซ่ตั้ง

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ

THE METAL CRACK DETECTOR

ผู้จัดทำ 1. นายเกษมปัญญา ชัยศรี

2. นายคำเนิน คล้ายทอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ

นายเกษมปัญญา ชัยศรี รหัส 47015865  
นายคำเนิน คล้ายทอง รหัส 47015872  
รศ.ชนิษฐา แซ่ตั้ง อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวในผนังโลหะนี้ ได้นำเอาหลักการของการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่บริเวณรอยร้าวมีการเปลี่ยนแปลงไปจากบริเวณปกติ ซึ่งสนามแม่เหล็กจะถูกส่งออกจากเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็กแปรตามเวลา แล้วทำการตรวจจับโดยอุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งทำให้เกิดผลเป็นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำค่าแรงดันมาทำการประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อแสดงผล ทั้งนี้ได้ออกแบบกลไกการตรวจจับลากไปตามผนังของโลหะแผ่นได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THE METAL CRACK DETECTOR

Mr. Kasempanya Chaisri ID.47015865

Mr. Dumnum Claytong ID.47015872

Assoc. Prof. Khanittha Sae-tung Advisor

Educational Year 2006

## Abstract

This metal wall crack detector use the principle of magnetic field at the cracks will differ from the normal area. The magnetic field will be sent by magnetic field generator and will be detected changing voltage the hall effect sending. The changing voltage will be processed by microcontroller and display the result. The system will also be able to drag wall for detecting metal sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างสูงจากท่าน ร.ศ.ขนิษฐา แซ่ตั้ง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ นอกจากนี้ ท่านจะให้ความรู้ทางด้านวิชาการแล้ว ท่านยังให้แนวคิดในการดำเนินชีวิตมากมาย ทางคณะผู้จัดทำ ได้รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยมจากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ทางคณะผู้จัดทำ รู้สึกซาบซึ้งและภาคภูมิใจ และจะนำความรู้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อประเทศชาติให้มากที่สุด

และสิ่งสำคัญที่จะลืมมิได้ ขอกราบขอบพระคุณ พ่อและแม่ อันเป็นที่รักและเคารพยิ่งของลูก ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่าง พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เงินทุนสนับสนุน พร้อมทั้งเอาใจใส่ที่ดีเสมอมาในทุกๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ลูกขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ทางคณะผู้จัดทำ ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

นาย เกษมปัญญา ชัยศรี

นาย ดำเนิน คล้ายทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีหลักการพื้นฐาน</b>	<b>2</b>
2.1 หลักการพื้นฐาน	2
2.2 ฮอลล์เจเนอเรเตอร์	9
2.3 ชนิดของตัวตรวจจับฮอลล์	10
2.3.1 ฮอลล์ชนิดสวิต	10
2.3.2 ฮอลล์ชนิดแลดซ์	11
2.3.3 ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น	12
2.4 พื้นฐานการตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก	13
2.4.1 การตรวจสอบหาตำแหน่งของผิวงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า	15
2.4.2 เงื่อนไขการทดสอบ	16
2.5 ความเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทดสอบ	18
2.5.1 วัสดุแม่เหล็กอ่อน	18
2.5.2 วัสดุแม่เหล็กแข็ง	19
<b>บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์</b>	<b>21</b>
3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51	21
3.1.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51	21
3.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของ AT89C51	23
3.1.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยัดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

3.2 การแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอลแบบซิกเซสซีฟแอปพรีอักษิเมชัน	28
3.2.1 ความเที่ยงตรงของวงจร ADC	31
3.2.2 ค่าเวลาในการแปลงสัญญาณ ( Conversion time)	31
3.3 การขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ (Uni - Polar Stepper Motor)	32
3.3.1 การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์	33
3.4 การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD model)	35
3.4.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD	35
3.4.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD	36
3.4.3 โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 16x2)	38
<b>บทที่ 4 ส่วนประกอบและหลักการทำงาน</b>	<b>40</b>
4.1 หลักการทำงาน	40
4.2 ส่วนของฮาร์ดแวร์	41
4.2.1 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)	41
4.2.2 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrumentation Amplifiers, IAs)	41
4.2.3 วงจรขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ด้วยไอซี ULN2803A	43
4.2.4 จอโมดูล LCD แบบตัวอักษรขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด	43
4.3 ส่วนของโปรแกรมควบคุม	46
4.4 โครงสร้างภายนอก	47
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง</b>	<b>49</b>
5.1 การทดลองหารอบบ่งชี้ของโลหะ	49
<b>บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	<b>52</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>a</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>b</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์	2
รูปที่ 2.2 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ	3
รูปที่ 2.3 หลักการของฮอลล์เจเนอเรเตอร์	9
รูปที่ 2.4 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจเนอเรเตอร์	10
รูปที่ 2.5 ผังการทำงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดสวิทช์	11
รูปที่ 2.6 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตกับสนามแม่เหล็กของฮอลล์ชนิดแลตซ์	11
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นเบอร์ 3503	12
รูปที่ 2.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของฮอลล์เชิงเส้นเบอร์ 3503	13
รูปที่ 2.9 ผงเหล็กเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก	14
รูปที่ 2.10 แท่งแม่เหล็กแต่ละท่อนกลายเป็นไดโพลแม่เหล็กอันใหม่เสมอ	14
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของรอยตำหนิ	15
รูปที่ 2.12 การเกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดกระแสไฟฟ้าตรง	16
รูปที่ 2.13 เกิดสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากบริเวณหัวขั้วขึ้นทดสอบจากกระแสฟ้าสถั	16
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B และ H	17
รูปที่ 2.15 วงฮีสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กอ่อน	19
รูปที่ 2.16 วงฮีสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กแข็ง	20
รูปที่ 3.1 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89C5x	23
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในของ MCS-51	26
รูปที่ 3.3 แสดงไดอะแกรมการทำงานของวงจร ADC แบบซิกเซสซีฟแอปพริอ็อกซิเมชัน	28
รูปที่ 3.4 แสดงไดอะแกรมเวลาการทำงานของวงจร ADC แบบซิกเซสซีฟแอปพริอ็อกซิเมชัน	30
รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์	32
รูปที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโมดูล LCD แบบอักษร	36
รูปที่ 3.7 แสดงรูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร	38
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า	41
รูปที่ 4.2 วงจรขยายสัญญาณอินสทรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว	42
รูปที่ 4.3 ไอซีขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์เบอร์ ULN2803A	43
รูปที่ 4.4 จอโมดูล LCD แบบตัวอักษรขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด	44
เอกสารรูปที่ 4.5 แสดงวงจรการทำงานของเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ	45

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.6	Flow chart แสดงการทำงานของระบบ	46
รูปที่ 4.7	แสดง โครงสร้างภายนอกของระบบ	47
รูปที่ 4.8	แสดงชุดควบคุมและแสดงผล	48
รูปที่ 4.9	แสดงชุดฮอลล์เอฟเฟกต์และเครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก	48
รูปที่ 5.0	แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่มีโลหะ	49
รูปที่ 5.1	แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง	50
รูปที่ 5.2	แสดงสัญญาณเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง	50
รูปที่ 5.3	แสดงชุดฮอลล์เอฟเฟกต์ เมื่อตรวจสอบบริเวณที่มีรอยบกพร่อง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่างๆ	27
ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ปหนึ่งเฟส	33
ตารางที่ 3.3 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ปสองเฟส	34
ตารางที่ 3.4 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบฮาล์ฟสเต็ป	35
ตารางที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ในการทำงานของขา RS R/W และ E ของโมดูล LCD แบบอักษร	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการขยายกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น เมื่อมีกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นสิ่งที่จะต้องพิจารณาในกระบวนการผลิตก็คือ การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งนี้เพื่อที่จะตรวจหาคุณภาพและมาตรฐานของผลิตภัณฑ์รวมไปถึงขบวนการผลิต ขั้นตอนที่ใช้การตรวจสอบที่นิยมใช้ในโรงงานวิธีหนึ่งก็คือ การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย การตรวจสอบแบบไม่ทำลายมีข้อดีก็คือ ไม่ทำให้วัตถุที่นำมาทดสอบไม่เสียหาย ดังนั้นแล้วการตรวจสอบแบบไม่ทำลายจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบ และซ่อมบำรุงอีกด้วย

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายมักจะเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบเช่น แสง ความร้อน หรืออำนาจของสนามแม่เหล็ก ซึ่งในแต่ละแบบนั้นก็จะมีกรรมวิธีที่แตกต่างกันออกไปเช่น การตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Testing) การตรวจสอบโดยใช้กระแสไหลวน (Eddy Current) การตรวจสอบโดยใช้วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก (Flux Leakage) ซึ่งการตรวจสอบที่ยกตัวอย่างมาทั้ง 3 วิธีนี้มีทั้งข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ในวิธีการตรวจสอบโดยใช้วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เป็นวิธีการที่ใช้กับวัตถุที่ต้องการจะตรวจสอบมีสภาพเป็นแม่เหล็ก ในอดีตการตรวจสอบด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความยุ่งยาก แต่ในปัจจุบัน ได้มีผู้ผลิตอุปกรณ์สำเร็จรูปขึ้นเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จากแนวความคิดนี้เอง จึงได้สังเกตเห็นความสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงได้นำอุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ เมื่อวัตถุโลหะที่ต้องนำมาตรวจสอบมีรอยร้าวเกิดขึ้น ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้อุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถตรวจจับได้แล้วเกิดผลเป็นแรงดัน ค่าแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กนี้เอง เราสามารถนำไปประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะแสดงผลในรูปแบบที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

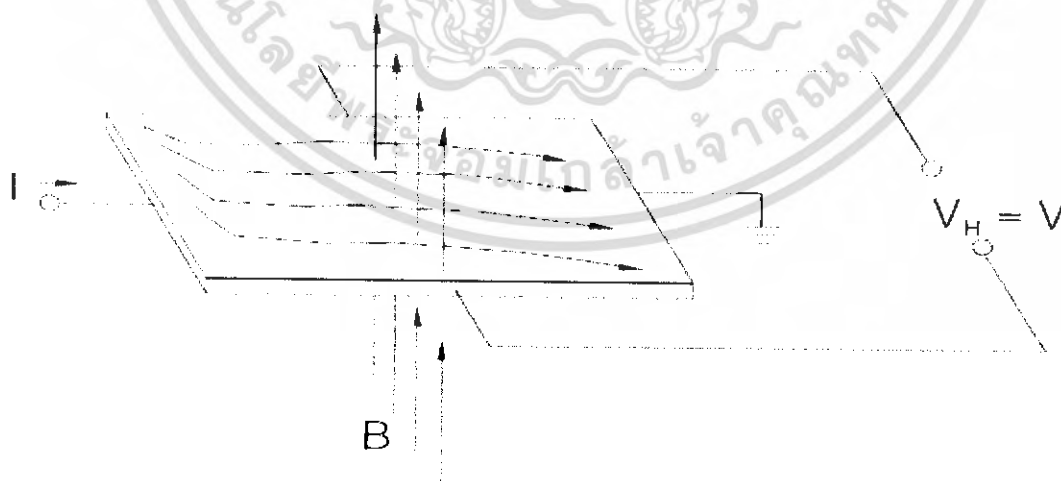
### ทฤษฎีและหลักการ

การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect Testing) เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายอีกวิธีหนึ่งซึ่งอาศัยหลักการทำงานของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทำการตรวจสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น กับวัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบ แล้วทำการส่งสนามแม่เหล็ก ไปที่ชิ้นงานที่ต้องการจะตรวจสอบ จากนั้นจึงใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นตัววัดค่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นเทคนิคที่ไม่กว้างขวางมากนัก นอกเหนือจากการตรวจสอบเพื่อหารอยบกพร่องแล้ว การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ยังสามารถใช้ตรวจสอบคุณลักษณะทางกลและทางโลหะได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กโดยทางอ้อม นอกจากนี้ผลกระทบทางรูปทรง เช่น ความหนา ความโค้ง ก็มีผลต่อการไหลเวียน หรือการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

#### 2.1 หลักการพื้นฐาน

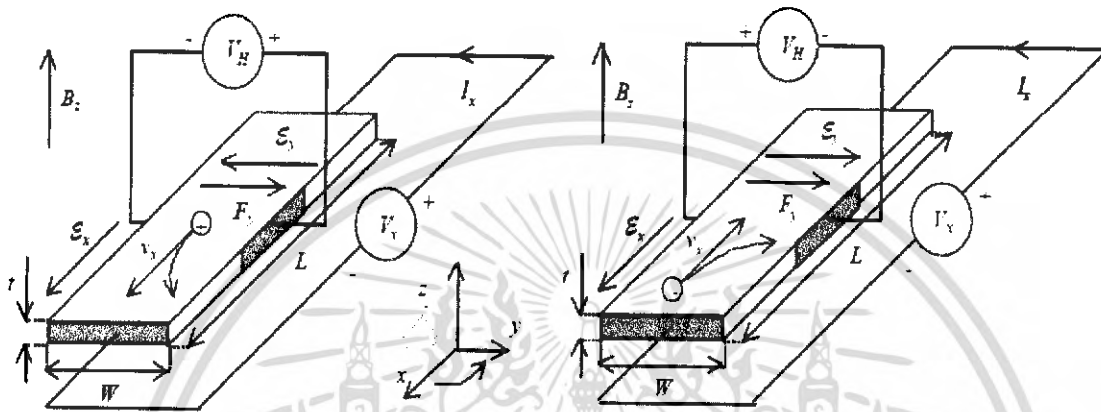
ถ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแท่งสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง และถ้าให้สนามแม่เหล็กทำมุมตั้งฉากกับทิศทาง การไหลของกระแส จะทำให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็กนั้น ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ของฮอลล์” (Hall Effect)



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในเรื่องของปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นการยืนยันแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของประจุพาหะ (Carrier Charge) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองในเรื่องนี้ ทำให้สามารถวัดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังสามารถนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อีกด้วย



ก) อิเล็กตรอน

ข) โฮล

รูปที่ 2.2 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูปที่ 2.2 (ข) จะเห็นได้ว่าต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่าความต่างศักย์  $V_x$  ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Current density)  $J_x$  ไหลในทิศทาง  $+x$  และถ้าให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศ  $+z$  โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน (Built in electric field)  $E_x$  จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วครีฟท์ (Drift velocity)  $v_{Dx}$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนาม  $B_z$  ตัดผ่านทิศตั้งฉากกับกระแส จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)  $F_L$  กระทำต่อโฮลดังสมการ

$$F_L = ev \times B \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $F_L$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

$$|F_L| = F_L = ev_{DX} \times B_Z \quad (2.2)$$

และมีทิศทาง  $+x$  ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาทางแกน  $-y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงกันข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมาก ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนโฮลน้อยกว่าทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $\mathcal{E}_y$  ในทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในสถานะสมดุล ซึ่งโฮลสามารถเคลื่อนที่ตรงไปในทิศ  $+x$  ได้ แสดงว่าแรงลอเรนซ์ ( $F_L$ ) และแรงจากสนามไฟฟ้าภายใน ( $e\mathcal{E}_y$ ) มีค่าเท่ากันนั่นคือ

$$e\mathcal{E}_y = F_L = ev_{DX} \times B_Z \quad (2.3)$$

หรือ

$$\mathcal{E}_y = v_{DX} \times B_Z \quad (2.4)$$

หาค่า  $v_{DX}$  จากสมการ

$$J_x = epv_{DX} \quad (2.5)$$

ดังนั้น

$$v_{DX} = \frac{J_x}{ep} \quad (2.6)$$

แทนค่า  $v_{DX}$  ลงในสมการที่ (2.4) จะได้

$$\mathcal{E}_y = \frac{J_x \times B_Z}{ep} \quad (2.7)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\mathcal{E}_y}{J_x \times B_Z} = \frac{1}{ep} = R_H \quad (2.8)$$

เมื่อ  $R_H$  คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.2 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $w$  จะได้

$$V_H = \mathcal{E}_y w \quad (2.9)$$

เมื่อ  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ หรือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

จากสมการที่ (2.9) เมื่อแทนค่า  $\mathbf{J}_x = \frac{I}{wd}$  และ  $\mathcal{E}_y = \frac{V_H}{w}$  ลงในสมการจะได้

$$R_H = \frac{V_H w d}{I B_z} = \frac{1}{e n q} \quad (2.10)$$

หรือ

$$R_H = \frac{dV_H}{I B_z} = \frac{1}{e n q} \quad (2.11)$$

$$\therefore V_H = \frac{I B_z}{e n q d} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.11) จะได้ค่าความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{e R_H} = \frac{I B_z}{e n q d} \quad (2.13)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) คือ

$$\rho = R \frac{wd}{L} = \frac{V}{I} = \frac{wd}{L} \quad (2.14)$$

เนื่องจาก  $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e n q \mu_p}$  ดังนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_p = \frac{1}{ep\rho} = \frac{1}{\rho} = R_H \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.13) (2.14) และ (2.15) จะเห็นได้ว่าการทดลองในเรื่องของปรากฏการณ์ของฮอลล์ ทำให้เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องได้เป็นอย่างดี

ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น รูปที่ 2.2 (ก) แรงดันฮอลล์ ( $V_H$ ) จะมีค่าตรงกันข้ามกับในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็ค มีค่าเป็นลบ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ( $R_H$ ) คือ

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (2.16)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการวัดแรงดันของฮอลล์ ทำให้สามารถที่บอกชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ เมื่อเราพิจารณาสมการที่ (2.12) จะได้ผลตอบสนองความไว (Sensitivity) คือ

$$S = \frac{V_H}{I \cdot B} = \frac{R_H G}{d} = \frac{Gr_n}{qnd} \quad (2.17)$$

จะเห็นได้ว่าค่าความไวที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นของประจุมีค่าต่ำลง นอกจากนี้ฮอลล์เพลท จะต้องมีความหนาน้อยๆ อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าสุทธิในแท่งสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นผลจากการรวมเวกเตอร์ของ  $\mathcal{E}_x$  และ  $\mathcal{E}_y$  ซึ่งไม่ได้มีทิศทางตรงไปตามแกน  $+x$  แต่ทำมุมกับ  $\theta_H$  กับแกน  $+x$  ดังรูป ซึ่งมุม  $\theta_H$  ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่ามุม “มุมฮอลล์” (Hall angle) ได้สมการคือ

$$\tan \theta_H = \frac{\mathcal{E}_y}{\mathcal{E}_x} \quad (2.18)$$

เมื่อทำการแทนค่า  $\mathcal{E}_y = \frac{\mathbf{J}_x \times \mathbf{B}_z}{ep}$  และ  $\mathbf{J}_x = \sigma \mathcal{E}_x$  จะได้

$$\tan \theta_H = \frac{\mathbf{J}_x \mathbf{B}_z}{ep} \frac{\sigma}{\mathbf{J}_x} = \frac{\sigma \mathbf{B}_z}{ep} \quad (2.19)$$

หรือ

$$\tan \theta_H = \frac{\sigma \mathbf{B}_z}{pe} = ep \mu_p \frac{\mathbf{B}_z}{ep} = \mu_p \mathbf{B}_z \quad (2.20)$$

$$\frac{\sigma}{ep} = \mu_p \quad (2.21)$$

$$\mu_p = \sigma R_H \quad (2.22)$$

ซึ่งเท่ากับสมการที่ (2.15) นั่นเอง

ในการวิเคราะห์ที่ผ่านมาแล้วนี้ ยังไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะหรือพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงยังไม่ถูกต้อง ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันระหว่างพาหะกับแลตทิซ (Lattice Scattering) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{3\pi}{8} R_H = 1.18 R_H \quad (2.23)$$

และ

$$\tan \theta_H = \frac{3\pi}{8} \mu_p \mathbf{B}_z = \mu_H \mathbf{B}_z \quad (2.24)$$

หรือ

$$\mu_H = \frac{\tan \theta_H}{\mathbf{B}_z} = \frac{3\pi}{8} \mu_p \quad (2.25)$$

เมื่อ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของโฮล (hole mobility)

$\mu_H$  คือ สภาพคล่องของฮอลล์ (Hall mobility)

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized Impurity Scattering) จะได้

$$R_{H(\text{collision})} = \frac{315\pi}{512} R_H = 1.93 R_H \quad (2.26)$$

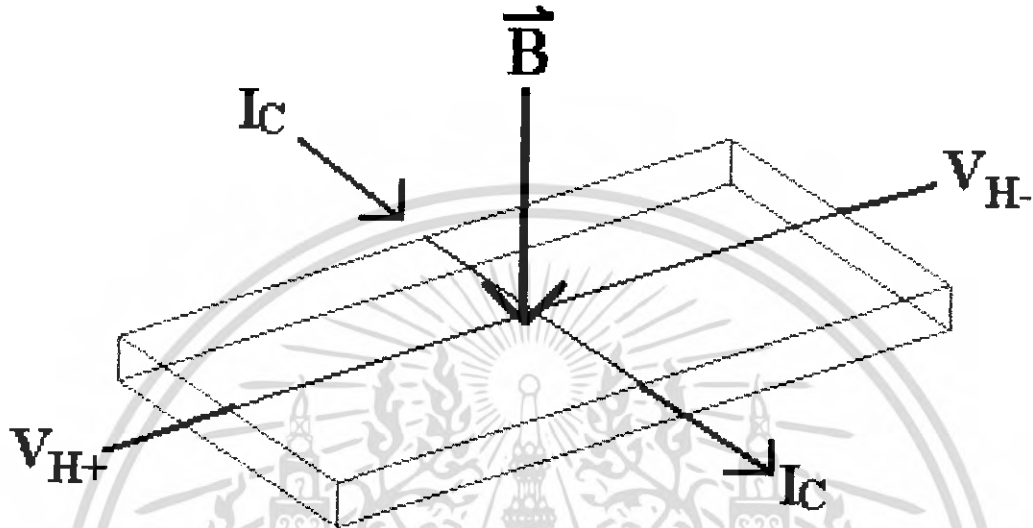
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\mu_{H(\text{collision})} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.27)$$

ในกรณีที่ต้องการพิจารณาทั้งอิเล็กตรอนและโพลีเมอร์ด้วยกัน จะต้องมีการแก้ไขสมการใหม่ให้ถูกต้อง จากรูป 2.2 สนามไฟฟ้า  $\mathcal{E}$  อยู่ในทิศ  $x$  และขณะเดียวกันสนามแม่เหล็ก  $\mathbf{B}$  อยู่ในทิศ  $z$  เนื่องจากสนาม  $\mathcal{E}$  จะเกิดกระแส โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางซ้าย และโพลีเมอร์เคลื่อนที่ไปทางขวา การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโพลีเมอร์ในสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์และทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโพลีเมอร์เคลื่อนที่ลง ไปสู่ผิวด้านล่าง และเกิดการหักล้างกันเกิดขึ้น การหักล้างนี้จะไม่หมดไปโดยสิ้นเชิง และทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวด้านล่าง เนื่องจากสารจะต้องเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นจะเกิดประจุตรงกันข้ามขึ้นที่ผิวด้านบน และเกิดสนามไฟฟ้าในแกน  $y$  ขึ้นซึ่งเรียกว่า สนามของฮอลล์

## 2.2 ฮอลล์เอฟเฟกต์



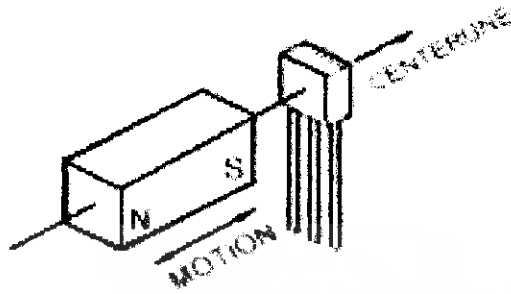
รูปที่ 2.3 หลักการของฮอลล์เอฟเฟกต์

จากรูปที่ 2.3 ถ้าให้กระแส  $I$  (A) ไหลผ่านไปนในสารกึ่งตัว เช่น เจอร์มาเนียมที่มีความหนา  $t$  (m) ซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์  $B$  ( $\text{Wb/m}^2$ ) ในแนวตั้งฉากกับระนาบ (plane) ของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า  $V$  ขึ้นในแนวตั้งฉากกับ  $B$  และ  $I$  ตามสมการ

$$V = \frac{\eta_i B I}{t} \quad (2.28)$$

ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ และ  $\eta$  ( $\text{m}^3\text{C}$ ) เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient) ถ้าทราบค่า  $\eta$ ,  $t$  และ  $I$  ก็จะสามารถหาค่า  $B$  ได้โดยการวัด  $V$  ฮอลล์เอฟเฟกต์มีขนาดเล็กมาก ( $t$  มีค่าอยู่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร) จนสามารถนำไปวัดความหนาแน่นของฟลักซ์ในทีแคบๆ ได้ ดังแสดงในรูป 2.4 ส่วนความไวสามารถวัดได้ถึงระดับ  $10^{-4}$  ( $\text{Wb/m}^2$ ) การเปรียบเทียบสามารถทำได้โดยการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall Emf) ในความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ทราบค่าแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



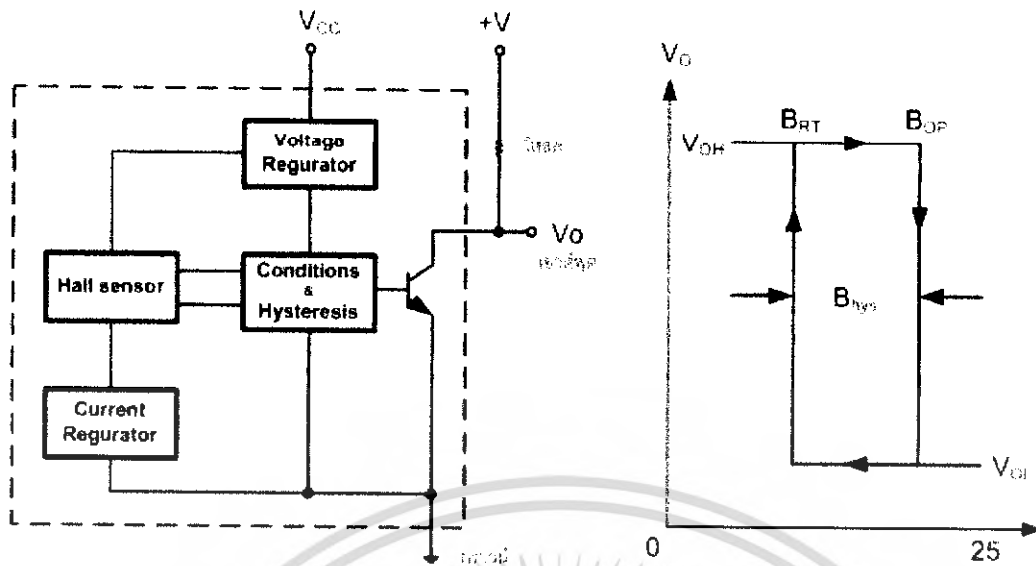
รูปที่ 2.4 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจเนอเรเตอร์

### 2.3 ชนิดของตัวตรวจจับฮอลล์

ฮอลล์แบ่งออกเป็นสามชนิด คือ ชนิดเป็นสวิทช์ ชนิดเป็นตัวแลตช์ (Latch) และชนิดเป็นอุปกรณ์เชิงเส้น ชนิดสวิทช์และชนิดแลตช์เป็นอุปกรณ์ทางดิจิทัลคือ จะมีเอาต์พุตเพียงสองสถานะ ไม่เปิดก็ปิด ในขณะที่ฮอลล์แบบเชิงเส้นจะให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็ก

#### 2.3.1 ฮอลล์ชนิดสวิทช์ (Switch Hall Device)

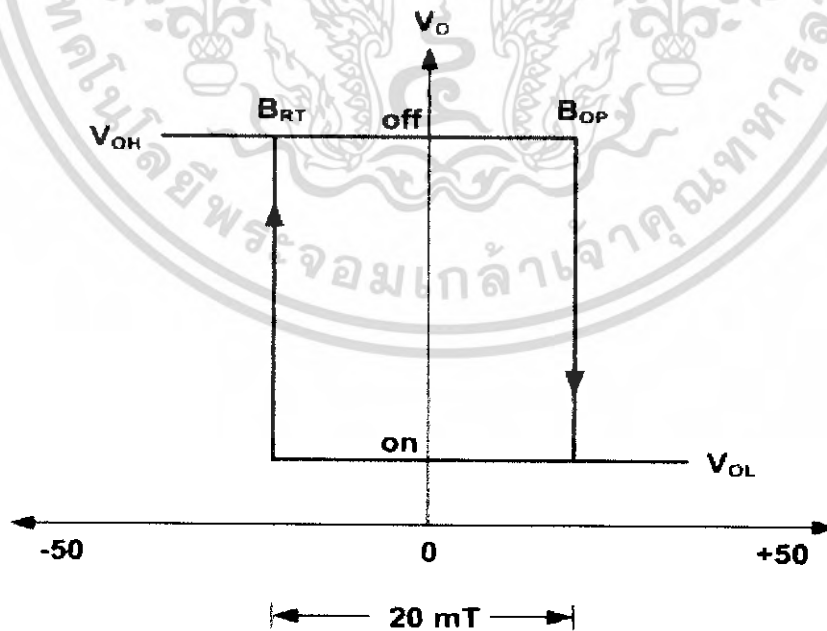
เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาวะปกติจะ “ปิด” และจะ “เปิด” เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก และจะปิดเมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก รูปที่ 2.5 แสดงผังงานของฮอลล์ชนิดสวิทช์ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มจนถึงค่า  $B_{RT}$  แล้วจะได้แรงเคลื่อน  $V_{OH}$  สภาวะเช่นนี้ คือ “เปิด” แต่เมื่อสนามแม่เหล็กลดลงจะถึง  $B_{OP}$  จะได้แรงดัน  $V_{OL}$  สภาวะเช่นนี้ คือ “ปิด”



รูปที่ 2.5 ผังการทำงานและกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดสวิทช์

### 2.3.2 ฮอลล์ชนิดแลตซ์ (Latching Hall Device)

ฮอลล์ชนิดแลตซ์ เป็นฮอลล์ที่จะเปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กบวก และจะปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กลบ ซึ่งต่างจากฮอลล์ชนิดสวิทช์ รูปที่ 2.6 เป็นการตอบสนองของฮอลล์จะเห็นได้ว่าการตอบสนองของฮอลล์จะเปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กเพื่อแลตซ์เป็น 20 mT และจะปิดเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กเป็น -25 mT



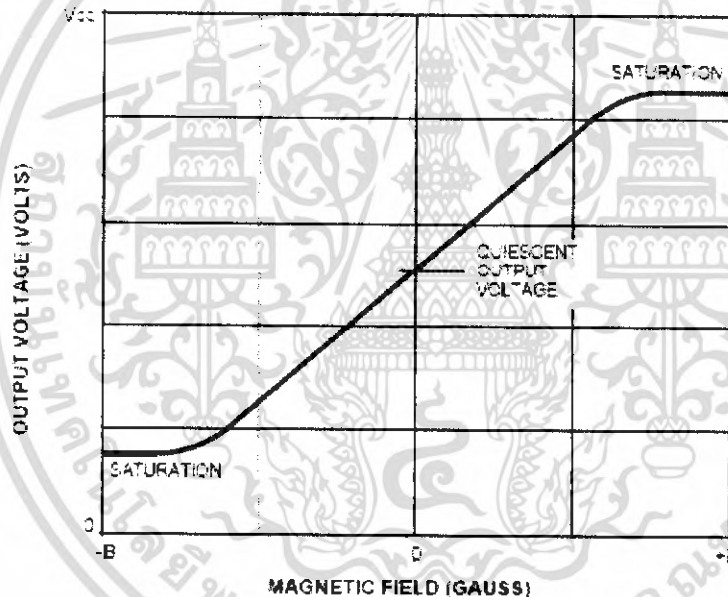
รูปที่ 2.6 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตกับสนามแม่เหล็กของฮอลล์ชนิดแลตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น (Linear Hall Device)

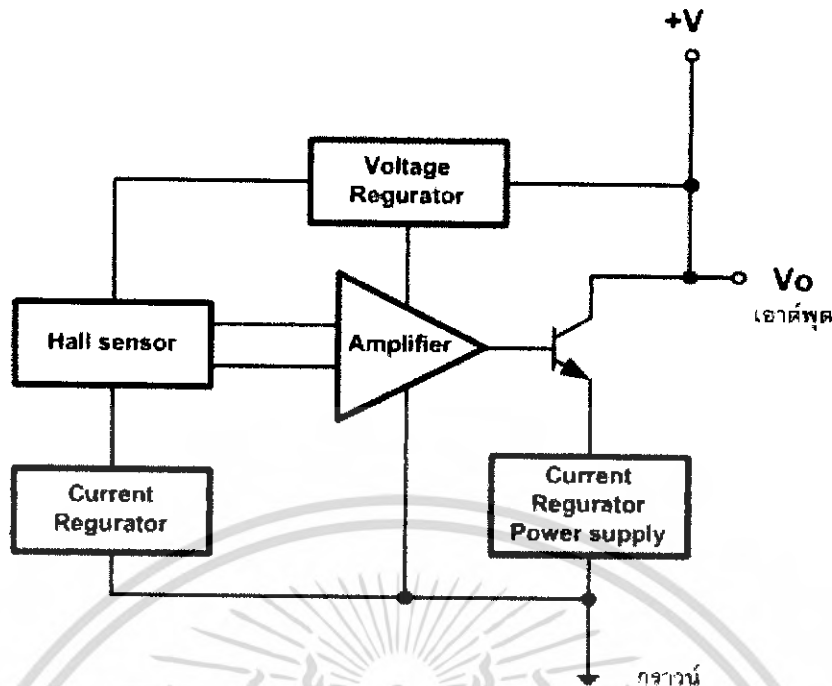
ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น เป็นฮอลล์ที่จะไม่เกิดการเปิดหรือปิด แบบฮอลล์ชนิดสวิตช์ กล่าวคือไม่เกิดการฮีสเทอรีซิส ความไวของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมีประมาณ  $16 \text{ mV/mT}$  ฮอลล์ชนิดนี้สามารถหาช่วงของสนามแม่เหล็ก ได้ถ้ารู้ค่าแรงดันในขณะที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ซึ่งเรียกว่า จุดอินเตอร์เซปต์ (Intercept)

หากแรงดันของฮอลล์มีค่ามากกว่าจุดอินเตอร์เซปต์แล้ว แสดงว่าขณะนั้นช่วงของสนามแม่เหล็กเป็นช่วงเหนือ แต่ถ้าแรงดันของฮอลล์น้อยกว่าจุดอินเตอร์เซปต์ แสดงว่าสนามแม่เหล็กในขณะนั้นเป็นช่วงใต้ ซึ่งคุณสมบัติในข้อนี้สามารถนำไปหาดำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นเบอร์ 3503

รูปที่ 2.7 เป็นกราฟแสดงผลการตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้น เบอร์ 3503 ภายในไอซีมีฮอลล์ชนิดเชิงเส้นคอยรับรู้ (Sensor) สนามแม่เหล็ก กระแสที่จ่ายให้แก่ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นต้องคงที่ โดยต้องต่อด้วยวงจรกระแสคงที่ให้แก่ฮอลล์ เอาต์พุตจากฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมีค่าค่า ดังนั้นจึงต้องขยายเพื่อให้ได้แรงดันสูงพอเมื่อนำไปจะใช้งาน



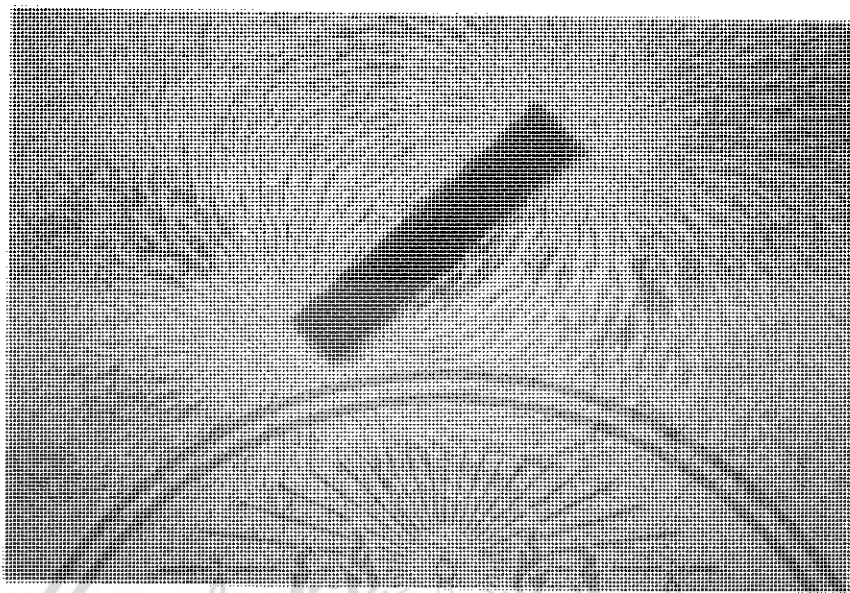
รูปที่ 2.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของฮอลล์เซ็นเซอร์ 3503

เนื่องจากฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ อุณหภูมิจึงมีผลต่อการทำงานของฮอลล์ภายในไอซีจึงจะต้องมีส่วนชดเชยอุณหภูมิ ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นที่ดีจะต้องมีความเที่ยงตรงขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานปกติ แรงดันที่วัดได้ไม่ควรผิดพลาดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่อุณหภูมิปกติ แรงดันของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นจะมีค่าน้อยมากเป็นมิลลิโวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องขยายเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น และถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยแรงดันที่ได้ก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากสนามแม่เหล็กมีค่ามาก ค่าของแรงดันก็จะมากขึ้นด้วย

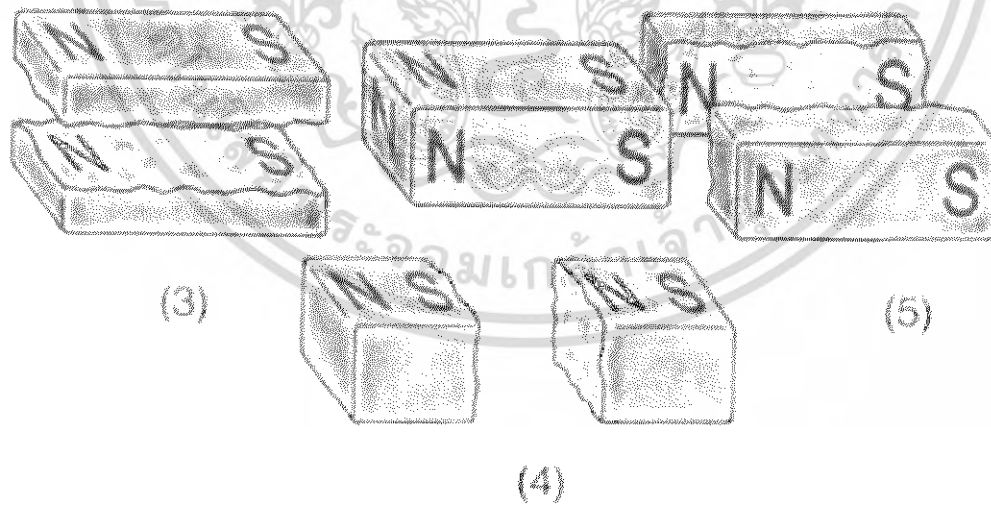
## 2.4 พื้นฐานการตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก

ตามธรรมชาติแล้วสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว (Dipole) วางอยู่ห่างกันเป็นระยะทางจำกัดค่าหนึ่งเสมอ โครงสร้างทางแม่เหล็กนี้เราจะเรียกว่า ไดโพลแม่เหล็ก (Magnetic Dipole) ดังรูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผงเหล็กที่โรยลงบนแผ่นกระดาษที่มีแท่งแม่เหล็กวางอยู่ จะปรากฏขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Lines) พุ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง และในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่ง ซึ่งถูกหักออกเป็นท่อนเล็กๆ แล้วยังมีไดโพลแม่เหล็กเกิดขึ้นที่แม่เหล็กแต่ละท่อน และประพุดิตัวเป็นแท่งแม่เหล็กอันใหม่ต่อไปอีก ดังนั้นการที่จะทำการแยกขั้วแม่เหล็กทั้งสองออกจากกันเป็นขั้วแม่เหล็กเดี่ยว (Monopole) จึงไม่สามารถที่จะทำได้เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ผงเหล็กเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

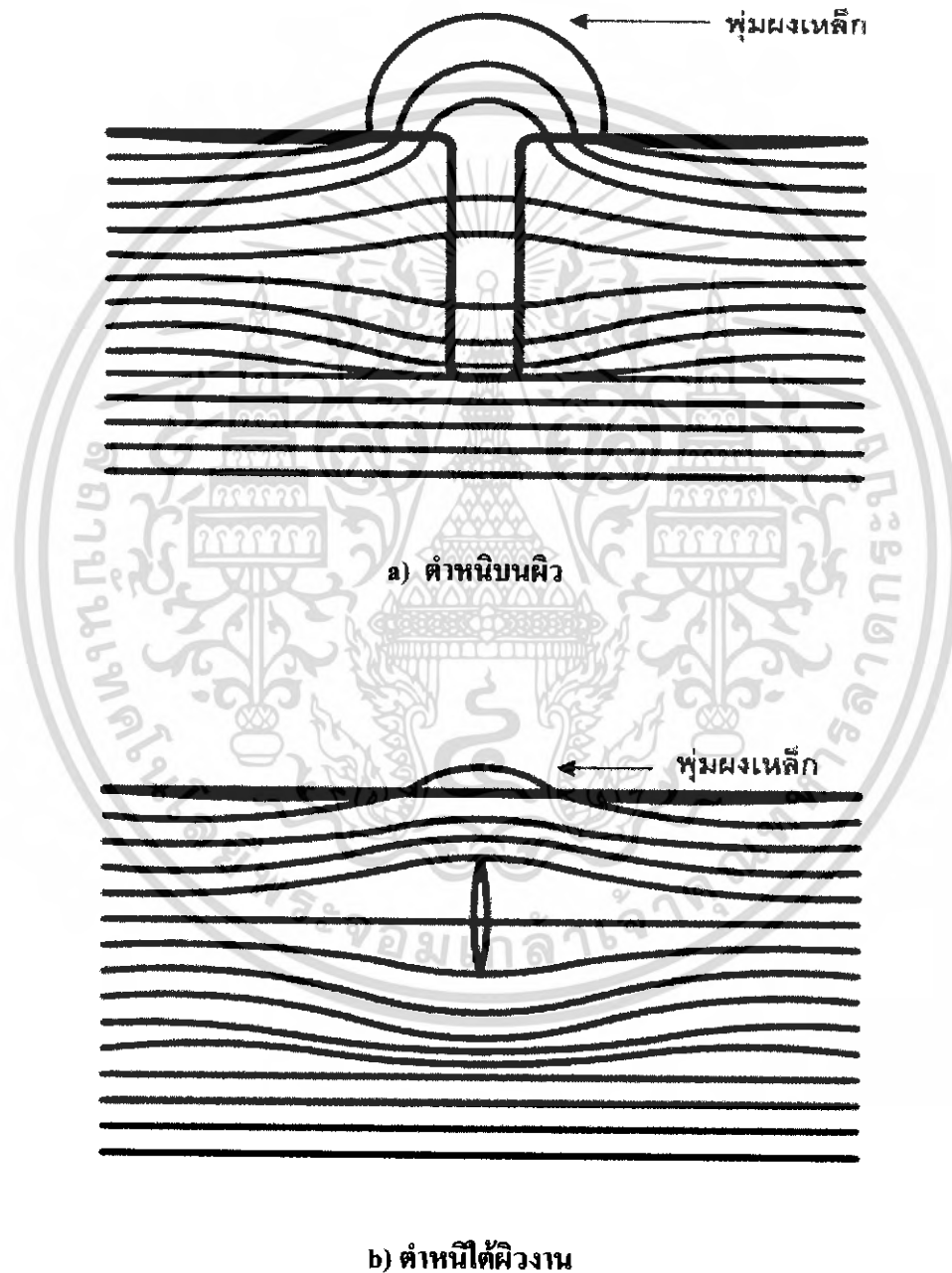


รูปที่ 2.10 แท่งแม่เหล็กแต่ละท่อนกลายเป็นไดโพลแม่เหล็กอันใหม่เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 การตรวจสอบหาตำแหน่งของผิวงานด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดสนามแม่เหล็กตามกฎของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากล่าวคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และจะเหนี่ยวนำขึ้นงานทดสอบที่เป็นเหล็ก ดังนั้นเมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังบริเวณที่เป็นตำแหน่งจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเส้นแรงแม่เหล็กทำให้เกิดเป็นพุ่มเหล็กอย่างเห็นได้ชัด



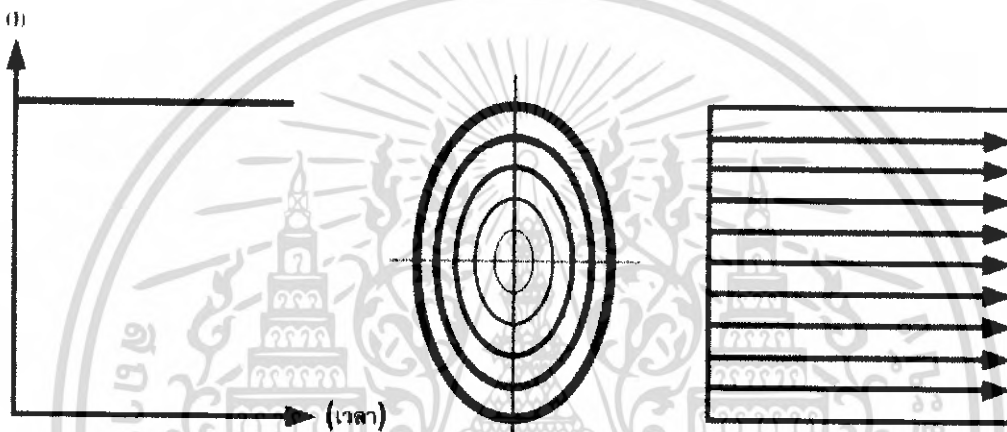
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะของรอยตำหนิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

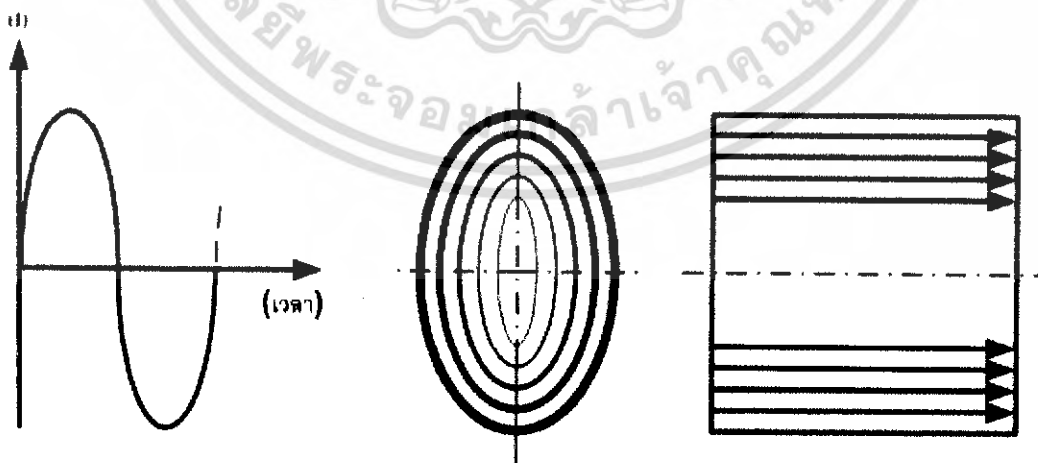
## 2.4.2 เงื่อนไขการทดสอบ

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าตรง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นเมื่อมีความเข้มสนามแม่เหล็กเพียงพอ ก็สามารถตรวจหารอยตำหนิภายใต้ผิวชิ้นงานได้ถึงระยะหนึ่งที่ไม่ลึกจนเกินไปได้

ส่วนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าสลับ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาผิวหนัง (Skin Effect) มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่ากระแสไฟฟ้าตรง สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ทำให้การแสดงการปรากฏของตำหนิบนผิวชิ้นทดสอบเกิดไวขึ้น



รูปที่ 2.12 การเกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดกระแสไฟฟ้าตรง

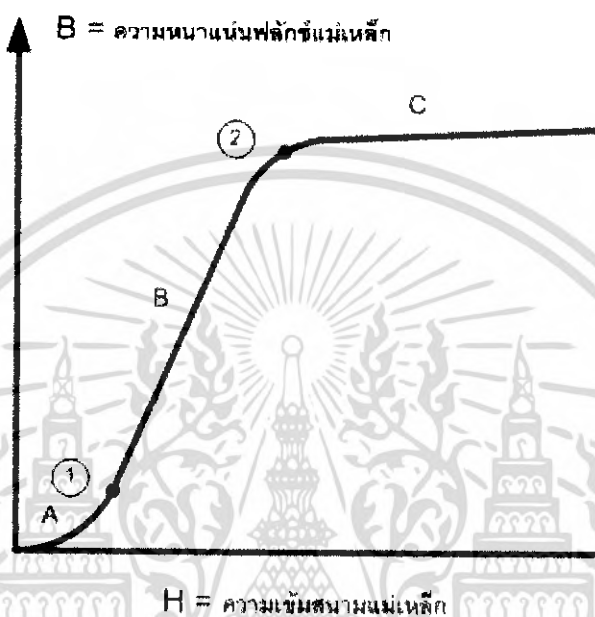


รูปที่ 2.13 การเกิดสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากบริเวณผิวชิ้นทดสอบจากกระแสไฟฟ้าสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สิ่งที่ช่วยเหนี่ยวนำขึ้นทดสอบให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้นั้น จะมีสิ่งที่เกี่ยวข้อง คึงต่อไปนี่คือ ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) **B** และ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) **H**



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B และ H

เมื่อชิ้นงานที่มีความเป็นแม่เหล็กได้ถูกเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้น ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนี้ จะถูกปรับแต่งให้ได้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก **B** ให้สูงอย่างเหมาะสม ซึ่งมันจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำแม่เหล็กของชิ้นงานด้วย

A = เส้น โคนึงจนถึงจุดที่ 1 ค่า **H** จะเป็นสัดส่วนต่อการเพิ่มค่า **B**

B = ระหว่างจุด 1 ถึงจุด 2 จะเกิดการนำแม่เหล็กในชิ้นงานทดสอบได้สูงที่สุด

C = จากจุด 2 เป็นพื้นที่การอิ่มตัวของแม่เหล็ก เช่น เส้น โคนึงเอียงจะแสดงถึงความต้านทานแม่เหล็กภายในเหล็กที่เป็นสัดส่วนต่อความต้านทานในอากาศ

**B** = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตร ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) หรือ Tesla

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
72764  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$H$  = ความหนาแน่นแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (kA/m)

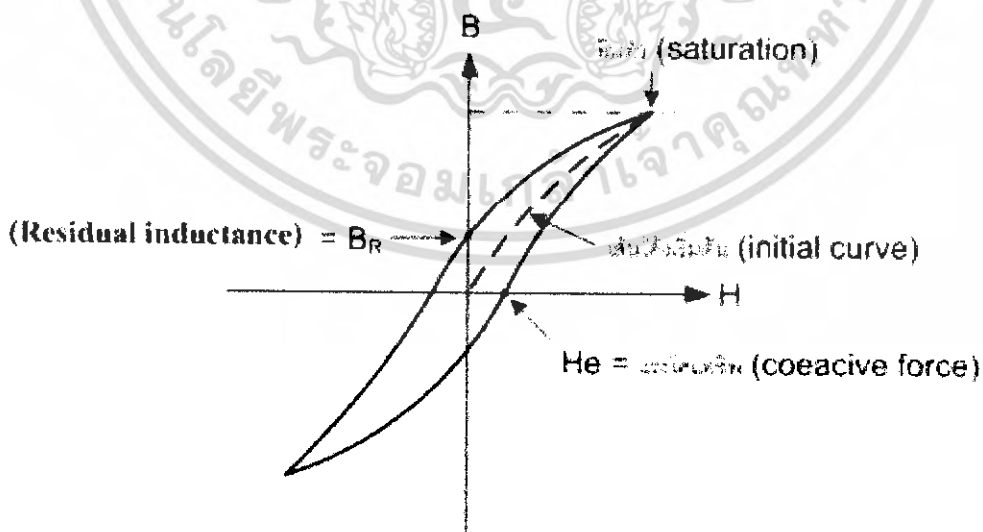
โดยที่  $1\text{kA/m} = 10\text{A/cm} = 1.256\text{ Oe}$

## 2.5 ความเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทดสอบ

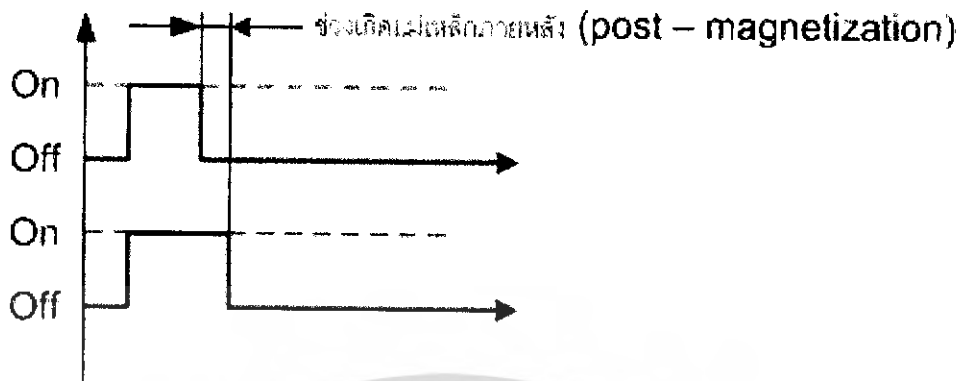
ความเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่นำมาทดสอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

### 2.5.1 วัสดุแม่เหล็กอ่อน

จะใช้แรงแม่เหล็กค่อนข้างน้อย ค่า Residual inductance ต่ำ ส่วนใหญ่แล้วจะนำมาใช้ในการเกิดสนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อปิดสวิตช์ สนามแม่เหล็กในชิ้นงานทดสอบจะหายไปหมด จัดได้ว่าเป็นวัสดุที่ง่ายต่อการเกิดและลบล้างอำนาจแม่เหล็ก วัสดุประเภทนี้ไม่ได้หมายความว่ามีความรวมไปถึงวัสดุที่มีความอ่อนนุ่ม วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กอ่อนมีลักษณะแคบ แรงลบล้างแม่เหล็กมีค่าน้อยคืออยู่ในช่วง  $0.004 - 0.088$  แอมแปร์ต่อเซนติเมตร วัสดุแม่เหล็กอ่อนได้แก่ โลหะผสม Fe - Si ที่นำมาทำเป็นแกนหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และวัสดุใหม่ที่เรียกว่า แก้วโลหะ ก็จัดเป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปทำเป็นแม่เหล็กประสิทธิภาพสูงในอุปกรณ์ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

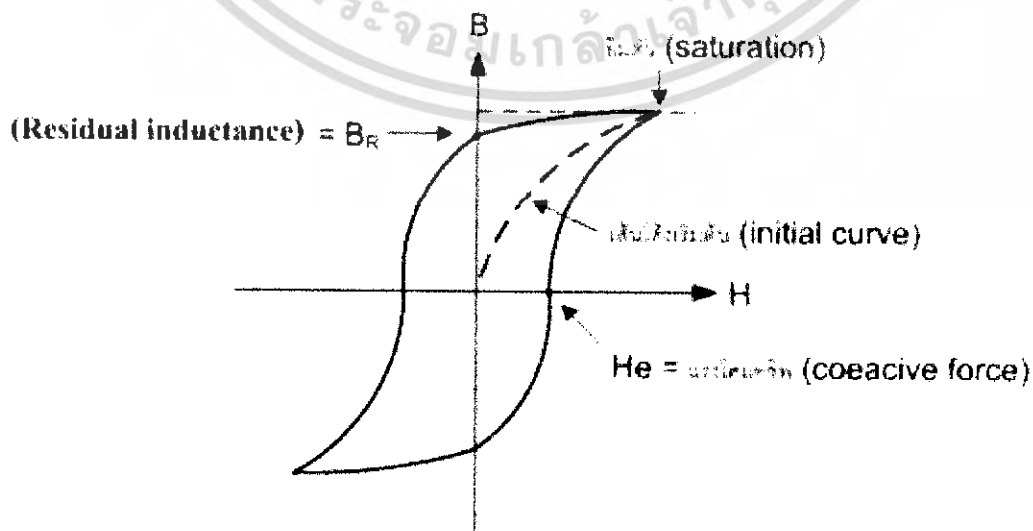


การใช้ทดสอบทำให้เป็นแม่เหล็ก

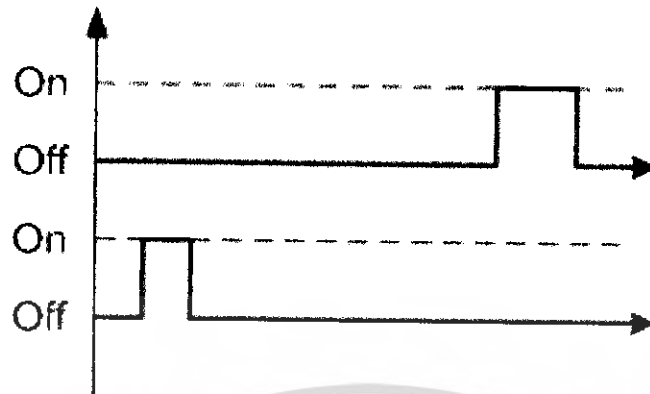
### รูปที่ 2.15 วงฮิสเทอรีซิสของวัสดุแม่เหล็กอ่อน

#### 2.5.2 วัสดุแม่เหล็กแข็ง

ได้แก่ชิ้นทดสอบเหล็กที่มี  $C > 0.2\%$  วัสดุประเภทนี้มีความเสียดทานมากต่อสนามแม่เหล็ก มีคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับวัสดุแม่เหล็กอ่อนคือ ต้องการสนามแม่เหล็กภายนอกความเข้มสูงในการทำให้เป็นแม่เหล็ก การลบล้างสถานะแม่เหล็กก็ทำได้ยาก ขนาดของวงฮิสเทอรีซิสจึงมีความกว้างมาก ค่าริมาเนนซ์จะสูงมาก ตัวอย่างวัสดุแม่เหล็กแข็งได้แก่ โลหะผสมอัลนิโค (Alnico Alloy) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่ได้จากการผสมโลหะอลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์เข้าด้วยกัน แรงลบล้างแม่เหล็กของโลหะผสมชนิดนี้สูงถึง 40 – 160 กิโลแอมแปร์ต่อเมตร อัลนิโคจึงเป็นวัสดุแม่เหล็กที่มีความสำคัญและใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การให้ทดสอบทำให้เป็นแม่เหล็ก

รูปที่ 2.16 วงอิเลททรอนิกส์ของวัสดุแม่เหล็กแข็ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ความรู้พื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณสมบัติต่าง ๆ มากขึ้น เทคโนโลยีทางการผลิตชิปไอซีกำลังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าชิปไอซีเหล่านี้สามารถที่จะรวมคุณสมบัติต่างๆ อาทิเช่น การประมวลผลข้อมูล หรือที่เรียกว่า ไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor) การกระทำทางลอจิก การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก ซึ่งโดยส่วนใหญ่ทั่วไปแล้วเรานิยมเรียกกันว่า ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ (IC Microcontroller) หรือเรียกสั้นๆว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่ง ที่รวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถใช้งานแทนวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อนได้ นอกจากนั้นแล้ว ยังช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบได้ ยังทำให้ขีดความสามารถของระบบเพิ่มขึ้นภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม การที่จะนำไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้ในโครงการต่าง ๆ นั้น จะต้องมีความรู้พื้นฐานเสียก่อน ดังนั้นแล้วในบทนี้ จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเฉพาะไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ใช้ในโครงการ การแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล การขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ การขับไมโครแสดงผลแบบคลิกเทสต์ และทฤษฎีพื้นฐานที่สอดคล้องในโครงการในฉบับนี้

### 3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51

#### 3.1.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51

คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ที่สำคัญๆมีดังนี้

- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ เพียงชุดเดียว
- มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานอยู่ภายในชิปจำนวน 4 กิโลไบต์ (เบอร์ 8031 8032 ไม่มีหน่วยความจำส่วนนี้ ส่วนเบอร์ 8052 มีหน่วยความจำส่วนนี้ 8 กิโลไบต์ และเบอร์ 83C51FB จะมีหน่วยความจำส่วนนี้รวมทั้งสิ้น 16 กิโลไบต์)

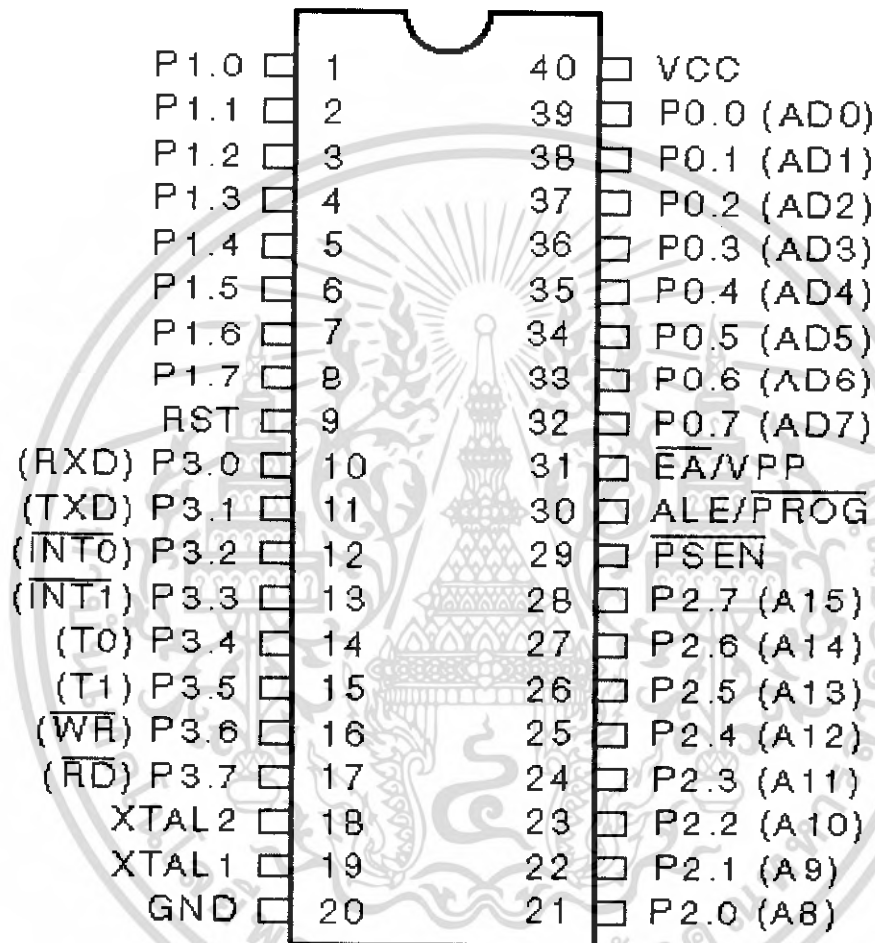
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีหน่วยความจำสำหรับ โปรแกรมและข้อมูล (RAM) อยู่ภายในชิปจำนวน 128 ไบต์ (ในเบอร์ 8031 8051) หรือ 256 ไบต์ (ในเบอร์ 8031 8052)
- สามารถใช้หน่วยความจำสำหรับ โปรแกรมและข้อมูลที่อยู่ภายนอกชิปได้ อย่าง ละ 64 กิโลไบต์ แยกจากกัน
- คำสั่งส่วนใหญ่ใช้เวลาเพียง 1 ไมโครวินาที เมื่อใช้คริสตอลความถี่ 12 เมกกะ เฮิร์ตซ์
- มีพอร์ตที่สามารถรับ หรือส่งข้อมูล ได้ทั้ง 2 ทิศทางจำนวน 4 พอร์ต พอร์ตละ 8 บิต หรือสามารถใช้งานเป็นพอร์ตขนาด 1 บิต แยกจากกัน ทำให้เหมือนมีพอร์ต ขนาด 1 บิต ใช้งานรวมทั้งสิ้น 32 พอร์ต
- รับและส่งข้อมูลแบบอนุกรม ได้ในตัว โดยสามารถกำหนดความเร็วในการรับ และส่งข้อมูล (Baud rate) ได้ตั้งแต่ 300 ถึง 375 กิโลบิตต่อวินาที
- จัดลำดับความสำคัญของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้ 2 ระดับ
- มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานเป็นไทมเมอร์ หรือเคาน์เตอร์ เพื่อนับจำนวนสัญญาณ นาฬิกาภายในชิป หรือนับเปลี่ยนสถานะของสัญญาณภายนอก 16 บิต จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้สำหรับนับจำนวนพัลส์ วัดความกว้างของพัลส์ หรือใช้วัดช่วงเวลา (ในเบอร์ 8052 จะมี 3 ตัว)
- หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในบางส่วน สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทั้ง ระดับบิต เพื่อให้การออกแบบ โปรแกรมและการควบคุมระบบทำได้ง่ายขึ้น
- มีคำสั่งคูณ และหารเลขในตัวเอง
- สามารถประมวลผลแบบบูลีน เพื่อใช้งานควบคุมโดยเฉพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของ AT89C51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทุกเบอร์จะมีขาใช้งานพื้นฐานและสถาปัตยกรรมเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดขั้นต้น ดังนี้



รูปที่ 3.1 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89C5x

ขา Vcc ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง +5 V

ขา GND เป็นขากราวด์ สำหรับต่อกับกราวด์ของระบบ

**ขาพอร์ต 0 (P0.0-P0.7)** มีขา 8 ขา สามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ต 0 ขาใดขาหนึ่งเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์ต่ำของหน่วยความจำภายนอก (A0-A7) และขาข้อมูล (D0-D7) โดยใช้กระบวนการมัลติเพล็กซ์เข้าช่วย เพื่อสลับการทำงานเป็นได้ทั้งขาติดต่อกับแอดเดรส และขาข้อมูล

**ขาพอร์ต 1 (P1.0-P1.7)** มีขา 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย นอกจากนั้นในอนุกรม AT89Cxx จะใช้ขา P1.0 เป็นขาอินพุตสำหรับนับค่าขงไทมเมอร์ 2 และ P1.1 เป็นขาอินพุตทริกเกอร์ของไทมเมอร์ 2 ในขณะที่ขา P1.4 ถึง P1.7 เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการ โปรแกรมข้อมูลในระบบ

**ขาพอร์ต 2 (P2.0-P2.7)** มีขา 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุตสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก (A8-A15)

**ขาพอร์ต 3 (P3.0-P3.7)** มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุตสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “ 1 ” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุตอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุตได้ นอกจากนั้นขาพอร์ต 3 ยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ดังมีรายละเอียดขั้นต้นต่อไปนี้

**P3.0** ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

**P3.1** ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา TxD

**P3.2** ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา  $\overline{INT0}$

**P3.3** ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา  $\overline{INT1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- P3.4** ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0  
**P3.5** ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1  
**P3.6** ใช้เป็นขาสัญญาณ  $\overline{WR}$  ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก  
**P3.7** ใช้เป็นขาสัญญาณ  $\overline{RD}$  ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

**ขารีเซต (Reset)** ใช้ในการรีเซตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้การป้อนสัญญาณเพื่อรีเซตสถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซตอย่างน้อย 2 แมกซ์ซีน ไซเคิล โดยที่วงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่องไปอย่างเป็นปกติ

**ขา  $\overline{ALE}/\overline{PROG}$  (Address Latch Enable/Program pulse input)** เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมการแลตช์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอก นอกจากนั้นขานี้ยังใช้เป็นขาสำหรับรับพัลส์ของการโปรแกรมสำหรับโปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในรุ่นที่มีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบอีพรอม

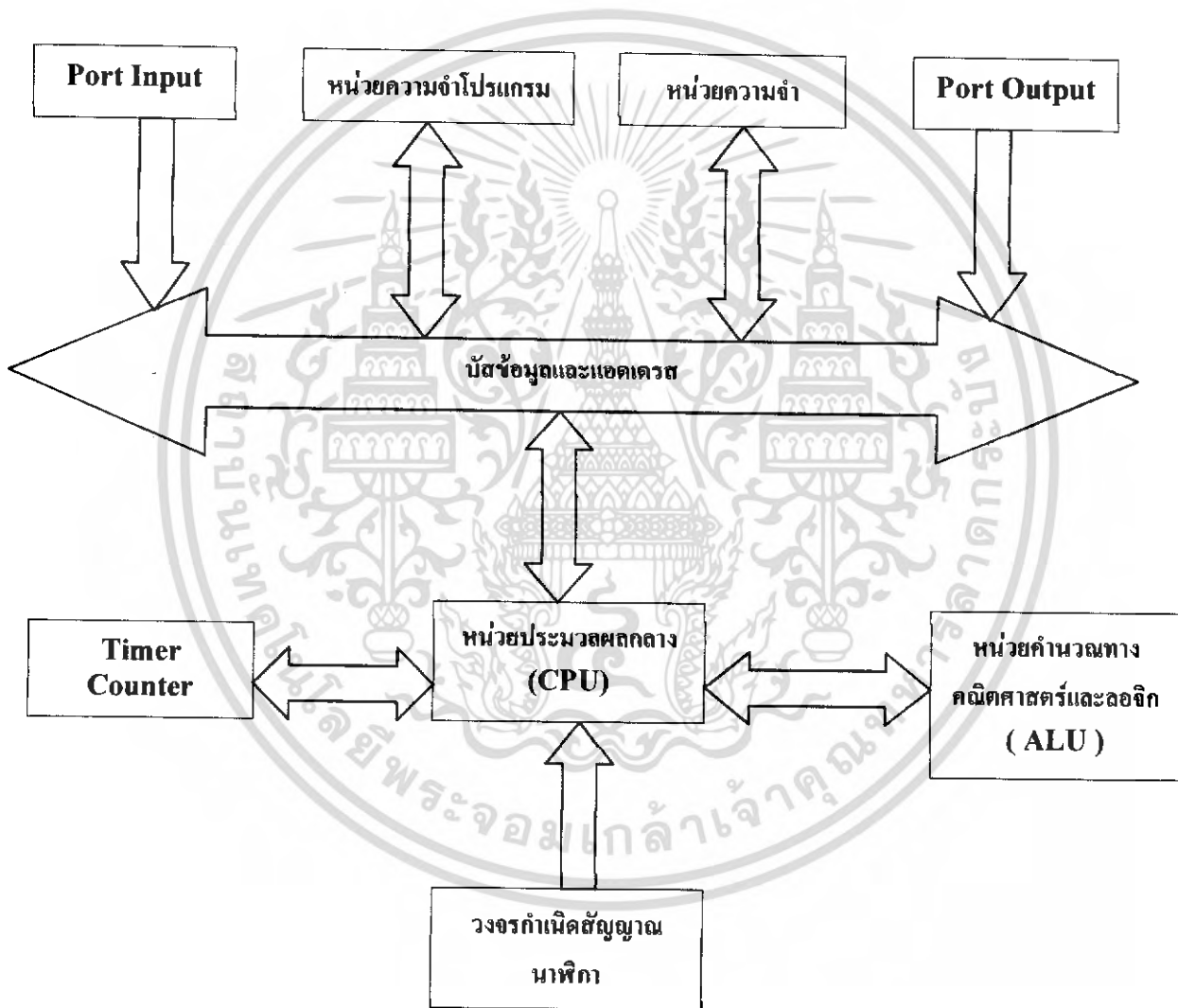
**ขา  $\overline{PSEN}$  (Program Store Enable)** ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณออกมาที่ขา  $\overline{PSEN}$  2 ครั้ง ในแต่ละแมกซ์ซีน ไซเคิล แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอกขา  $\overline{PSEN}$  จะไม่มีการส่งสัญญาณใดๆออกมา

**ขา  $\overline{EA}/V_{pp}$  (External Access enable/Programming voltage input)** ใช้สำหรับเลือกการติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าหาขานี้เป็น "0" เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก แต่ถ้าหากขานี้เป็น "1" เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ที่ขา  $\overline{EA}$  ยังใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับแรงดันไฟสูงสำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบแฟลชต้องการแรงดันสำหรับการโปรแกรม +12 V

**ขา XTAL1 และ XTAL2** เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.1.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีสมาชิกในตระกูลหลายเบอร์ด้วยกัน แต่ละเบอร์จะมีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างกัน เช่น มีหน่วยความจำภายในสำหรับเก็บโปรแกรมและข้อมูลภายในชิปเพิ่มขึ้น มีวงจรเปลี่ยนค่าสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลในตัว สามารถรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์ได้หลายชนิด ทำกระบวนการ DMA (Direct Memory Access) ได้ในตัว มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้เป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งในแต่ละตระกูลก็จะมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในของ MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ที่นับได้ว่าเป็นเบอร์พื้นฐานสำหรับตระกูล MCS-51 นี้ ได้แก่ เบอร์ 8051 8031 8751 โดยเบอร์ 8051 จัดเป็นสมาชิกตัวแรกในตระกูล ซึ่งมีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิปเป็น ROM ขนาด 4 กิโลไบต์ และหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลทั่วไปภายใน MCS-51 (RAM) เองจำนวน 128 ไบต์ มีพอร์ตขนาด 8 บิต 4 พอร์ต มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้เป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต รวม 2 ตัว สามารถรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอกได้ 2 ชนิด สามารถรับและส่งข้อมูลแบบอนุกรมผ่านทางพอร์ตสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม มีวงจรรอสซิงลเลเตอร์เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาควบคุมการทำงานในตัวเอง ส่วนเบอร์ 8751 จะมีคุณสมบัติเหมือนเบอร์ 8051 ทุกอย่าง ต่างกันเพียงชนิดของหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิปคือ เบอร์ 8751 จะเป็น EPROM แทนที่จะเป็น ROM ส่วนเบอร์ 8031 จะเหมือนกับเบอร์ 8051 ต่างกันเพียงในเบอร์ 8031 ไม่มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมภายในชิปเท่านั้น

เบอร์	หน่วยความจำโปรแกรมบนชิป	หน่วยความจำข้อมูลบนชิป	Timer
8051	4K ROM	128 bytes	2
8031	-	128 bytes	2
8751	4K EPROM	128 bytes	2
8052	8K ROM	256 bytes	3
8032	-	256 bytes	3
8752	8K EPROM	256 bytes	3

ตารางที่ 3.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่างๆ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ใช้แรงดันไฟเพียง 5 โวลต์ในการทำงาน ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต เบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ที่มีตัวอักษร C อยู่ตรงกลางเบอร์ เช่น 80C31 80C51 จะเป็นเบอร์ของชิปที่ผลิตโดยอาศัยเทคโนโลยี CMOS ซึ่งใช้พลังงานในการทำงานน้อยกว่า และสามารถควบคุมการใช้พลังงานของตัวชิปได้จากโปรแกรม เพื่อการประหยัดในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

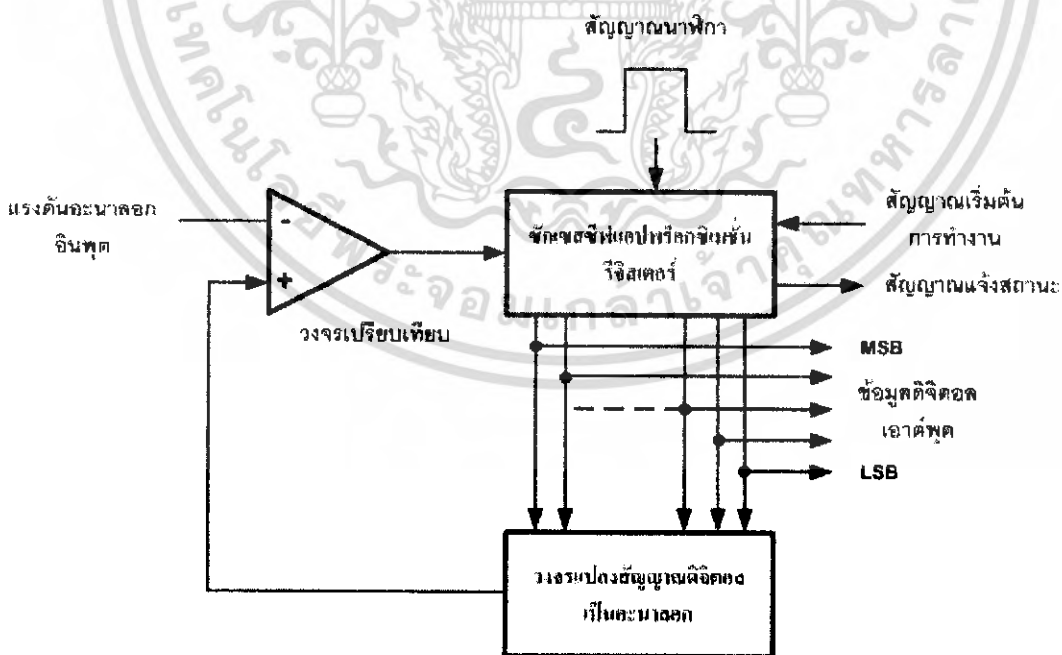
MCS-51 เป็นตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากตระกูล MCS-48 ดังนั้นจึงมีความสามารถเหนือกว่าหลายอย่าง ข้อดีของ MCS-51 ก็คือสามารถใช้ความถี่ได้ถึง 12 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือ สำหรับบางเบอร์ในตระกูลสามารถใช้ได้ 16 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำให้ช่วงเวลาในการทำงานแต่ละคำสั่งน้อยมาก เมื่อใช้ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์ คำสั่งที่ใช้เวลาน้อยสุดจะใช้เวลาเพียง 1 ไมโครวินาที ส่วนคำสั่งที่ใช้เวลามากที่สุดจะใช้เวลาเพียง 4 ไมโครวินาที เท่านั้น

### 3.2 การแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัลแบบซัคเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชัน

#### (Digital to Analog Converters Successive Approximation)

การแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิทัล (ADC) ที่ได้รับความนิยมสูงและมีประสิทธิภาพดี คือ การแปลงแบบซัคเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชัน กล่าวคือ เป็นการแปลงแบบประมาณค่าใกล้เคียง โคอะแกรมการทำงานแสดงในรูป 3.3 ส่วนที่สำคัญหลักคือ วงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอะนาลอก (DAC) สัญญาณนาฬิกา และส่วนควบคุมลอจิก

วงจร ADC แบบซัคเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชันนี้จะใช้รีจิสเตอร์เลขฐานสองหรือไบนารี รีจิสเตอร์ในการส่งข้อมูลดิจิทัลของวงจร DAC ภายในแต่ละบิตของรีจิสเตอร์จะเซตและรีเซตโดยการควบคุมจากวงจรควบคุม การทำงานของ ADC สามารถพิจารณาจากโคอะแกรมดังรูป 3.3 ได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 แสดงโคอะแกรมการทำงานของวงจร ADC แบบซัคเซสซีฟแอปพร็อกซิเมชัน

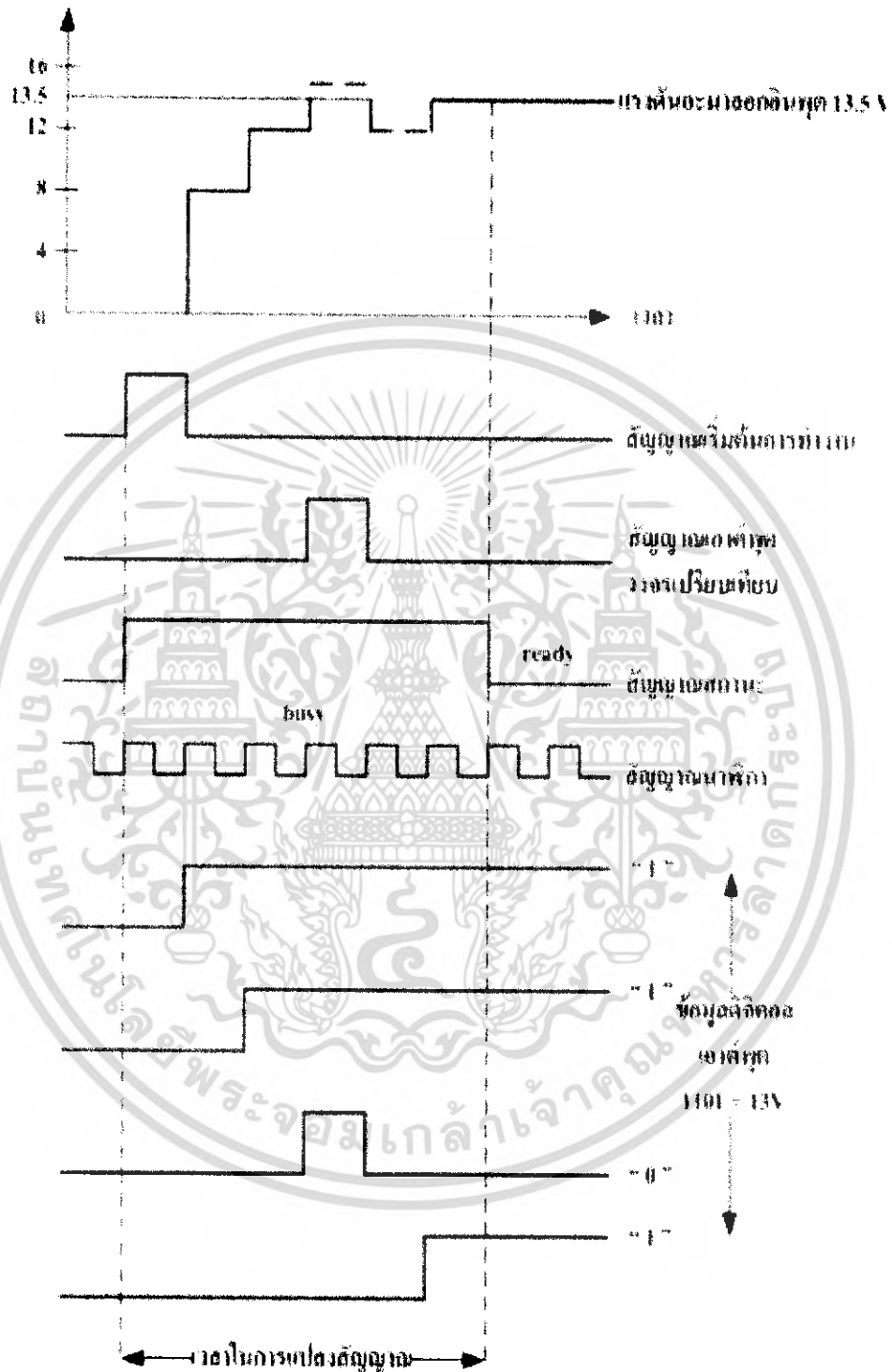
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาไดอะแกรมการทำงาน กำหนดให้แรงดันอะนาลอกอินพุต ( $V_{in}$ ) มีค่า  $13.5\text{ V}$

1. ส่งสัญญาณเริ่มต้นการทำงาน (start converter) มายังซีกเซสซีฟแอปหรือกซิมชั้นรีจิสเตอร์
2. ขณะนี้สถานะของรีจิสเตอร์ไม่ว่าง (budy) สัญญาณนาฬิกาถูกแรกถูกส่งเข้ามาเพื่อ กำหนดให้ค่าของรีจิสเตอร์เท่ากับ 0000
3. เอาต์พุตของ DAC จะเป็น  $0\text{ V}$  ส่งไปในวงจรเปรียบเทียบ เพื่อเปรียบเทียบ  $V_{in}$  ในขณะนี้ จะได้เอาต์พุตเท่ากับ  $-5\text{ V}$  กำหนดเป็นลอจิก “0”
4. เมื่อสัญญาณถูกต่อไปเข้ามา จะทำการเซตบิต MSB ของรีจิสเตอร์เป็น “1”
5. ในกรณีที่ เป็น ADC ขนาด 4 บิต ดังนั้นการที่บิต MSB เซต จะทำให้วงจร DAC แปลงค่าแรงดัน  $8\text{ V}$  นำไปเปรียบเทียบวงจรเปรียบเทียบแรงดัน แต่ยังไม่พอ  $V_{in}$  ดังนั้นเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันยังคงเป็น “0” ทำให้รีจิสเตอร์ยังคงค่าบิต MSB ให้เป็น “1” ต่อไป
6. ต่อมาบิต B2 (ถัดจากบิต MSB 1 บิต เนื่องจาก 4 บิต กำหนดบิต MSB = B3) จะเซตซึ่งมีค่าเท่ากับ  $4\text{ V}$  นำไปรวมกับค่าของบิต MSB ที่มีอยู่  $8\text{ V}$  เช่น  $12\text{ V}$  นำไปเปรียบเทียบ กับ  $V_{in}$  ก็ยังไม่พอ รีจิสเตอร์จึงยังคงค่า B2 ไว้ที่ “1” เช่นกัน
7. ต่อมา บิตจะเซตทำให้แรงดันเอาต์พุตออกมา DAC กลายเป็น  $8+4+2 = 14$  ซึ่งมากกว่า  $V_{in}$  ทำให้วงจรเปรียบเทียบเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็น “1” ซึ่งจะส่งสัญญาณมาควบคุมให้ B1 กลายเป็น “0”
8. เมื่อบิต LSB ถูกเซต จะมีค่าแรงดัน “1” เข้ามารวมกับค่าของ B3 B2 และ B1 เป็น  $8+4+0+1 = 13\text{ V}$  นำไปเปรียบเทียบกับ  $V_{in}$  ปรากฏว่าน้อยกว่า  $V_{in}$  ทำให้บิตที่ B0 หรือ LSB มีค่าเป็น “1”
9. ขณะนี้ทุกบิตในรีจิสเตอร์ถูนำมาแปลงค่าเรียบร้อยแล้ว ทำให้สถานะของรีจิสเตอร์กลับมาเป็นพร้อมทำงาน (ready)
10. ข้อมูลดิจิตอลที่ได้จากการ ADC แบบนี้ จะมีค่า  $1001_2$  หรือ  $13\text{ V}$  ซึ่งใกล้เคียงกับ  $V_{in}$  มากที่สุดถ้าหากรีจิสเตอร์มีจำนวนบิตมากกว่านี้ ความละเอียดของข้อมูลที่แปลงได้จะมีค่าใกล้เคียงมากขึ้น ช่วงเวลาการแปลงสัญญาณ จะเริ่มต้นตั้งแต่สัญญาณนาฬิกาถูกแรกถูกส่งไปเตรียมระบบ จนถึงเมื่อสถานะของรีจิสเตอร์กลับมาเป็นพร้อมทำงานอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะต้องใช้จำนวนสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ  $n+1$  พัลส์ โดย  $n$  เท่ากับจำนวนบิตของรีจิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟอินพุตที่ถูกต้องของ DAC (V)



รูปที่ 3.4 แสดงไดอะแกรมเวลาการทำงานของวงจร ADC แบบซิกเซสซีฟแอปหรืออิมเมชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นถ้าหาก ADC แบบซิกเซสซีฟแอปพริอ็อกซิเมชันขนาด 4 บิต ใช้สัญญาณนาฬิกาความถี่ 50 kHz เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการแปลงสัญญาณจะคำนวณได้ดังนี้

(1) จำนวนคาบสัญญาณนาฬิกา

$$f_{ckl} = 50\text{kHz} = 50 \times 10^3$$

$$T = \frac{1}{50 \times 10^3} = 20 \text{ มิลลิวินาที}$$

- (2) จำนวนสัญญาณนาฬิกาทั้งหมดที่ใช้ในการแปลงเท่ากับ  $n+1$  ซึ่ง  $n$  มีค่าเท่ากับ 4 เนื่องจากมีจำนวน 4 บิต ดังนั้นจำนวนสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ทั้งหมดจึงเท่ากับ  $4+1 = 5$
- (3) เวลาทั้งหมดที่ใช้เท่ากับ  $5 \times 20 = 100$  มิลลิวินาที

จะเห็นว่าวงจร ADC แบบซิกเซสซีฟแอปพริอ็อกซิเมชันมีความเร็วในการทำงานสูงพอสมควร เหมาะอย่างยิ่งในการนำไปใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

### 3.2.1 ความเที่ยงตรงของวงจร ADC

ความเที่ยงตรงของวงจร ADC เป็นการแสดงการเปรียบเทียบแรงดันอนุภาคของวงจร ADC กับแรงดันที่ควรเกิดขึ้นจริง ยกตัวอย่างที่ข้อมูลดิจิทัลสูงสุดของวงจร ADC ขนาด 8 บิต เมื่อเทียบเป็นแรงดันอนุภาคควรมีค่าเท่ากับ  $5.0000\text{ V}$  แต่จากการคำนวณส่วนใหญ่แล้วจะได้ค่าประมาณ  $4.9804\text{ V}$  นั่นคือเกิดความผิดพลาดไป  $0.0195\text{ V}$  หรือ  $19.5\text{ mV}$  แต่การบอกค่าความเที่ยงตรงของวงจร ADC มักระบุเป็นจำนวนที่เทียบกับ VLSB ดังนั้นในวงจร ADC ขนาด 8 บิตจึงมีค่าความเที่ยงตรง (หรือบางทีเรียกเป็นค่าความผิดพลาด) เป็น  $\pm 1/2\text{LSB}$

### 3.2.2 ค่าเวลาในการแปลงสัญญาณ (Conversion time)

เป็นค่าของเวลาทั้งหมดที่วงจร ADC แบบวงจรนับแรมปี และแบบซิกเซสซีฟแอปพริอ็อกซิเมชัน ใช้ในการแปลงสัญญาณอนุภาคเป็นดิจิทัลจนเสร็จสิ้น พารามิเตอร์ตัวนี้มักจะปรากฏในคุณสมบัติของไอซีที่ทำงานเป็นวงจร ADC เมื่อไอซีแปลงสัญญาณเสร็จสิ้นลง จะส่งสัญญาณที่เรียกว่า EOC (End of conversion) ออกมา

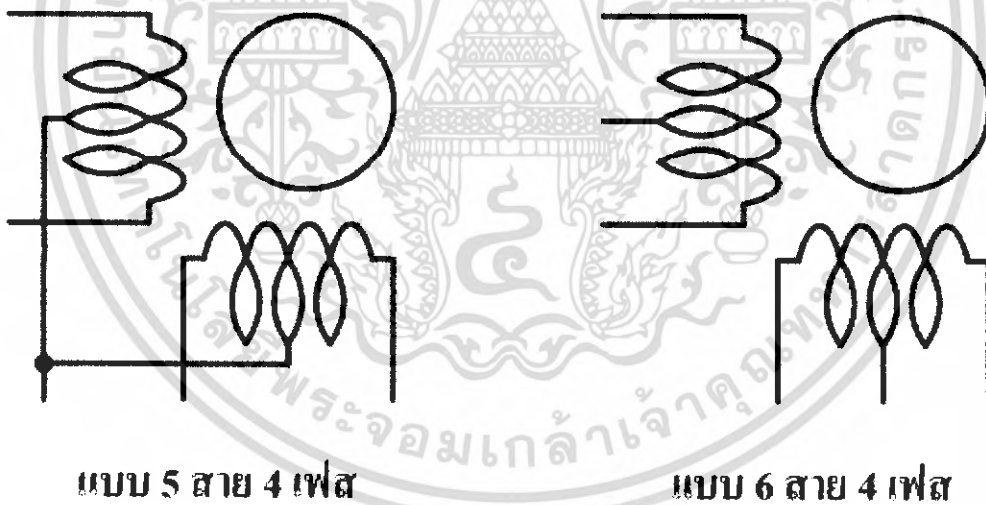
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเวลาในการแปลงสัญญาณของวงจร ADC จะขึ้นอยู่กับ จำนวนบิตของวงจร ค่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ และขนาดของสัญญาณอะนาลอกอินพุต

### 3.3 การขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ (Uni - Polar Stepper Motor)

สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) เป็นมอเตอร์ที่หมุนเป็นจำนวนสเต็ป (Step) ที่แน่นอน ในการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์จะอยู่ที่ 1, 1.5, 1.8, 2, 15 หรือ 75 องศา ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ โดยปกติที่ตัวสเต็ปเปอร์มอเตอร์จะกำหนดไว้ว่าในการหมุน 1 รอบใช้จำนวนกี่สเต็ป เช่น มอเตอร์ 24 สเต็ป หมายความว่า ในการหมุน 1 รอบ หรือ 360 องศา ใช้จำนวน 24 สเต็ป หรือสเต็ปละ 15 องศา นั่นเอง

ในปัจจุบันสเต็ปเปอร์มอเตอร์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่หาง่าย และเป็นที่ยอมรับใช้คือ สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์ มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขด บนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดแบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งดั่งจะมี 4 เฟส คือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สายและ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว

### 3.3.1 การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์

การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปแต่ละสเต็ปทำได้โดย จ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังขดลวดแต่ละขดบนสเตเตอร์ ซึ่งต้องป้อนเป็นแบบซีแควนเชียลในรูปแบบที่ถูกต้องด้วย สามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ แบบฟูลสเต็ปหนึ่งเฟส แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส และแบบฮาล์ฟสเต็ป (half step)

แบบฟูลสเต็ปหนึ่งเฟส (full step) เป็นการกระตุ้นที่มีรูปแบบง่ายที่สุด โดยทำการกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งไล่เรียงถัดกันไป เช่น เริ่มต้นที่ขดที่ 1, 2, 3, 4 แล้ววนกลับมาขดที่ 1 วนไปเรื่อยๆ หรือ เริ่มที่ขดที่ 1 แล้วย้อนไปยังขดที่ 4, 3, 2 แล้วกลับมาขดที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งทำให้ทิศทางของการหมุนสวนกัน ในการกระตุ้นรูปแบบนี้ จึงมีขดลวดเพียงขดเดียวในเวลาหนึ่งที่ถูกกระตุ้นเท่านั้น วงจรกระตุ้นแบบเวฟจึงมีราคาถูกและง่าย ขั้นตอนการทำงานต่างๆแสดงดังในตารางที่ 3.2

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	-	ทำงาน	-	-
3	-	-	ทำงาน	-
4	-	-	-	ทำงาน

ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์  
เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ปหนึ่งเฟส

แบบฟูลสเต็ปสองเฟส เป็นการกระตุ้นซึ่งคล้ายกับแบบหนึ่งเฟส แต่การกระตุ้นแบบนี้จะทำการกระตุ้นโดยจ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ขดลวด 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันในเวลาเดียวกัน และเรียงถัดกันไป เช่นเดียวกับแบบหนึ่งเฟส ดังตัวอย่าง ขดลวดขุดแรกที่ถูกกระตุ้นจะเป็นขดที่ 1 และ 2 ตามด้วยการกระตุ้นขดที่ 2 และ 3 ต่อไปเป็นขดที่ 3 และ 4 และ 3 ถัดไปเป็นขดที่ 4 และ 1 แล้วกลับมาที่ขดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 2 วนไปตามลำดับเช่นนี้ หรือเริ่มที่ขด 1 และ 4 ตามด้วยขดที่ 4 และ 3 ถัดไปเป็นขดที่ 3 และ 2 ถัดไปเป็นขดที่ 2 และ 1 แล้ววนกลับมาที่ขดที่ 1 และ 4 ทิศทางการหมุนจะสวนทางกัน

การกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ สามารถเพิ่มแรงบิดได้มากกว่าแบบเวฟ โรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจาก 2 ขดลวดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน และต่อไปด้วยแรงดึงจากอีก 2 ขดลวดถัดไป สำหรับข้อเสียคือการกระตุ้นแบบนี้ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น ขั้นตอนการทำงานต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 3.3

สเต็ปที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	ทำงาน	-	-
2	-	ทำงาน	ทำงาน	-
3	-	-	ทำงาน	ทำงาน
4	ทำงาน	-	-	ทำงาน

ตารางที่ 3.3 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์  
เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ปสองเฟส

แบบฮาล์ฟสเต็ป เป็นรูปแบบที่ผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ปหนึ่งเฟส และ ฟูลสเต็ปสองเฟส ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนของสเต็ปต่อรอบอีกเท่าตัวหนึ่ง ในระบบนี้จะทำการกระตุ้นขดลวดเรียงกัน ไปเป็นลำดับดังนี้ เริ่มจากขดลวดที่ 1, 1 และ 2, 2, 2 และ 3, 3, 3 และ 4, 4 และ 1 แล้ววนกลับมายังขดลวดที่ 1 แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นแบบนี้จะเพิ่มมากขึ้นอีก เพราะช่วง สเต็ปมีระยะสั้นลง แต่ละสเต็ปเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกัน ความถูกต้องของ ตำแหน่งมีเพิ่มมากขึ้น แต่ต้องพึงระวังไว้อีกประการหนึ่งว่า เมื่อกระตุ้นให้ทำงานในรูปแบบนี้ จะต้องทำการหมุนถึง 2 สเต็ป จึงจะได้เท่ากับระยะเท่ากับ 1 สเต็ปเต็มของการควบคุมใน 2 แบบ แรก สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องใช้ขนาดเท่ากับแบบ 2 เฟสเป็นอย่างน้อย จึงจะเพียงพอ ขั้นตอนการทำงานต่างๆ แสดงดังในตารางที่ 3.4

ระดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	ทำงาน	ทำงาน	-	-
3	-	ทำงาน	-	-
4	-	ทำงาน	ทำงาน	-
5	-	-	ทำงาน	-
6	-	-	ทำงาน	ทำงาน
7	-	-	-	ทำงาน
8	ทำงาน	-	-	ทำงาน

ตารางที่ 3.4 แสดงลำดับการทำงานของขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์  
เมื่อได้รับการกระตุ้นแบบฮาล์ฟสเต็ป

### 3.4 การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD model)

การเขียนโปรแกรม MCS-51 เพื่อติดต่อกับภายนอก ปกติจะใช้อุปกรณ์อินพุต และเอาต์พุต อุปกรณ์หนึ่งทีนิยมใช้กันมากคือ LCD เนื่องจากราคาถูก และสามารถแสดงผลได้ทั้งตัวอักษร และ ภาพกราฟฟิก อุปกรณ์ LCD ทีนิยมจะเป็นขนาด 16×2 (บรรทัดละ 16 ตัวอักษร มีจำนวน 2 บรรทัด) และขนาด 20×2 (บรรทัดละ 20 ตัวอักษร มีจำนวน 2 บรรทัด)

#### 3.4.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD

ในโมดูล LCD จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ 3 ส่วน ดังนี้

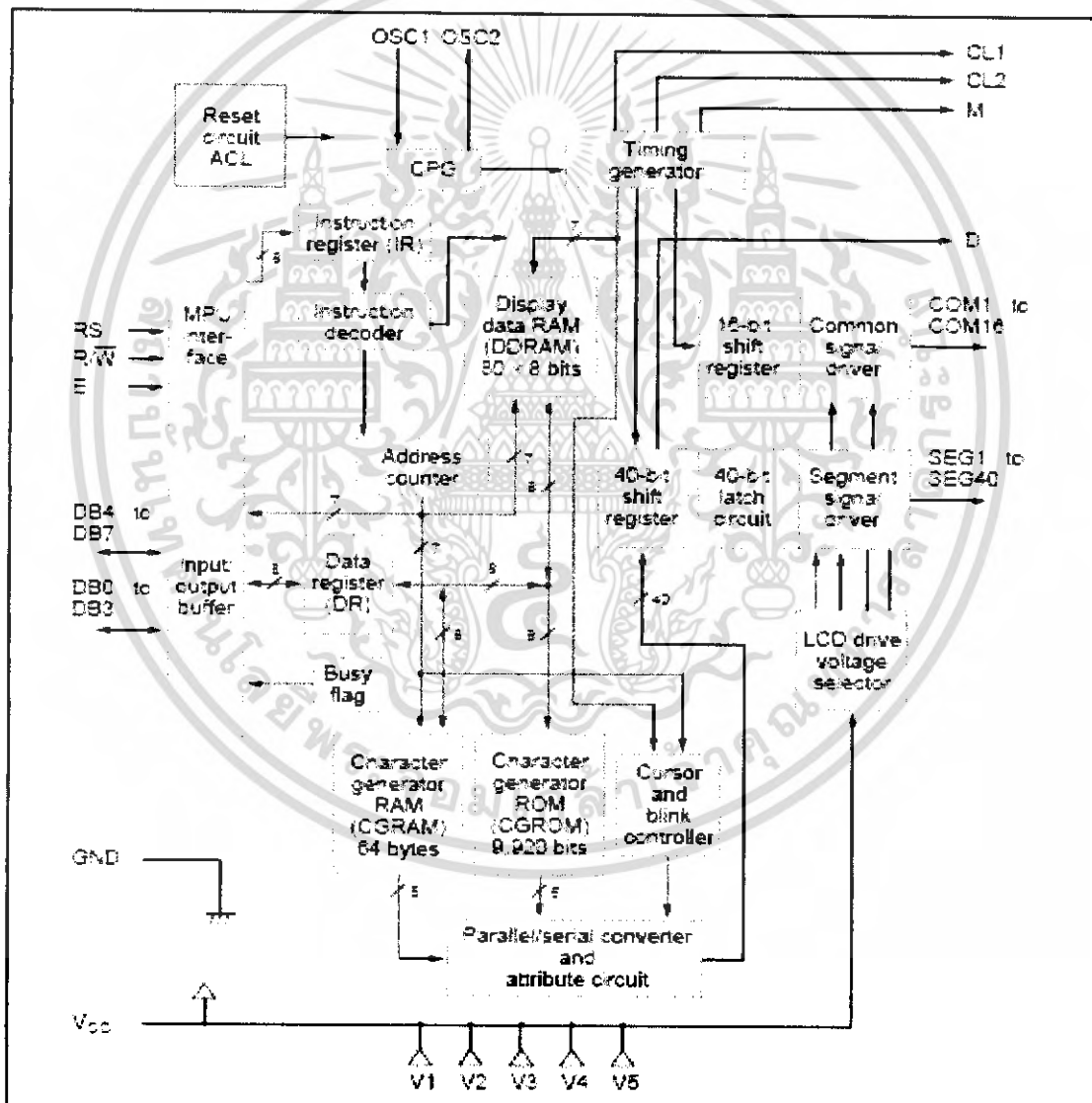
**ตัวแสดงผล (display)** ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมในการมองข้อมูลที่แสดงผลบนจอ LCD

**ตัวควบคุม (control)** เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้นิยมใช้ชิปเบอร์ HD 44780 และ HD61830 โดย HD44180 จะใช้ควบคุม LCD แบบอักษร ส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟฟิก

ตัวขับ (driver) เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้แสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด  
ชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น

### 3.4.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD

การใช้งานโมดูล LCD ต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและคำสั่งที่ใช้ในการควบคุม  
จากรูปที่ 3.6 เป็นบล็อกไดอะแกรมภายในของชิปควบคุม LCD เบอร์ HD44780 ซึ่งใช้ในโมดูล  
LCD แบบอักษร ประกอบด้วย



รูปที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมการทำงานของโมดูล LCD แบบอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บัพเฟอร์อินพุตเอาต์พุต** เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก เพื่อที่จะถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม

**รีจิสเตอร์คำสั่ง** (Instruction Register : IR) เป็นรีจิสเตอร์ใช้รับข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อนำไปควบคุมการแสดงผล

**รีจิสเตอร์ข้อมูล** (Data Register : DR) เป็นรีจิสเตอร์ใช้รับข้อมูลคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อถ่ายทอดไปยังหน่วยความจำที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลแสดงผล หรือนำข้อมูลไปสร้างตัวอักษรเพิ่มเติมในแรมเก็บตัวอักษร

**แรมเก็บข้อมูลแสดงผล** (Display Data Ram : DDRAM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลที่มาจากรีจิสเตอร์ DR ตัวควบคุมจะนำข้อมูลใน DDRAM นี้ไปเปิดตาราง (Look up - table) ของตัวอักษรที่เก็บไว้ในหน่วยความจำรวมและแรมเก็บตัวอักษร เพื่อนำไปแสดงผลที่ตัวแสดงผล

**รอมเก็บตัวอักษร** (Character Generator ROM : CGROM) เป็นหน่วยความจำรอมที่ใช้เก็บข้อมูลตัวอักษร หรือสัญลักษณ์ที่สามารถอ่านออกไปแสดงที่ตัวแสดงผลได้ มีขนาด 7,200 บิต โดยจะถูกอ่านด้วยค่าของข้อมูลใน DDRAM

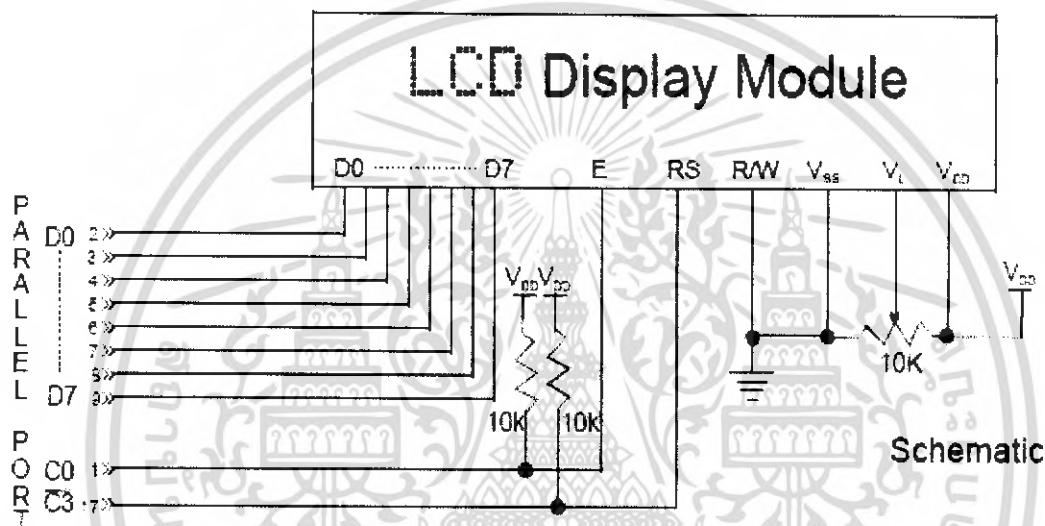
**แรมเก็บตัวอักษร** (Character Generator RAM : CGRAM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บตัวอักษรที่มีการสร้างเพิ่มเติมขึ้นใหม่ในกรณีที่ตัวอักษรใน CGROM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้น สามารถทำได้เช่นเดียวกับ CGROM คือ เขียนข้อมูลลงใน DDRAM แล้วตัวควบคุม จะอ่านค่ามาจาก CGRAM เอง

**แฟล็ก BUSY** เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานะการทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่าตัวควบคุมข้อมูลพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้น ก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมจะต้องตรวจสอบสถานะของแฟล็ก BUSY นี้เสียก่อน

### 3.4.3 โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 16x2)

โมดูล LCD เป็นโมดูลที่มีโครงสร้างเป็นมาตรฐาน มีการระบุเบอร์แตกต่างกันออกไปตามผู้ผลิตเช่น LM020L ของฮิตาชิ DMC-16417A ของคอนเท็กซ์ (Contrex) เป็นต้น อย่างไรก็ตามคอนโทรลเลอร์ที่นิยมใช้คือเบอร์เดียวกันนั่นเองคือเบอร์ HD44750 ของฮิตาชิ

โมดูล LCD ขนาด 16x2 มีขนาดใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา มีการจัดขาตั้งในรูปแบบที่ 3.7 สำหรับรายละเอียดการทำงานของแต่ละขามีดังนี้



รูปที่ 3.7 แสดงรูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร

**V<sub>SS</sub> (ขา 1) :** ต่อกาวด์

**V<sub>DD</sub> (ขา 2) :** ต่อไฟเลี้ยง + 5 โวลต์





**V<sub>0</sub> (ขา 3) :** เป็นขาอินพุตรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

**RS (ขา 4) :** เป็นขาอินพุตใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่าเป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยถ้าขานี้เป็น “ 0 ” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง แต่ถ้าขานี้เป็น “ 1 ” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล

**R/W (ขา 5) :** เป็นขาที่เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับโมดูล LCD ถ้าเป็น “ 0 ” เป็นการกำหนดให้เขียนข้อมูล แต่ถ้าเป็น “ 1 ” จะเป็นการอ่านข้อมูล

**E (ขา 6) :** เป็นขาสำหรับสัญญาณพัลส์เอ็นเอเบิลโมดูล LCD ให้ทำงาน

**D0 - D7 (ขา 7-14) :** เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูล ระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอกขนาด 8 บิต ซึ่งขา RS R/W และขา E จะใช้งานร่วมกันได้ โดยมีความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 3.5

RS	RW	E	การทำงาน
0	0		เขียนคำสั่ง
0	1		อ่านสถานะของโมดูล LCD
1	0		เขียนข้อมูล
1	1		อ่านข้อมูล

ตารางที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ในการทำงานของขา RS R/W และ E ของโมดูล LCD แบบอักษร

## บทที่ 4

### ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

หลักการสร้างและออกแบบเครื่องตรวจสอบรื้อยี่ห้อของโลหะนี้ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ และส่วนของโปรแกรมควบคุม ในส่วนของฮาร์ดแวร์นั้น ยังแบ่งวงจรแยกย่อยลงไปอีก ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น ซึ่งวงจรในส่วนต่างๆที่ได้ออกแบบ มีดังนี้

1. วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)
2. วงจรขยายอินสทรูเมนต์ (Instrumentation Amplifiers)
3. วงจรขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ด้วยไอซี ULN2803A
4. จอโมดูล LCD แบบตัวอักษรขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

#### 4.1 หลักการทำงาน

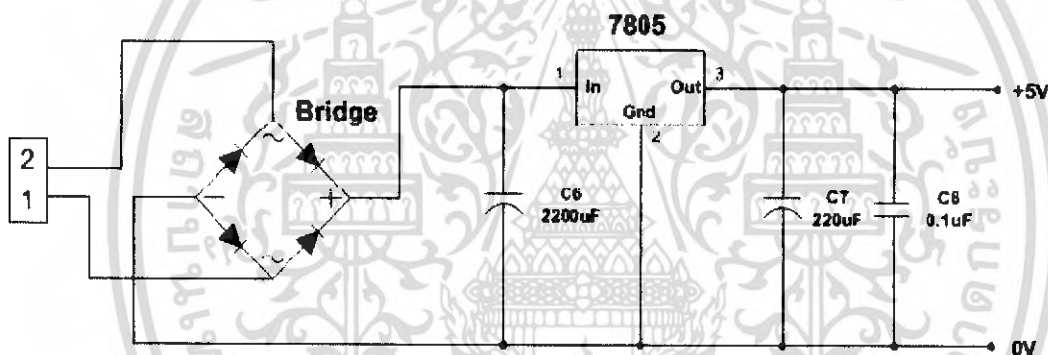
หลักการทำงานของระบบ เริ่มจากโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบ จะทำการเช็คค่าให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่เรากำหนดไว้เพื่อให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ พร้อมทั้งจะทำงาน หลังจากนั้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวที่ 1 ซึ่งมีอุปกรณ์ฮอลล์เอฟเฟกต์ และเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กติดอยู่ จะเคลื่อนที่ไปในแนวแกน  $+x$  ถ้ามีโลหะที่ต้องการตรวจจับวางอยู่ และมีรอยบกพร่องในผิวโลหะนั้น จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากปกติ ส่งผลให้แรงดันของฮอลล์เอฟเฟกต์เกิดการเปลี่ยนแปลง ผลของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนี้ จะถูกส่งไปยังวงจรขยายอินสทรูเมนต์ เพื่อทำการขยายสัญญาณและจัดสัญญาณรบกวน ผลความแตกต่างของแรงดันจะถูกส่งต่อไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำประมวลผลแล้วแสดงผลการตรวจสอบไปยังโมดูล LCD หลังจากนั้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์ก็จะเคลื่อนที่ต่อไปยังตำแหน่งที่กำหนด เมื่อถึงจุดที่กำหนดแล้ว เซนเซอร์สวิตช์ก็จะส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์อีก เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำการควบคุมให้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวที่ 2 เคลื่อนที่ไปในแนวแกน  $-y$  ในระยะที่กำหนด จากนั้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์ตัวที่ 1 ก็จะเคลื่อนที่ไปในแนวแกน  $+x$  อีกครั้ง ถ้าโลหะมีรอยบกพร่องอีก ก็จะส่งผลให้สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงอีก ทำให้แรงดันของฮอลล์เอฟเฟกต์เกิดการเปลี่ยนแปลง ผลของการเปลี่ยนแปลงก็จะถูกส่งไปยัง

วงจรขยายอินสทรูเมนต์ ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานที่วนลูปไปเรื่อยๆ จนสิ้นสุดกระบวนการตรวจสอบรอบยกพร้อมของโลหะ ระบบก็จะหยุดทำงานโดยอัตโนมัติ

## 4.2 ส่วนของฮาร์ดแวร์

### 4.2.1 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)

ส่วนของภาคจ่ายไฟที่ใช้เลี้ยงวงจรมานั้น เป็นส่วนที่ต้องจ่ายไฟให้กับวงจรของไอซีดิจิตอลต่างๆ รวมทั้งตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีขนาด 5 โวลต์ ดีซี มีพิกัดกระแสประมาณ 1.5 แอมป์ โดยใช้ บริดจ์ไดโอด (Bridge Diode) เป็นตัวเรียงกระแส จากนั้นป้อนให้วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) ซึ่งจะได้แหล่งจ่ายไฟดีซีขนาดประมาณ 5 โวลต์



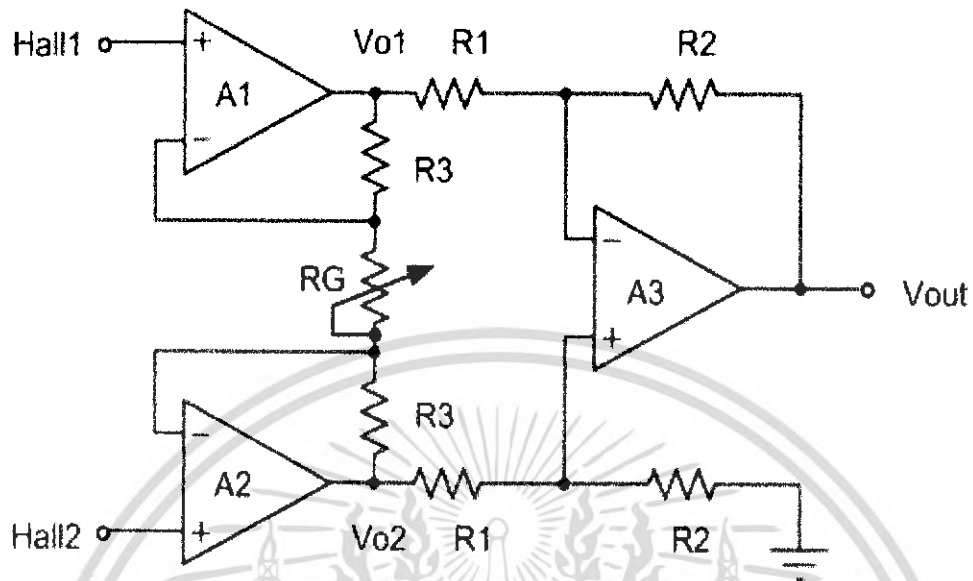
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

### 4.2.2 วงจรขยายอินสทรูเมนต์ (Instrumentation Amplifiers, IAs)

วงจรขยายอินสทรูเมนต์ เป็นวงจรทำหน้าที่ขยายสัญญาณผลต่างของสัญญาณอินพุทของวงจร โดยรับสัญญาณอินพุทจากตัวฮอลล์ แล้วทำการปรับปรุงให้สมรรถนะของสัญญาณให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการขจัดสัญญาณรบกวน (Common Mode Rejection Ratio, CMRR) ของสัญญาณให้น้อยลง ซึ่งแรงดันเอาต์พุทของวงจรจะมีความสัมพันธ์เป็นไปดังสมการที่ 4.1

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 วงจรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว

จากรูปที่ 4.2 เป็นวงจรอินสตรูเมนต์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว โดยที่  $A_1$  และ  $A_2$  ทำหน้าที่เป็นวงจรภาคเอาต์พุตส่วนหน้า (first stage หรือ input stage) ขณะที่ออปแอมป์  $A_3$  จะเป็นวงจรเอาต์พุตส่วนที่สอง (second stage หรือ output stage) ของวงจร ถ้าให้  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  เป็นแรงดันเอาต์พุตของ  $A_1$  และ  $A_2$  ตามลำดับ จะได้สมการแรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  มีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{o2} - V_{o1}) \quad (4.2)$$

และเนื่องจากคุณสมบัติของออปแอมป์ ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  และ  $R_G$  มีค่าเท่ากัน ( $I_{R3} \cong I_{RG}$ ) ซึ่งจากกฎของโอห์มจะได้

$$V_{o1} - V_{o2} = (2R_3 + R_G) I_{RG} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $V_1 = 0$  จะทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $R_G$  มีค่าเท่ากับ

$$I_{RG} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการแทนค่าสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.2) และ (4.3) จะได้

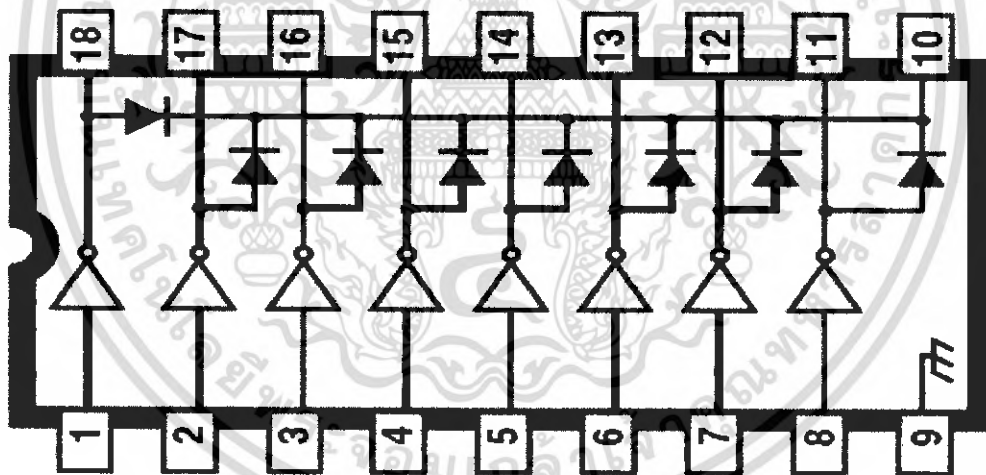
$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (4.4)$$

โดยที่

$$A = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.5)$$

#### 4.2.3 วงจรขับเสต็ปเปอร์มอเตอร์ด้วยไอซี ULN2803A

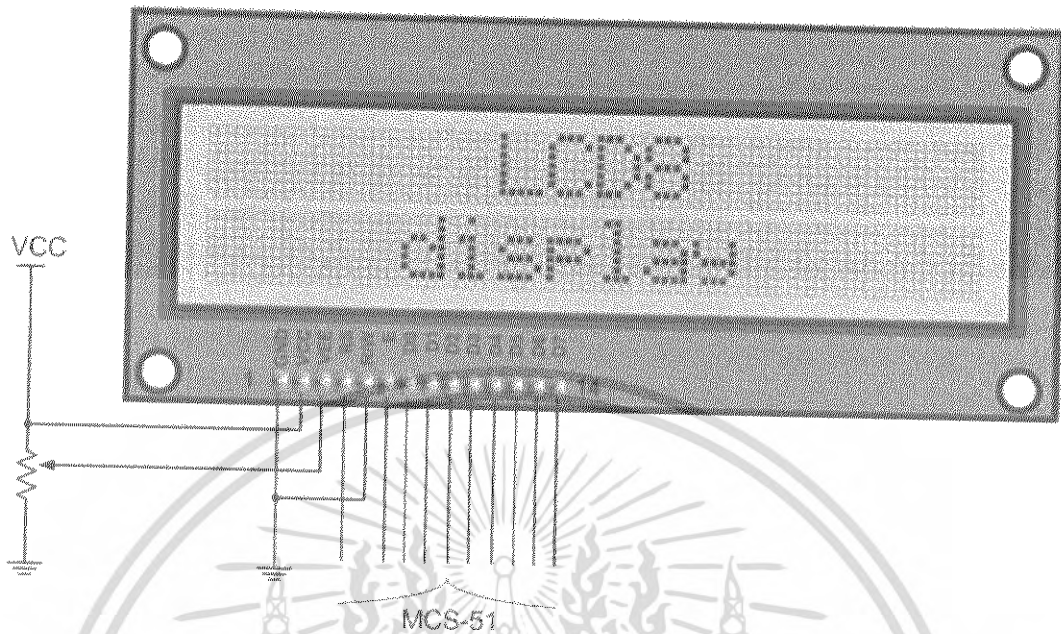
จากรูป 4.3 เป็นไอซีสำหรับขับเสต็ปเปอร์มอเตอร์ โดยที่พอร์ต 1 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะส่งข้อมูลมายังไอซีไดรเวอร์กระแสสูงแบบคอลเล็กเตอร์เปิดเบอร์ ULN2803A การใช้ไอซีแบบนี้ ทำให้สามารถเลือกแรงดันสำหรับเคลื่อนเสต็ปเปอร์มอเตอร์ได้กว้างตั้งแต่ 5-50V นอกจากนี้ยังสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 500 mA ต่อขาอีกด้วย



รูปที่ 4.3 ไอซีขับเสต็ปเปอร์มอเตอร์เบอร์ ULN2803A

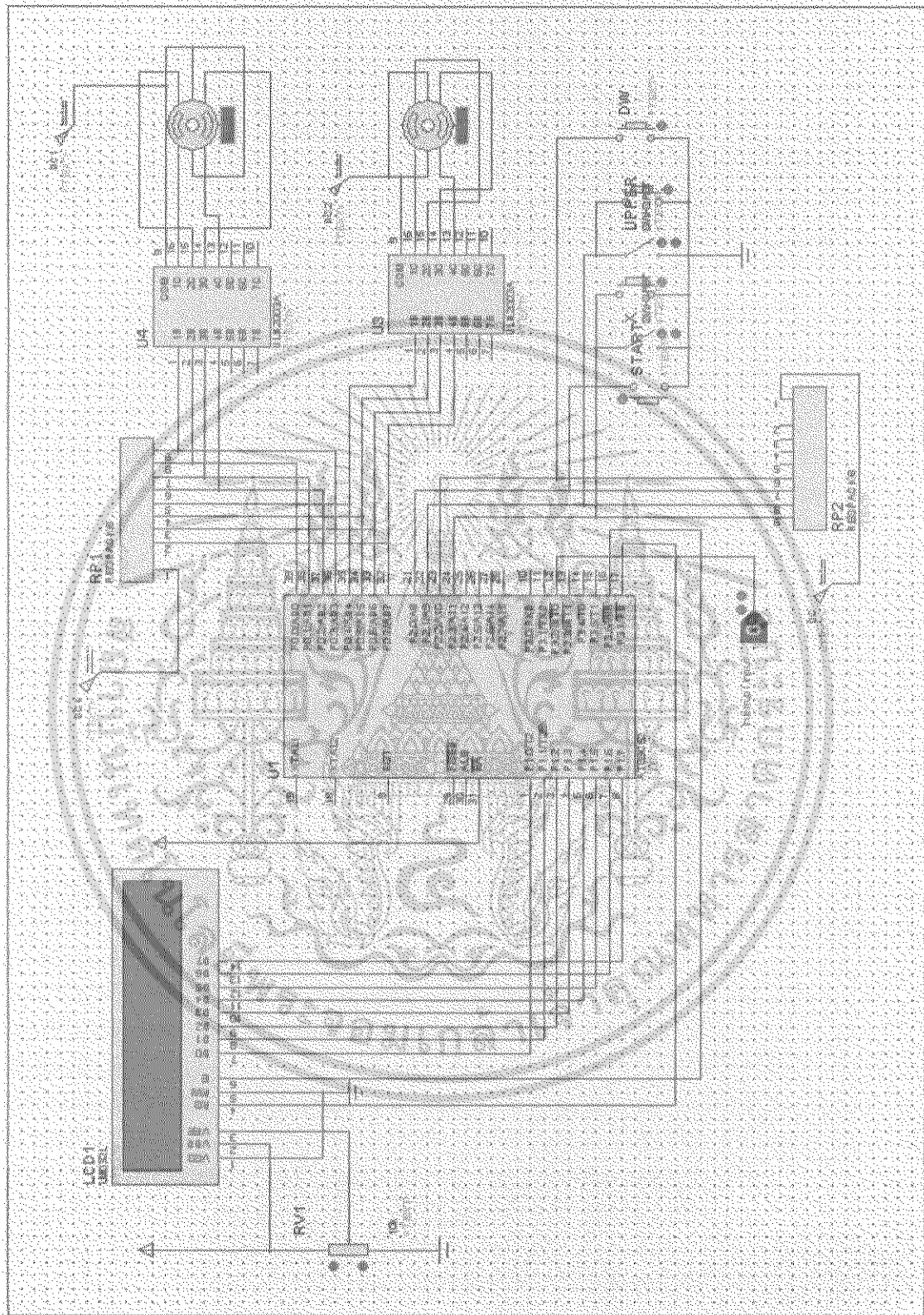
#### 4.2.4 จอโมดูล LCD แบบตัวอักษรขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

จอโมดูล LCD ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงข้อความเมื่อสามารถตรวจจ็บร็อยร้าวของโลหะได้ ใน ส่วนของหลักการทำงานและหลักการใช้โมดูล LCD ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 กล่าวคือจะต้องมีการส่งรหัสควบคุมให้กับ LCD ก่อน แล้วจึงส่งรหัส ASCII ให้ LCD เพื่อแสดงผล



รูปที่ 4.4 จอโมดูล LCD แบบตัวอักษรขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

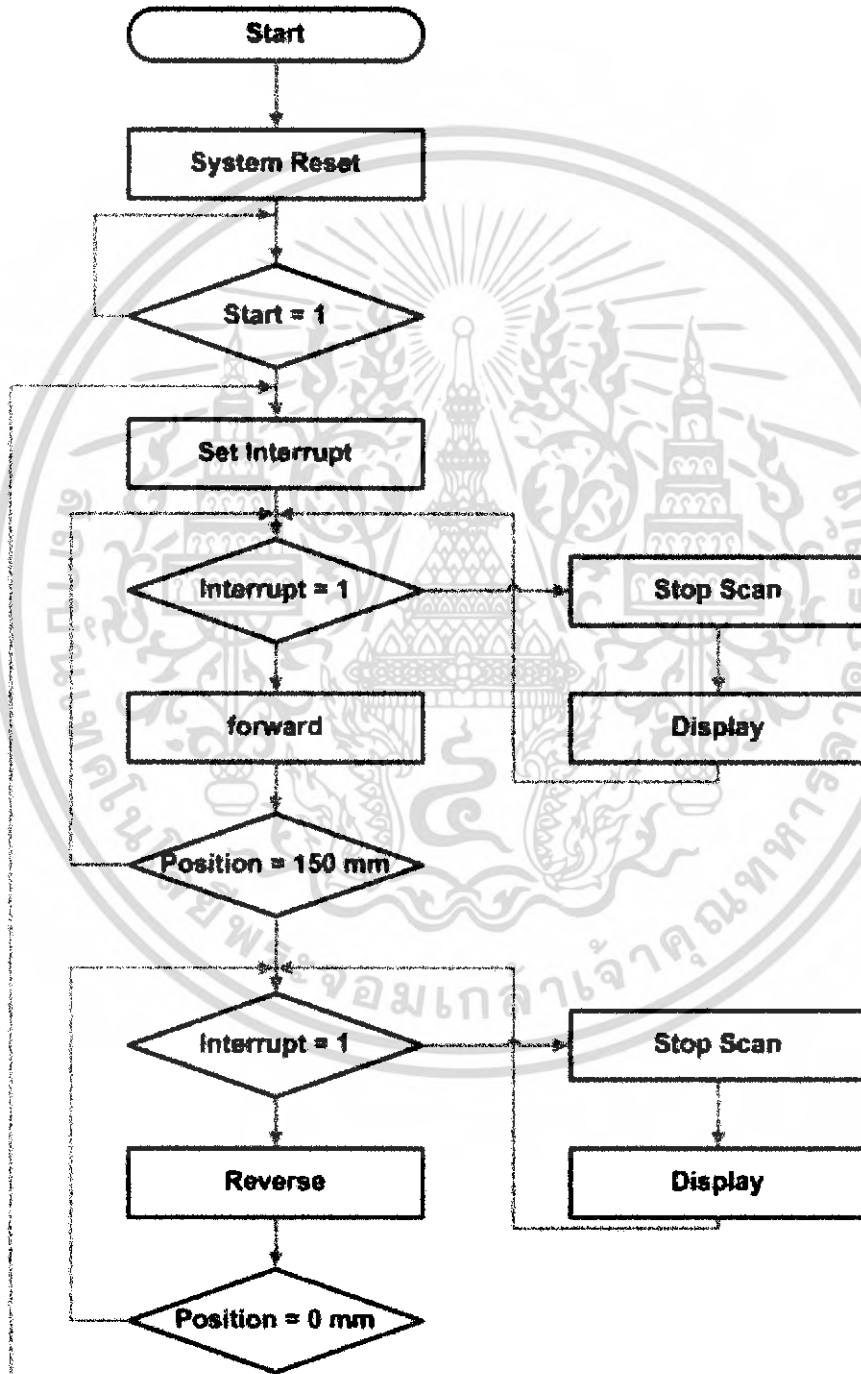


รูปที่ 4.5 แสดงวงจรการทำงานของเครื่องตรวจสอบรื้อรวของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ส่วนของโปรแกรมควบคุม

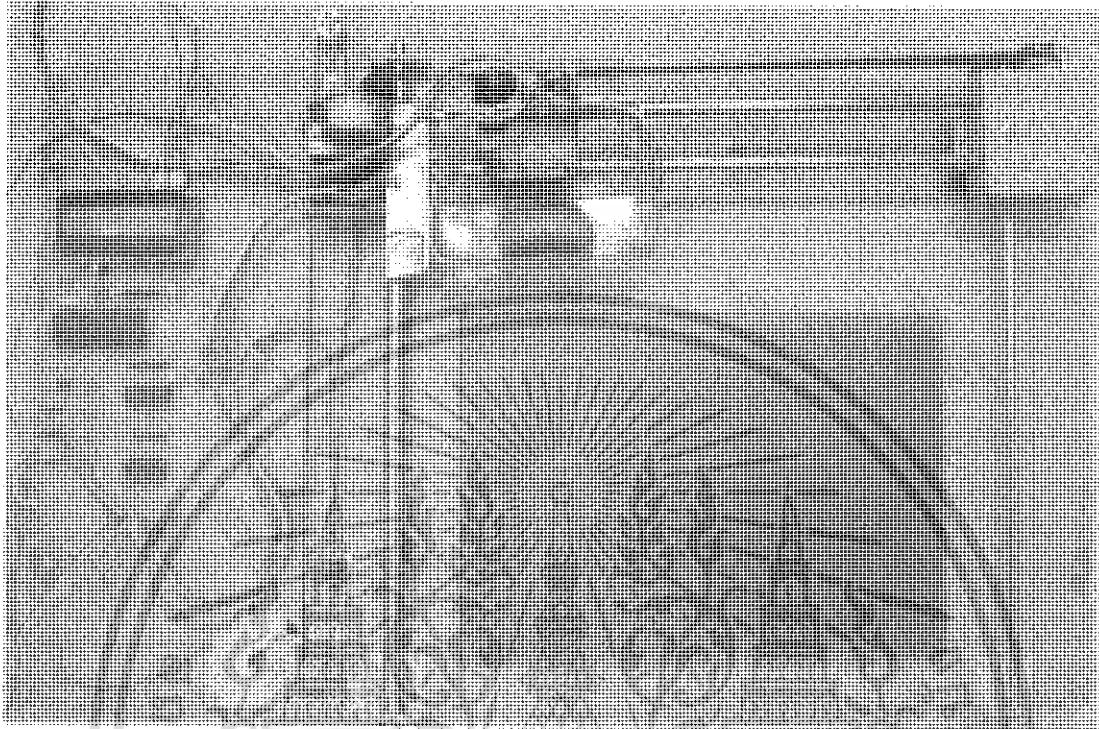
ในส่วนของโปรแกรมควบคุมนั้น มีหลักการทำงานดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1 ซึ่งเงื่อนไขในการทำงานแต่ละขั้นตอนนี้ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Flow chart แสดงการทำงานของระบบ

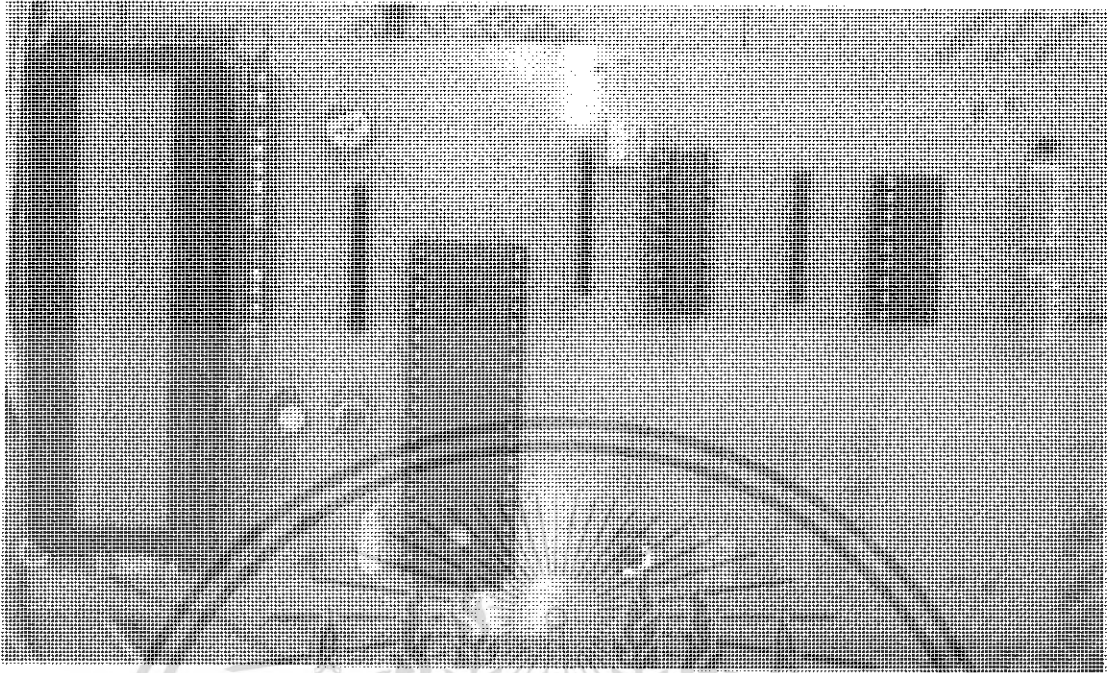
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 โครงสร้างภายนอก

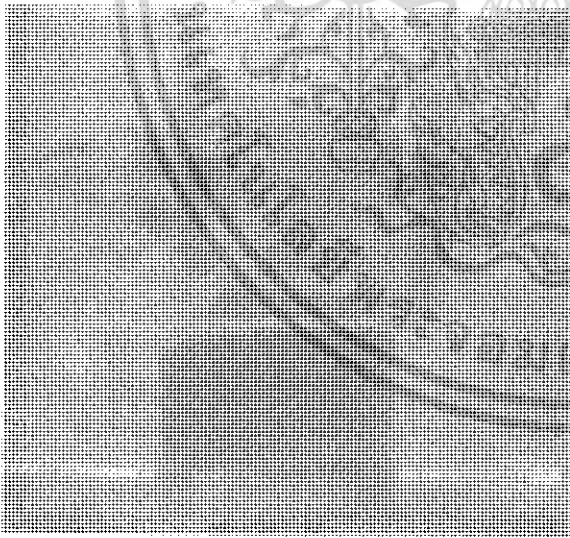


รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างภายนอกของระบบ

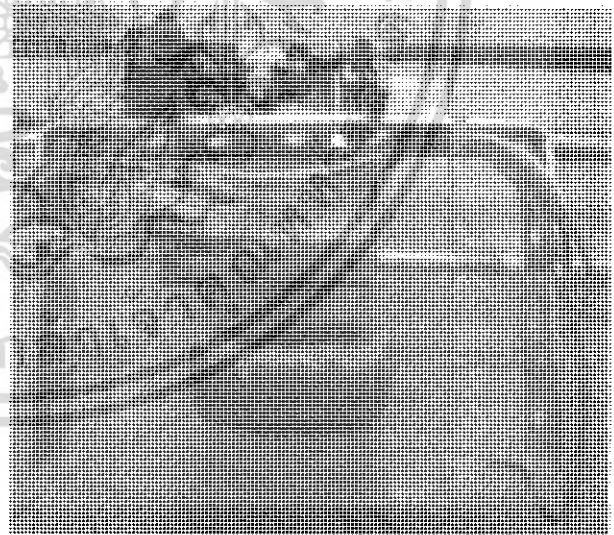
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงชุดควบคุม และ ชุดแสดงผล



(ก) ภาพด้านข้าง



(ข) ภาพด้านบน

รูปที่ 4.9 แสดงชุดออกดีเอสเฟกต์ และ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลอง ได้แบ่งการทดลองเป็นสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำการทดสอบระบบการทำงาน ในส่วนของการขับเคลื่อนมอเตอร์ และการสร้างสนามแม่เหล็ก หลังจากนั้น จึงทำการทดลองตรวจสอบหารอยบกพร่องของโลหะ และได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

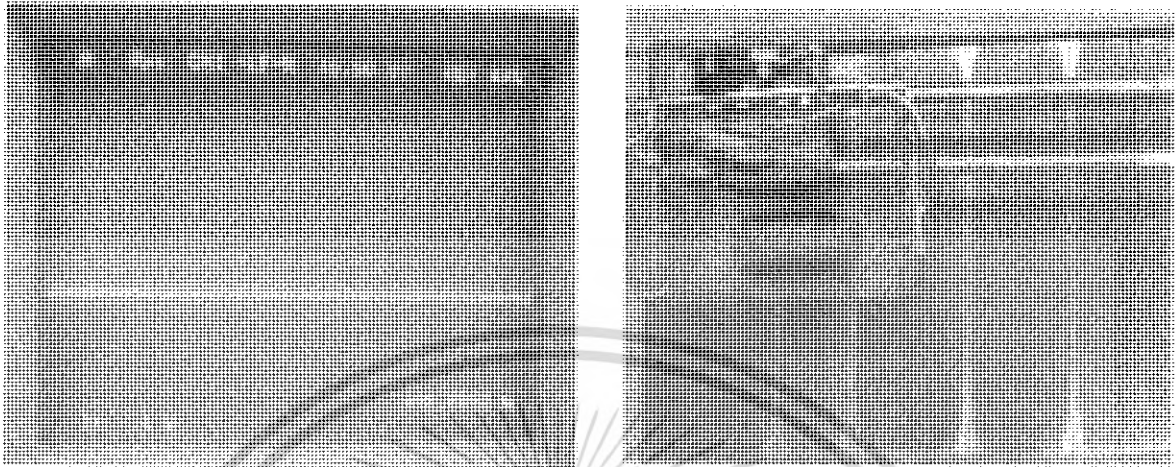
#### 5.1 การทดลองหารอยบกพร่องของโลหะ

ในการทดลองหารอยบกพร่องของโลหะ ได้ทำการทดลองวัดค่าความแตกต่างของแรงดัน ได้ผลการทดลองดังนี้คือ



รูปที่ 5.0 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบโดยที่ยังไม่มีโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง



รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.3 แสดงชุดรอยฉีกของแฟ้ม เมื่อตรวจสอบบริเวณที่มีรอยบดพร่อง**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ เป็นการนำอุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวของโลหะ ซึ่งแบ่งการทำงานเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนของเครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก และชุดฮอลล์เอฟเฟกต์, ส่วนของการขับเคลื่อนเสต็ปเปอร์มอเตอร์, ส่วนของชุดควบคุมและแสดงผล ซึ่งได้มีการออกแบบวงจรภาคต่างๆตามทฤษฎี จากนั้นจึงนำมาประกอบกันในแต่ละส่วน

ในการทดลองเพื่อทำการตรวจสอบหารอยบกพร่องของโลหะแผ่น เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะสามารถที่จะตรวจสอบรอยร้าว หรือรอยบกพร่องต่างๆได้อย่างถูกต้องตามที่คาดหวังไว้ นอกจากนี้ยังสามารถที่จะบอกตำแหน่งได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามบางส่วนของวงจรยังมีปัญหาอยู่บ้าง ซึ่งสรุปเป็นข้อแนะนำได้ดังนี้

1. ในการตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะ สามารถที่จะตรวจสอบเฉพาะ โลหะแผ่นเรียบเท่านั้น เนื่องจากติดปัญหาทางด้านชุดกลไกที่จะทำการตรวจสอบ
2. ในการบอกตำแหน่งที่พบรอยบกพร่อง บางครั้งยังคลาดเคลื่อนไปบ้าง เนื่องจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยไป ดังนั้นควรเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มากยิ่งขึ้น
3. การเคลื่อนที่ของเสต็ปเปอร์มอเตอร์บางจังหวะ ยังมีปัญหาในการเคลื่อนที่ที่ขยับบ้าง ไม่คล่องตัวตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นควรปรับเปลี่ยนอุปกรณ์เชิงกล

## เอกสารอ้างอิง

1. วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล และ ชัยวัฒน์ ลี้มพรจิตวิไล, “เรียนรู้และปฏิบัติการ ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS - 51” , อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ กรุงเทพ 2540, หน้า 236 - 238, 254 - 256, 288 – 291.
2. อุดม รานอก, “ภาษา C สำหรับงานควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS - 51” , อินโฟเพรส กรุงเทพ 2548, หน้า 189 – 191.
3. ผศ.วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, “ออปแอมป์ และ การประมวลผลสัญญาณอนาล็อก” , ว.เพ็ชรสกุล กรุงเทพ 2545, หน้า 75 – 77.
4. สมชาย บรรยงพาณิชย์, “ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็ก” , วารสารเคมีคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 109, 2534, หน้า 111 – 117.
5. Honeywell, “Hall effect sensing and application”, pp. 1-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
#include <AT89X52.H>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
```

```
#define true 1
#define port_step P0
#define lcd_dsp P1
#define lcd_add_1 0x00;
#define lcd_add_2 0x40;
```

```
sbit org_x = P2^3;
sbit org_y = P2^1;
sbit org_dw = P2^2;
sbit dri_select = P2^4;
sbit start = P2^0;
sbit lcd_en = P3^6;
sbit lcd_rs= P3^7;
bit error;
```

```
/* global variable */
```

```
code unsigned char *text_char[]={ "creck position ", "X=", "Y=", "cm",
                                     "Machain Crecker ",
                                     "Please Start " };
code unsigned char *text_run[]={ "0", "1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9"};
```

```
unsigned char step_fw[] = {0x08,0x04,0x02,0x01};
unsigned char step_rw[] = {0x01,0x02,0x04,0x08};
unsigned char step_up[] = {0x80,0x40,0x20,0x10};
unsigned char step_dw[] = {0x10,0x20,0x40,0x80};
```

```
unsigned int x,y;
unsigned char i;
unsigned int a,b,c,d,e,f;
unsigned int count_x;
unsigned int count_y;
unsigned long num_posi_x;
unsigned long num_posi_y;
unsigned int count_po_x;
unsigned int count_po_y;
```

```
/* func proto */
```

```
void delayLCD(int n);
void lcd_pulse_clock(void);
void lcd_send_byte (bit sf,int n);
void lcd_send_byte2 (bit sf2,int n2);
void lcd_string(unsigned char *buf,int dly);
void lcd_string2(unsigned char *buf,int dly2);
void lcd_int2(void);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void lcd_int(void);
void check(void);
```

```
void delay(int ms) ;
void delay2 (unsigned int msd);
```

```
void fw_step(int dl);
void rw_step(int dl);
void up_step(int dl);
void dw_step(int dl);
```

```
void int0_init(void);
void processing(void);
void start_counter0(void);
void disable_interrupt(void);
```

```
/****** Start Function LCD *****/
```

```
void delayLCD(int m)
{ int o,p;
  for(o=0;o<m;o++)
  for(p=0;p<100;p++);
}
```

```
void delay(int ms)
{
  unsigned int s,u ;
  for(s=0;s<ms;s++)
  {
    for(u=0;u<125;u++);
  }
}
```

```
void delay2 (unsigned int msd)
{
  unsigned int k,l ;
  for(k=0;k<msd;k++)
  {
    for(l=0;l<125;l++);
  }
}
```

```
void lcd_send_byte (bit sf,int n)
```

```
{
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
```

```

    lcd_rs = sf ;
    lcd_dsp = n ;
    lcd_pulse_clock();
}

```

```

void lcd_send_byte2 (bit sf2,int n2)
{
    lcd_rs = sf2 ;
    lcd_dsp = n2;
    lcd_pulse_clock() ;
}

```

```

void lcd_string(unsigned char *buf,int dly)
{
    unsigned int len,i ;
    len = strlen (buf);
    for (i=0; i<len; i++)
    {
        lcd_send_byte(1,buf[i]);
        delay(dly);
    }
}

```

```

void lcd_string2(unsigned char *buf,int dly2)
{
    unsigned int len2,i2 ;
    len2 = strlen (buf);
    for (i2=0; i2<len2; i2++)
    {
        lcd_send_byte2(1,buf[i2]);
        delay(dly2);
    }
}

```

```

// Clock EN for LCD
void lcd_pulse_clock(void)
{ lcd_en = 1;
  delayLCD(2);
  lcd_en = 0;
  delayLCD(2);
}

```

```

void lcd_int(void)
{
    lcd_send_byte(0,0x38);
    lcd_send_byte(0,0x01);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    lcd_send_byte(0,0x06);
    lcd_send_byte(0,0x0C);
    lcd_send_byte(0,0x02);
}

```

```

void lcd_int2(void)
{
    lcd_send_byte2(0,0x38);
    lcd_send_byte2(0,0x01);
    lcd_send_byte2(0,0x06);
    lcd_send_byte2(0,0x0C);
    lcd_send_byte2(0,0x02);
}

```

```

void lcd_show(void)
{
    lcd_send_byte(0,0x80);
    lcd_string(text_char[4],1);
    lcd_send_byte(0,0xC0);
    lcd_string(text_char[5],1);
}

```

```

/*****interrupt *****/

```

```

void int0_init(void)
{
    IT0 = 0 ;
    EX0 = 1 ;
    EA = 1 ;
    TMOD = 0x05 ;
    TH0 = 0 ;
    TL0 = 0 ;
    TF0 = 0 ;
}

```

```

/***** INTERRUPT *****/<----interrupt

```

```

void disable_interrupt(void)
{
    EA = 0;
    TR0 = 0;
    EX0 = 0 ;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void start_counter0(void)
{
    //    int0_init();
    TR0 = 1 ;//
}

```

```

void wait_interrupt(void)

```

```

{
// for(;;)
// {
    error = 1 ;
    delay2(100);
    disable_interrupt();
    TH0 = 0;
    TL0 = 0;
    TF0 = 0;
    if (error == 1)
    {
        P1=0x00;
        do
        {
            fw_step(1);
            count_po_x++;
        }while(count_po_x<149);

        do
        {
            rw_step(1);
            count_po_x++;
        }while(count_po_x<299);

        dw_step(25);
        count_po_x=0;
    }
// }

}

```

```

void check(void)

```

```

{
    unsigned int number;
    switch(number) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

case 0:
    lcd_string2(text_run[0],1);

    break;
case 1:
    lcd_string2(text_run[1],1);

    break;
case 2:
    lcd_string2(text_run[2],1);

    break;
case 3:
    lcd_string2(text_run[3],1);

    break;
case 4:
    lcd_string2(text_run[4],1);

    break;
case 5:
    lcd_string2(text_run[5],1);

    break;
case 6:
    lcd_string2(text_run[6],1);

    break;
case 7:
    lcd_string2(text_run[7],1);

    break;
case 8:
    lcd_string2(text_run[8],1);

    break;
case 9:
    lcd_string2(text_run[9],1);

    break;
}
}

```

```

void processing(void)
{
    unsigned char keep1,keep2;
    unsigned int number;
    keep1=num_posi_x;
    a=keep1/100;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

b=(keep1-(a*100))/10;
c=(keep1-((b*100)+(c*10)));

keep2=num_posi_y;
d=keep2/100;
e=(keep2-(d*100))/10;
f=(keep2-((e*100)+(f*10)));

lcd_send_byte2(0,0x80);
lcd_string2(text_char[0],1);

lcd_send_byte2(0,0xC0);
lcd_string2(text_char[1],1);
lcd_send_byte2(0,0xC2);
number = a;
check();
lcd_send_byte2(0,0xC3);
number = b;
check();
lcd_send_byte2(0,0xC4);
number = c;
check();
lcd_send_byte2(0,0xC5);
lcd_string2(text_char[3],1);

lcd_send_byte2(0,0xC8);
lcd_string2(text_char[2],1);
lcd_send_byte2(0,0xCA);
number = d;
check();
lcd_send_byte2(0,0xCB);
number = e;
check();
lcd_send_byte2(0,0xCC);
number = f;
check();
lcd_send_byte2(0,0xCD);
lcd_string2(text_char[3],1);

}

void service_counter0(void) interrupt 0 using 1
{
    disable_interrupt();
    TR0 = 0 ;
    error = 0 ;
    lcd_int2();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        lcd_send_byte2(0,0x80);
        lcd_string2(text_char[4],1);
        lcd_send_byte2(0,0x01);
        processing();
//        lcd_send_byte2(0,0x8C);
    }

/*****Start function STEP *****/
/* func delay Step */
void delay3(int n)
    { int i,j;
      for(i=0;i<n;i++)
        for(j=0;j<500;j++);
    }

/*func forward step have interrupt out loop show x,y */
void reset(void)
{
    do
    {
        if(org_x==1)
        {
            do
            {
                rw_step(1);
            }while(org_x==1);
        }
        if(org_y==1)
        {
            do
            {
                up_step(1);
            }while(org_y==1);
        }
    }while(org_x==1 && org_y==1);

    dw_step(25);
    fw_step(10);
}

void fw_step(int dl) //
forward step
{
    int x;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        unsigned int count_x;
        count_x=0;
        do
        {
            for(x=0;x<4;x++)
                { port_step = step_fw[x];
                  count_x++;
                }
            delay3(dl);
        }
        }while(count_x<25);
        num_posi_x++;
    }

void rw_step(int dl) //
reward step
{
    int x;
    unsigned int count_x;
    count_x=0;
    do
    {
        for(x=0;x<4;x++)
            { port_step = step_rw[x];
              count_x++;
              delay3(dl);
            }
        }while(count_x<25);
        num_posi_x--;
    }

void up_step(int dl) //
uper step
{
    int y;
    unsigned int count_y;
    count_y = 0;
    do
    {
        for(y=0;y<4;y++)
            { port_step = step_up[y];
              count_y++;
              delay3(dl);
            }
        }while(count_y<40);
        num_posi_y--;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* fun down */
void dw_step(int dl)
down step 1 round = 1.5 mm
{
    int y;
    unsigned int count_y;
    count_y=0;
    do
    {
        for(y=0;y<4;y++)
        { port_step = step_dw[y];
          count_y++;
          delay3(dl);
        }
        }while(count_y<40);
    num_posi_y++;
}

/***** Start Function Main *****/
/* main func */
void main (void)
{
    P0 = 0x00;
    P2 = 0xFF;
    P1 = 0x00;
    P3 = 0x00;
    dri_select = 1;

    count_x = 0;
    count_y = 0;
    count_po_x=0;

    P0 = 0x00 ;
    delay(100);
    lcd_int() ;
    reset();
    lcd_show();
    while (start==1);
    lcd_int();
    start_counter0();
    wait_interrupt();
    while(1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 3503

Data Sheet  
27501B\*

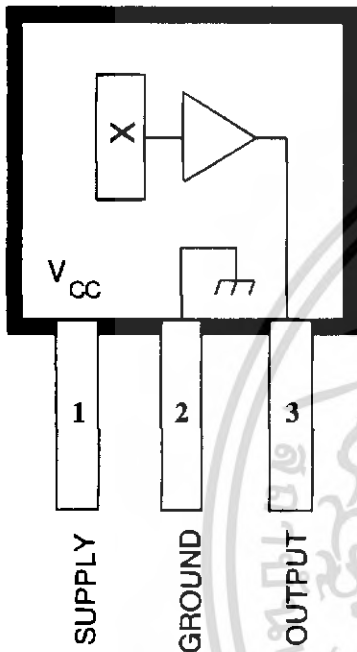
## RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

The UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA Hall-effect sensors accurately track extremely small changes in magnetic flux density—changes generally too small to operate Hall-effect switches.

As motion detectors, gear tooth sensors, and proximity detectors, they are magnetically driven mirrors of mechanical events. As sensitive monitors of electromagnets, they can effectively measure a system's performance with negligible system loading while providing isolation from contaminated and electrically noisy environments.

Each Hall-effect integrated circuit includes a Hall sensing element, linear amplifier, and emitter-follower output stage. Problems associated with handling tiny analog signals are minimized by having the Hall cell and amplifier on a single chip.

Three package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffix 'U' is a miniature three-lead plastic SIP, while 'UA' is a three-lead ultra-mini-SIP. All devices are rated for continuous operation over the temperature range of  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ .



Dwg. PH-006

Pinning is shown viewed from branded side.

### FEATURES

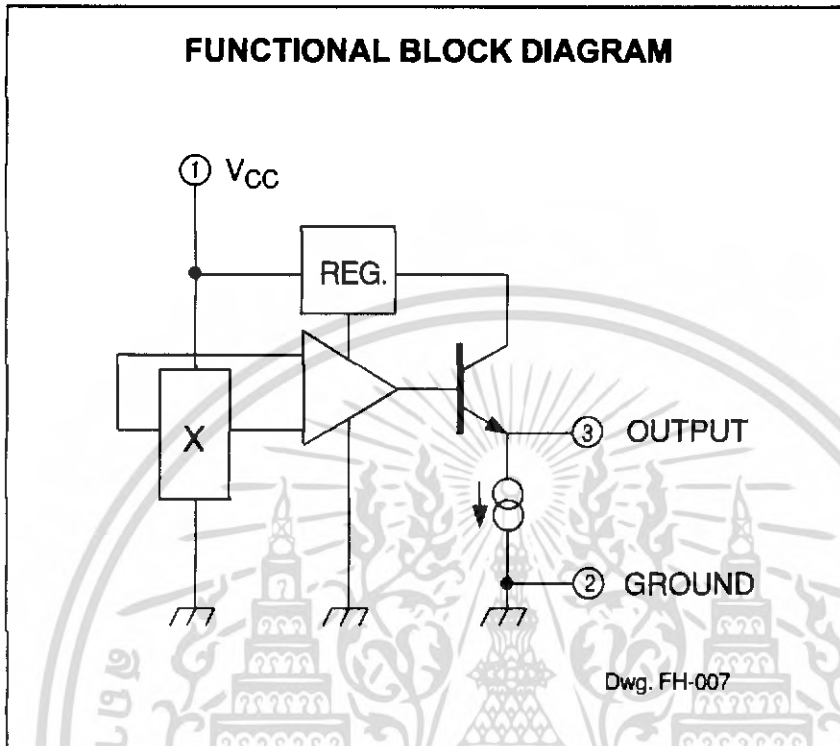
- Extremely Sensitive
- Flat Response to 23 kHz
- Low-Noise Output
- 4.5 V to 6 V Operation
- Magnetically Optimized Package

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, $V_{CC}$ .....	8 V
Magnetic Flux Density, B .....	Unlimited
Operating Temperature Range, $T_A$ .....	$-20^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range, $T_S$ .....	$-65^{\circ}\text{C}$ to $+150^{\circ}\text{C}$

Always order by complete part number, e.g., **UGN3503UA**.

**103**  
**ANALOG, DIGITAL,**  
**NEAR**  
**ALL-EFFECT SENSORS**



**CRITICAL CHARACTERISTICS at  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_{CC} = 5\text{ V}$**

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	Units
Operating Voltage	$V_{CC}$		4.5	—	6.0	V
Supply Current	$I_{CC}$		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	$V_{OUT}$	$B = 0\text{ G}$	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	$\Delta V_{OUT}$	$B = 0\text{ G to } \pm 900\text{ G}$	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
100-Hz Band Output Noise	$V_{out}$	$BW = 10\text{ Hz to } 10\text{ kHz}$	—	90	—	$\mu\text{V}$
Output Resistance	$R_{OUT}$		—	50	220	$\Omega$

Output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 10 k $\Omega$ .

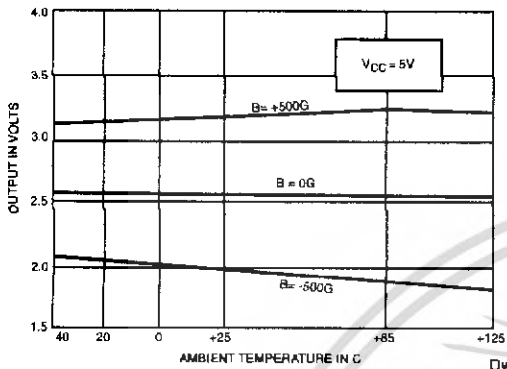
Magnetic flux density is measured at most sensitive area of device located 0.016" (0.41 mm) below the branded face of the 'U' package; 0.020" (0.51 mm) below the branded face of the 'UA' package; and 0.030" (0.76 mm) below the branded face of the 'LT' package.



Allegro MicroSystems, Inc. 115 Northeast Cutoff, Box 15036  
 Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000  
 Copyright © 1985, 1999, Allegro MicroSystems, Inc.

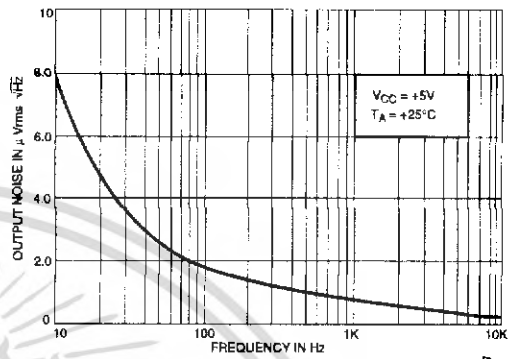
# 3503 RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

## OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE



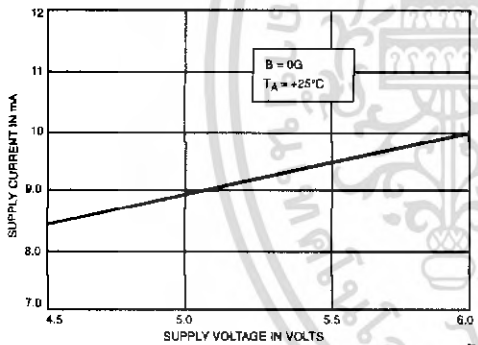
Dwg. A-12,573

## OUTPUT NOISE AS A FUNCTION OF FREQUENCY



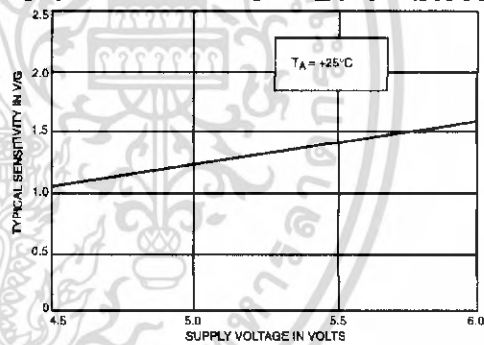
Dwg. A-12,505

## SUPPLY CURRENT AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



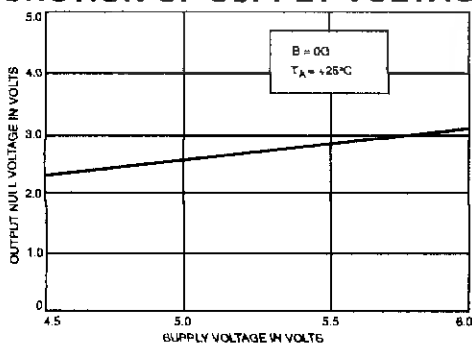
Dwg. A-12,506

## DEVICE SENSITIVITY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



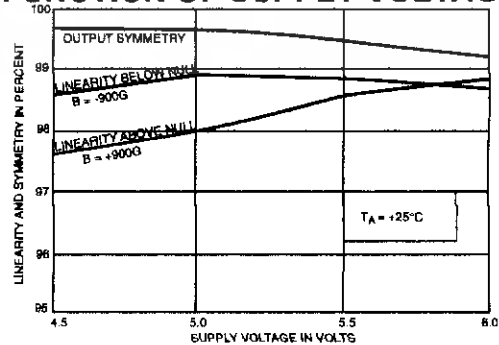
Dwg. A-12,507

## OUTPUT NULL VOLTAGE AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



Dwg. A-12,508

## LINEARITY AND SYMMETRY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE

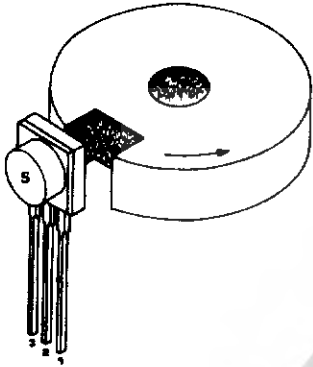


Dwg. A-12,509

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

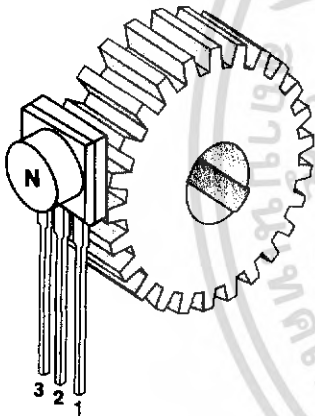
# 03 TIOMETRIC, NEAR LL-EFFECT SENSORS

## NOTCH SENSOR



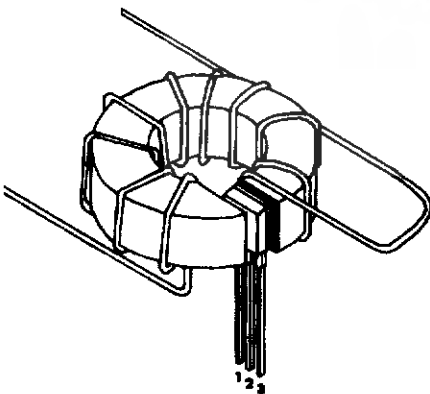
Dwg. A-12,574

## GEAR TOOTH SENSOR



Dwg. A-12,512

## CURRENT MONITOR



Dwg. A-12,513

## OPERATION

The output null voltage ( $B = 0$  G) is nominally one-half the supply voltage. A south magnetic pole, presented to the branded face of the Hall-effect sensor will drive the output higher than the null voltage level. A north magnetic pole will drive the output below the null level.

In operation, instantaneous and proportional output-voltage levels are dependent on magnetic flux density at the most sensitive area of the device. Greatest sensitivity is obtained with a supply voltage of 6 V, but at the cost of increased supply current and a slight loss of output symmetry. The sensor's output is usually capacitively coupled to an amplifier that boosts the output above the millivolt level.

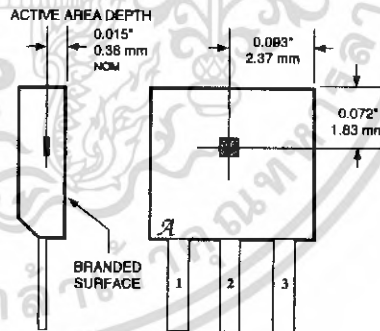
In two applications shown, a permanent bias magnet is attached with epoxy glue to the back of the epoxy package. The presence of ferrous material at the face of the package acts as a flux concentrator.

The south pole of a magnet is attached to the back of the package if the Hall-effect IC is to sense the presence of ferrous material. The north pole of a magnet is attached to the back surface if the integrated circuit is to sense the absence of ferrous material.

Calibrated linear Hall devices, which can be used to determine the actual flux density presented to the sensor in a particular application, are available.

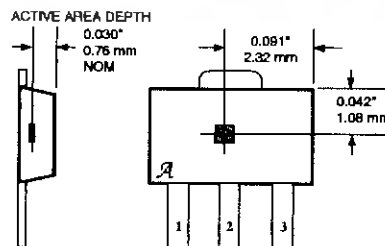
## SENSOR LOCATIONS

### SUFFIX "U"



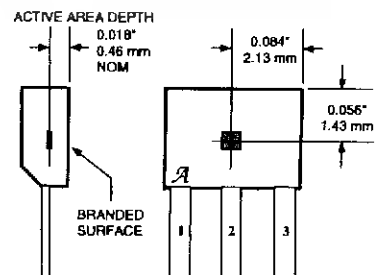
Dwg. MH-002-5C

### SUFFIX "LT"



Dwg. MH-008-9

### SUFFIX "UA"



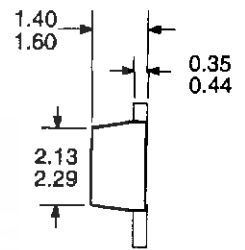
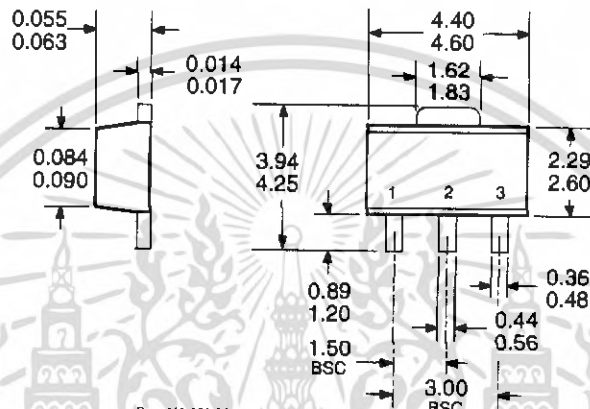
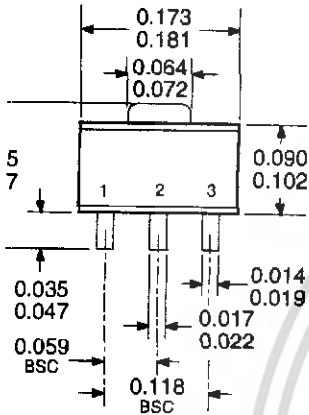
Dwg. MH-011-3C

# 3503 RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS

## UGN3503LT (SOT-89/TO-243AA)

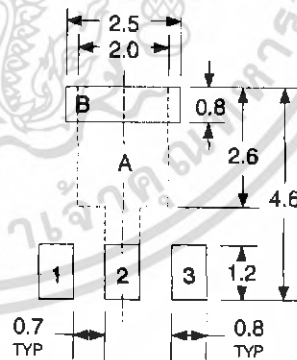
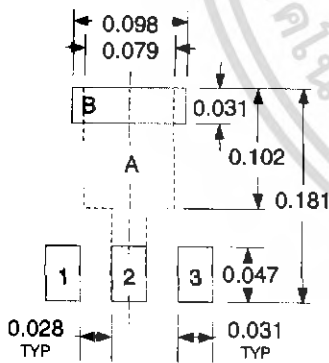
Dimensions in Inches  
(for reference only)

Dimensions in Millimeters  
(controlling dimensions)



Dwg. MA-008-3 in

Dwg. MA-008-3 mm



Pads 1, 2, 3, and A — Standard SOT-89 Layout  
 Pads 1, 2, 3, and B — Low-Stress Version  
 Pads 1, 2, and 3 only — Lowest Stress, But Not Self Aligning

Pads 1, 2, 3, and A — Standard SOT-89 Layout  
 Pads 1, 2, 3, and B — Low-Stress Version  
 Pads 1, 2, and 3 only — Lowest Stress, But Not Self Aligning

Dwg. MA-012-3 in

Dwg. MA-012-3 mm

†E: Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.

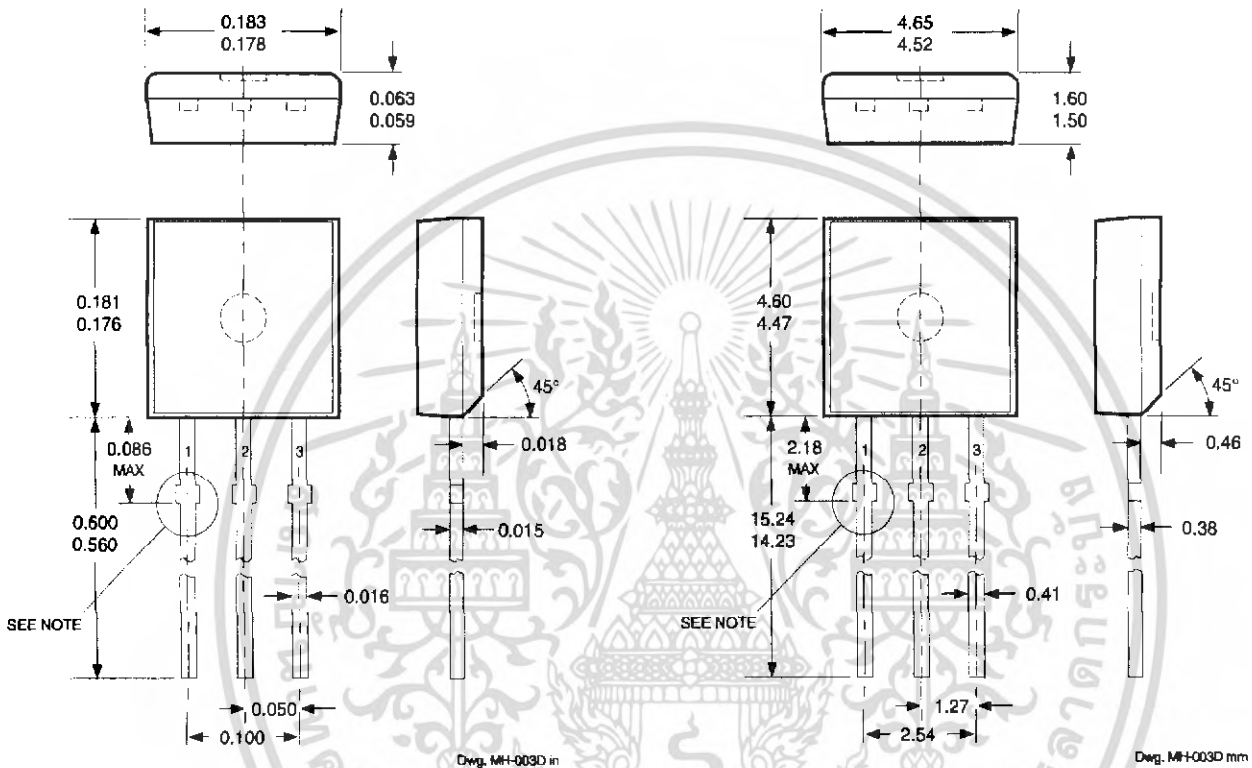
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**03**  
**TIOMETRIC,**  
**VEAR**  
**LL-EFFECT SENSORS**

**UGN3503U**

Dimensions in Inches  
 (controlling dimensions)

Dimensions in Millimeters  
 (for reference only)



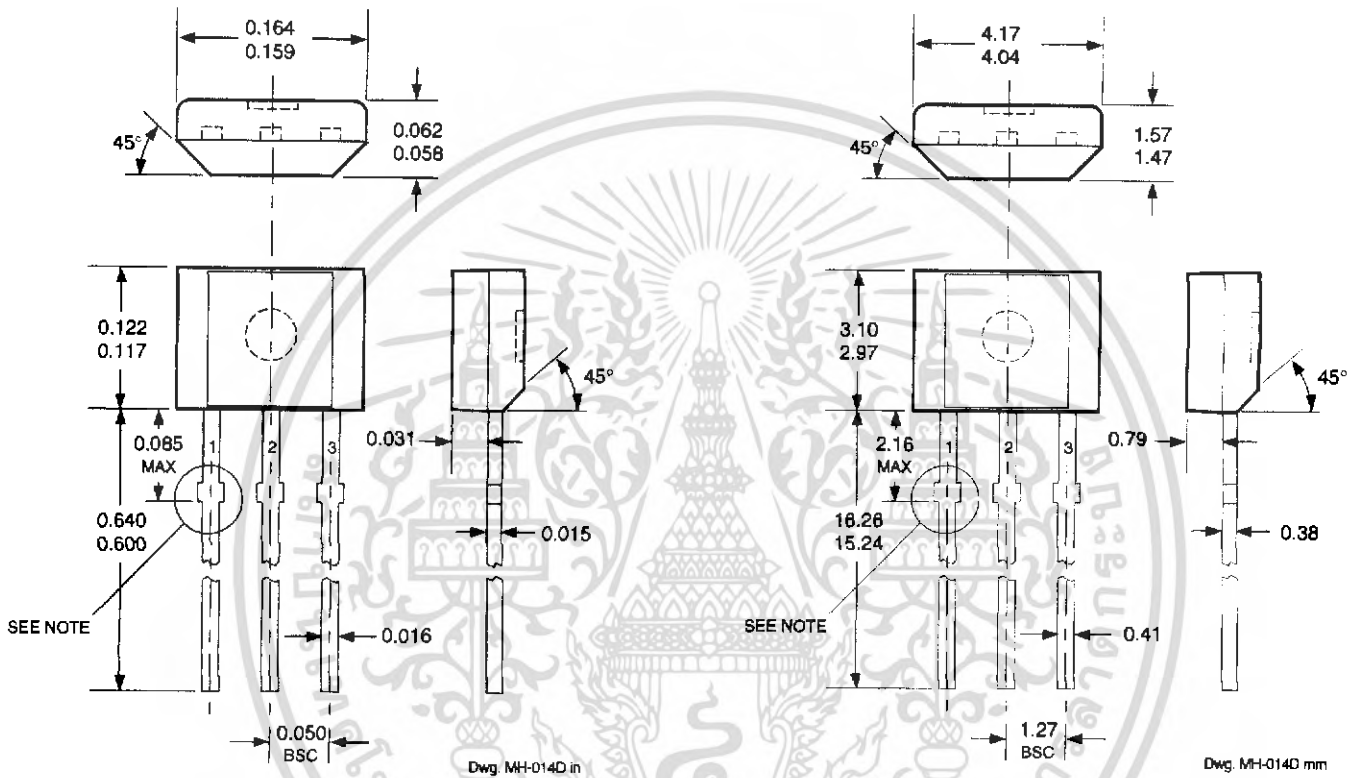
- 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
- 2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
- 3. Height does not include mold gate flash.
- 4. Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
- 5. Minimum lead length was 0.500" (12.70 mm). If existing product to the original specifications is not acceptable, contact sales office before ordering.

**3503**  
**RATIOMETRIC,**  
**LINEAR**  
**HALL-EFFECT SENSORS**

**UGN3503UA**

Dimensions in Inches  
 (controlling dimensions)

Dimensions in Millimeters  
 (for reference only)



- ES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
3. Height does not include mold gate flash.
4. Minimum lead length was 0.500" (12.70 mm). If existing product to the original specifications is not acceptable, contact sales office before ordering.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**03**  
**TIOMETRIC,**  
**WEAR**  
**PLL-EFFECT SENSORS**



*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 design of its products.*

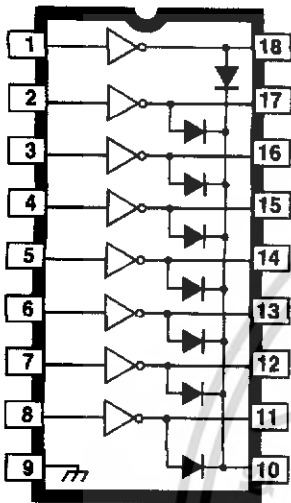
*The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.*



เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2803 THRU 2824

## HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS



Dwg. No. A-10.322A

Note that the ULx28xxA series (dual in-line package) and ULx28xxLW series (small-outline IC package) are electrically identical and share a common terminal number assignment.

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Output Voltage, $V_{CE}$	
(x2803x and x2804x) .....	50 V
(x2823x and x2824x) .....	95 V
Input Voltage, $V_{IN}$ .....	30 V
Continuous Output Current, $I_C$ ....	500 mA
Continuous Input Current, $I_{IN}$ .....	25 mA
Power Dissipation, $P_D$	
(one Darlington pair) .....	1.0 W
(total package) .....	See Graph
Operating Temperature Range, $T_A$	
Prefix 'ULN' .....	-20°C to +85°C
Prefix 'ULQ' .....	-40°C to +85°C
Storage Temperature Range,	
$T_S$ .....	-55°C to +150°C

Featuring continuous load current ratings to 500 mA for each of the drivers, the Series ULN28xxA/LW and ULQ28xxA/LW high-voltage, high-current Darlington arrays are ideally suited for interfacing between low-level logic circuitry and multiple peripheral power loads. Typical power loads totaling over 260 W (350 mA x 8, 95 V) can be controlled at an appropriate duty cycle depending on ambient temperature and number of drivers turned on simultaneously. Typical loads include relays, solenoids, stepping motors, magnetic print hammers, multiplexed LED and incandescent displays, and heaters. All devices feature open-collector outputs with integral clamp diodes.

The ULx2803A, ULx2803LW, ULx2823A, and ULN2823LW have series input resistors selected for operation directly with 5 V TTL or CMOS. These devices will handle numerous interface needs — particularly those beyond the capabilities of standard logic buffers.

The ULx2804A, ULx2804LW, ULx2824A, and ULN2824LW have series input resistors for operation directly from 6 V to 15 V CMOS or PMOS logic outputs.

The ULx2803A/LW and ULx2804A/LW are the standard Darlington arrays. The outputs are capable of sinking 500 mA and will withstand at least 50 V in the off state. Outputs may be paralleled for higher load current capability. The ULx2823A/LW and ULx2824A/LW will withstand 95 V in the off state.

These Darlington arrays are furnished in 18-pin dual in-line plastic packages (suffix 'A') or 18-lead small-outline plastic packages (suffix 'LW'). All devices are pinned with outputs opposite inputs to facilitate ease of circuit board layout. Prefix 'ULN' devices are rated for operation over the temperature range of -20°C to +85°C; prefix 'ULQ' devices are rated for operation to -40°C.

### FEATURES

- TTL, DTL, PMOS, or CMOS Compatible Inputs
- Output Current to 500 mA
- Output Voltage to 95 V
- Transient-Protected Outputs
- Dual In-Line Package or Wide-Body Small-Outline Package

x = Character to identify specific device. Characteristic shown applies to family of devices with remaining digits as shown. See matrix on next page.

**D3 THRU 2824  
5V-VOLTAGE,  
500mA-CURRENT  
ULN2800 ARRAYS**

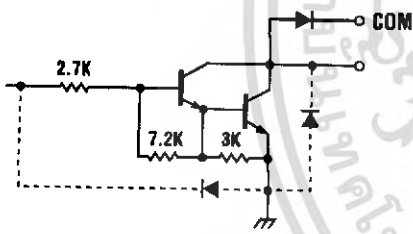
**DEVICE PART NUMBER DESIGNATION**

$V_{CE(MAX)}$	50 V	95 V
$I_{C(MAX)}$	500 mA	500 mA
<b>Logic</b>	<b>Part Number</b>	
5V TTL, CMOS	ULN2803A* ULN2803LW*	ULN2823A* ULN2823LW
6-15 V CMOS, PMOS	ULN2804A* ULN2804LW*	ULN2824A* ULN2824LW

\*Also available for operation between -40°C and +85°C. To order, change prefix from 'ULN' to 'ULQ'.

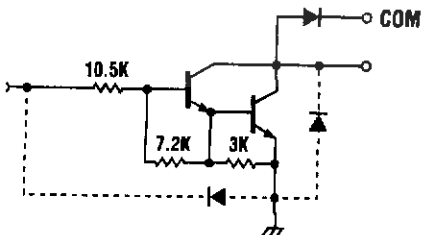
**PARTIAL SCHEMATICS**

**28x3A/LW (Each Driver)**

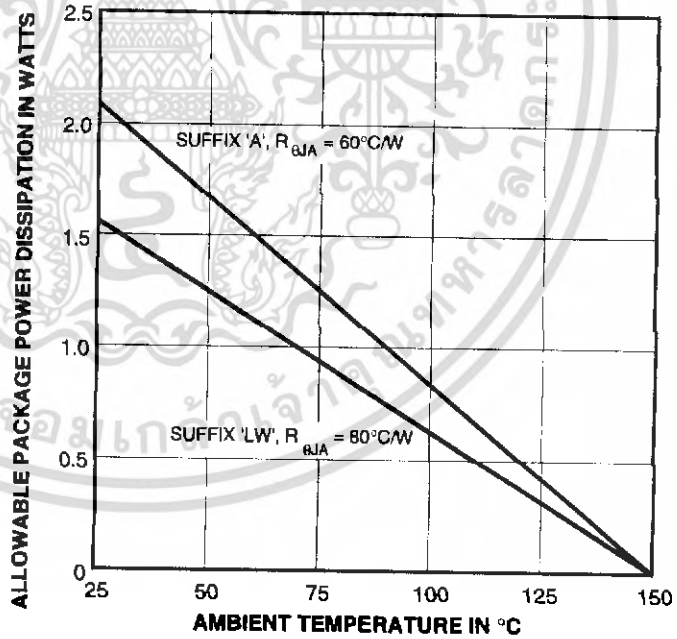


Dwg. No. A-9851

**28x4A/LW (Each Driver)**



Dwg. No. A-9898A



Dwg. GP-018B

x = Character to identify specific device. Specification shown applies to family of devices with remaining digits as shown. See matrix above.



## 2803 THRU 2824 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

Series ULx2803A, ULx2803LW, ULx2804A, and ULx2804LW  
ELECTRICAL CHARACTERISTICS at +25°C (unless otherwise noted).

Characteristic	Symbol	Test Fig.	Applicable Devices	Test Conditions	Limits			
					Min.	Typ.	Max.	Units
Input Leakage Current	$I_{CEX}$	1A	All	$V_{CE} = 50\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	< 1	50	$\mu\text{A}$
				$V_{CE} = 50\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	< 1	100	$\mu\text{A}$
		1B	ULx2804x	$V_{CE} = 50\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}, V_{IN} = 1.0\text{ V}$	—	< 5	500	$\mu\text{A}$
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	2	All	$I_C = 100\text{ mA}, I_B = 250\text{ }\mu\text{A}$	—	0.9	1.1	V
				$I_C = 200\text{ mA}, I_B = 350\text{ }\mu\text{A}$	—	1.1	1.3	V
				$I_C = 350\text{ mA}, I_B = 500\text{ }\mu\text{A}$	—	1.3	1.6	V
Input Current	$I_{IN(ON)}$	3	ULx2803x	$V_{IN} = 3.85\text{ V}$	—	0.93	1.35	mA
			ULx2804x	$V_{IN} = 5.0\text{ V}$	—	0.35	0.5	mA
				$V_{IN} = 12\text{ V}$	—	1.0	1.45	mA
	$I_{IN(OFF)}$	4	All	$I_C = 500\text{ }\mu\text{A}, T_A = 70^\circ\text{C}$	50	65	—	$\mu\text{A}$
Input Voltage	$V_{IN(ON)}$	5	ULx2803x	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	2.4	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 250\text{ mA}$	—	—	2.7	V
				$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 300\text{ mA}$	—	—	3.0	V
		ULx2804x	$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 125\text{ mA}$	—	—	5.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 200\text{ mA}$	—	—	6.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 275\text{ mA}$	—	—	7.0	V	
			$V_{CE} = 2.0\text{ V}, I_C = 350\text{ mA}$	—	—	8.0	V	
Input Capacitance	$C_{IN}$	—	All		—	15	25	pF
Turn-On Delay	$t_{PLH}$	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	$\mu\text{s}$
Turn-Off Delay	$t_{PHL}$	8	All	$0.5 E_{IN}$ to $0.5 E_{OUT}$	—	0.25	1.0	$\mu\text{s}$
Reverse Diode Leakage Current	$I_R$	6	All	$V_R = 50\text{ V}, T_A = 25^\circ\text{C}$	—	—	50	$\mu\text{A}$
				$V_R = 50\text{ V}, T_A = 70^\circ\text{C}$	—	—	100	$\mu\text{A}$
Forward Diode Voltage	$V_F$	7	All	$I_F = 350\text{ mA}$	—	1.7	2.0	V

Complete part number includes prefix to operating temperature range: ULN = -20°C to +85°C, ULQ = -40°C to +85°C  
and a suffix to identify package style: A = DIP, LW = SOIC.

**03 THRU 2824  
GH-VOLTAGE,  
GH-CURRENT  
RLINGTON ARRAYS**

**ULx2823A, ULN2823LW, ULx2824A, and ULN2824LW  
TYPICAL CHARACTERISTICS at +25°C (unless otherwise noted).**

Characteristic	Symbol	Test Fig.	Applicable Devices	Test Conditions	Limits			
					Min.	Typ.	Max.	Units
Collector Leakage Current	I <sub>CEX</sub>	1A	All	V <sub>CE</sub> = 95 V, T <sub>A</sub> = 25°C	—	< 1	50	μA
				V <sub>CE</sub> = 95 V, T <sub>A</sub> = 70°C	—	< 1	100	μA
		1B	ULx2824x	V <sub>CE</sub> = 95 V, T <sub>A</sub> = 70°C, V <sub>IN</sub> = 1.0 V	—	< 5	500	μA
Collector-Emitter Saturation Voltage	V <sub>CE(SAT)</sub>	2	All	I <sub>C</sub> = 100 mA, I <sub>B</sub> = 250 μA	—	0.9	1.1	V
				I <sub>C</sub> = 200 mA, I <sub>B</sub> = 350 μA	—	1.1	1.3	V
				I <sub>C</sub> = 350 mA, I <sub>B</sub> = 500 μA	—	1.3	1.6	V
Collector Current	I <sub>IN(ON)</sub>	3	ULx2823x	V <sub>IN</sub> = 3.85 V	—	0.93	1.35	mA
			ULx2824x	V <sub>IN</sub> = 5.0 V	—	0.35	0.5	mA
				V <sub>IN</sub> = 12 V	—	1.0	1.45	mA
	I <sub>IN(OFF)</sub>	4	All	I <sub>C</sub> = 500 μA, T <sub>A</sub> = 70°C	50	65	—	μA
Collector Voltage	V <sub>IN(ON)</sub>	5	ULx2823x	V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 200 mA	—	—	2.4	V
				V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 250 mA	—	—	2.7	V
				V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 300 mA	—	—	3.0	V
			ULx2824x	V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 125 mA	—	—	5.0	V
				V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 200 mA	—	—	6.0	V
				V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 275 mA	—	—	7.0	V
				V <sub>CE</sub> = 2.0 V, I <sub>C</sub> = 350 mA	—	—	8.0	V
Input Capacitance	C <sub>IN</sub>	—	All		—	15	25	pF
Turn-On Delay	t <sub>PLH</sub>	8	All	0.5 E <sub>IN</sub> to 0.5 E <sub>OUT</sub>	—	0.25	1.0	μs
Turn-Off Delay	t <sub>PHL</sub>	8	All	0.5 E <sub>IN</sub> to 0.5 E <sub>OUT</sub>	—	0.25	1.0	μs
Reverse Diode Leakage Current	I <sub>R</sub>	6	All	V <sub>R</sub> = 95 V, T <sub>A</sub> = 25°C	—	—	50	μA
				V <sub>R</sub> = 95 V, T <sub>A</sub> = 70°C	—	—	100	μA
Forward Diode Voltage	V <sub>F</sub>	7	All	I <sub>F</sub> = 350 mA	—	1.7	2.0	V

Complete part number includes prefix to operating temperature range: ULN = -20°C to +85°C, ULQ = -40°C to +85°C  
 Suffix to identify package style: A = DIP, LW = SOIC. Note that the ULQ2823LW and ULQ2824LW are not presently available.



115 Northeast Cutoff, Box 15036

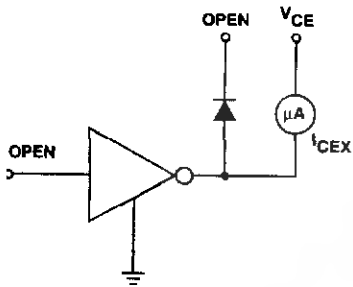
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

Allegro Microsystems, Inc. เป็นองค์กรที่สนับสนุนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 การใช้งานอื่นใดที่ห้ามมิให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก Allegro Microsystems, Inc. ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2803 THRU 2824 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

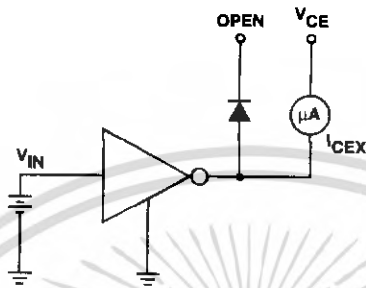
## TEST FIGURES

FIGURE 1A



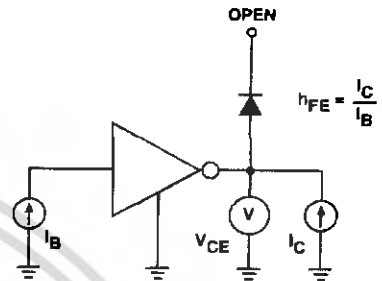
Dwg. No. A-9729A

FIGURE 1B



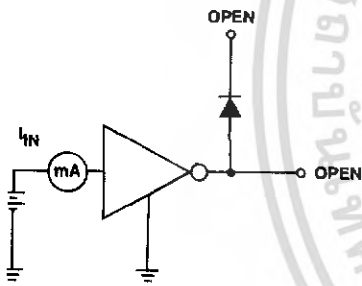
Dwg. No. A-9730A

FIGURE 2



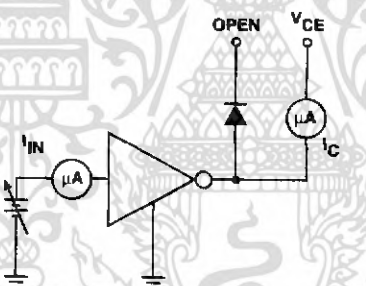
Dwg. No. A-9731A

FIGURE 3



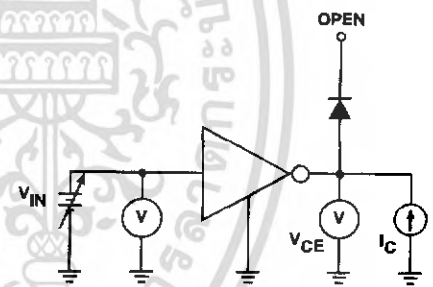
Dwg. No. A-9732A

FIGURE 4



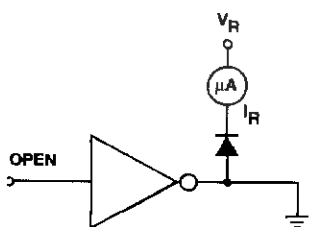
Dwg. No. A-9733A

FIGURE 5



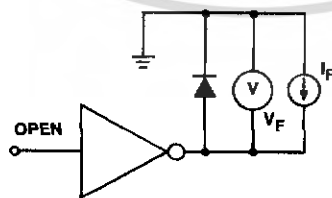
Dwg. No. A-9734A

FIGURE 6



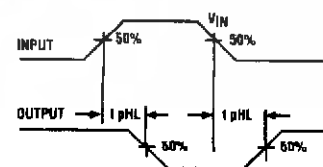
Dwg. No. A-9735A

FIGURE 7

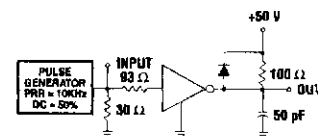


Dwg. No. A-9736A

FIGURE 8

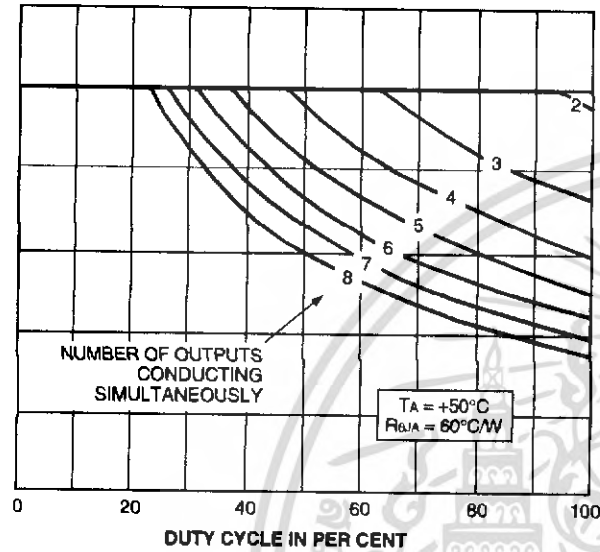


$V_{IN}$   
ULx28x3x 3.5 V  
ULx28x4x 12 V

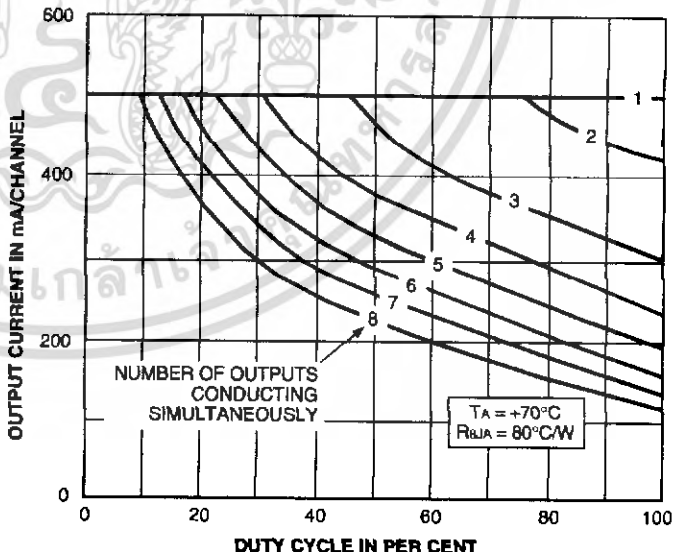
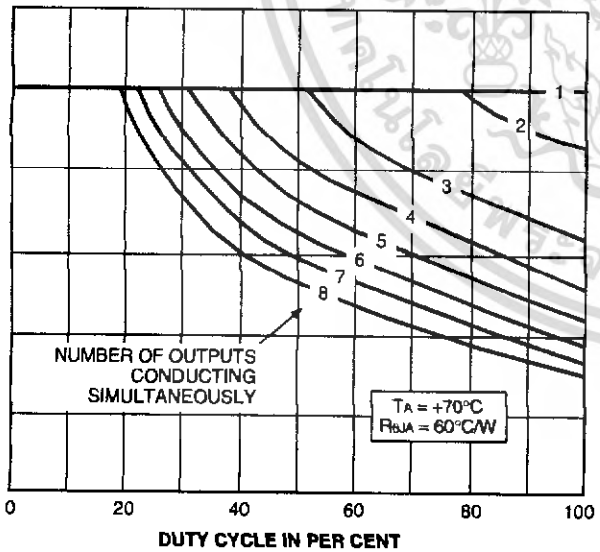
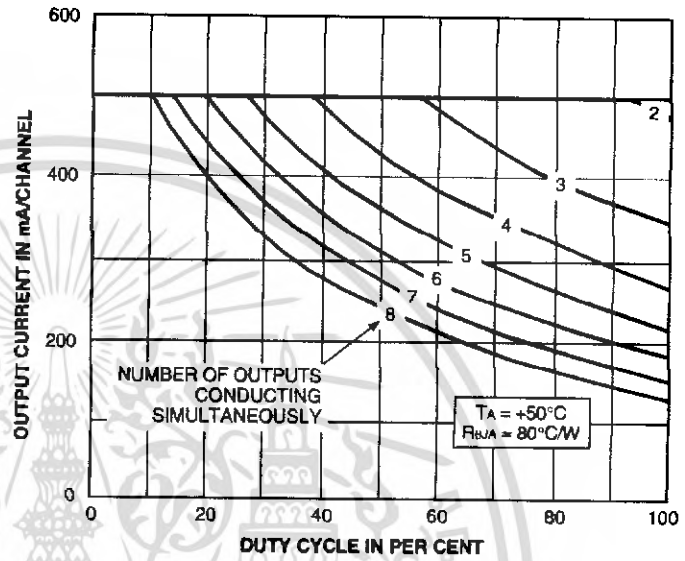


**03 THRU 2824**  
**GH-VOLTAGE,**  
**GH-CURRENT**  
**RLINGTON ARRAYS**

**ALLOWABLE COLLECTOR CURRENT AS A FUNCTION OF DUTY CYCLE**  
**ULx28xxA**



**ALLOWABLE COLLECTOR CURRENT AS A FUNCTION OF DUTY CYCLE**  
**ULx28xxLW**



characters to identify specific device. Specification shown applies to family of devices with remaining digits as shown.

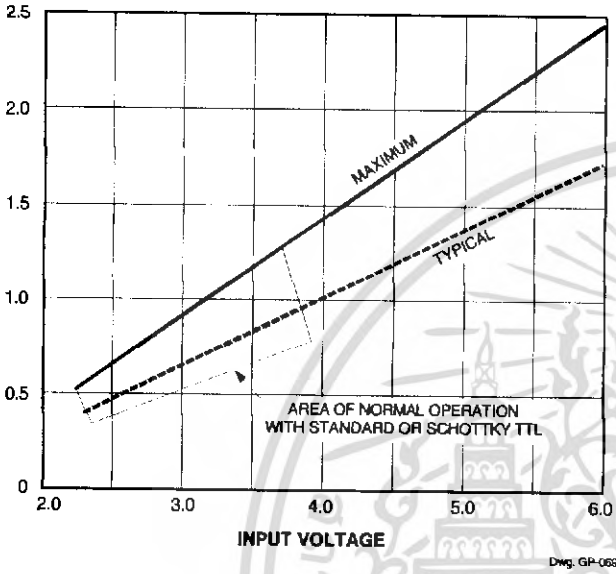


115 Northeast Cutoff, Box 15036  
 Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

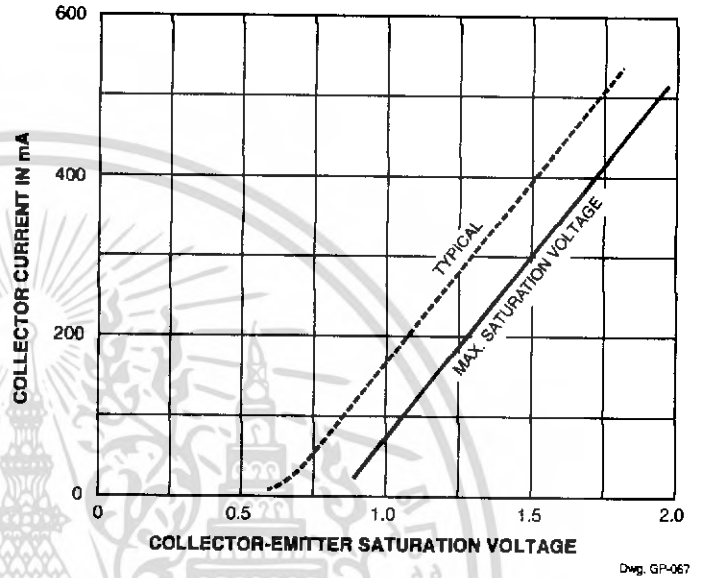
สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อผลิตภัณฑ์และเครื่องหมายการค้าของ Allegro MicroSystems, Inc. ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจาก Allegro MicroSystems, Inc. หรือตัวแทนจำหน่ายของ Allegro MicroSystems, Inc. ในประเทศไทย

# 2803 THRU 2824 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

**INPUT CURRENT AS A  
FUNCTION OF INPUT VOLTAGE**  
ULx28x3x

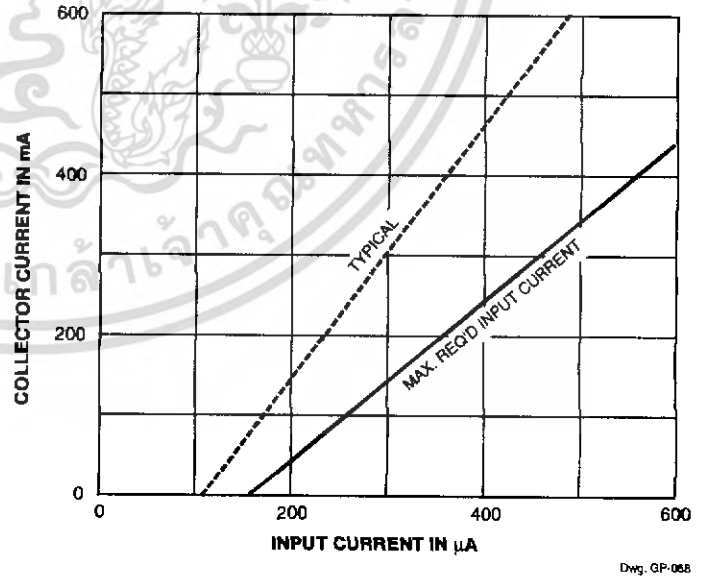
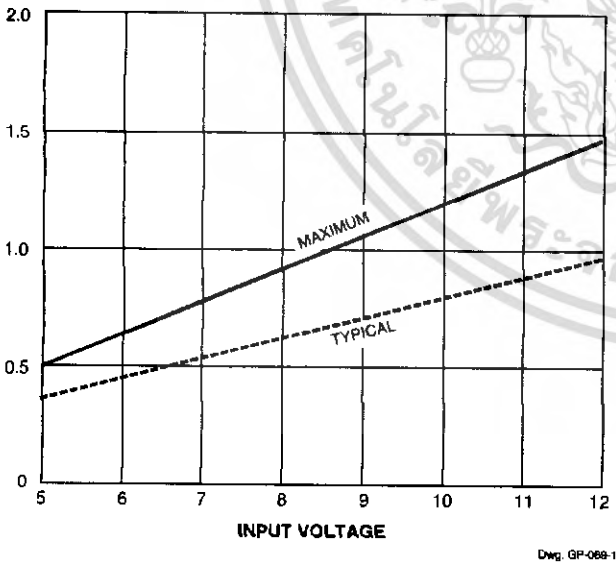


**SATURATION VOLTAGE AS A FUNCTION OF  
COLLECTOR CURRENT**



ULx28x4x

**COLLECTOR CURRENT AS A  
FUNCTION OF INPUT CURRENT**

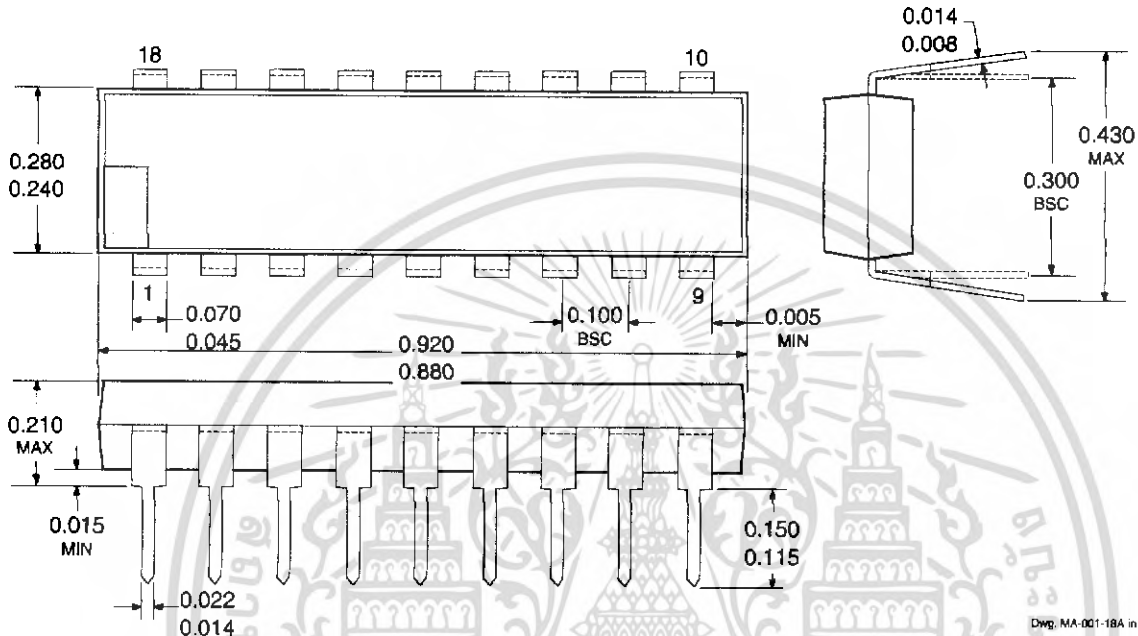


Characters to identify specific device. Characteristic shown applies to family of devices with remaining digits as shown.

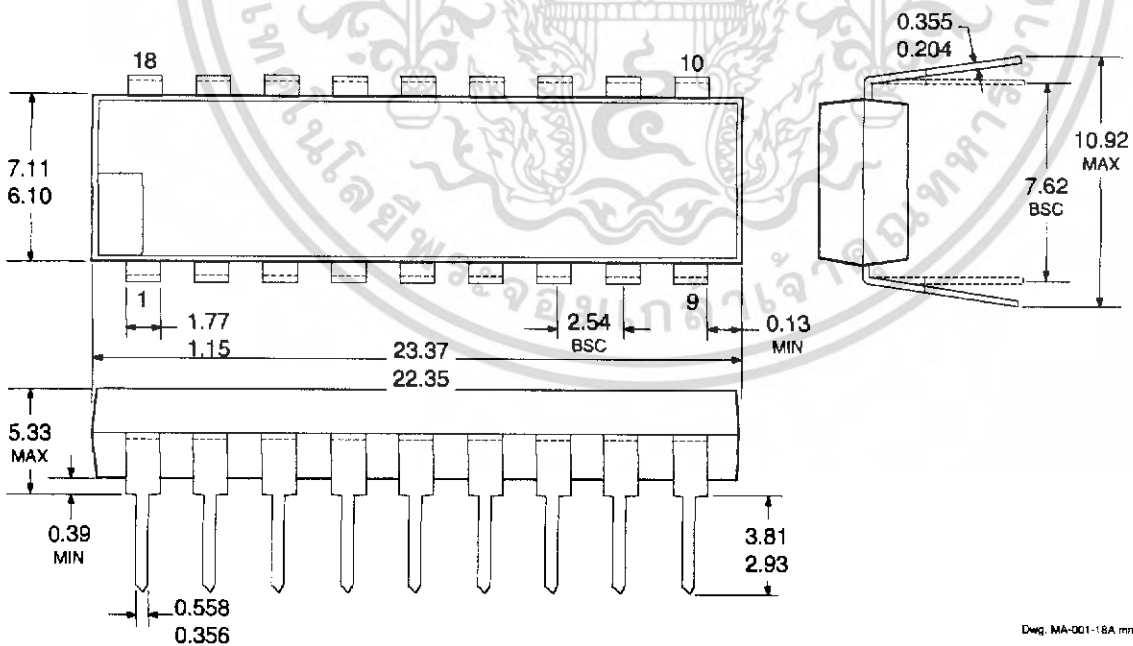
**03 THRU 2824**  
**5H-VOLTAGE,**  
**5H-CURRENT**  
**18-LEAD DIP SMT ARRAYS**

**PACKAGE DESIGNATOR "A" DIMENSIONS**

Dimensions in Inches  
 (controlling dimensions)



Dimensions in Millimeters  
 (for reference only)



- 1. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
- 2. Lead spacing tolerance is non-cumulative.
- 3. Lead thickness is measured at seating plane or below.



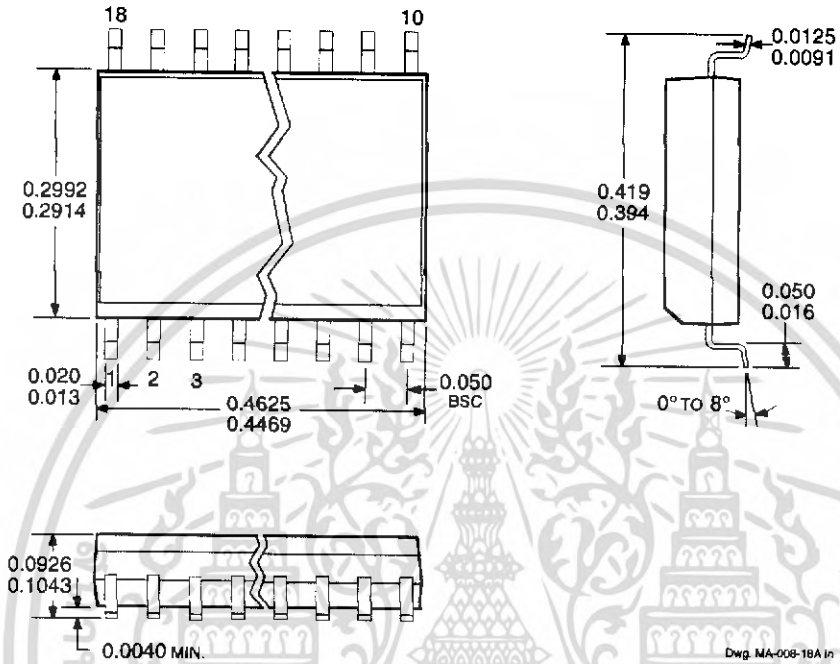
115 Northeast Cutoff, Box 15036  
 Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000

ไมโครซิสเต็มส์ อิงค์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 หรือในลักษณะอื่นใดที่ห้ามมิให้เกิดขึ้นและต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

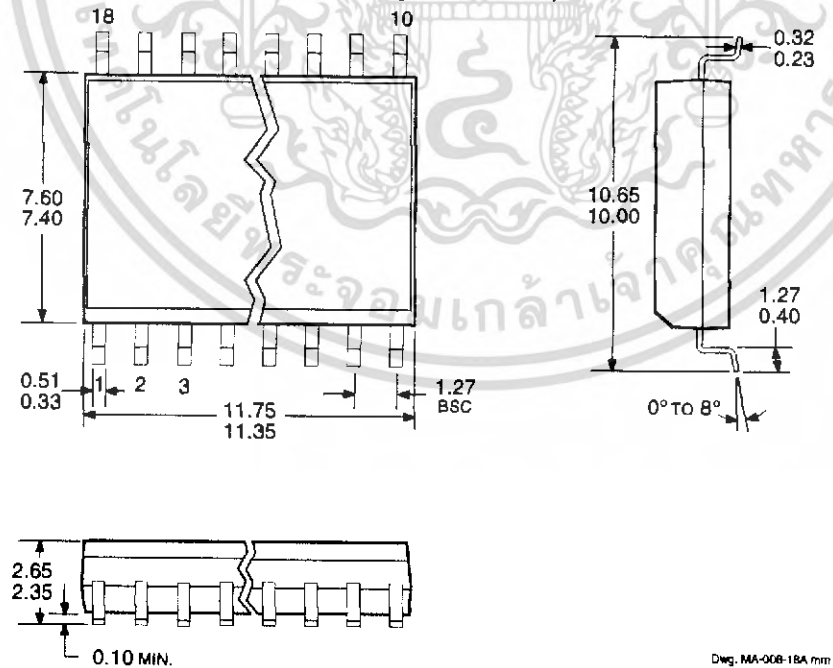
# 2803 THRU 2824 HIGH-VOLTAGE, HIGH-CURRENT DARLINGTON ARRAYS

## PACKAGE DESIGNATOR "LW" DIMENSIONS

Dimensions in Inches  
(for reference only)



Dimensions in Millimeters  
(controlling dimensions)



- ES: 1. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.  
2. Lead spacing tolerance is non-cumulative.

**03 THRU 2824  
5H-VOLTAGE,  
5H-CURRENT  
WILMINGTON ARRAYS**



*The products described here are manufactured under one or more U.S. patents or U.S. 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.*