

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กแผ่น

**THE METAL PLATE CRACK DETECTOR**



รฟ.  
26169ค  
2550

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 82187

วัน,เดือน,ปี..... 9. 0. 2551

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กแผ่น  
THE METAL PLATE CRACK DETECTOR



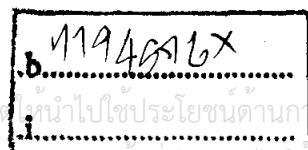
รายงานสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

รายงาน ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กแผ่น

THE METAL PLATE CRACK DETECTOR

ผู้จัดทำ 1. นายนพดล จันทรวุฒิกุล

2. นายสุรศักดิ์ วินทะสมบัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กแผ่น

นาย นพดล จันทร์วุฒิกุล รหัส 48015166

นาย สุรศักดิ์ วินทะสมบัติ รหัส 48015189

รศ. ขนิษฐา แซ่ตั้ง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2550

### บทคัดย่อ

โครงการตรวจสอบรอยร้าวในเหล็กแผ่น โดยใช้หลักการตรวจสอบความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่ารีลักแตนซ์ที่เปลี่ยนแปลงบนแผ่นเหล็กเมื่อเกิดรอยร้าว โดยวิธีสร้างแหล่งจ่ายกระแสตรงเพื่อขับกระแสให้ไหลผ่านขดลวดตัวนำที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กที่จะเหนี่ยวนำเข้าสู่แผ่นเหล็กที่เราต้องการจะตรวจสอบ แล้วใช้ตัวอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กโดยปรากฏการณ์ของฮอลล์ 2 ตัว ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ส่งเข้าไปในชิ้นงานที่เราต้องการตรวจสอบหารอยบกพร่องอันเนื่องมาจากผลของการเกิดช่องว่างอากาศหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวกลางที่เป็นทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่ารีลักแตนซ์ แล้วนำผลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ตัว ซึ่งจะออกมาในรูปของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามาขยายโดยวงจรขยายเครื่องมือวัดแล้วนำไปเปรียบเทียบโดยวงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อให้ได้ค่าเป็นลอจิก 0 สำหรับกรณีไม่มีรอยร้าว กับ 1 สำหรับกรณีตรวจพบรอยร้าว ทำการประมวลผลโดย MCS-51 และแสดงผลออกทางจอ LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THE METAL PLATE CRACK DETECTOR

Mr. Nopadol Chanwuttikun ID.48015166

Mr. Surasak Wintasombat ID.48015189

Assoc. Prof. Khanittha Sae-Tang Advisor

Education Year 2007

### Abstract

The Metal Plate Cracking Detector used the principle of the changing magnetic flux density by reluctance of material change. The magnetic flux density has produce from the constant current source drive magnetic coil to produce the magnetic flux density into plane Metal Plate. Cracking in metal plate will change the magnetic flux density, and we can sense the changing by Hall-effect sensor (IC) detector. The magnetic field are change by the rule of reluctance changing at the metal plate crack and compare the magnetic flux density between output from two Hall effect sensor and gain by Instrumentation Amplifiers. Then use comparator circuit transform output to logic 1 for cracking or 0 for no cracking. The MCS-51 use to process and control the out put LCD display.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยการชี้แนะและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างสูงจากท่าน ร.ศ.ชนิษฐา แซ่ตั้ง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญานิพนธ์ นอกจากนี้ที่ท่านจะให้ความรู้ทางด้านวิชาการแล้ว ท่านยังเป็นที่ปรึกษาในการดำเนินชีวิตมากมาย ทางคณะผู้จัดทำได้รู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยมจากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ ครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและภาคภูมิใจ และจะนำความรู้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวมและประเทศชาติให้มากที่สุด

และสิ่งสำคัญที่จะลืมมิได้ ขอกราบขอบพระคุณ พ่อและแม่ อันเป็นที่รักและเคารพยิ่งของลูก ที่อบรม ให้กำลังใจ สนับสนุนในด้านการศึกษาอย่างเต็มที่ พร้อมทั้งเอาใจใส่อย่างดีเสมอมาในทุกๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ลูกขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์อันพึงมีจากโครงการนี้ ทางคณะผู้จัดทำ ขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่านรวมถึงผู้ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

นาย นพดล จันทรวุฒิคุณ

นาย สุรศักดิ์ วินทะสมบัติ

## 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 ปรัชญาการณของฮอลล์ (Hall Effect)	2
2.2 ฮอลล์เจเนอเรเตอร์	8
2.3 ชนิดของตัวตรวจจับฮอลล์	9
2.3.1 ฮอลล์ชนิดสวิทช์	9
2.3.2 ฮอลล์ชนิดแลตซ์	10
2.3.3 ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น	10
2.4 การตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก	12
2.4.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)	13
2.4.2 เงื่อนไขการทดสอบ	16
<b>บทที่ 3 ความรู้พื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์</b>	<b>18</b>
3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	18
3.1.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	18
3.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของ AT89C51	19
3.1.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	22
3.2 การขับโมดูลแสดงผลแบบฟลิกเหลว (LCD modul)	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 รายละเอียดเกี่ยวกับ โมดูล LCD	24
3.2.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุม โมดูล LCD	25
3.2.3 โมดูล LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด (LCD 16x2)	26
<b>บทที่ 4 ส่วนประกอบและหลักการทำงาน</b>	<b>28</b>
4.1 หลักการทำงาน	28
4.2 ส่วนของฮาร์ดแวร์	29
4.2.1 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)	29
4.2.2 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (Current Source)	29
4.2.3 ส่วนหัวตรวจจ็บรอยร้าว	30
4.2.4 วงจรขยายเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifiers, IAs)	30
4.2.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator)	31
4.2.7 จอ โมดูล LCD แบบตัวอักษรขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด	32
4.3 โครงสร้างระบบ	34
<b>บทที่ 5 ผลการทดลอง</b>	
1 .การทดลองสร้างสนามแม่เหล็ก	35
2 .การทดลองหารอบยกพร้อมของเหล็กแผ่น	35
2.1. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก 23 mA	35
2.2. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก 43 mA	37
2.3. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก 86 mA	38
2.4. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก 113 mA	40
<b>บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</b>	<b>42</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>a</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>b</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์	2
รูปที่ 2.2 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ	3
รูปที่ 2.3 หลักการของฮอลล์เจเนอเรเตอร์	8
รูปที่ 2.4 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจเนอเรเตอร์	9
รูปที่ 2.5 การตอบสนองแรงดันเฮดจ์พุตของฮอลล์ชนิดสวิตช์	9
รูปที่ 2.6 การตอบสนองแรงดันเฮดจ์พุตของฮอลล์ชนิดแลตซ์	10
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเส้น	11
รูปที่ 2.8 แสดงบล็อกไดอะแกรมของฮอลล์เชิงเส้น เบอร์ A1302	11
รูปที่ 2.9 ผลเหล็กเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก	12
รูปที่ 2.10 แม่เหล็กไดโพลมีทิศทางที่แน่นอนเสมอ	13
รูปที่ 2.11 วงจรแม่เหล็กพื้นฐาน	13
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า	14
รูปที่ 2.13 วงจรสนามแม่เหล็กเมื่อมี Air gap	15
รูปที่ 2.14 แสดงปรากฏการณ์ fringing effect	15
รูปที่ 2.15 การเกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดกระแสไฟฟ้าตรง	16
รูปที่ 2.16 การเกิดสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากบริเวณผิวชั้นทศสอบจากกระแสไฟฟ้าสลับ	16
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า B และ H	17
รูปที่ 3.1 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89Cx	20
รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างภายในของ MCS-51	23
รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร	26
รูปที่ 4.1 Block Diagram การทำงานของระบบ	28
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรกำลังไฟฟ้า	29
รูปที่ 4.3 วงจรจ่ายกระแสคงที่	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 วงจรขยายเครื่องมือวัดแบบใช้โอปแอมป์ 3 ตัว	31
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างการใช้งานวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ	32
รูปที่ 4.6 แสดงวงจรการทำงานในส่วนของการแสดงผล	33
รูปที่ 4.7 แสดง โครงสร้างของระบบที่ออกแบบจริง	34
รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 23 mA	36
รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 23 mA	37
รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 43 mA	38
รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 43 mA	38
รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 86 mA	39
รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 86 mA	40
รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 113 mA	40
รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 113 mA	41

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เมอร์ต่างๆ	24
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองที่กระแส 23 mA	36
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองที่กระแส 43 mA	37
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองที่กระแส 86 mA	39



## บทที่ 1

### บทนำ

เทคโนโลยีทางด้านอุตสาหกรรมกำลังมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง โรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มกำลังการผลิตได้มากขึ้น เมื่อมีกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นสิ่งที่จำเป็นที่สุดในกระบวนการผลิตก็คือ การตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์และชิ้นส่วนอุปกรณ์ของโครงสร้างหรือเครื่องจักรต่างๆ ซึ่งเป็นปัญหาที่มักพบได้เสมอในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีอุปกรณ์ช่วยในการออกแบบและมีการใช้เทคนิคในการซ่อมบำรุงที่ทันสมัย แต่สถานะการทำงานของเครื่องจักรที่มักไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้เกิดผลเสียทางเศรษฐกิจ สุขภาพ หรือชีวิต การตรวจสอบที่นิยมใช้ในโรงงานวิธีหนึ่งคือ การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย การตรวจสอบแบบไม่ทำลายมีข้อดีคือไม่ทำให้วัตถุที่นำมาทดสอบเสียหาย ดังนั้นแล้วการตรวจสอบแบบไม่ทำลายจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการตรวจสอบ เพื่อวินิจฉัยหาสาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายที่เกิดขึ้นสำหรับใช้เป็นแนวทางพิจารณาในการแก้ไขซ่อมแซม หรือออกแบบใหม่ เพื่อป้องกันความเสียหายชนิดดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

การตรวจสอบโดยใช้วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้กับวัตถุที่ต้องการจะตรวจสอบมีสภาพเป็นแม่เหล็ก ในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตอุปกรณ์สำเร็จรูปขึ้นเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก จากแนวความคิดนี้เอง จึงได้สังเกตเห็นความสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงได้นำอุปกรณ์ที่ใช้ทฤษฎีของฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบโลหะแผ่นเพื่อตรวจหารอยร้าวหรือรอยบกพร่องที่มีอยู่ภายในชิ้นงาน เมื่อวัตถุโลหะแผ่นที่ต้องการนำมาตรวจสอบมีรอยร้าวเกิดขึ้น ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทำให้อุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์สามารถตรวจจับได้เกิดผลเป็นแรงดันแล้วขยายแบบเปรียบเทียบค่าแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กผ่านวงจร ขยาย เพื่อให้สามารถแสดงส่วนของค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กได้ละเอียดยิ่งขึ้นแล้วใช้วงจรเปรียบเทียบเพื่อให้แรงดันออกมาเสมือนเป็นลอจิก 1 หรือ 0 นำไปประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะแสดงผลออกทาง LCD

## บทที่ 2

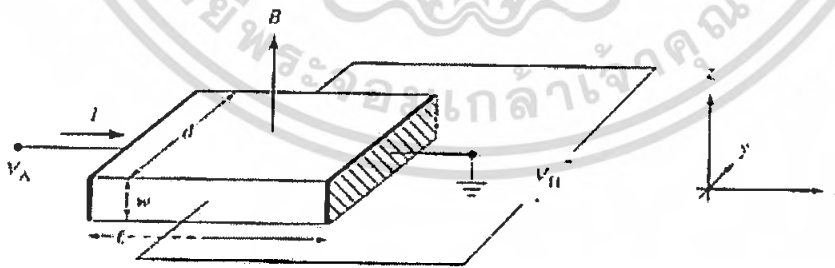
### ทฤษฎีหลักการพื้นฐาน

การตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect Testing) เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายอีกวิธีหนึ่งซึ่งอาศัยหลักการทำงานของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น กับวัสดุที่ใช้ในการตรวจสอบ แล้วทำการส่งสนามแม่เหล็กไปที่ชิ้นงานที่ต้องการจะตรวจสอบ จากนั้นจึงใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กเป็นตัววัดค่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก

การตรวจสอบด้วยการปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นเทคนิคที่ไม่กว้างขวางมากนัก นอกเหนือจากการตรวจสอบเพื่อหารอยบกพร่องแล้วการตรวจสอบด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ยังสามารถใช้ตรวจสอบคุณลักษณะทางกลและทางโลหะได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กโดยทางอ้อม นอกจากนั้นผลกระทบทางรูปทรง เช่น ความหนา ความโค้ง ก็มีผลต่อการไหลเวียน หรือการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

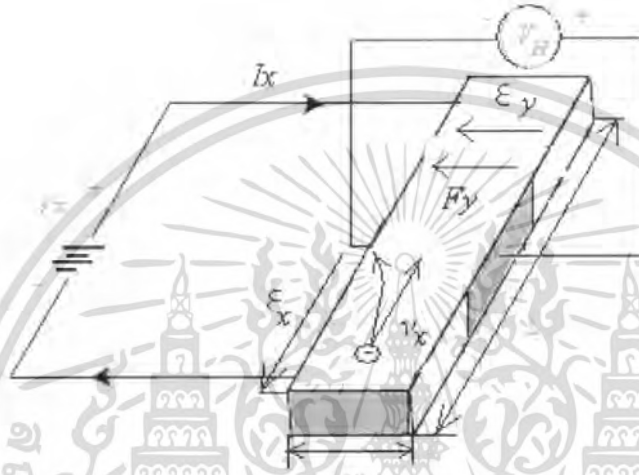
#### 2.1 ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect)

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



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ของฮอลล์

การทดลองในเรื่องของปรากฏการณ์ฮอลล์ เป็นการยืนยันว่าแนวคิดที่เป็นไปได้เกี่ยวกับชนิดของประจุพาหะ (Carrier Change) ทั้งสองชนิด คือ อิเล็กตรอน และ โฮล ที่มีอยู่จริงในสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดลองในเรื่องนี้ ทำให้สามารถวัดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำได้ ทั้งยังสามารถนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.2 แสดงการทดลองปรากฏการณ์ของฮอลล์ในสารกึ่งตัวนำ

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังรูปที่ 2.2 (ข) จะเห็นได้ว่าต่ออยู่กับแหล่งจ่ายแรงดันที่ค่าความต่างศักย์  $V_x$  ทำให้เกิดความหนาแน่นกระแส (Current density)  $J_x$  ไหลในทิศทาง  $+x$  และถ้าให้สนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux density)  $B_z$  ตัดผ่านสารกึ่งตัวนำในทิศทาง  $+z$  โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากและมีค่าประจุไฟฟ้าเป็นบวก เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน (Built in electric field)  $E_x$  จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อโฮล ทำให้โฮลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว drift (Drift velocity)  $v_{DX}$  ในทิศทาง  $+x$  และเมื่อมีสนาม  $B_z$  ตัดผ่านทิศตั้งฉากกับกระแส จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)  $F_L$  กระทำต่อโฮลดังสมการ

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

เมื่อ  $F_L$  คือ แรงลอเรนซ์มีขนาดเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีทิศทาง  $+x$  ดังนั้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เบี่ยงเบนมาทางแกน  $-y$  และสะสมอยู่ที่บริเวณด้านหน้าของแท่งสารกึ่งตัวนำ ด้านตรงกันข้าม (ด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำ) จึงมีประจุไฟฟ้าลบเกิดขึ้น เนื่องจากโฮลทางด้านหน้ามีจำนวนมาก ในขณะที่ด้านหลังมีจำนวนโฮลน้อยกว่า ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน  $\mathcal{E}_y$  ในทิศ  $+y$  สนามไฟฟ้านี้จะต้านทานการเคลื่อนที่ของโฮลซึ่งถูกกระทำด้วยแรงลอเรนซ์ในสภาวะสมดุล 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)

จากรูป 2.2 เมื่อทำการวัดแรงดันระหว่างด้านหน้า และด้านหลังของแท่งสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ  $W$  จะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $V_H$  คือ แรงดันฮอลล์ หรือแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างด้านข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ

จากสมการที่ (2.9) เมื่อแทนค่า  $J_x = \frac{I}{Wd}$  และ  $\mathcal{E}_y = \frac{V_H}{W}$  ลงในสมการจะได้

$$R_H = \frac{V_H}{W} \frac{Wd}{I} \frac{1}{B_z} \quad (2.10)$$

หรือ

$$R_H = \frac{dV_H}{I \cdot B_z} = \frac{1}{ep} \quad (2.11)$$

$$\therefore V_H = \frac{I \cdot B_z}{epd} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.11) จะได้ค่าความหนาแน่นของโฮล คือ

$$p = \frac{1}{eR_H} = \frac{I \cdot B_z}{epd} \quad (2.13)$$

และสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) คือ

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

เนื่องจาก  $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{ep\mu_p}$  ดังนั้นจะได้

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

จากสมการ (2.13) (2.14) และ (2.15) จะเห็นได้ว่าการทดลองในเรื่องของปรากฏการณ์ของฮอลล์ ทำให้เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้คือ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพคล่องได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการวัดแรงดันของฮอลล์ ทำให้สามารถบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ว่าเป็นสารชนิดเอ็น หรือชนิดพีได้ เมื่อเราพิจารณาสมการที่ (2.12) จะได้ผลตอบสนองของความไว (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  $\theta_H$  ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “มุมฮอลล์” (Hall angle) ได้สมการคือ

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

เมื่อทำการแทนค่า  $\mathcal{E}_y = \frac{J_x \times B_z}{ep}$  และ  $J_x = \sigma \mathcal{E}_x$  จะได้

$$\tan \theta_H = \frac{J_x B_z \sigma}{ep J_x} = \frac{\sigma B_z}{ep} \quad (2.19)$$

หรือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ซึ่งเท่ากับสมการที่ (2.15) นั่นเอง

ในการวิเคราะห์ที่ผ่านมาแล้วนี้ ยังไม่ได้พิจารณาผลของการชนกันระหว่างพาหะกับพาหะ หรือพาหะกับแลตทิซ ดังนั้นค่าที่ได้จึงยังไม่ถูกต้อง ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ในกรณีที่พิจารณาการชนกันระหว่างพาหะกับแลตทิซ (Lattice Scattering) จะได้ว่า

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

และ

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

หรือ

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

เมื่อ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของโฮล (Hole mobility)

$\mu_H$  คือ สภาพคล่องของฮอลล์ (Hall mobility)

ในกรณีที่พิจารณาการชนกันของพาหะกับอะตอมสารเจือ (Ionized Impurity Scattering) จะ

ได้

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

และ

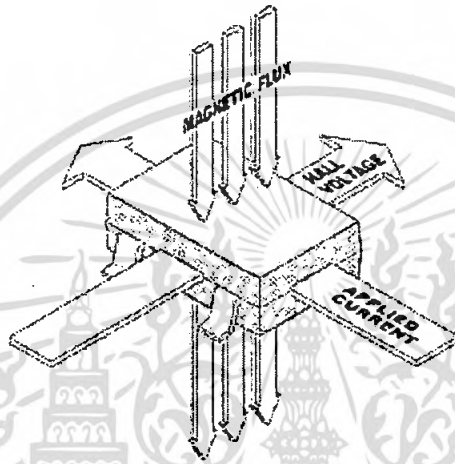
$$\mu_{H(\text{collision})} = \frac{315\pi}{512} \mu_p = 1.93 \mu_p \quad (2.27)$$

ในกรณีที่ต้องการพิจารณาทั้งอิเล็กตรอนและโฮลพร้อมๆ กัน จะต้องมีการแก้ไขสมการใหม่ให้ถูกต้อง จากรูป 2.2 สนามไฟฟ้า  $\mathcal{E}$  อยู่ในทิศ  $x$  และขณะเดียวกันสนามแม่เหล็ก  $B$  อยู่ในทิศ  $z$  เนื่องจากสนาม  $\mathcal{E}$  จะเกิดกระแส โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางซ้าย และ โฮลเคลื่อนที่ไปทางขวา การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์และทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ลง ไปสูงผิวด้านล่าง และเกิดการหักล้างกันเกิดขึ้น การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หักล้างนี้จะไม่หมดไปโดยสิ้นเชิง และทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวด้านล่าง เนื่องจากสารจะต้องเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นจะเกิดประจุตรงกันข้ามขึ้นที่ผิวด้านบน และเกิดสนามไฟฟ้าในแกน  $y$  ขึ้นซึ่งเรียกว่า สนามของฮอลล์

## 2.2 ฮอลล์เจเนอเรเตอร์



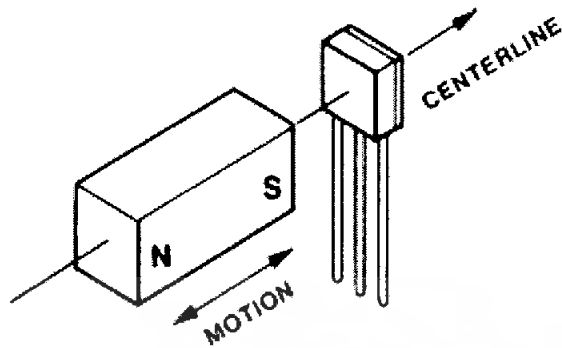
รูปที่ 2.3 หลักการของฮอลล์เจเนอเรเตอร์

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

$$v = \frac{\eta i B}{t} \quad (2.28)$$

ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์ และ  $\eta$  ( $\text{m}^2\text{C}$ ) เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (Hall Coefficient) ถ้าทราบค่า  $\eta$ ,  $t$  และ  $I$  ก็จะสามารถหาค่า  $B$  ได้โดยการวัด  $V$  ฮอลล์เจเนอเรเตอร์มีขนาดเล็กมาก ( $t$  มีค่าอยู่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร)

จนสามารถนำไปวัดความหนาแน่นของฟลักซ์ในที่แคบๆ ได้ ดังแสดงในรูป 2.4 ส่วนความไวสามารถวัดได้ถึงระดับ  $10^{-4}$  ( $\text{Wb/m}^2$ ) การเปรียบเทียบสามารถทำได้โดยการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฮอลล์ (Hall Emf) ในความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ทราบค่าแล้ว



รูปที่ 2.4 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เจนเนอเรเตอร์

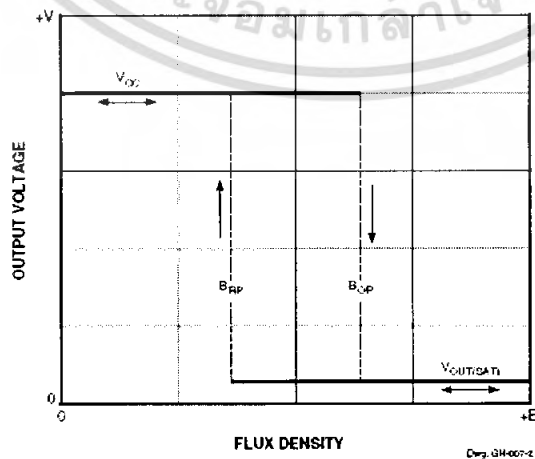
### 2.3 ชนิดของตัวตรวจจับฮอลล์

ฮอลล์แบ่งออกเป็นสามชนิด คือ ชนิดเป็นสวิตช์ ชนิดเป็นตัวลatches (Latch) และชนิดเป็นอุปกรณ์เชิงเส้น ชนิดสวิตช์และชนิดลatches เป็นอุปกรณ์ทางดิจิทัลคือ จะมีเอาต์พุตเพียงสองสถานะ "ไม่เปิดก็ปิด" ในขณะที่ฮอลล์แบบเชิงเส้นจะให้แรงดันเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสนามแม่เหล็ก

#### 2.3.1 ฮอลล์ชนิดสวิตช์ (Switch Hall Device)

เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาวะปกติจะ "ปิด" และจะ "เปิด" เมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก และจะปิดเมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก รูปที่ 2.5 แสดงฟังก์ชันงานของฮอลล์ชนิดสวิตช์ จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก เมื่อสนามแม่เหล็กเพิ่มจนถึงค่า  $B_{RT}$

จะได้แรงเคลื่อน  $V_{OH}$  สภาวะเช่นนี้คือ "เปิด" แต่เมื่อสนามแม่เหล็กลดลงจนถึง  $B_{OP}$  จะได้แรงดัน  $V_{OL}$  สภาวะเช่นนี้คือ "ปิด"

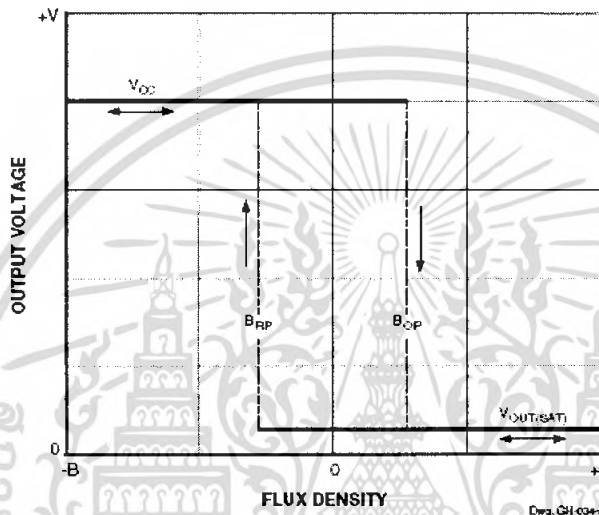


รูปที่ 2.5 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตของฮอลล์ชนิดสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ฮอลล์ชนิดแลตซ์ (Latching Hall Device)

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

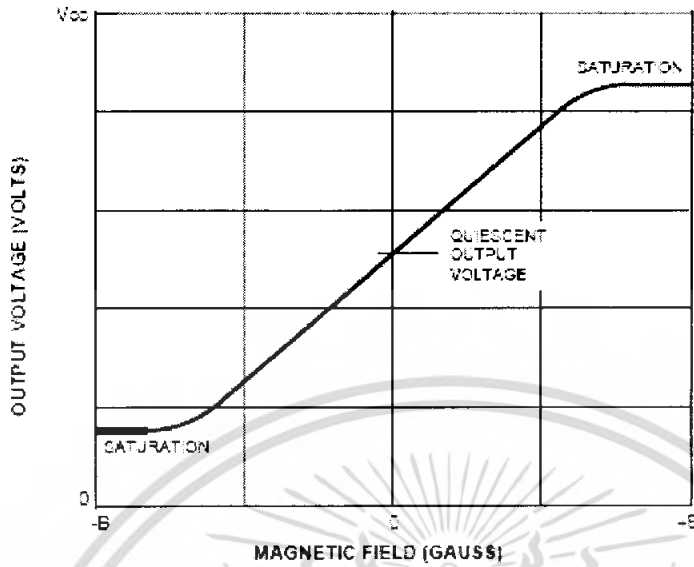


รูปที่ 2.6 การตอบสนองแรงดันเอาต์พุตของฮอลล์ชนิดแลตซ์

### 2.3.3 ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น (Linear Hall Device)

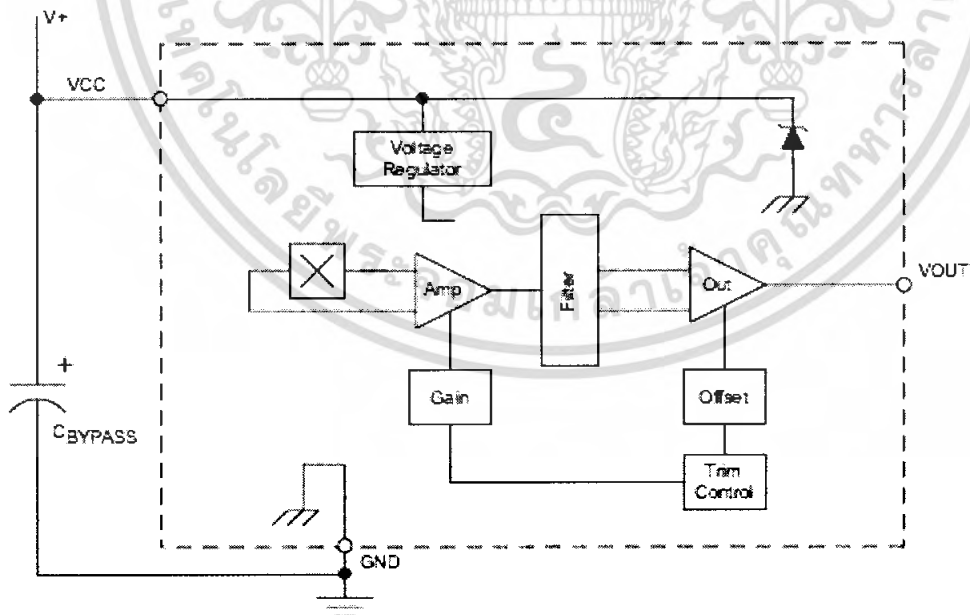
ฮอลล์ชนิดเชิงเส้น เป็นฮอลล์ที่จะไม่เกิดการเปิดหรือปิด แบบฮอลล์ชนิดสวิตช์ กล่าวคือไม่เกิดการฮิสเตอร์รีซิส ความไวของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมีประมาณ 1.3 mV/G ฮอลล์ชนิดนี้สามารถหาขั้วของสนามแม่เหล็กได้ ถ้ารู้ค่าแรงดันในขณะที่สนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ซึ่งเรียกว่า จุดอินเตอร์เซปต์ (Intercept)

หากแรงดันของฮอลล์มีค่ามากกว่าจุดอินเตอร์เซปต์แล้ว แสดงว่าขณะนั้นขั้วของสนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ แต่ถ้าแรงดันของฮอลล์น้อยกว่าจุดอินเตอร์เซปต์ แสดงว่าสนามแม่เหล็กในขณะนั้นเป็นขั้วใต้ ซึ่งคุณสมบัติในข้อนี้สามารถไปหาตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงได้



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเส้น

ในรูปที่ 2.7 เป็นกราฟแสดงผลตอบสนองของฮอลล์ชนิดเชิงเส้น ภายในไอซีซึ่งจะมีฮอลล์ชนิดเชิงเส้นคอยรับรู้ (Sensor) สนามแม่เหล็ก กระแสที่จ่ายให้แก่ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นต้องคงที่ โดยต้องต่อตัวจ่ายกระแสคงที่ให้แก่ฮอลล์ เอาต์พุตจากฮอลล์ชนิดเชิงเส้นมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงต้องขยายเพื่อให้ได้แรงดันสูงพอเมื่อนำไปใช้งาน



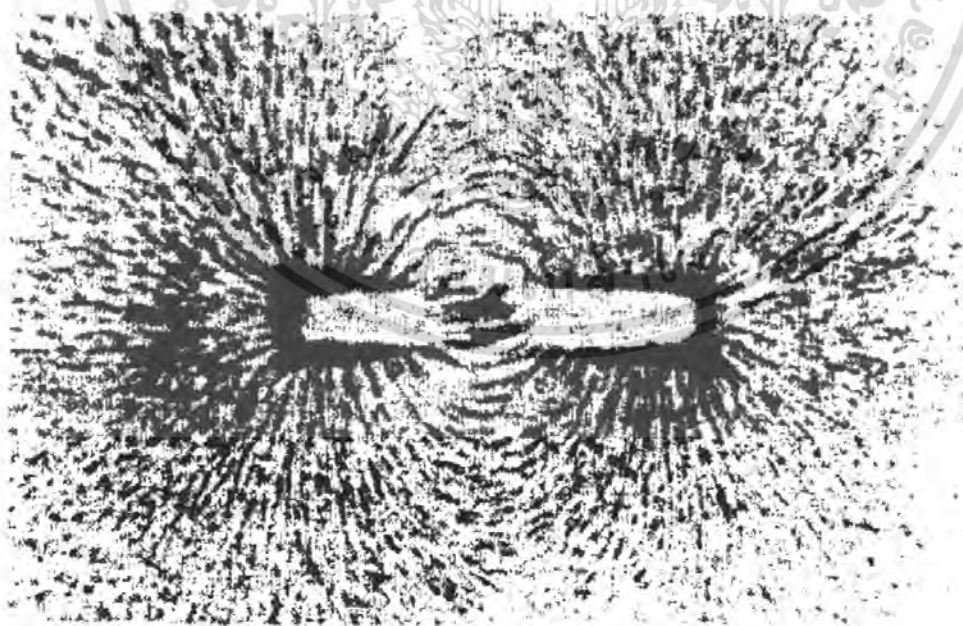
รูปที่ 2.8 แสดงบล็อกโคอะแกรมของฮอลล์เชิงเส้น เบอร์ A1302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากฮอลล์เป็นอุปกรณ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ อุณหภูมิจึงมีผลต่อการทำงานของฮอลล์ ภายในไอซีจึงจะต้องมีส่วนชดเชยอุณหภูมิ ฮอลล์ชนิดเชิงเส้นที่ดีจะต้องมีความเที่ยงตรงขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานปกติ แรงดันที่วัดได้ไม่ควรผิดพลาดเกิน 5 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่อุณหภูมิปกติ แรงดันของฮอลล์ชนิดเชิงเส้นจะมีค่าน้อยมากเป็นมิลลิโวลต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องขยายเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น และถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยแรงดันที่ได้ก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าหากสนามแม่เหล็กมีค่ามาก ค่าของแรงดันก็จะมากขึ้นด้วย

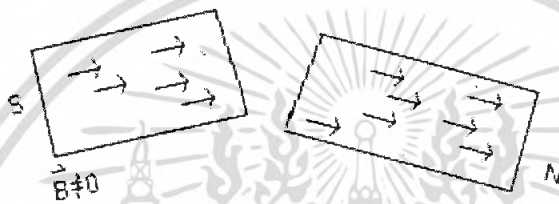
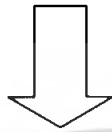
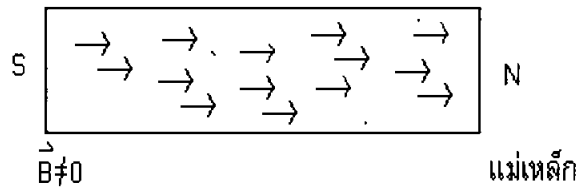
#### 2.4 การตรวจสอบด้วยสนามแม่เหล็ก

ตามธรรมชาติแล้วสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว (Dipole) วางอยู่ห่างกันเป็นระยะทางจำกัดค่าหนึ่งเสมอ โครงสร้างทางแม่เหล็กนี้เราจะเรียกว่า ไดโพลแม่เหล็ก (Magnetic Dipole) ดังรูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขั้วแม่เหล็กที่โรยลงบนแผ่นกระดาษที่มีแท่งแม่เหล็กวางอยู่ จะปรากฏขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Lines) พุ่งออกจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง และในรูปที่ 2.10 แสดงแท่งแม่เหล็กแท่งหนึ่ง ซึ่งถูกหักออกเป็น 2 ส่วน แล้วยังมีไดโพลแม่เหล็กเกิดขึ้นที่แม่เหล็กแต่ละท่อน และประพฤติกรรมเป็นแท่งแม่เหล็กอันใหม่ต่อไปอีก ดังนั้นการที่จะทำการแยกขั้วแม่เหล็กทั้งสองออกจากกันเป็นขั้วแม่เหล็กเดี่ยว (Monopole) จึงไม่สามารถที่จะทำได้เลย



รูปที่ 2.9 ผลเหล็กเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

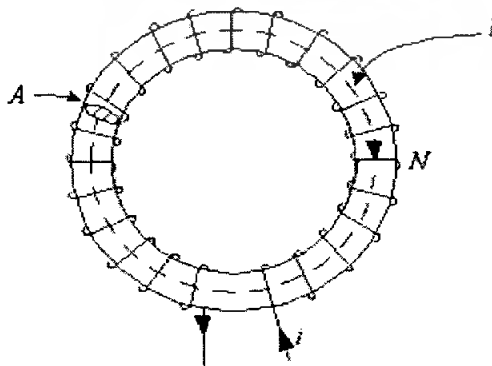
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แม่เหล็กไดโพลมีทิศทางที่แน่นอนเสมอ

#### 2.4.1 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

เป็นการแก้ปัญหาทางแม่เหล็กอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า โดยให้วัสดุแม่เหล็กตั้งรูปมีสภาพความซึมซับทางแม่เหล็ก  $\mu$  มากกว่า  $\mu_0$  มากๆ จากข้อสมมุติดังกล่าวทำให้เมื่อมีอำนาจแม่เหล็กเกิดขึ้น การไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจะไหลวนเป็นวงรอบปิดอยู่ในแกนเหล็กเท่านั้น โดยตัวสร้างอำนาจแม่เหล็กก็คือชุดขดลวดที่พันอยู่บนแกนเหล็กที่ขาด้านซ้ายในรูปนั่นเอง จากกฎ Ampere's Law เมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำที่นำมาพันเป็นขดลวดจะเกิดการสร้างสนามแม่เหล็กในรูปของความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  หรืออาจจะพิจารณาในรูปของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก Magnetomotive Force ( $F$ ) โดยที่  $F = Ni$  เมื่อ  $N$  คือจำนวนรอบของขดลวด  $H$



รูปที่ 2.11 วงจรแม่เหล็กพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของแอมแปร์ จะพบว่า

$$F = Ni = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$$

จากสมการดังกล่าวจะได้ว่า

$$F = Ni = H_c l_c = \frac{B_c}{\mu} l_c = \frac{\phi}{\mu A_c} l_c$$

เมื่อ  $H_c$  คือ ค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก

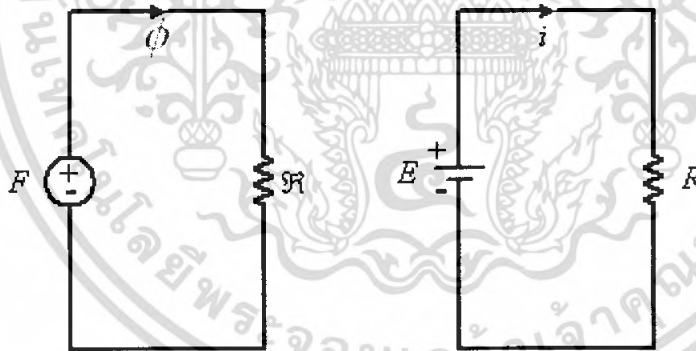
$l_c$  คือ ค่าความยาวของทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก

$A_c$  คือ ขนาดหน้าตัดของทางเดินฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก

โดยที่  $B = \mu H$  และ  $B_c = \phi A_c$  ซึ่งจะพบว่า  $l_c$ ,  $\mu$  และ  $A_c$  ต่างก็เป็นค่าคงที่ขึ้นกับวัสดุแม่เหล็กที่พิจารณา ซึ่งก็คือค่าความต้านทานแม่เหล็ก (reluctance:  $\mathcal{R}$ ) โดยที่  $\mathcal{R} = \frac{l_c}{\mu A_c}$

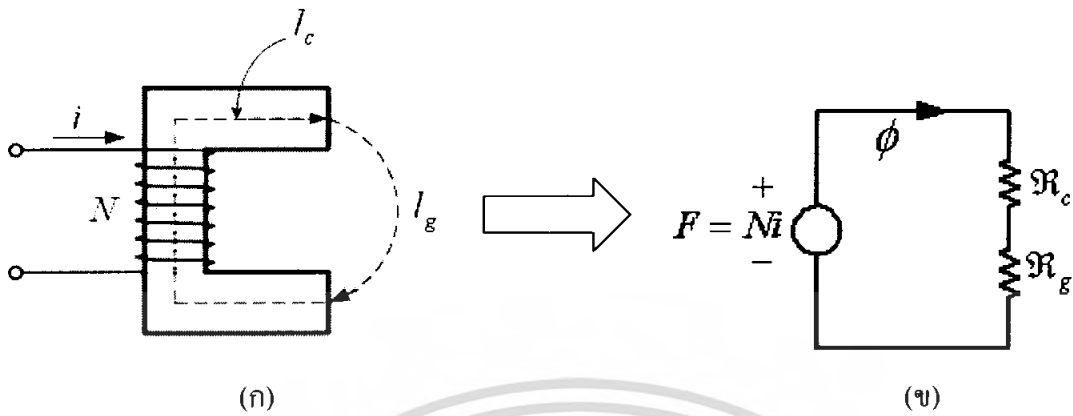
จะได้สมการความสัมพันธ์ของวงจรแม่เหล็กดังนี้

$$F = \mathcal{R}\phi$$



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบวงจรแม่เหล็กกับวงจรไฟฟ้า

ต่อไปจะเป็นการพิจารณาวงจรแม่เหล็กที่มีช่องว่างอากาศ ซึ่งสามารถแสดงเป็นวงจรสนามแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 วงจรสนามแม่เหล็กเมื่อมี Air gap

พิจารณาวงจรแม่เหล็กในรูปที่ 2.13 (ข)สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

$$F = Ni = (R_c + R_g)\phi$$

เมื่อ  $R_c$  คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กในแกนเหล็ก

$R_g$  คือ ค่าความต้านทานแม่เหล็กในอากาศ

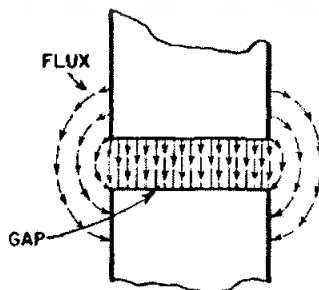
โดยผลของช่องว่างอากาศทำให้เกิดการกระจายตัวของฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณรอยต่อระหว่างแกนเหล็กและช่องอากาศ มีผลให้พื้นที่หน้าตัดที่ฟลักซ์แม่เหล็กไหลผ่านบริเวณช่องอากาศ

มีค่าเพิ่มขึ้นของ ส่งผลให้ความต้านทานแม่เหล็กมีค่าลดลง(ตามสมการ  $R = \frac{l_c}{\mu A_c}$ ) เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “fringing effect”

ผลของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแม่เหล็กจะมีผลต่อขนาดของสนามแม่เหล็กตามสมการ

$$\phi = \frac{Ni}{R_c + R_g}$$

$$B = \frac{\phi}{A}$$



รูปที่ 2.14 แสดงปรากฏการณ์ fringing effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

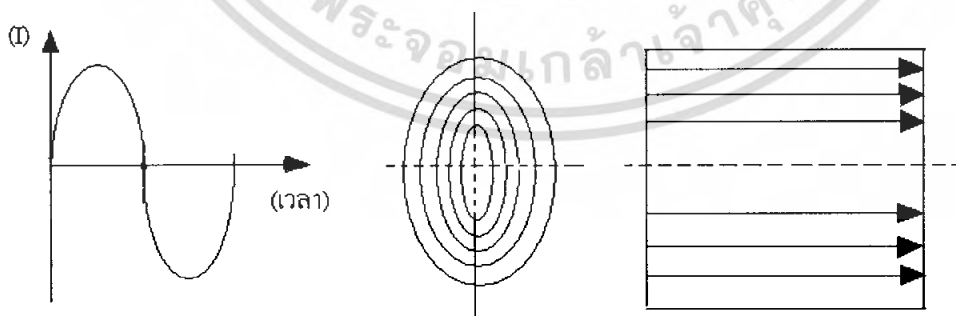
## 2.4.2 เงื่อนไขการทดสอบ

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าตรง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นเมื่อมีความเข้มสนามแม่เหล็กเพียงพอ ก็สามารถตรวจหารอยตำหนิภายในผิวชิ้นงานได้ถึงระยะหนึ่งที่ไม่ลึกจนเกินไปได้

ส่วนสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าสลับ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาผิวหนัง (Skin Effect) มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่ากระแสไฟฟ้าตรง สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ทำให้การแสดงผลการปรากฏของตำหนิบนผิวชิ้นทดสอบเกิดไวขึ้น



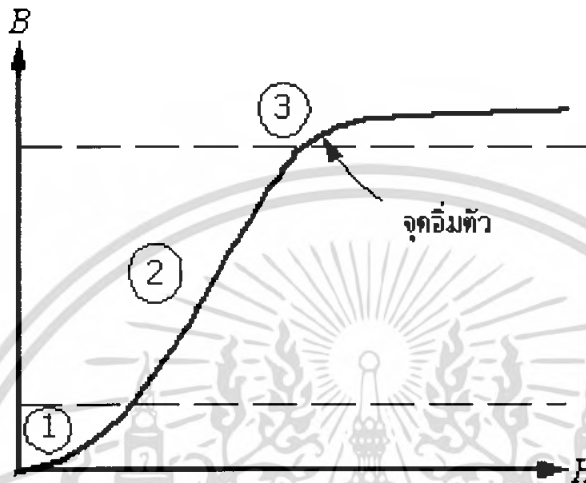
รูปที่ 2.15 การเกิดสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดกระแสไฟฟ้าตรง



รูปที่ 2.16 การเกิดสนามแม่เหล็กหนาแน่นมากบริเวณผิวชิ้นทดสอบจากกระแสไฟฟ้าสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ช่วยเหนี่ยวนำขึ้นทดสอบให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้นั้น จะมีสิ่งที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density)  $B$  และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity)  $H$



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $B$  และ  $H$

ถ้าป้อนกระแสให้กับวงจรเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความเข้มเส้นแม่เหล็กในแกนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กนี้ จะถูกปรับแต่งให้ได้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก  $B$  ให้สูงอย่างเหมาะสม ซึ่งมันจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำแม่เหล็กของชิ้นงานด้วย

จุดที่ 1 เส้นโค้งจนถึงจุดที่ 1 ค่า  $H$  จะเป็นสัดส่วนต่อการเพิ่มค่า  $B$

จุดที่ 2 การเปลี่ยนแปลงระหว่างค่า  $B$  และ  $H$  จะเป็นไปอย่างเป็นเชิงเส้นเหมาะกับการนำไปทดสอบมากที่สุด

จุดที่ 3 เป็นพื้นที่การอิ่มตัวของแม่เหล็ก จะสังเกตเห็นว่าการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กมีผลน้อยมากต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่ออยู่ในช่วงอิ่มตัว

โดยที่

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

$H$  = ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m)

82187

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ความรู้พื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

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

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นชื่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่ง ที่รวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณเอาต์พุต หน่วยความจำ วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความซับซ้อนได้ นอกจากนั้นแล้ว ยังช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบได้ ยังทำให้ขีดความสามารถของระบบเพิ่มขึ้นภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม การที่จะนำไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้ในโครงการต่าง ๆ นั้น จะต้องมีความรู้พื้นฐานเสียก่อน ดังนั้นแล้วในบทนี้ จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเฉพาะไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ใช้ในโครงการ การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว และทฤษฎีพื้นฐานที่สอดคล้องในโครงการในฉบับนี้

### 3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

#### 3.1.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51

คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ที่สำคัญมีดังนี้

- ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ เพียงชุดเดียว
- มีหน่วยความจำสำหรับเก็บ โปรแกรมควบคุมการทำงานอยู่ภายในชิปจำนวน 4 กิโลไบต์ (เบอร์ 8031 8032 ไม่มีหน่วยความจำส่วนนี้ ส่วนเบอร์ 8052 มีหน่วยความจำส่วนนี้ 8 กิโลไบต์ และเบอร์ 83C51FB จะมีหน่วยความจำส่วนนี้รวมทั้งสิ้น 16 กิโลไบต์)
- มีหน่วยความจำสำหรับ โปรแกรมและข้อมูล (RAM) อยู่ภายในชิปจำนวน 128 ไบต์ (ในเบอร์ 8031 8051) หรือ 256 ไบต์ (ในเบอร์ 8031 8052)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถใช้หน่วยความจำสำหรับ โปรแกรมและข้อมูลที่อยู่ภายนอกชิปได้ อย่างละ 64 กิโลไบต์ แยกจากกัน
- คำสั่งส่วนใหญ่ใช้เวลาเพียง 1 ไมโครวินาที เมื่อใช้ คริสตอลความถี่ 12 เมกกะ เฮิรตซ์
- มีพอร์ตที่สามารถรับหรือส่งข้อมูลได้ทั้ง 2 ทิศทางจำนวน 4 พอร์ต พอร์ตละ 8 บิต หรือสามารถใช้งานเป็นพอร์ตขนาด 1 บิต แยกจากกัน ทำให้เหมือนมี พอร์ตขนาด 1 บิต ใช้งานรวมทั้งสิ้น 32 พอร์ต
- รับและส่งข้อมูลแบบอนุกรมได้ในตัว โดยสามารถกำหนดความเร็วในการรับ และส่งข้อมูล(Baud rate) ได้ตั้งแต่ 300 ถึง 375 กิโลบิตต่อวินาที
- จัดลำดับความสำคัญของสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้ 2 ระดับ
- มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานเป็น ไทมเมอร์ หรือเคาเตอร์ เพื่อนับจำนวนสัญญาณ นาฬิกาภายในชิป หรือนับเปลี่ยนสถานะของสัญญาณภายนอก 16 บิต จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้สำหรับนับจำนวนพัลส์ วัดความกว้างของพัลส์ หรือใช้วัด ช่วงเวลา(ในเบอร์8052 จะมี 3 ตัว)
- หน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลภายในบางส่วน สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทั้ง ระดับบิต เพื่อให้การออกแบบ โปรแกรมและการควบคุมระบบทำได้ง่ายขึ้น
- มีคำสั่งคูณ และหารเลขในตัวเอง
- สามารถประมวลผลแบบบูลีน เพื่อใช้งานควบคุมโดยเฉพาะ

### 3.1.2 คุณสมบัติทั่วไปของ AT89C51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ทุกเบอร์จะมีขาใช้งานพื้นฐานและสถาปัตยกรรม เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 3. 1 โดยมีรายละเอียดขั้นต้นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P1.0	1	40	Vcc
P1.1	2	39	P0.0 AD0
P1.2	3	38	P0.1 AD1
P1.3	4	37	P0.2 AD2
P1.4	5	36	P0.3 AD3
P1.5	6	35	P0.4 AD4
P1.6	7	34	P0.5 AD5
P1.7	8	33	P0.6 AD6
RST	9	32	P0.7 AD7
RXD P3.0	10	31	EA' Vpp
TXD P3.1	11	30	ALE PROG'
INT0' P3.2	12	29	PSEN'
INT1' P3.3	13	28	P2.7 A15
T0 P3.4	14	27	P2.6 A14
T1 P3.5	15	26	P2.5 A13
WR' P3.6	16	25	P2.4 A12
RD' P3.7	17	24	P2.3 A11
XTAL2	18	23	P2.2 A10
XTAL1	19	22	P2.1 A9
Vss	20	21	P2.0 A8

### รูปที่ 3.1 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ในอนุกรม AT89Cx

ขา Vcc ใช้สำหรับต่อไฟเลี้ยง +5v

ขา Vss เป็นขากราวด์ สำหรับต่อกับกราวด์ของระบบ

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

ขาพอร์ต 1 (P1.0-P1.7) มี 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุต สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุต สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย นอกจากนั้นในอนุกรม AT89Cxx จะใช้ขา

P1.0 เป็นขาอินพุทสำหรับนับค่าของไทมเมอร์ 2 และ P1.1 เป็นขาอินพุททริกเกอร์ของไทมเมอร์ 2 ในขณะที่ขา P1.4 ถึง P1.7 เป็นขาสำหรับเชื่อมต่อแบบ SPI เพื่อทำการโปรแกรมข้อมูลในระบบ

**ขาพอร์ต 2 (P2.0-P2.7)** มีขา 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งเอาต์พุทและอินพุท สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุทสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ตนี้ยังถูกใช้งานในการติดต่อกับขาแอดเดรสไบต์สูงของหน่วยความจำภายนอก (A8-A15)

**ขาพอร์ต 3 (P3.0-P3.7)** มีขา 8 ขา แต่ละขาสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้งเอาต์พุทและอินพุท สำหรับใช้งานทั่วไป ถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุทสามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล “1” ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อด้วย ส่งผลให้ขาพอร์ตนั้นมีสถานะปล่อยลอย (float) จึงมีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง สามารถใช้งานเป็นขาพอร์ตอินพุทได้ นอกจากนั้นขาพอร์ต 3 ยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ดังมีรายละเอียดขั้นตอนต่อไป

**P3.0** ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

**P3.1** ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรม หรือขา RxD

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

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

**P3.4** ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0

**P3.5** ใช้เป็นขาอินพุทสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา T1

**P3.6** ใช้เป็นขาสัญญาณ  $\overline{WR}$  ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

**P3.7** ใช้เป็นขาสัญญาณ  $\overline{RD}$  ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก

**ขารีเซ็ต (Reset)** ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเป็นการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซ็ตสถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซ็ตอย่างน้อย 2 แมกซีนไซเคิล โดยที่วงจรถูกเปิดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่องไปอย่างปกติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

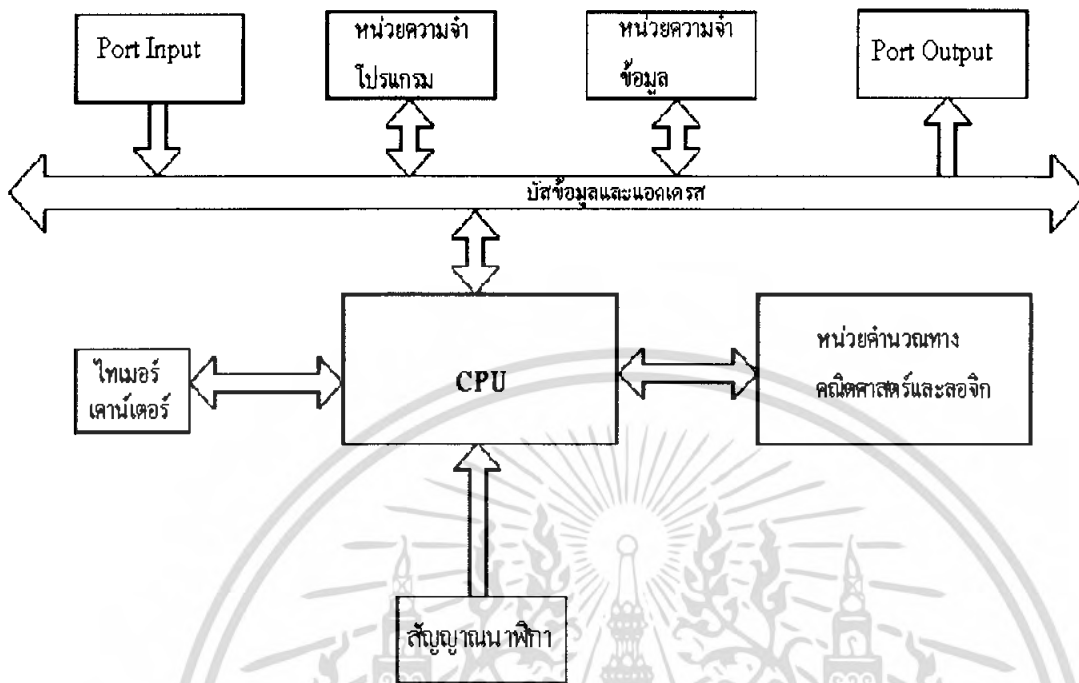
**ขา PSEN (Program Store Enable)** ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อร้องขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณออกมาที่ขานี้ 2 ครั้ง ในแต่ละแมชชีนไซเคิล แต่ถ้าหากติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลภายนอกขานี้จะไม่มีการส่งสัญญาณใดๆออกมา

**ขา EA/Vpp (External Access enable/Programming voltage input)** ใช้สำหรับเลือกการติดต่อหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ถ้าหากขานี้เป็น “0” เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก แต่ถ้าหากขานี้เป็น “1” เป็นการเลือกให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ติดต่อกับหน่วยความจำภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ที่ขานี้ยังใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับแรงดันไฟสูงสำหรับการโปรแกรมหน่วยความจำภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 แบบเฟลชต้องการแรงดันสำหรับการโปรแกรม +12v

**ขา XTAL1 และ XTAL2** เป็นขาสำหรับต่อคริสตัลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.1.3 โครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 มีสมาชิกในตระกูลหลายเบอร์ด้วยกัน แต่ละเบอร์จะมีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างกัน เช่น มีหน่วยความจำภายในสำหรับเก็บ โปรแกรมและข้อมูลภายในชิปเพิ่มขึ้น มีวงจรเปลี่ยนคำสั่งสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลในตัว สามารถรับสัญญาณอินเทอร์รัปต์ได้หลายชนิด ทำกระบวนการ DMA (Direct Memory Access) ได้ในตัว มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้เป็นไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งในแต่ละตระกูลก็จะมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างกันออกไป



รูปที่ 3.2 แสดง โครงสร้างภายในของ MCS-51

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

ตารางที่ 3.1 แสดงไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เบอร์ต่างๆ

เบอร์	หน่วยความจำโปรแกรมบิท	หน่วยความจำข้อมูลบิท	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

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ใช้แรงดันไฟเพียง 5 โวลต์ในการทำงาน ส่วนกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต เบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ที่มีตัวอักษร C อยู่ตรงการเบอร์ เช่น 80C31 80C51 จะเป็นเบอร์ของชิปที่ผลิตโดยอาศัยเทคโนโลยี CMOS ซึ่งใช้พลังงานในการทำงานน้อยกว่า และสามารถควบคุมการใช้พลังงานของตัวชิปได้จากโปรแกรมเพื่อการประหยัดในระบบ

MCS-51 เป็นตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากรุ่น MCS-48 ดังนั้นจึงมีความสามารถเหนือกว่าหลายอย่าง ข้อดีของ MSC-51 คือสามารถใช้ความถี่ได้ถึง 12 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือ สำหรับบางเบอร์ในตระกูลสามารถใช้ได้ 16 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำให้ช่วงเวลาในการทำงานแต่ละคำสั่งน้อยมาก เมื่อใช้ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์ คำสั่งที่ใช้เวลาน้อยที่สุดจะใช้เวลาเพียง 1 ไมโครวินาที ส่วนคำสั่งที่ใช้เวลามากที่สุดจะใช้เวลาเพียง 4 ไมโครวินาที เท่านั้น

### 3.2 การขับโมดูลแสดงผลแบบผลึกเหลว (LCD)

การเขียนโปรแกรม MCS-51 เพื่อติดต่อกับภายนอก ปกติจะใช้อุปกรณ์อินพุต และเอาต์พุต พุด อุปกรณ์หนึ่งที่นิยมใช้กันมากคือ LCD เนื่องจากราคาถูก และสามารถแสดงผลได้ทั้งตัวอักษรและภาพกราฟฟิก อุปกรณ์ LCD ที่นิยมจะเป็นขนาด 16x2 (บรรทัดละ 16 ตัวอักษร มีจำนวน 2 บรรทัด) และขนาด 20x2 (บรรทัดละ 20 ตัวอักษร มีจำนวน 2 บรรทัด)

#### 3.2.1 รายละเอียดเกี่ยวกับโมดูล LCD

ในโมดูล LCD จะมีส่วนประกอบหลัก ๆ 3 ส่วน ดังนี้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวแสดงผล (display)** ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็นโดยอาศัยแสงจากภายนอก ดังนั้นจึงต้องมีมุมในการมองข้อมูลที่แสดงผลบนจอ LCD

**ตัวควบคุม (control)** เป็นตัวรับข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกมาควบคุมการทำงานของโมดูล LCD เช่น ลบจอภาพ แสดงตัวอักษร หรือเลื่อนเคอร์เซอร์ เป็นต้น ตัวควบคุมนี้นิยมใช้ชิปเบอร์ HD 44780 และ HD61830 โดย HD44780 จะใช้ควบคุม LCD แบบอักษร ส่วน HD61830 ใช้ควบคุม LCD แบบกราฟฟิก

**ตัวขับ (driver)** เป็นตัวรับสัญญาณจากตัวควบคุมมาขับให้แสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนดชิปที่ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวขับที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ เบอร์ HD44100H และ MSM5259 เป็นต้น

### 3.2.2 โครงสร้างภายในของตัวควบคุมโมดูล LCD

การใช้งานโมดูล LCD ต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างและคำสั่งที่ใช้ในการควบคุม จากรูปที่ 3.6 เป็นบล็อกไดอะแกรมภายในของชิปควบคุม LCD เบอร์ HD44780 ซึ่งใช้ใน โมดูล LCD แบบอักษร ประกอบด้วย

**บัฟเฟอร์อินพุตเอาต์พุต** เป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อที่จะถ่ายทอดข้อมูลเข้าออกภายในตัวควบคุม

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

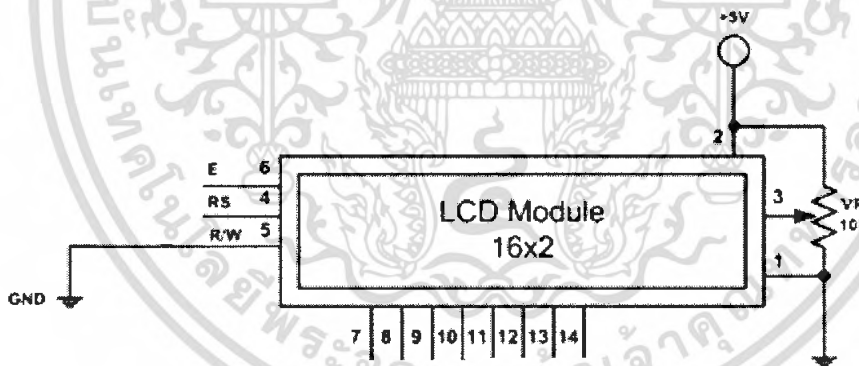
**แรมเก็บตัวอักษร** (Character Generator RAM CGRAM) เป็นหน่วยความจำแรมที่ใช้เก็บตัวอักษรที่มีการสร้างเพิ่มเติมขึ้นใหม่ในกรณีที่ตัวอักษรใน CGROM ไม่เพียงพอ มีขนาด 512 บิต การเขียนและอ่านค่าไปใช้นั้น สามารถทำได้เช่นเดียวกับ CGROM คือ เขียนข้อมูลลงใน DDRAM แล้วตัวควบคุม จะอ่านค่ามาจาก CGRAM เอง

**แฟลค BUSY** เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แจ้งสถานะการทำงานของตัวควบคุมให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่าตัวควบคุมข้อมูลพร้อมที่จะรับข้อมูลหรือคำสั่งหรือไม่ ดังนั้น ก่อนการส่งข้อมูลหรือคำสั่งมายังตัวควบคุมจะต้องตรวจสอบสถานะของแฟลค BUSY นี้เสียก่อน

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

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

โมดูล LCD ขนาด 16x2 มีขาต่อใช้งานทั้งสิ้น 14 ขา มีการจัดขาตั้งไขรูปที่ 3.7 สำหรับรายละเอียดการทำงานของแต่ละมีดังนี้



รูปที่ 3.3 แสดงรูปร่างและการจัดขาโมดูล LCD แบบอักษร

- $V_{SS}$  (ขา 1) : ต่อกราวด์
- $V_{DD}$  (ขา 2) : ต่อไฟเลี้ยง + 5 โวลต์
- $V_O$  (ขา 3) : เป็นขาอินพุตรับแรงดันเพื่อปรับความเข้มของการแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RS (ขา 4) : เป็นขาอินพุตใช้ในการแยกชนิดของข้อมูลที่ทำการประมวลผลในขณะนั้นว่า เป็นคำสั่งสำหรับรีจิสเตอร์ IR หรือเป็นข้อมูลสำหรับรีจิสเตอร์ DR โดยถ้าขานี้เป็น “ 0 ” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นคำสั่ง แต่ถ้าขาเป็น “ 1 ” ข้อมูลที่ส่งมาจะเป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผล

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

E (ขา 6) : เป็นขาสำหรับสัญญาณพัลส์เอ็นเอเบิล โมดูล LCD ให้ทำงาน

D0 – D7 (ขา 7) : เป็นขาที่ใช้เป็นทางผ่านของข้อมูล ระหว่าง LCD กับอุปกรณ์ภายนอก ขนาด 8 บิต ซึ่งขา RS R/W และขา E จะใช้งานร่วมกันได้ โดยมีความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 3.5



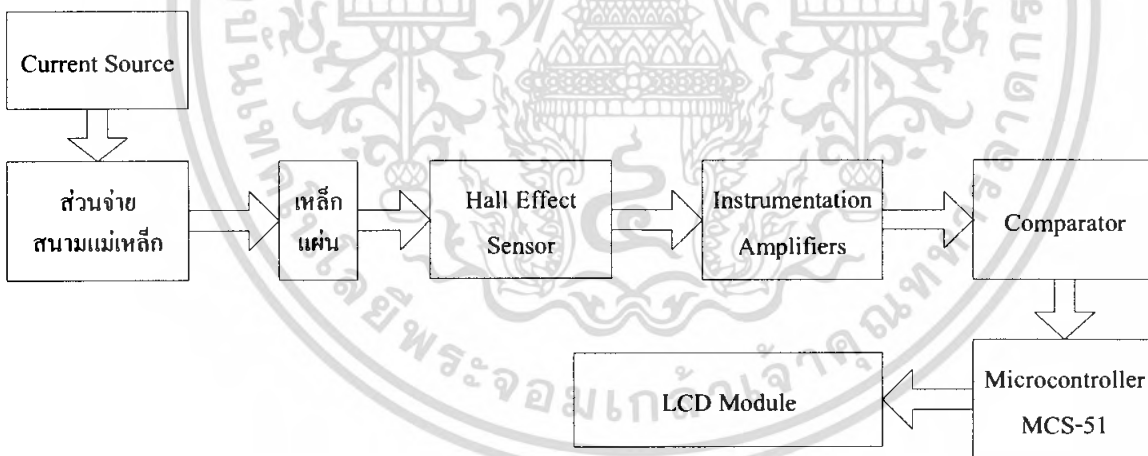
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

หลักการสร้างและออกแบบเครื่องตรวจสอบรอยร้าวของโลหะนี้ ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนหัววัดสนามแม่เหล็ก ส่วนของฮาร์ดแวร์ และส่วนของการแสดงผล ในส่วนของฮาร์ดแวร์นั้น ยังแบ่งวงจรแยกย่อยลงไปอีก ทั้งนี้เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้น ซึ่งวงจรในส่วนต่างๆ มีดังนี้

1. วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)
2. วงจรจ่ายกระแส (Current Source)
3. ส่วนหัวตรวจจ็บรอยร้าว
4. วงจรขยายเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifiers)
5. วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ(Comparator)
6. จอแสดงผลแบบ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด



รูปที่ 4.1 Block Diagram การทำงานของระบบ

#### 4.1 หลักการทำงาน

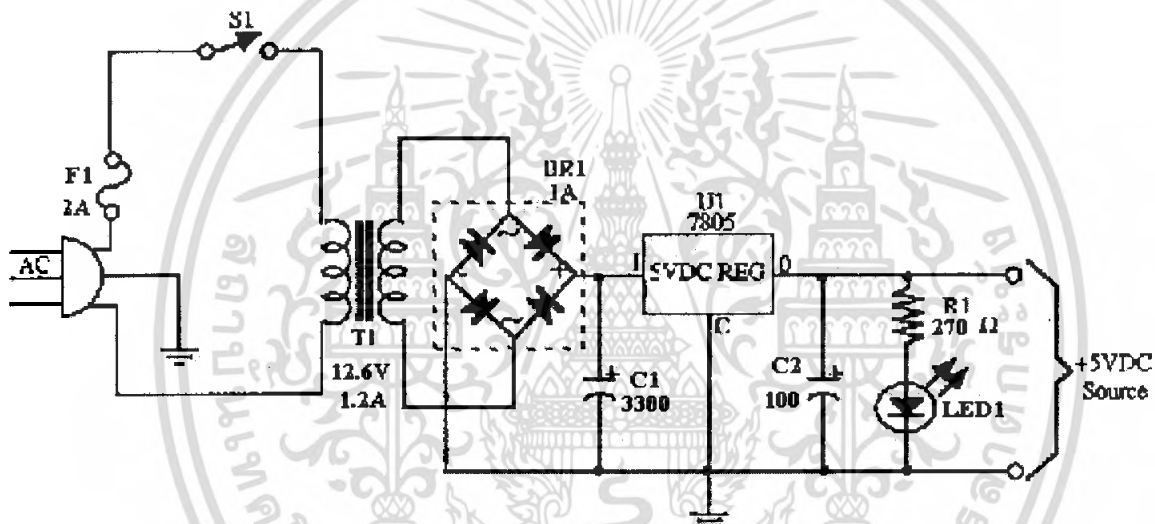
หลักการทำงานของระบบ เริ่มจากอุปกรณ์ตรวจจ็บ โดยปรากฏการณ์ของฮอลล์ และเครื่องสร้างสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่ไปในแนวแกน  $x$  ถ้ามีเหล็กแผ่นที่ต้องการตรวจจ็บวางอยู่ และมีรอยบกพร่องในผิวชิ้นงานนั้น จะทำให้สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากปกติ ส่งผลให้แรงดันของปรากฏการณ์ของฮอลล์เกิดการเปลี่ยนแปลง ผลของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงนี้จะถูกส่งไปยังวงจรขยายเครื่องมือวัดเพื่อทำการขยายสัญญาณและขจัดสัญญาณรบกวน ผลความแตกต่างของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันจะถูกส่งต่อไปยังวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เพื่อให้สัญญาณออกมาเสมือนเป็นลอจิก 1 หรือ 0 แล้วส่งเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแสดงผลออกไปยังจอ LCD

## 4.2 ส่วนของฮาร์ดแวร์

### 4.2.1 วงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)

ส่วนของภาคจ่ายไฟที่ใช้เลี้ยงวงจรนั้น เป็นส่วนที่ต้องจ่ายไฟให้กับวงจรของไปซีดิจิตอลต่างๆ รวมทั้งตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมีขนาด 5 โวลต์ ดีซี มีพิกัดกระแสประมาณ 1.5 แอมป์ โดยใช้ บริดจ์ไดโอด (Bridge Diode) เป็นตัวเรียงกระแส จากนั้นป้อนให้วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) ซึ่งจะได้แหล่งจ่ายไฟดีซีมีขนาดประมาณ 5 โวลต์



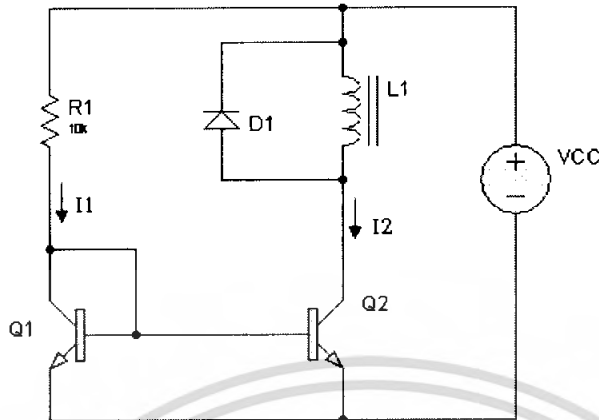
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้า

### 4.2.2 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (Current Source)

เมื่อวงจรที่ทำหน้าที่จ่ายพิกัดกระแสให้กับตัวจ่ายสนามแม่เหล็กซึ่งใช้หลักการสะท้อนกระแสไฟฟ้าของ Mirrors การสะท้อนของกระแสจะแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อจ่ายแรงดันให้กับวงจร เราสามารถคำนวณหากระแสของ  $Q_1$  ได้จากสมการ

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 วงจรจ่ายกระแสคงที่

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $Q_2$  จะมีค่าประมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $Q_1$  เพราะเมื่อพิจารณาหลักการของ Mirrors Effect กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $Q_1$  จะสะท้อนมาที่  $Q_2$  ( $Q_1=Q_2$ ) และ กระแสที่  $Q_2$  จะทำหน้าที่จ่ายพิกัดกระแสให้กับตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก

#### 4.2.3 ส่วนหัวตรวจจ็อบรอยร้าว

ส่วนหัววัดการตรวจจ็อบรอยร้าวโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจ็อบแบบปรากฏการณ์ของฮอลล์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กแล้วได้ผลในรูปของค่าแรงดันค่าหนึ่ง (ใช้ทฤษฎีของฮอลล์ ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 2) เพื่อวัดสนามแม่เหล็กที่เราสร้างขึ้น โดยการป้อนกระแสให้ขดลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็ก

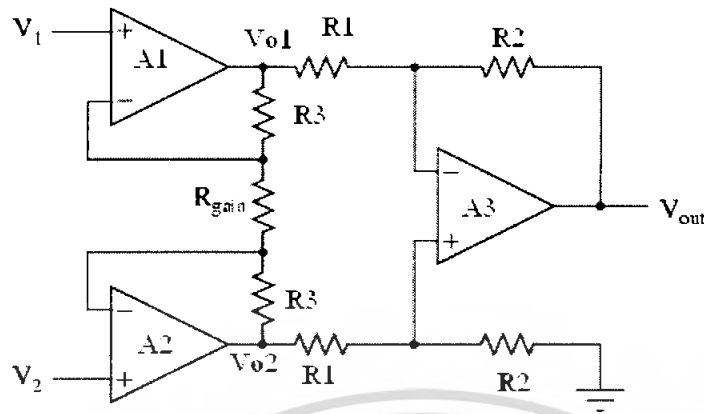
จากวัตถุประสงค์ที่เราต้องการจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเมื่อพบรอยร้าวในเหล็กแผ่น ทำให้ต้องเพิ่มสนามแม่เหล็กให้มีค่าที่เหมาะสมตามความสัมพันธ์ B-H (B-H Curve) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

#### 4.2.4 วงจรขยายเครื่องมือวัด (Instrumentation Amplifier, IAs)

วงจรขยายเครื่องมือวัด เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณผลต่างของสัญญาณอินพุทของวงจร โดยรับสัญญาณอินพุทจากตัวฮอลล์ แล้วทำการปรับปรุงให้สมรรถนะของสัญญาณให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการขจัดสัญญาณรบกวน (Common Mode Rejection Ration, CMRR) ของสัญญาณให้น้อยลง ซึ่งแรงดันเอาต์พุทของวงจรจะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 3.1

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรขยายเครื่องมือวัดแบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว

จากรูปที่ 4.4 เป็นวงจรเครื่องมือวัดแบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว โคนที่  $A_1$  และ  $A_2$  ทำหน้าที่เป็น วงจรขาเข้าของสัญญาณส่วนหน้า (input stage) ขณะที่ออปแอมป์  $A_3$  จะเป็นวงจรขาออกของ สัญญาณส่วนที่สอง (output stage) ของวงจร ถ้าให้  $V_{o1}$  และ  $V_{o2}$  เป็นแรงดันขาออกของ  $A_1$  และ  $A_2$  ตามลำดับ จะได้สมการแรงดันขาออกของวงจร  $V_{out}$  มีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{o2} - V_{o1}) \quad (3.2)$$

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

$$V_{o1} - V_{o2} = (2R_3 + R_G) I_{RG} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $V_1 = 0$  จะทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $R_G$  มีค่าเท่ากับ

$$I_{RG} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} \quad (3.4)$$

ทำการแทนค่าสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.3) และ (3.2) จะได้

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (3.5)$$

โดยที่

$$A = \left[ 1 + \frac{2R_3}{R_G} \right] \left[ \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (3.6)$$

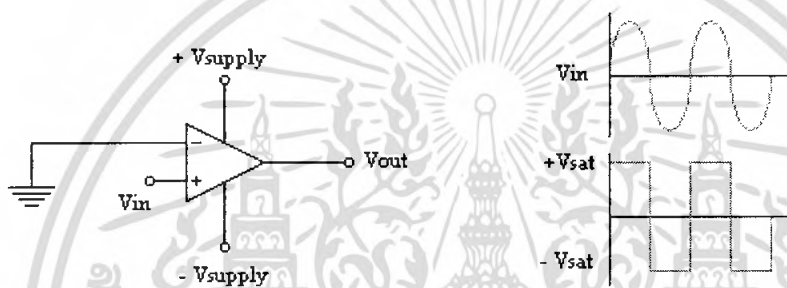
#### 4.2.5 วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Comparator)

วงจรเปรียบเทียบแรงดัน คือ วงจรที่เราใช้ในการตรวจสอบแรงดันของสัญญาณหนึ่งว่ามี ขนาดสูงหรือต่ำกว่าอีก สัญญาณ หนึ่ง ดังรูปที่ 4.5 แสดงพื้นฐานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดย การใช้ออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากว่ามีการแตกต่างของสัญญาณของ  $V_1$  และ  $V_2$  ในขณะใดๆแล้ว จะทำให้โอปแอมป์นั้นเกิดการทำงานในสถานะอิ่มตัว ซึ่ง  $V_{out}$  ของโอปแอมป์ก็จะมีเฟสตาม ความแตกต่างของ  $V_1$  และ  $V_2$

ตัวอย่าง ถ้าหากเราต้องการที่จะ Detect สัญญาณที่เข้ามาทาง Input ว่าเมื่อใดสัญญาณที่เข้ามามีแรงดันที่สูงกว่า 0 V ดังนั้นเราต้องนำ Input ด้านหนึ่งต่อกับ 0 V ไว้เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงดังรูป ซึ่งใช้ขา Inverting ของโอปแอมป์ต่อกับ Ground ส่วน Non-inverting เป็นสัญญาณ  $V_{in}$  ที่เข้ามา

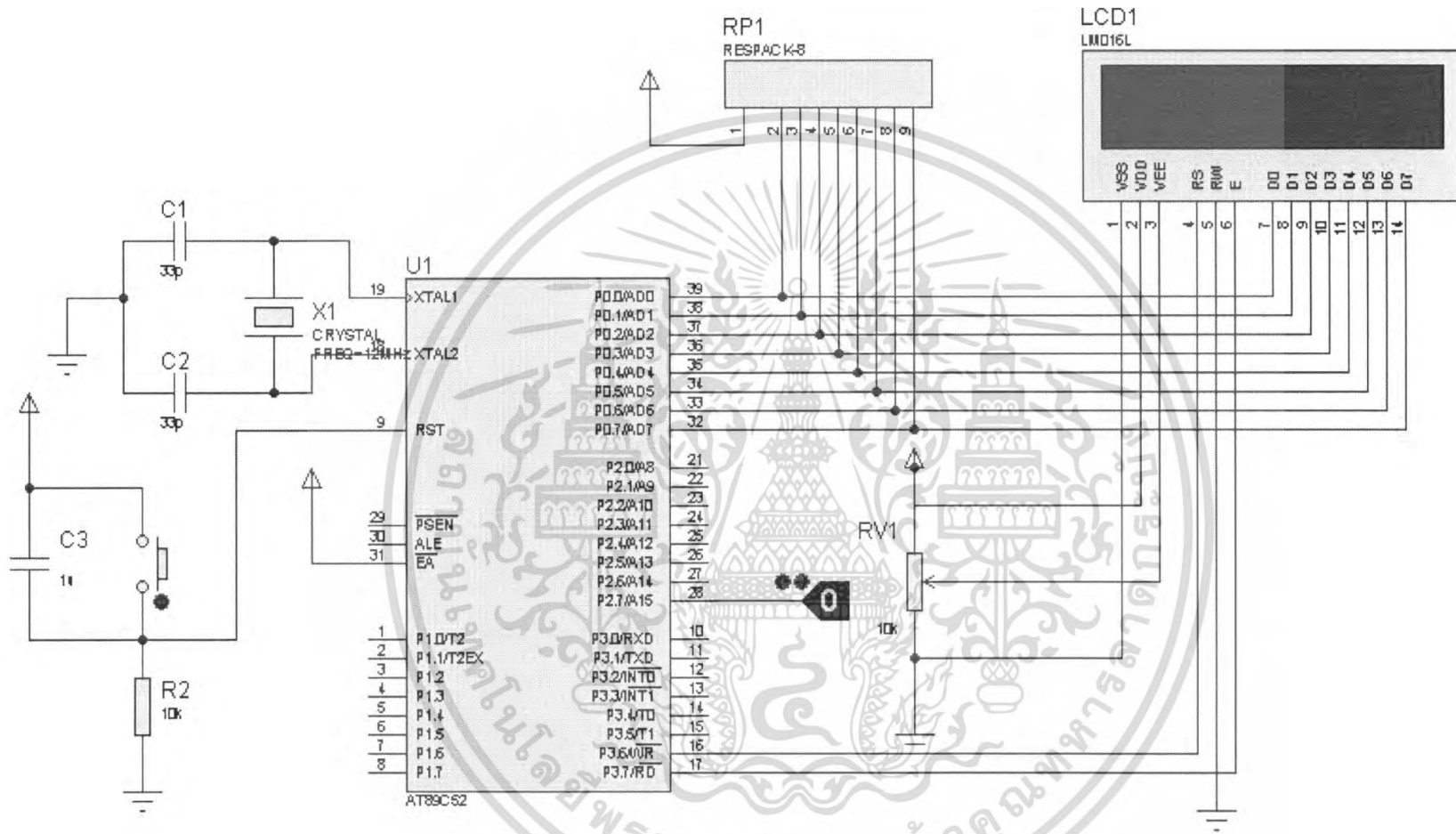


รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างการใช้งานวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

เมื่อใดก็ตามที่สัญญาณ  $V_{in}$  ที่ขา Non-inverting เข้ามามีแรงดันเป็นบวกมากกว่า 0 V แรงดันขาออกของโอปแอมป์ก็จะมีแรงดัน  $+V_{sat}$  , ถ้าหากสัญญาณ  $V_{in}$  เข้ามาเป็นแรงดันด้านลบขาออกของโอปแอมป์ก็จะเป็น  $-V_{sat}$  (ค่าของ  $V_{sat}$  จะมีค่าจำกัดโดยขึ้นกับค่า  $V_{supply}$  ที่จ่ายให้กับโอปแอมป์)

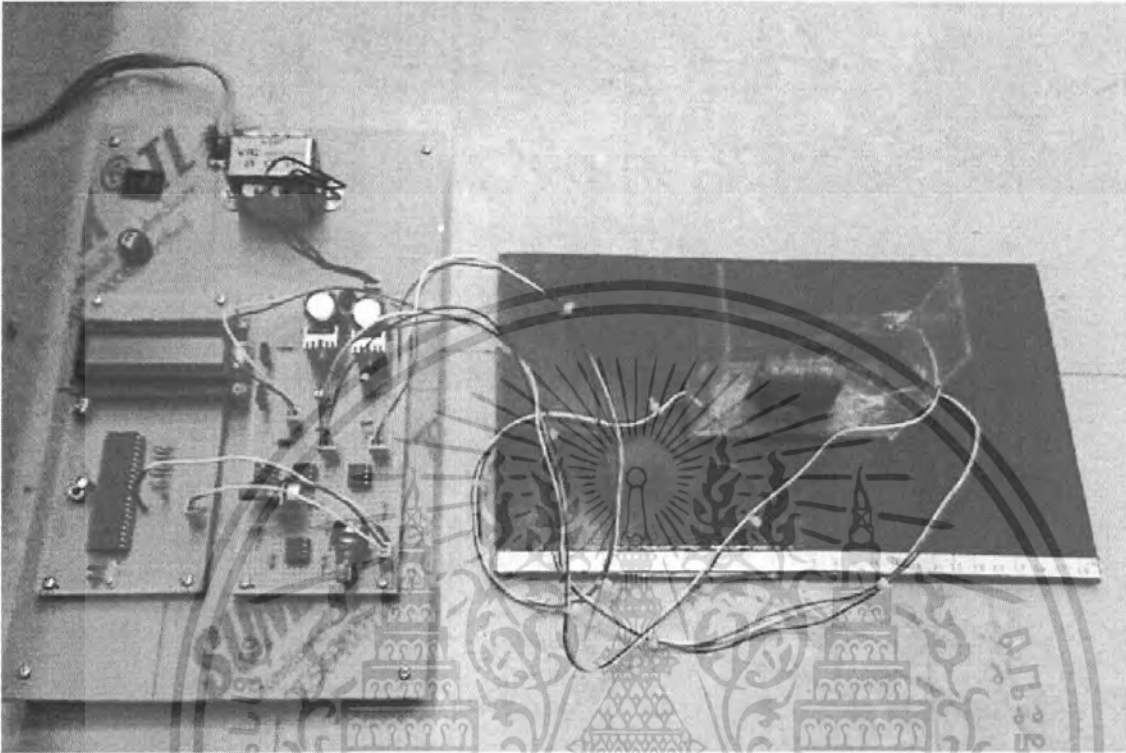
#### 4.2.6 จอLCDขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด

จอ LCD ถูกนำมาใช้ เพื่อแสดงข้อความเมื่อสามารถตรวจจ็บรอยร้าวของโลหะได้ ในส่วนของหลักการทำงานและหลักการใช้ LCD ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 กล่าวคือจะต้องมีการส่งรหัสควบคุมให้กับ LCD ก่อน แล้วจึงส่งรหัส ASCII ให้ LCD เพื่อแสดงผล



รูปที่ 4.6 แสดงวงจรการทำงานในส่วนของการแสดงผล

### 4.3 โครงสร้างระบบ



รูปที่ 4.7 แสดง โครงสร้างของระบบที่ออกแบบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลองได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกทำการสร้างสนามแม่เหล็ก แล้วจึงทำการทดลองตรวจสอบหารอบกพร่องของโลหะ

#### 1. การทดลองสร้างสนามแม่เหล็ก

โดยการพันขดลวดรอบแกนเหล็ก(ใช้ทฤษฎีในบทที่2)

จำนวนการพันขดลวดที่ใช้  $N = 1000$  รอบ

ขนาดกระแสที่ใช้ทดลอง( $i$ ) = ในส่วนนี้จะสัมพันธ์กับในส่วนการทดลองที่2 คือเราจะทดลองเพิ่มกระแสแม่เหล็กขึ้นแล้วสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กตามความสัมพันธ์ B-H (B-H Curve) ได้ผลการทดลองดังนี้

ต่ำกว่า 23 mA เป็นช่วงที่1ของความสัมพันธ์ B-H คือสนามแม่เหล็กยังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นต่อความเข้มสนามแม่เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงโดยตรงต่อขนาดกระแสที่เพิ่มขึ้น

ประมาณ 43 mA-86 mA เป็นช่วงที่ 2 ของความสัมพันธ์ B-H คือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาใช้ทดลอง

สูงกว่า 113 mA ขึ้นไปจะเป็นช่วงที่ 3 ของความสัมพันธ์ B-H คือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยไม่เป็นเชิงเส้นต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองในส่วนการทดลองที่1 ค่ากระแสที่จะใช้ในการทดลองคือกระแสที่ขนาด 43 mA เนื่องจากเป็นช่วงที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นต่อความเข้มสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์โดยตรงต่อขนาดกระแสที่ใช้ และเป็นค่ากระแสที่ได้ผลของแรงดันต่ำกว่าผลของแรงดันที่ได้จาก 86 mA โดยเมื่อนำไปขยายจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่า

#### 2. การทดลองหารอบกพร่องของเหล็กแผ่น

ในการทดลองหารอบกพร่องของเหล็กแผ่นได้ทำการทดลองวัดค่าความแตกต่างของแรงดัน ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

##### 2.1. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก = 23 mA

- ใช้แผ่นเหล็กขนาด (กว้าง x ยาว) = (16 x 28) cm
- วัดในแนวแกน X ที่ระยะต่างๆ (ระยะแกน Y = 0)

ดังผลการทดลองตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองที่กระแส 23 mA

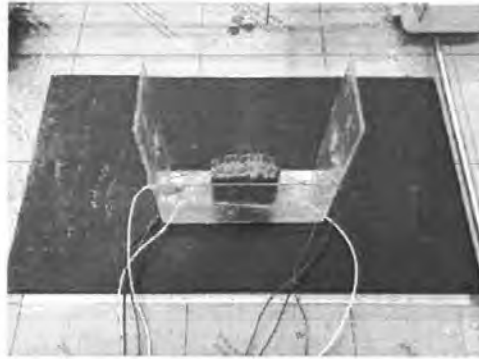
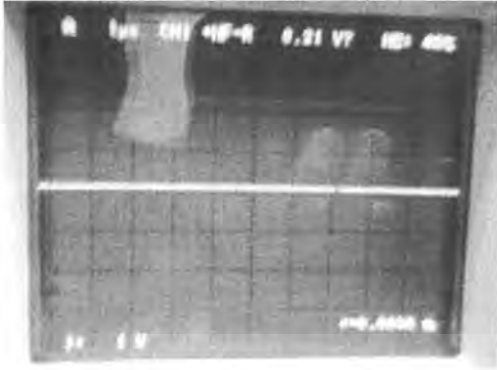
ระยะการวัด (cm)	Vout (v)	ระยะการวัด (cm)	Vout (v)
1	0.24	15	0.24
2	0.22	16	0.26
3	0.22	17	0.25
4	0.24	18	0.25
5	0.24	19	0.27
6	0.24	20	0.26
7	0.24	21	0.28
8	0.26	22	0.27
9	0.26	23	0.27
10	0.26	24	0.26
11	0.24	25	0.26
12	0.24	26	0.24
13	0.22	27	0.26
14	0.22	28	0.26

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec



รูปที่ 5.1 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 23 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec

รูปที่ 5.2 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 23 mA ผลสรุปจากการวัด

1) ตรวจไม่พบรอยร้าวในชิ้นงาน จึงทดลองเพิ่มพิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก

2.2. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก = 43 mA

- ใช้แผ่นเหล็กขนาด (กว้าง x ยาว) = (16 x 28) cm

- วัดในแนวแกน X ที่ระยะต่างๆ (ระยะแกน Y = 0)

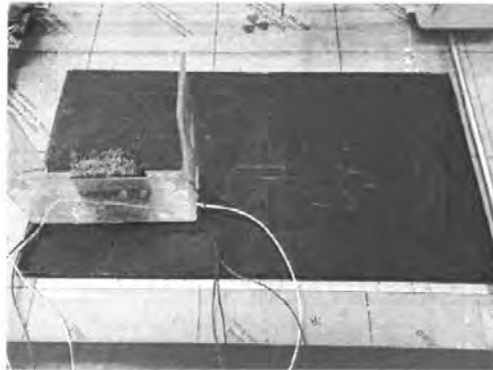
ดังผลการทดลองตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองที่กระแส 43 mA

ระยะของการวัด(cm)	Vout (V)	ระยะของการวัด(cm)	Vout (V)
1	0.20	15	0.25
2	0.36	16	0.23
3	0.37	17	0.25
4	0.36	18	0.24
5	0.36	19	0.23
6	0.36	20	0.23
7	0.34	21	0.20
8	0.33	22	0.18
9	0.34	23	0.18
10	0.34	24	0.20
11	0.35	25	0.26
12	0.33	26	0.26
13	0.38	27	0.26
14	0.60	28	0.26

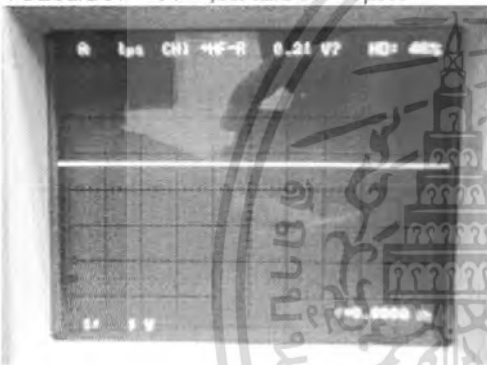
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec



รูปที่ 5.3 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 43 mA

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec



รูปที่ 5.4 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 43 mA

ผลสรุปจากการวัด

- 1) วัดที่ระยะพื้นผิวเรียบ  $V_o \sim 0.20V$  ถึง  $0.38V$
- 2) วัดที่ระยะที่มีรอยร้าว  $V_o \sim 0.60V$
- 3) พบความแตกต่างระหว่างแผ่นเหล็กพื้นผิวเรียบกับพื้นผิวที่มีรอยร้าวแตกต่างกัน
- 4) ทดลองเพิ่มพิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก

### 2.3. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก = 86 mA

- ใช้แผ่นเหล็กขนาด (กว้าง x ยาว) = (16 x 28) cm

- วัดในแนวแกน X ที่ระยะต่างๆ (ระยะแกน Y = 0)

ดังผลการทดลองตามตารางที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองที่กระแส 86 mA

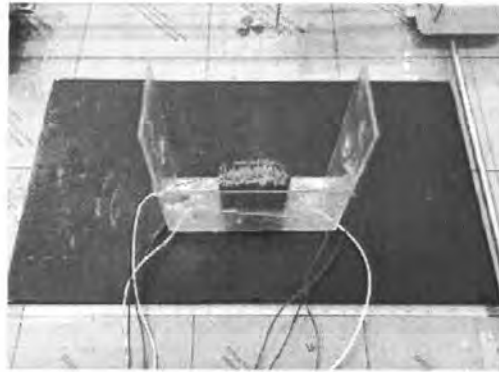
ระยะของการวัด(cm)	Vout (V)	ระยะของการวัด(cm)	Vout (V)
1	0.44	15	0.68
2	0.68	16	0.58
3	0.76	17	0.56
4	0.78	18	0.60
5	0.68	19	0.64
6	0.64	20	0.54
7	0.64	21	0.54
8	0.68	22	0.44
9	0.66	23	0.50
10	0.66	24	0.48
11	0.78	25	0.48
12	0.70	26	0.46
13	0.84	27	0.47
14	1.24	28	0.55

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec

รูปที่ 5.5 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 86 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec



รูปที่ 5.6 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 86 mA  
ผลสรุปจากการวัด

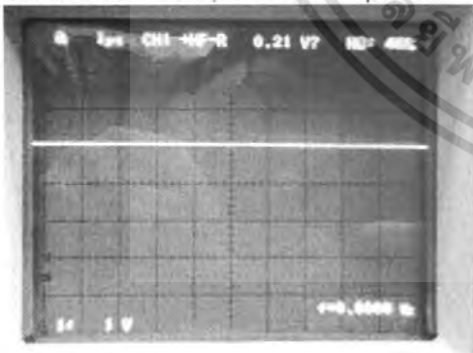
- 1) วัดที่ระยะพื้นผิวเรียบ  $V_o \sim 0.50V$  ถึง  $0.72V$
- 2) วัดที่ระยะที่มีรอยร้าว  $V_o \sim 1.24V$
- 3) พบความแตกต่างระหว่างแผ่นเหล็กพื้นผิวเรียบกับพื้นผิวที่มีรอยร้าว ได้ใกล้เคียงกับการวัดที่ 43 mA

#### 2.4. พิกัดกระแสที่ตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก = 113 mA

- ใช้แผ่นเหล็กขนาด (กว้าง x ยาว) = (16 x 28) cm
- วัดในแนวแกน X ที่ระยะต่างๆ (ระยะแกน Y = 0)

ผลการทดลองที่ได้  $V_{out}$  เท่ากันตลอดระยะของการวัด (=1V)

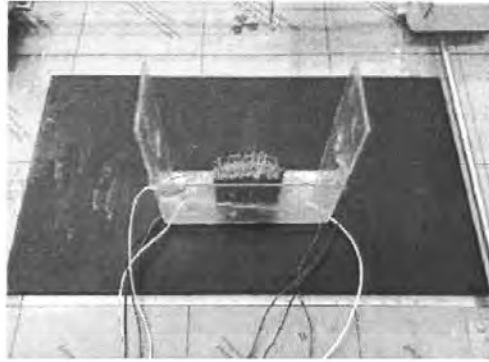
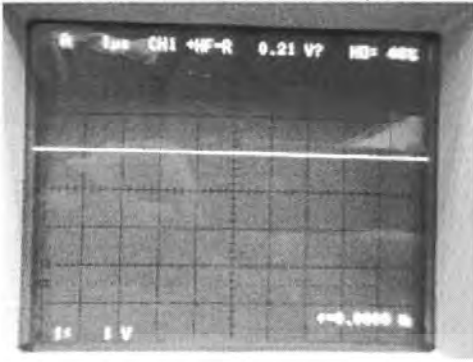
VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec



รูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณเมื่อทำการตรวจสอบ โดยที่ยังไม่พบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 113 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VOLTS/DIV = 1V , TIME/DIV = 1 $\mu$ sec



รูปที่ 5.8 แสดงสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตรวจพบรอยบกพร่อง ที่พิกัดกระแส 113 mA ผลสรุปจากการวัด

- 1) ตัวจ่ายสนามแม่เหล็กเข้าสู่ช่วง saturation ทำให้ไม่สามารถตรวจหารอยร้าวในชิ้นงานได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เครื่องตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กแผ่น เป็นการนำเอาหลักการแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กเข้าไปในเหล็กแผ่น แล้วใช้อุปกรณ์แบบปรากฏการณ์ฮอลล์มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยร้าวของเหล็กแผ่นซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของหัววัดสนามแม่เหล็ก ส่วนของวงจร และ ส่วนของการแสดงผล

ในการทดลองเพื่อทำการตรวจสอบหารอยบกพร่องของแผ่นเหล็กแผ่นดังตารางที่ 5.2 (ผลการทดลองที่กระแส 43 mA) ส่วนของตัวจ่ายสนามแม่เหล็กสามารถจ่ายสนามแม่เหล็กด้วยค่าที่คงที่ทำให้ชุดของ Hall Effect Sensor สามารถที่จะตรวจสอบรอยร้าวหรือรอยบกพร่องต่างๆได้อย่างถูกต้องตามที่คาดหวังไว้ อย่างไรก็ตามบางส่วนของวงจรยังมีปัญหาอยู่บ้างซึ่งสรุปเป็นข้อแนะนำได้ดังนี้

- 1) เมื่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าน้อยเกินไป จึงไม่สามารถตรวจพบรอยบกพร่องได้ ต้องทำการเพิ่มความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กให้มากขึ้น โดยการเพิ่มกระแสที่จ่ายให้กับตัวจ่ายสนามแม่เหล็ก แต่ถ้าเพิ่มกระแสมากเกินไปจะทำให้ตัวจ่ายสนามแม่เหล็กทำงานในช่วง Saturation ได้ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องได้
- 2) ผลการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการใช้มือในการเลื่อนหัววัด
- 3) ในการตรวจสอบรอยบกพร่องของโลหะสามารถที่จะตรวจสอบได้เฉพาะโลหะแผ่นเรียบเท่านั้น

ข้อเสนอแนะ

ควรเพิ่มความละเอียดในการเพิ่มกระแส (ทีละน้อยๆ) และพิจารณาความหนาแน่นฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ได้

ควรมีส่วนยึดจับหัววัดในการเลื่อนให้เป็นอย่างคงที่ เนื่องจากหากเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยผลการทดลองที่ได้จะแตกต่างกันหรือผิดเพี้ยนจากที่ควรจะเป็น

## เอกสารอ้างอิง

1. ผศ.วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์, “ออปแอมป์ และ การประมวลผลสัญญาณอนาล็อก” , ว.เพชรสกุล กรุงเทพฯ 2545, หน้า 75 – 77.
2. สมชาย บรรยงพาณิชย์, “ปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็ก” , วารสารเซมิกอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 109, 2534, หน้า 111 – 117.
3. Honeywell, “Hall effect sensing and application” , pp. 1 – 3.
4. อุดม รานอก, “ภาษา C สำหรับงานควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51” , อินโฟเพรส กรุงเทพฯ 2548, หน้า 189-191.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <reg51.h>
#include <string.h>           // Header file for string function
#include <absacc.h>          // Header file for Absolute Memory
                             // Access Macros

/**/ Constants *****/
#define TRUE      1
#define LCD_DSP   P0          // P0.0 = D0, P0.1 = D1
                             // P0.2 = D2, P0.3 = D3
                             // P0.4 = D4, P0.25= D5
                             // P0.6 = D6, P0.7 = D7
                             // P3.6 = E , P3.7 = RS

#define LCD_ADDR  0x30       // LCD Address
#define LCD_ADD_1 0x00;     // 0x00-0x0F 1st line
#define LCD_ADD_2 0x40;     // 0x40-0x4F 2nd line

sbit LCD_EN = P3^6;
sbit LCD_RS = P3^7;
sbit In = P2^7;

/**/ Global variables *****/
code unsigned char *msg[2] = {"Data",
                              "Err"};

/**/ Functions prototypes *****/
void delay(int n);
void LCD_PUSLE_CLOCK(void);
void LCD_Sent_Byte(bit cm, int n);
void LCD_ShiftLeft(void);
void LCD_ShiftRight(void);
void LCD_String(unsigned char *buf,int dly,unsigned char LR);
void LCD_Init(void);

void delay(int n) {
    int i,j;

    for(i=0; i<n; i++)
        for(j=0; j<100; j++)
            ;
}

void LCD_PUSLE_CLOCK(void) {

    LCD_EN = 1;
    delay(1);
    LCD_EN = 0;
    delay(1);
}

void LCD_Sent_Byte(bit cm, int n) {

    LCD_RS = cm;          // cm=0 send command, cm=1 send data
    LCD_DSP = n;          // data sent to LCD
    LCD_PUSLE_CLOCK();
}

void LCD_ShiftLeft(void) {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    LCD_Sent_Byte(0,0x18);
}

void LCD_ShiftRight(void) {

    LCD_Sent_Byte(0,0x1C);
}

void LCD_String(unsigned char *buf,int dly,unsigned char LR) {
    unsigned int len,i;

    len = strlen (buf);
    for(i=0; i<len; i++) {
        if(LR == 1) { LCD_ShiftLeft(); }
        if(LR == 2) { LCD_ShiftRight();}
        LCD_Sent_Byte(1,buf[i]);
        delay(dly);
    }
}

void LCD_Init(void) {

    LCD_Sent_Byte(0,0x38); // Two line size char 5x7 dot
    LCD_Sent_Byte(0,0x0E); // Display & cursor
    LCD_Sent_Byte(0,0x01); // Clear LCD
    LCD_Sent_Byte(0,0x06); // move cursor to right
    LCD_Sent_Byte(0,0x0C); // LCD On, & cursor off
}
/** Main Functions *****/
void main(void) {

    P0 = 0x00; // Clear Databus
    P1 = 0xEF; // Clear status all devices
    P2 = 0xFF; // Clear Keypad input and onewire
    P3 = 0x1F; // Clear status LCD, R-2R, P3.2 - P3.4

    LCD_Sent_Byte(0,0x01); // Clear LCD
    LCD_Init(); // LCD Initialize
    while(TRUE) {
        LCD_Init(); // LCD Initialize

        if(In==0){

            LCD_Sent_Byte(0,0x80); // start 1st line
            LCD_String(msg[1],10,0);
        }else if (In==1){

            LCD_Sent_Byte(0,0x80);
            LCD_String(msg[0],10,0);
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

### Features and Benefits

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

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



Not to scale

### Description

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

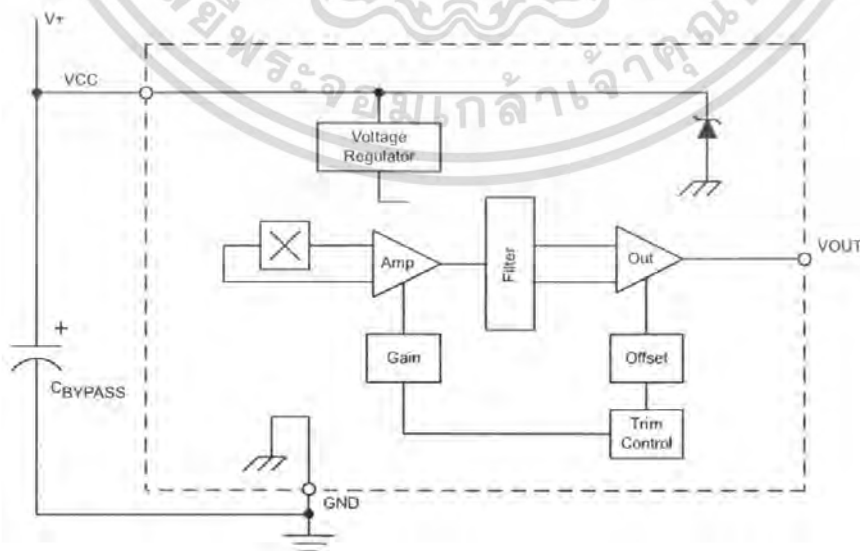
The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall sensing element, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall sensing element and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog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

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

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

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

### Functional Block Diagram



**Selection Guide**

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

based variants are being phased out of the product line. Certain variants cited in this footnote are no longer in production. The variants should be purchased for new design applications. Samples are no longer available. Status change: May 1, 2006. These variants include: A1301ELHLT, A1301EUA, A1301KLHLT, A1301KUA, A1302ELHLT, A1302EUA, A1302KLHLT, and A1302KUA. Contact Allegro for additional packing options.



**Electrical Maximum Ratings**

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

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

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

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

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

**Characteristic Definitions**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

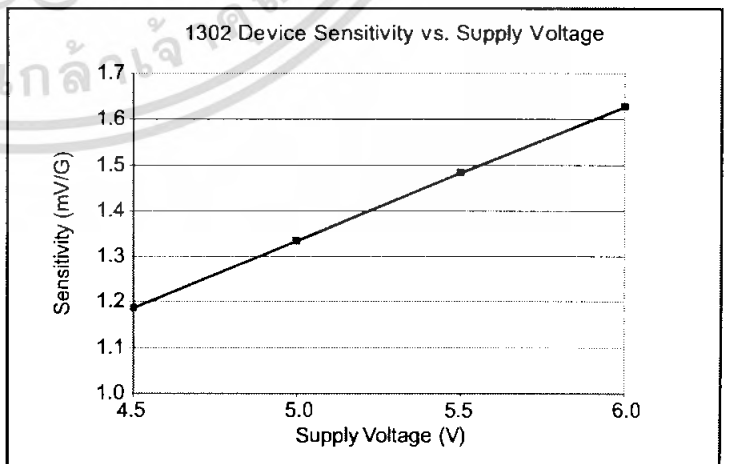
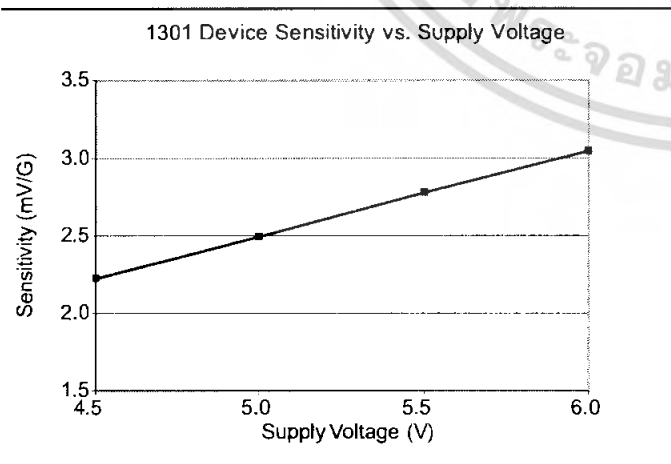
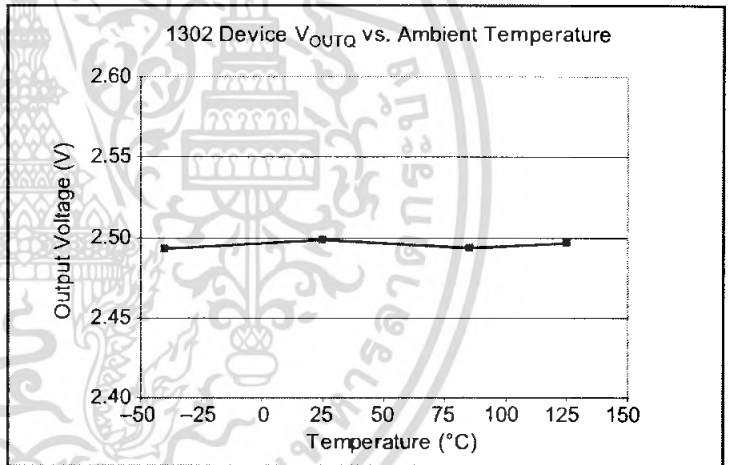
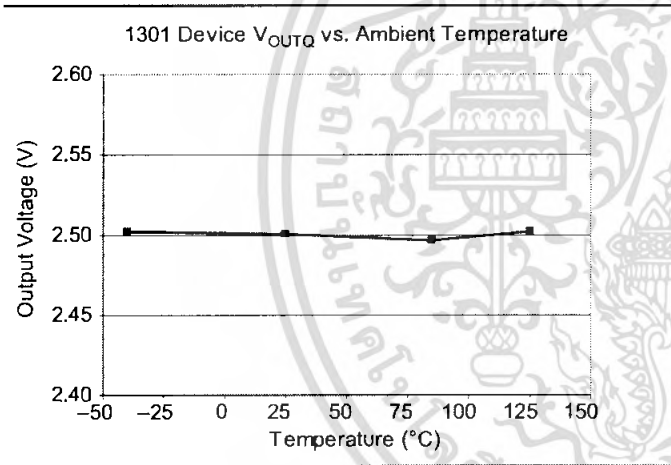
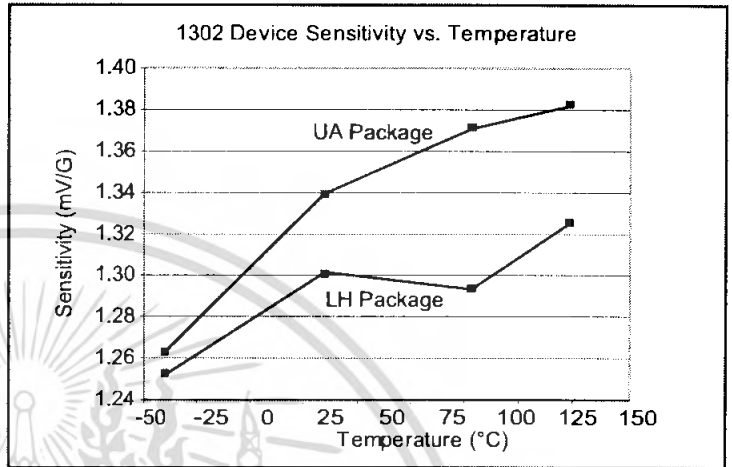
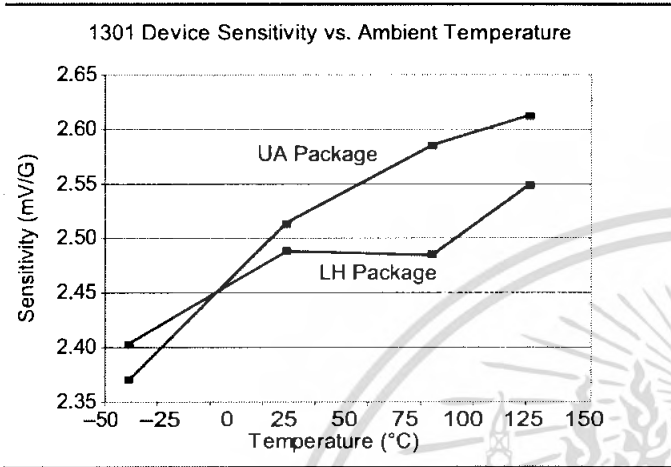
$$Lin+ = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(+B/2)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (6)$$

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

and output symmetry as:

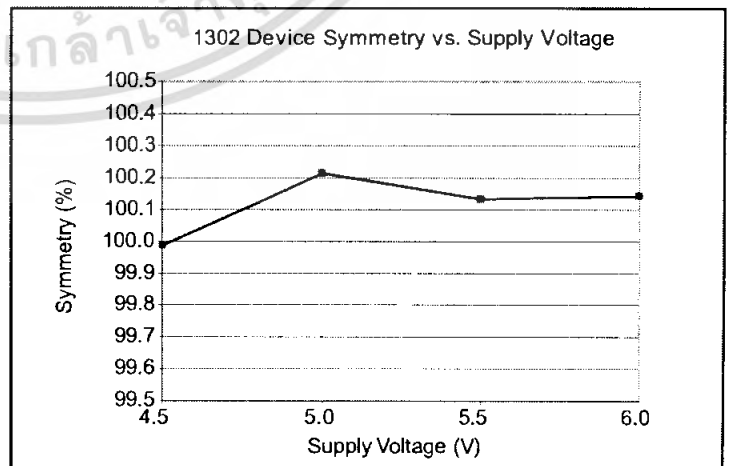
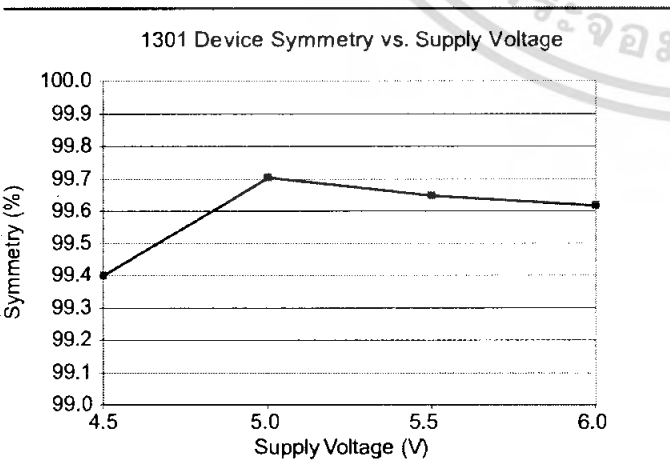
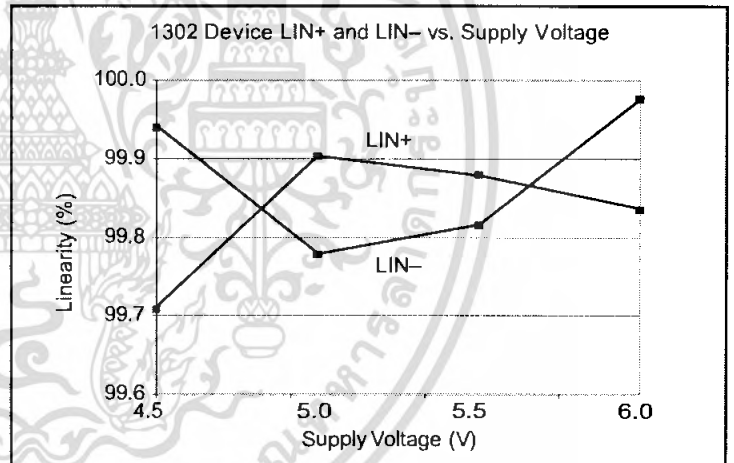
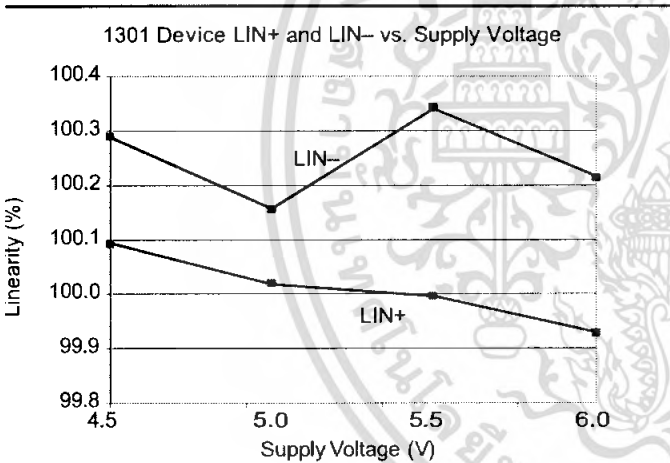
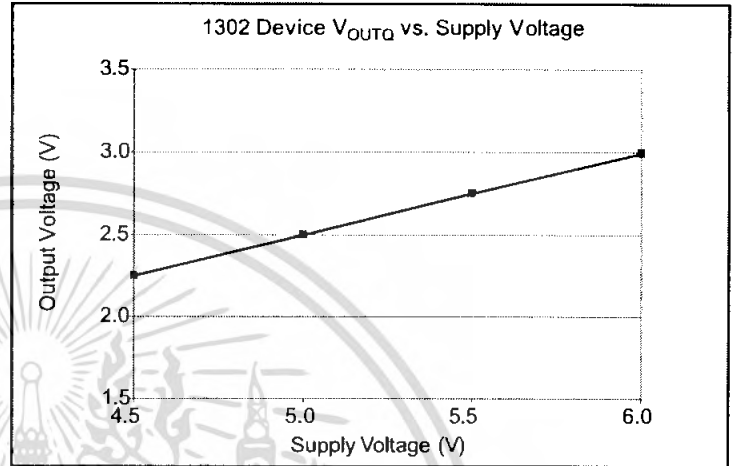
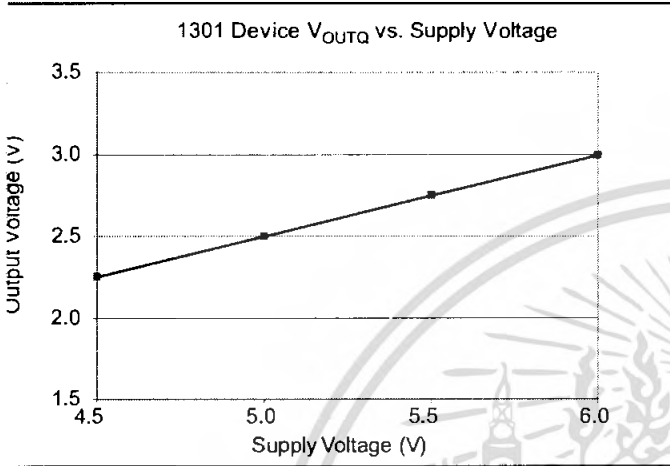
$$Sym = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{V_{OUTQ} - V_{OUT(-B)}} \times 100\% \quad (8)$$

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

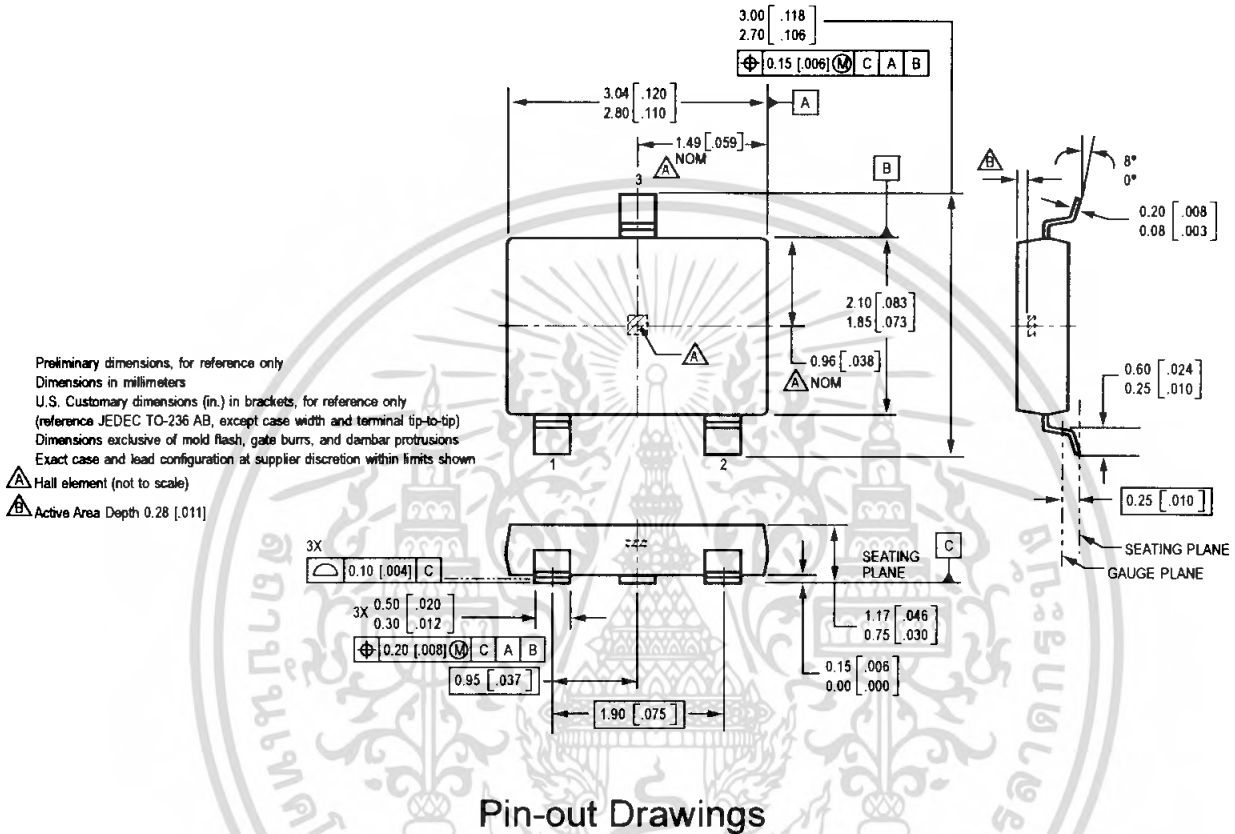


Continued on the next page...

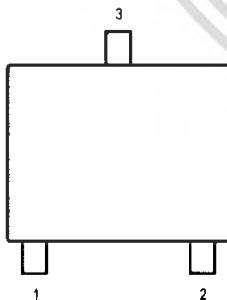
Typical Characteristics, continued  
(30 pieces, 3 fabrication lots)



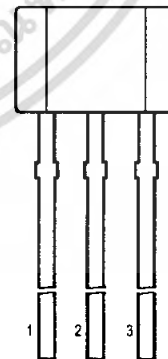
Package LH, 3-Pin; (SOT-23W)



Package LH



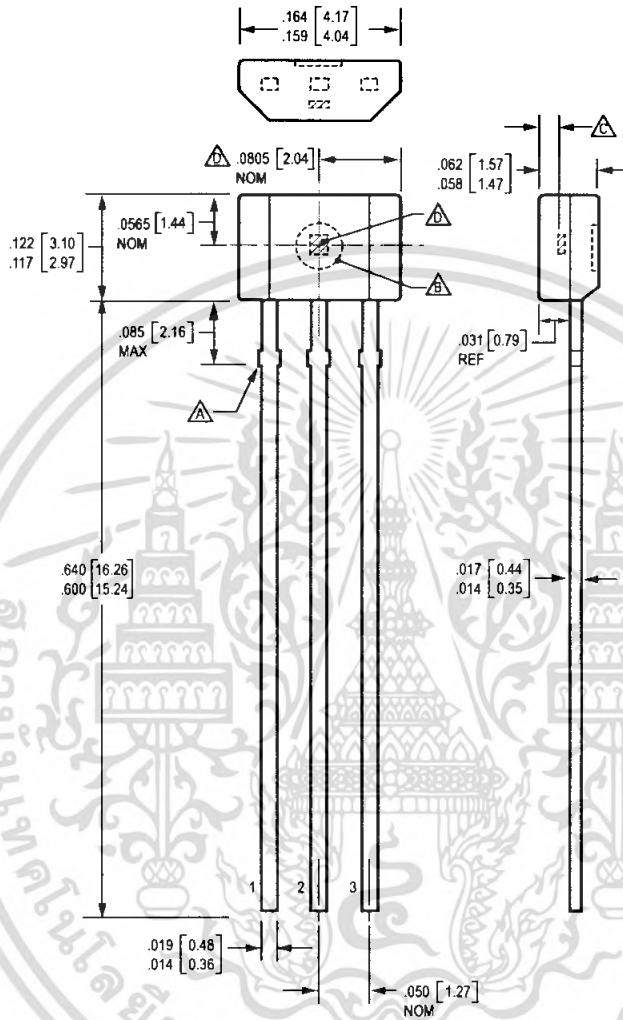
Package UA



Terminal List

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

**Package UA, 3-Pin SIP**



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

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

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

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

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

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

Copyright © 2005, 2006 Allegro MicroSystems, Inc.

## LF411

# Low Offset, Low Drift JFET Input Operational Amplifier

### General Description

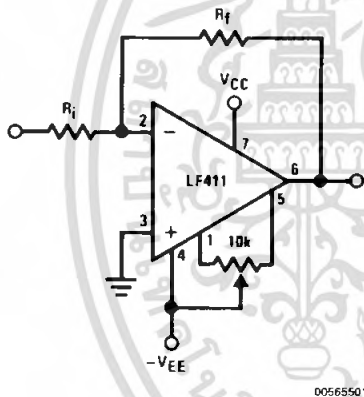
These devices are low cost, high speed, JFET input operational amplifiers with very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF411 is pin compatible with the standard LM741 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage and drift, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth.

### Features

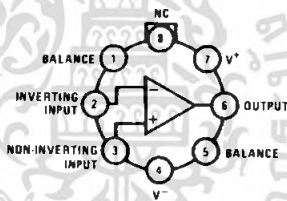
- Internally trimmed offset voltage: 0.5 mV(max)
- Input offset voltage drift: 10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (max)
- Low input bias current: 50 pA
- Low input noise current: 0.01 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Wide gain bandwidth: 3 MHz(min)
- High slew rate: 10V/ $\mu\text{s}$ (min)
- Low supply current: 1.8 mA
- High input impedance:  $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion:  $\leq 0.02\%$
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2  $\mu\text{s}$

### Typical Connection



### Connection Diagrams

#### Metal Can Package



Note: Pin 4 connected to case.

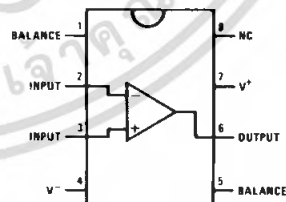
**Top View**  
Order Number LF411ACH  
or LF411MH/883 (Note 11)  
See NS Package Number H08A

### Ordering Information

#### LF411XYZ

- X** indicates electrical grade
- Y** indicates temperature range
- “M” for military
- “C” for commercial
- Z** indicates package type
- “H” or “N”

#### Dual-In-Line Package



**Top View**  
Order Number LF411ACN, LF411CN  
See NS Package Number N08E

### Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

	LF411A	LF411
Supply Voltage	±22V	±18V
Differential Input Voltage	±38V	±30V
Input Voltage Range (Note 2)	±19V	±15V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous

$T_{j,max}$

$\theta_{jA}$

$\theta_{jC}$

Operating Temp.

Range

Storage Temp.

Range

Lead Temp.

(Soldering, 10 sec.)

ESD Tolerance

H Package

N Package

150°C

115°C

162°C/W (Still Air)

120°C/W

65°C/W (400

LF/min

Air Flow)

20°C/W

(Note 4)

(Note 4)

-65°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 150°C

-65°C ≤ T<sub>A</sub> ≤ 150°C

260°C

260°C

Power Dissipation

(Notes 3, 10)

H Package

N Package

670 mW

670 mW

Rating to be determined.

### DC Electrical Characteristics (Note 5)

Symbol	Parameter	Conditions	LF411A			LF411			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V <sub>OS</sub>	Input Offset Voltage	R <sub>S</sub> =10 kΩ, T <sub>A</sub> =25°C		0.3	0.5		0.8	2.0	mV
ΔV <sub>OS</sub> /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R <sub>S</sub> =10 kΩ (Note 6)		7	10		7	20 (Note 6)	μV/°C
I <sub>OS</sub>	Input Offset Current	V <sub>S</sub> =±15V (Notes 5, 7)	T <sub>J</sub> =25°C	25	100	25	100	pA	
			T <sub>J</sub> =70°C		2		2	nA	
			T <sub>J</sub> =125°C		25		25	nA	
I <sub>B</sub>	Input Bias Current	V <sub>S</sub> =±15V (Notes 5, 7)	T <sub>J</sub> =25°C	50	200	50	200	pA	
			T <sub>J</sub> =70°C		4		4	nA	
			T <sub>J</sub> =125°C		50		50	nA	
R <sub>IN</sub>	Input Resistance	T <sub>J</sub> =25°C		10 <sup>12</sup>		10 <sup>12</sup>		Ω	
A <sub>VOL</sub>	Large Signal Voltage Gain	V <sub>S</sub> =±15V, V <sub>O</sub> =±10V, R <sub>L</sub> =2k, T <sub>A</sub> =25°C	50	200	25	200		V/mV	
		Over Temperature	25	200	15	200		V/mV	
V <sub>O</sub>	Output Voltage Swing	V <sub>S</sub> =±15V, R <sub>L</sub> =10k	±12	±13.5	±12	±13.5		V	
V <sub>CM</sub>	Input Common-Mode Voltage Range		±16	+19.5	±11	+14.5		V	
				-16.5		-11.5		V	
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R <sub>S</sub> ≤10k	80	100	70	100		dB	
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 8)	80	100	70	100		dB	
I <sub>S</sub>	Supply Current		1.8	2.8		1.8	3.4	mA	

### AC Electrical Characteristic (Note 5)

Symbol	Parameter	Conditions	LF411A			LF411			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	V <sub>S</sub> =±15V, T <sub>A</sub> =25°C	10	15		8	15		V/μs
GBW	Gain-Bandwidth Product	V <sub>S</sub> =±15V, T <sub>A</sub> =25°C	3	4		2.7	4		MHz
e <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Voltage	T <sub>A</sub> =25°C, R <sub>S</sub> =100Ω, f=1 kHz		25			25		nV/√Hz
i <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Current	T <sub>A</sub> =25°C, f=1 kHz		0.01			0.01		pA/√Hz

### AC Electrical Characteristic (Note 5) (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	LF411A			LF411			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
THD	Total Harmonic Distortion	$A_v=+10$ , $R_L=10k$ , $V_O=20$ Vp-p, $BW=20$ Hz-20 kHz		<0.02			<0.02		%

**Note 1:** "Absolute Maximum Ratings" indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits.

**Note 2:** Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

**Note 3:** For operating at elevated temperature, these devices must be derated based on a thermal resistance of  $\theta_{JA}$ .

**Note 4:** These devices are available in both the commercial temperature range  $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$  and the military temperature range  $-55^\circ C \leq T_A \leq 125^\circ C$ . The temperature range is designated by the position just before the package type in the device number. A "C" indicates the commercial temperature range and an "M" indicates the military temperature range. The military temperature range is available in "H" package only.

**Note 5:** Unless otherwise specified, the specifications apply over the full temperature range and for  $V_S = \pm 20V$  for the LF411A and for  $V_S = \pm 15V$  for the LF411.  $V_{OS}$ ,  $I_B$ , and  $I_{OS}$  are measured at  $V_{CM}=0$ .

**Note 6:** The LF411A is 100% tested to this specification. The LF411 is sample tested to insure at least 90% of the units meet this specification.

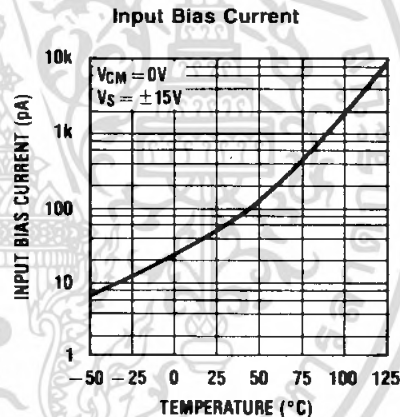
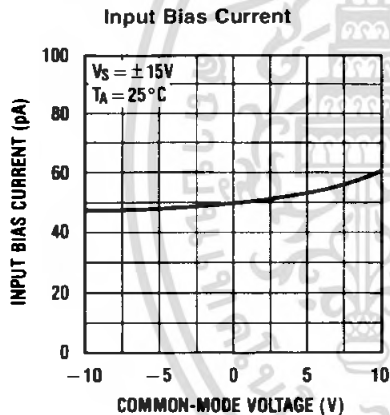
**Note 7:** The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every  $10^\circ C$  increase in the junction temperature,  $T_J$ . Due to limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation,  $P_D$ .  $T_J = T_A + \theta_{JA} P_D$  where  $\theta_{JA}$  is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.

**Note 8:** Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice, from  $\pm 15V$  to  $\pm 5V$  for the LF411 and from  $\pm 20V$  to  $\pm 5V$  for the LF411A.

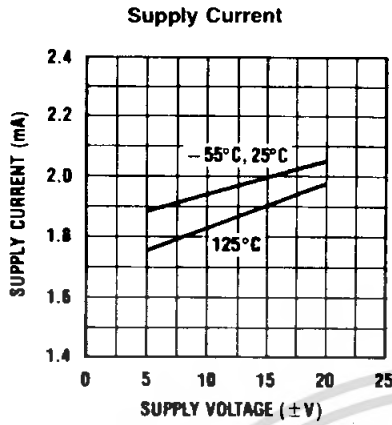
**Note 9:** RETS 411X for LF411MH and LF411MJ military specifications.

**Note 10:** Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

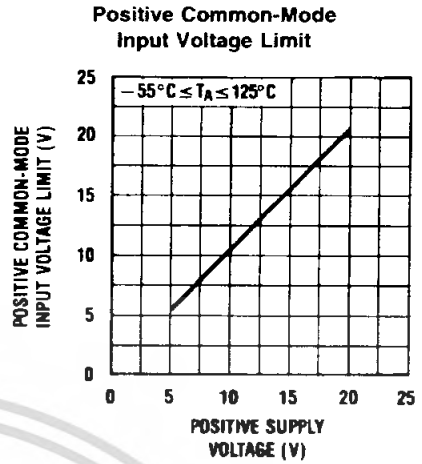
### Typical Performance Characteristics



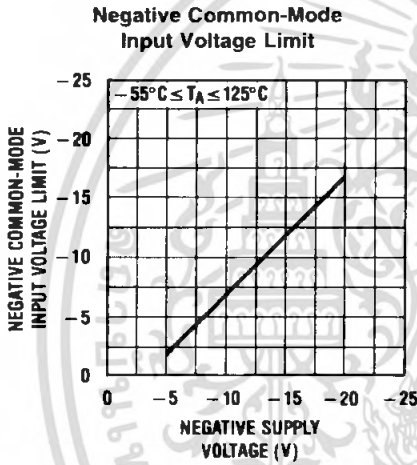
Typical Performance Characteristics (Continued)



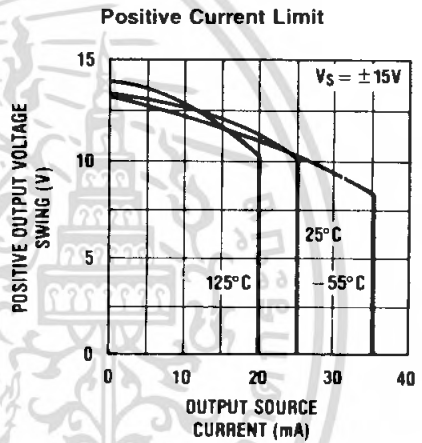
00565513



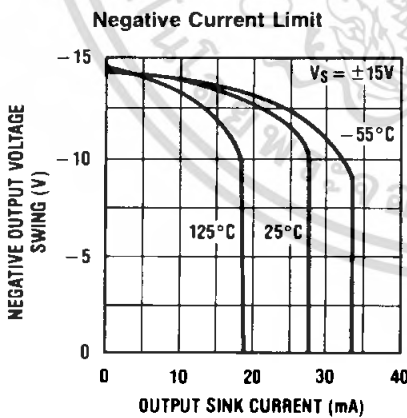
00565514



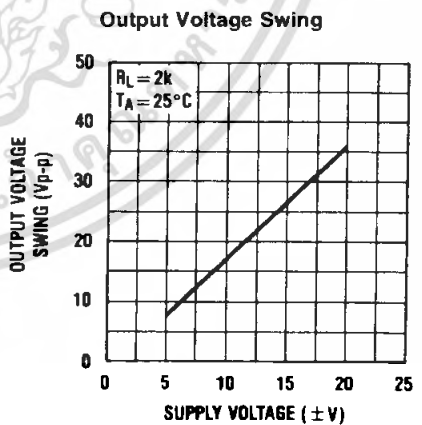
00565515



00565516

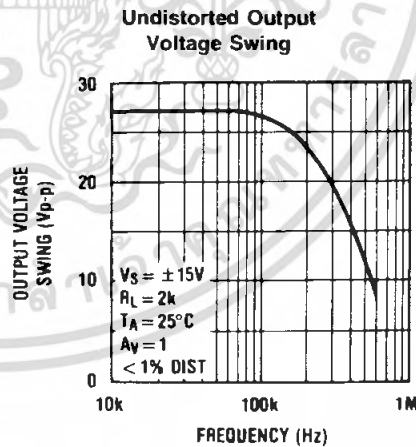
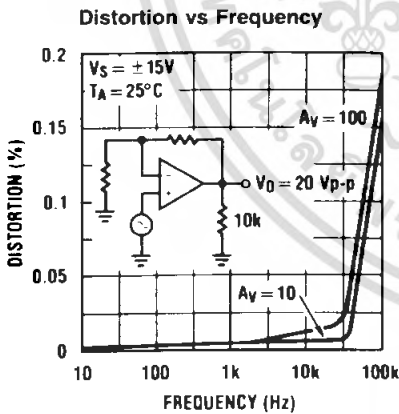
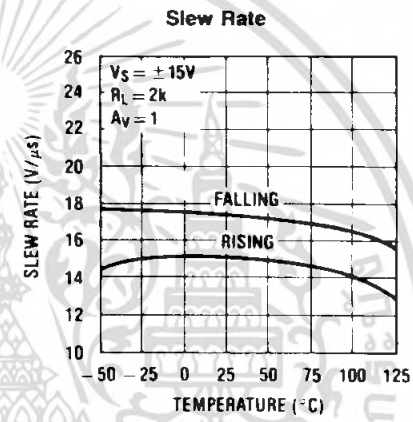
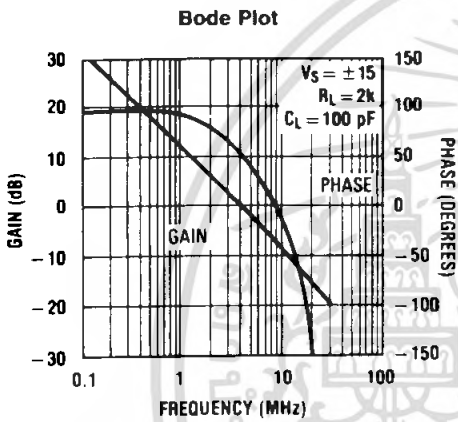
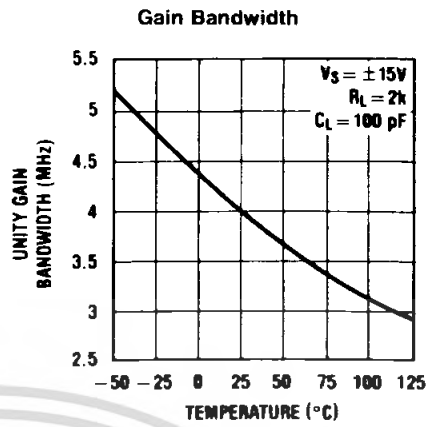
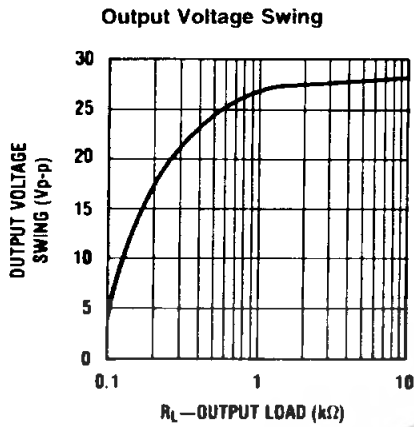


00565517



00565518

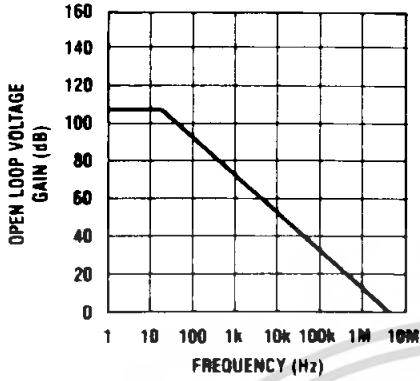
Typical Performance Characteristics (Continued)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

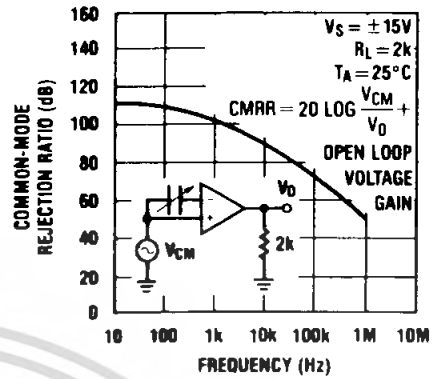
Typical Performance Characteristics (Continued)

Open Loop Frequency Response



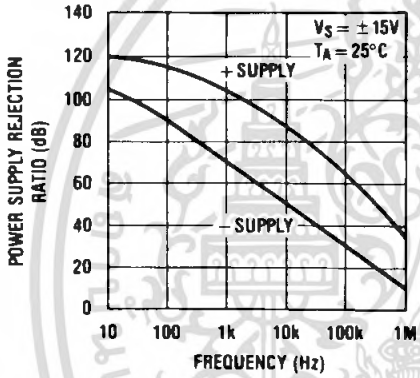
00565525

Common-Mode Rejection Ratio



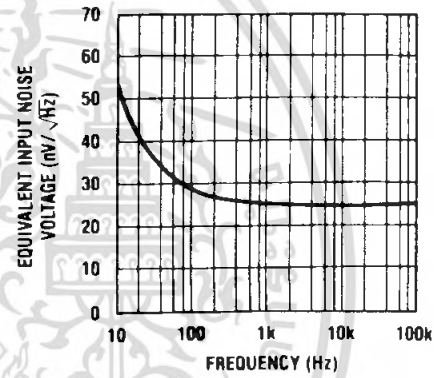
00565526

Power Supply Rejection Ratio



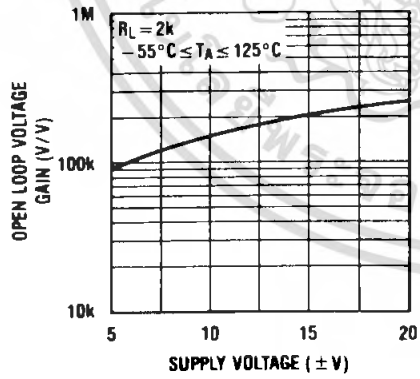
00565527

Equivalent Input Noise Voltage



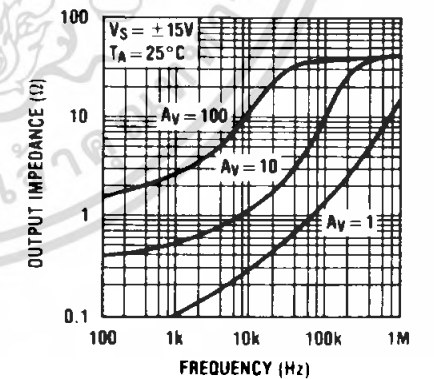
00565528

Open Loop Voltage Gain



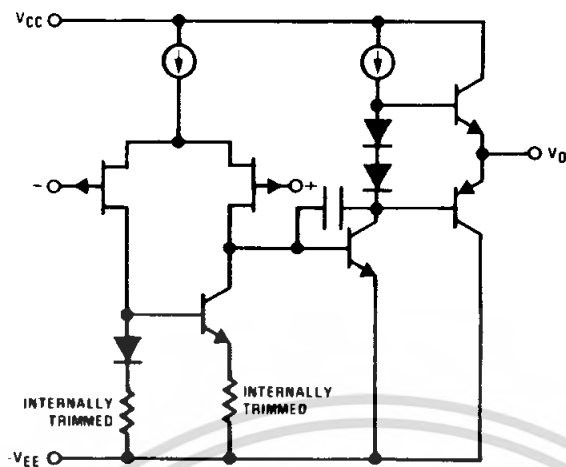
00565529

Output Impedance



00565530

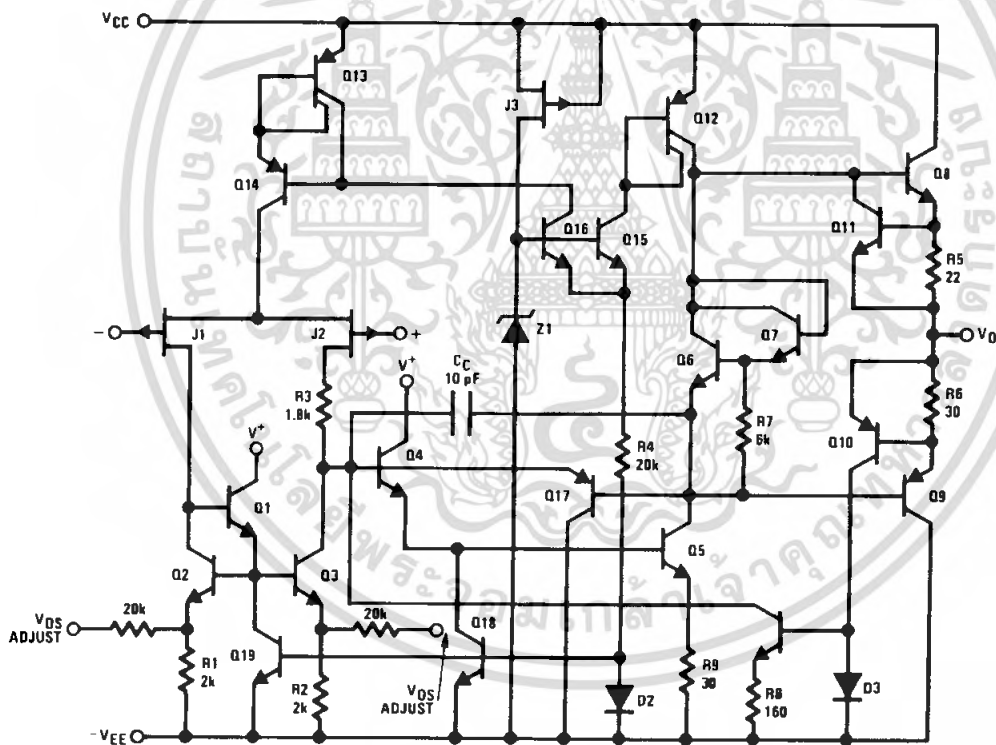
### Simplified Schematic



00565506

Note 11: Available per JM38510/11904

### Detailed Schematic



00565534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# LM111/LM211/LM311 Voltage Comparator

## 1.0 General Description

The LM111, LM211 and LM311 are voltage comparators that have input currents nearly a thousand times lower than devices like the LM106 or LM710. They are also designed to operate over a wider range of supply voltages: from standard  $\pm 15V$  op amp supplies down to the single 5V supply used for IC logic. Their output is compatible with RTL, DTL and TTL as well as MOS circuits. Further, they can drive lamps or relays, switching voltages up to 50V at currents as high as 50 mA.

Both the inputs and the outputs of the LM111, LM211 or the LM311 can be isolated from system ground, and the output can drive loads referred to ground, the positive supply or the negative supply. Offset balancing and strobe capability are provided and outputs can be wire OR'ed. Although slower than the LM106 and LM710 (200 ns response time vs 40 ns)

the devices are also much less prone to spurious oscillations. The LM111 has the same pin configuration as the LM106 and LM710.

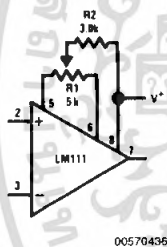
The LM211 is identical to the LM111, except that its performance is specified over a  $-25^{\circ}C$  to  $+85^{\circ}C$  temperature range instead of  $-55^{\circ}C$  to  $+125^{\circ}C$ . The LM311 has a temperature range of  $0^{\circ}C$  to  $+70^{\circ}C$ .

## 2.0 Features

- Operates from single 5V supply
- Input current: 150 nA max. over temperature
- Offset current: 20 nA max. over temperature
- Differential input voltage range:  $\pm 30V$
- Power consumption: 135 mW at  $\pm 15V$

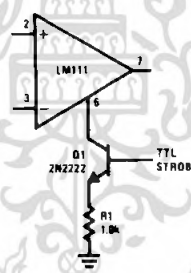
## 3.0 Typical Applications (Note 3)

Offset Balancing



00570436

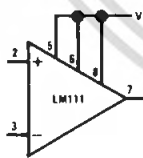
Strobing



00570437

**Note:** Do Not Ground Strobe Pin. Output is turned off when current is pulled from Strobe Pin.

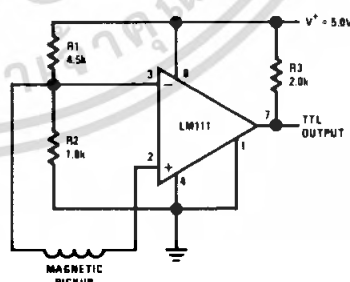
Increasing Input Stage Current (Note 1)



00570438

**Note 1:** Increases typical common mode slew from 7.0V/ $\mu s$  to 18V/ $\mu s$ .

Detector for Magnetic Transducer



00570439

## 4.0 Absolute Maximum Ratings for the LM111/LM211 (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage ( $V_{84}$ )	36V
Output to Negative Supply Voltage ( $V_{74}$ )	50V
Ground to Negative Supply Voltage ( $V_{14}$ )	30V
Differential Input Voltage	$\pm 30V$
Input Voltage (Note 4)	$\pm 15V$
Output Short Circuit Duration	10 sec
Operating Temperature Range	

LM111	-55°C to 125°C
LM211	-25°C to 85°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	260°C
Voltage at Strobe Pin	$V^+ - 5V$
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.	
ESD Rating (Note 11)	300V

## Electrical Characteristics (Note 6) for the LM111 and LM211

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Input Offset Voltage (Note 7)	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_S \leq 50k$		0.7	3.0	mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		4.0	10	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		60	100	nA
Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$	40	200		V/mV
Response Time (Note 8)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		200		ns
Saturation Voltage	$V_{IN} \leq -5\text{ mV}$ , $I_{OUT} = 50\text{ mA}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.5	V
Strobe ON Current (Note 9)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		2.0	5.0	mA
Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 5\text{ mV}$ , $V_{OUT} = 35V$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $I_{STROBE} = 3\text{ mA}$		0.2	10	nA
Input Offset Voltage (Note 7)	$R_S \leq 50\text{ k}$			4.0	mV
Input Offset Current (Note 7)				20	nA
Input Bias Current				150	nA
Input Voltage Range	$V^+ = 15V$ , $V^- = -15V$ , Pin 7 Pull-Up May Go To 5V	-14.5	13.8, -14.7	13.0	V
Saturation Voltage	$V^+ \geq 4.5V$ , $V^- = 0$ $V_{IN} \leq -6\text{ mV}$ , $I_{OUT} \leq 8\text{ mA}$		0.23	0.4	V
Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 5\text{ mV}$ , $V_{OUT} = 35V$		0.1	0.5	$\mu\text{A}$
Positive Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		5.1	6.0	mA
Negative Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		4.1	5.0	mA

**Note 4:** This rating applies for  $\pm 15$  supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.

**Note 5:** The maximum junction temperature of the LM111 is 150°C, while that of the LM211 is 110°C. For operating at elevated temperatures, devices in the H08 package must be derated based on a thermal resistance of 165°C/W, junction to ambient, or 20°C/W, junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 110°C/W, junction to ambient.

**Note 6:** These specifications apply for  $V_S = \pm 15V$  and Ground pin at ground, and  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$ , unless otherwise stated. With the LM211, however, all temperature specifications are limited to  $-25^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ . The offset voltage, offset current and bias current specifications apply for any supply voltage from a single 5V supply up to  $\pm 15V$  supplies.

**Note 7:** The offset voltages and offset currents given are the maximum values required to drive the output within a volt of either supply with a 1 mA load. Thus, these parameters define an error band and take into account the worst-case effects of voltage gain and  $R_S$ .

**Note 8:** The response time specified (see definitions) is for a 100 mV input step with 5 mV overdrive.

**Note 9:** This specification gives the range of current which must be drawn from the strobe pin to ensure the output is properly disabled. Do not short the strobe pin to ground; it should be current driven at 3 to 5 mA.

**Note 10:** Refer to RETS111X for the LM111H, LM111J and LM111J-B military specifications.

**Note 11:** Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

## 5.0 Absolute Maximum Ratings for the LM311 (Note 12)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage ( $V_{84}$ )	36V
Output to Negative Supply Voltage ( $V_{74}$ )	40V
Ground to Negative Supply Voltage ( $V_{14}$ )	30V
Differential Input Voltage	$\pm 30V$
Input Voltage (Note 13)	$\pm 15V$
Power Dissipation (Note 14)	500 mW
ESD Rating (Note 19)	300V

Output Short Circuit Duration	10 sec
Operating Temperature Range	0° to 70°C
Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Lead Temperature (soldering, 10 sec)	260°C
Voltage at Strobe Pin	$V^+ - 5V$
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.	

## Electrical Characteristics (Note 15) for the LM311

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
Input Offset Voltage (Note 16)	$T_A = 25^\circ C, R_S \leq 50k$		2.0	7.5	mV
Input Offset Current (Note 16)	$T_A = 25^\circ C$		6.0	50	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ C$		100	250	nA
Voltage Gain	$T_A = 25^\circ C$	40	200		V/mV
Response Time (Note 17)	$T_A = 25^\circ C$		200		ns
Saturation Voltage	$V_{IN} \leq -10 mV, I_{OUT} = 50 mA$ $T_A = 25^\circ C$		0.75	1.5	V
Strobe ON Current (Note 18)	$T_A = 25^\circ C$		2.0	5.0	mA
Output Leakage Current	$V_{IN} \geq 10 mV, V_{OUT} = 35V$ $T_A = 25^\circ C, I_{STROBE} = 3 mA$ $V^- = \text{Pin 1} = -5V$		0.2	50	nA
Input Offset Voltage (Note 16)	$R_S \leq 50K$			10	mV
Input Offset Current (Note 16)				70	nA
Input Bias Current				300	nA
Input Voltage Range		-14.5	13.8, -14.7	13.0	V
Saturation Voltage	$V^+ \geq 4.5V, V^- = 0$ $V_{IN} \leq -10 mV, I_{OUT} \leq 8 mA$		0.23	0.4	V
Positive Supply Current	$T_A = 25^\circ C$		5.1	7.5	mA
Negative Supply Current	$T_A = 25^\circ C$		4.1	5.0	mA

**Note 12:** "Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits."

**Note 13:** This rating applies for  $\pm 15V$  supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.

**Note 14:** The maximum junction temperature of the LM311 is 110°C. For operating at elevated temperature, devices in the H08 package must be derated based on a thermal resistance of 165°C/W, junction to ambient, or 20°C/W, junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W, junction to ambient.

**Note 15:** These specifications apply for  $V_S = \pm 15V$  and Pin 1 at ground, and  $0^\circ C < T_A < +70^\circ C$ , unless otherwise specified. The offset voltage, offset current and bias current specifications apply for any supply voltage from a single 5V supply up to  $\pm 15V$  supplies.

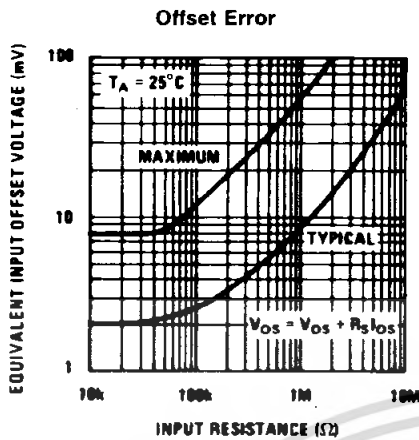
**Note 16:** The offset voltages and offset currents given are the maximum values required to drive the output within a volt of either supply with 1 mA load. Thus, these parameters define an error band and take into account the worst-case effects of voltage gain and  $R_S$ .

**Note 17:** The response time specified (see definitions) is for a 100 mV input step with 5 mV overdrive.

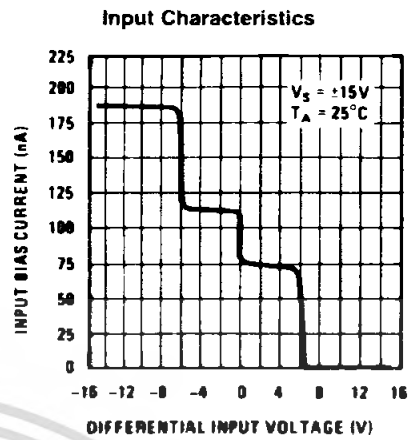
**Note 18:** This specification gives the range of current which must be drawn from the strobe pin to ensure the output is properly disabled. Do not short the strobe pin to ground; it should be current driven at 3 to 5 mA.

**Note 19:** Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

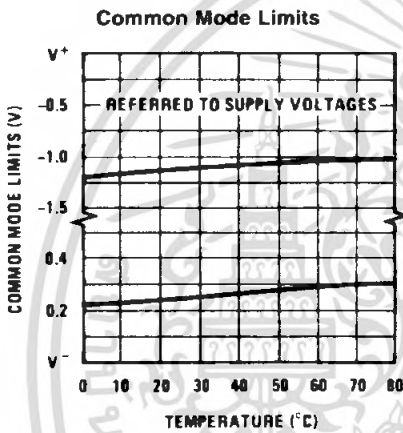
## 7.0 LM311 Typical Performance Characteristics (Continued)



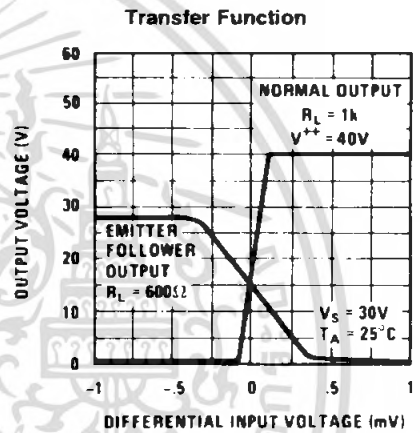
00570460



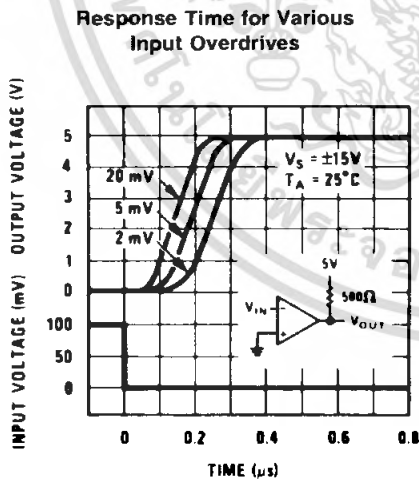
00570461



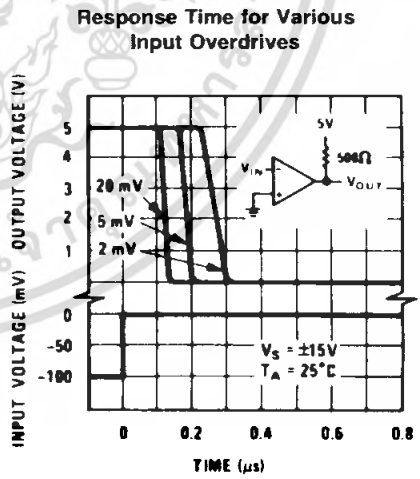
00570462



00570463



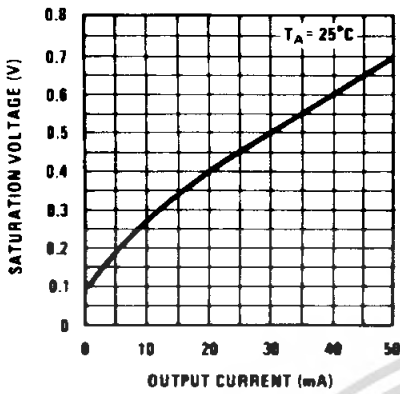
00570464



00570465

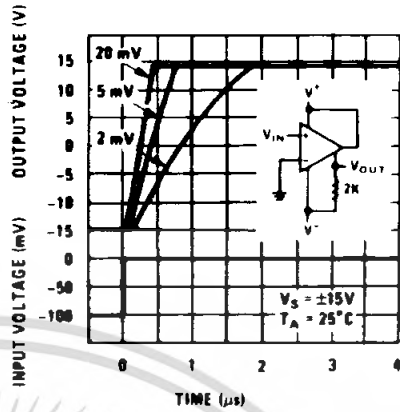
7.0 LM311 Typical Performance Characteristics (Continued)

Output Saturation Voltage



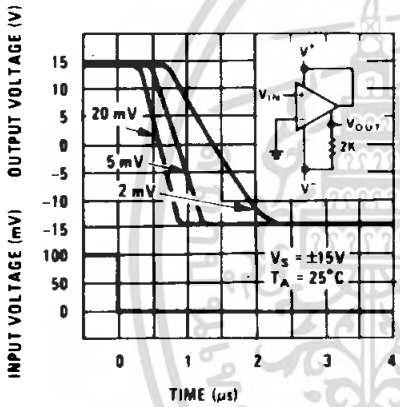
00570466

Response Time for Various Input Overdrives



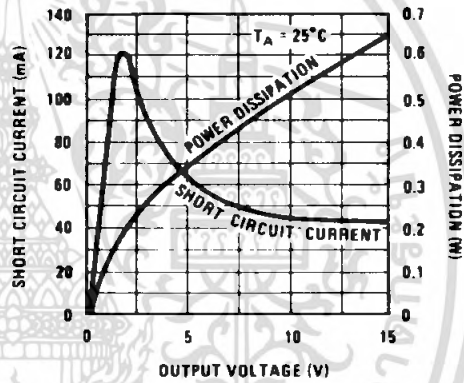
00570467

Response Time for Various Input Overdrives



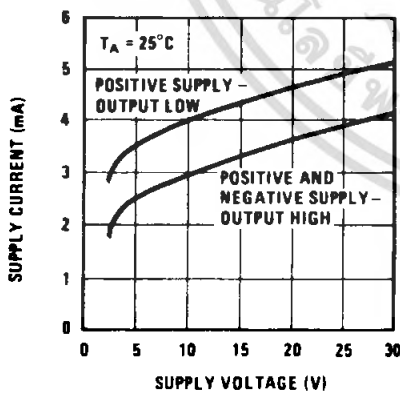
00570468

Output Limiting Characteristics



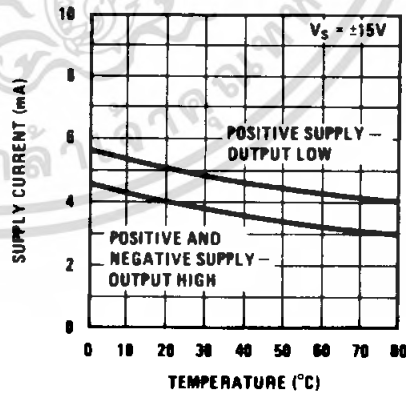
00570469

Supply Current



00570470

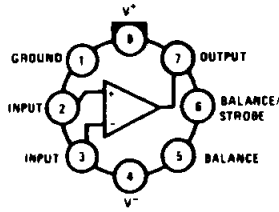
Supply Current



00570471

# 11.0 Connection Diagrams

**Metal Can Package**



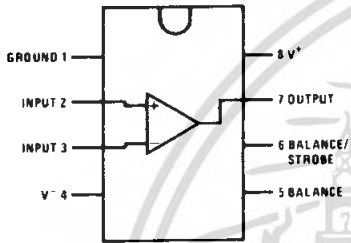
00570406

Note: Pin 4 connected to case

**Top View**

Order Number LM111H, LM111H/883(Note 21), LM211H or LM311H  
See NS Package Number H08C

**Dual-In-Line Package**

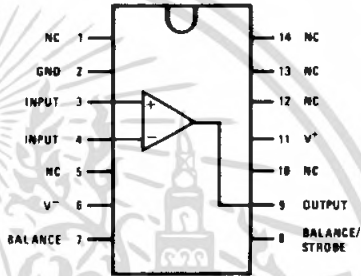


00570434

**Top View**

Order Number LM111J-8, LM111J-8/883(Note 21),  
LM311M, LM311MX or LM311N  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

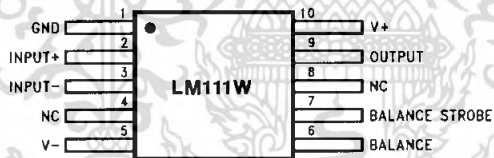
**Dual-In-Line Package**



00570435

**Top View**

Order Number LM111J/883(Note 21)  
See NS Package Number J14A or N14A



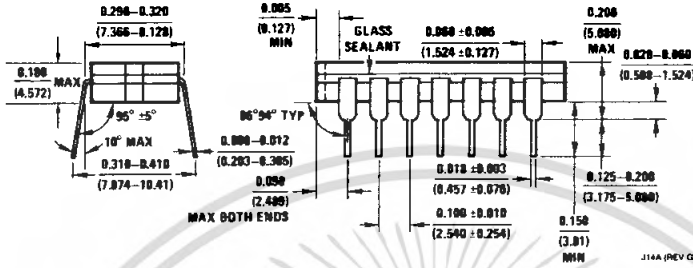
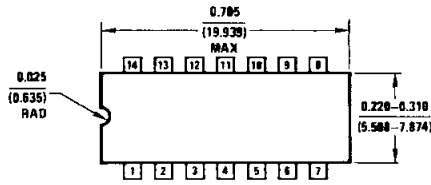
00570433

Order Number LM111W/883(Note 21), LM111WG/883  
See NS Package Number W10A, WG10A

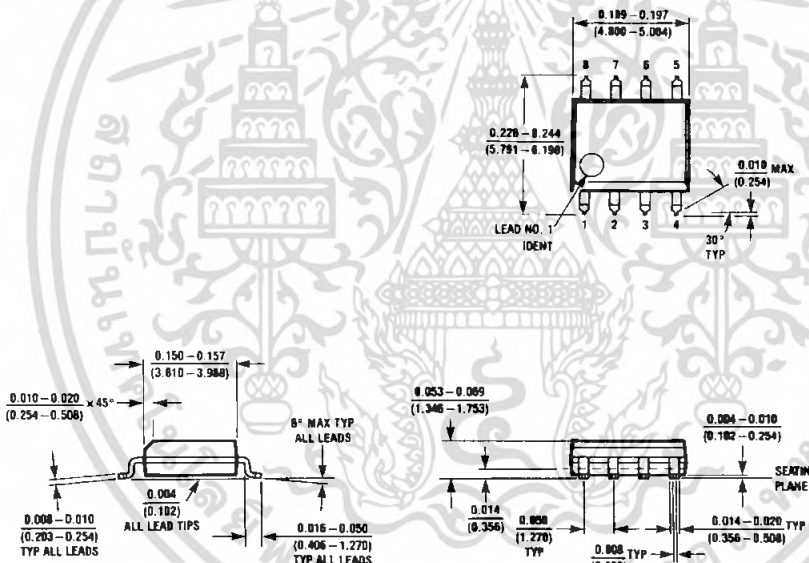
Note 21: Also available per JM38510/10304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**12.0 Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



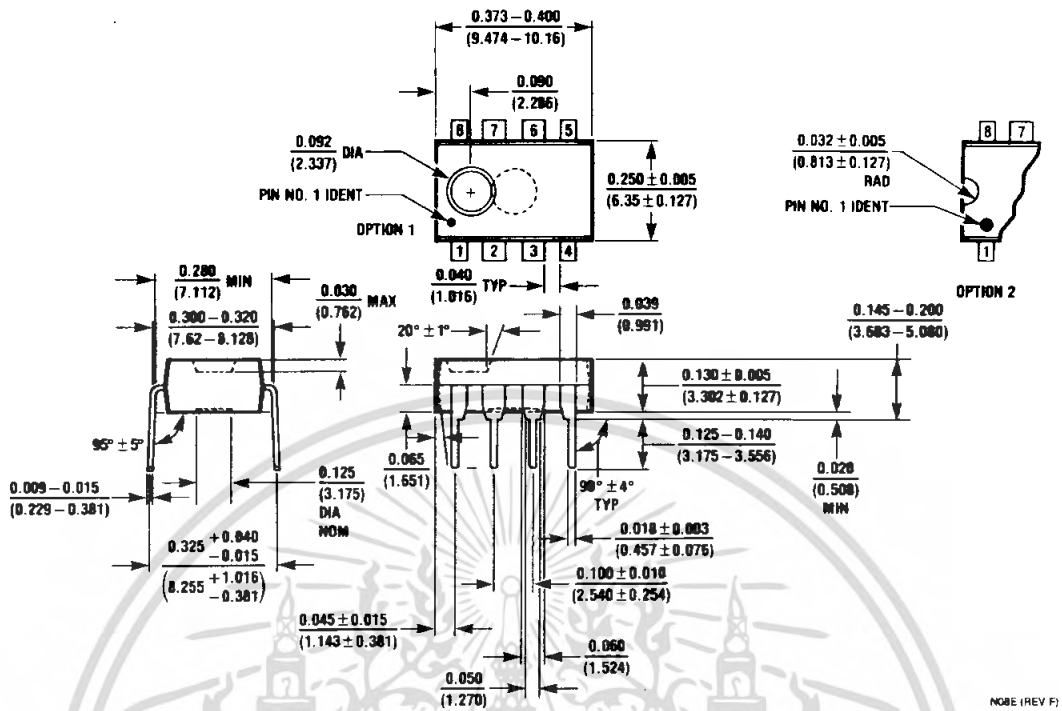
**Dual-In-Line Package (J)**  
**Order Number LM111J/883**  
**NS Package Number J14A**



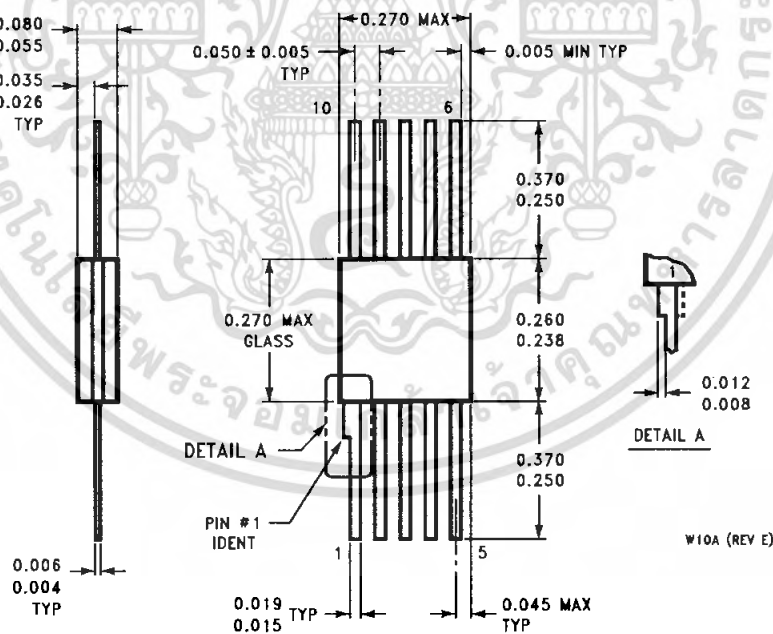
**Dual-In-Line Package (M)**  
**Order Number LM311M, LM311MX**  
**NS Package Number M08A**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**12.0 Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



Dual-In-Line Package (N)  
Order Number LM311N  
NS Package Number N08E



Order Number LM111W/883, LM111WG/883  
NS Package Number W10A, WG10A