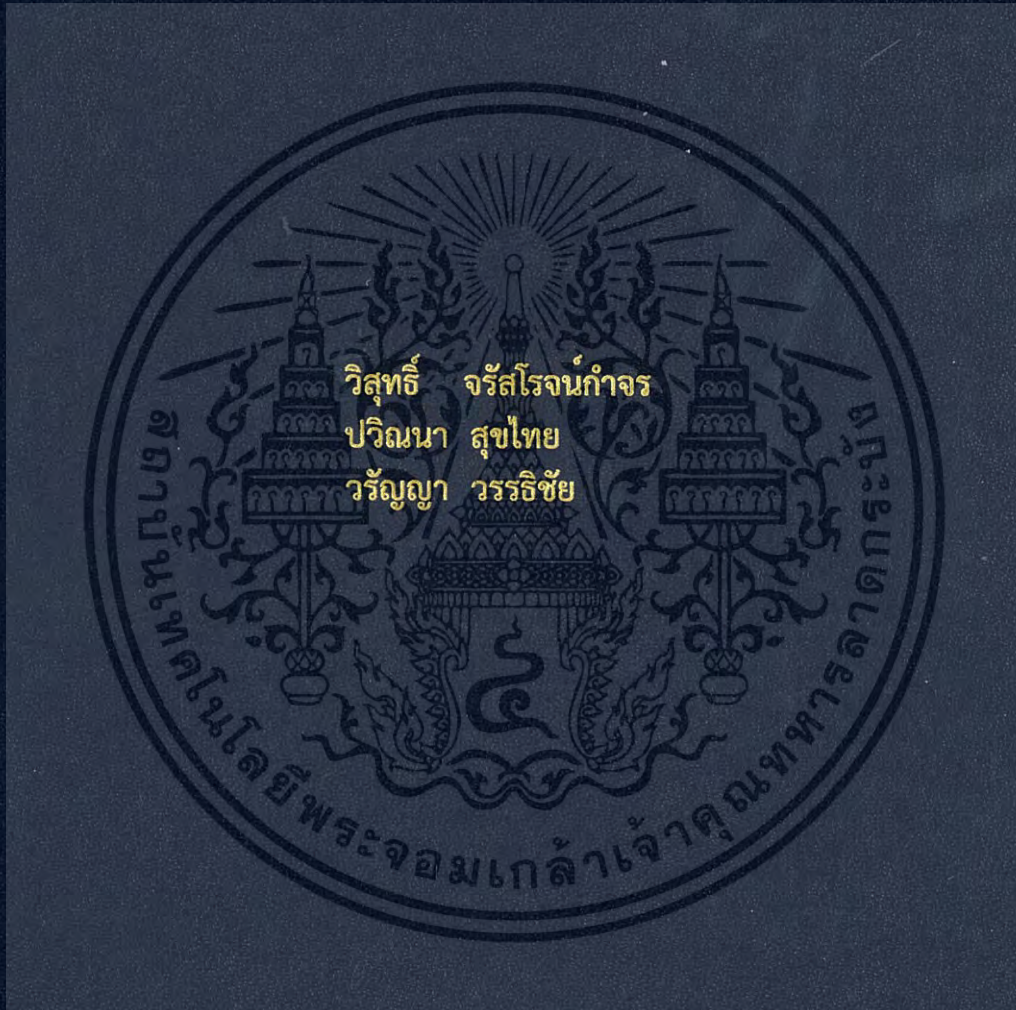


การออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดค่าความนำทางไฟฟ้า
ของของเหลวด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

THE DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR MEASURING OF
CONDUCTIVITY OF LIQUIDS USING HALL EFFECT SENSOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดค่าความนำทางไฟฟ้า
ของของเหลวด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

THE DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR MEASURING OF
CONDUCTIVITY OF LIQUIDS USING HALL EFFECT SENSOR



T143882



วิสุทธิ จรัสโรจน์กำจร
ปวิณนา สุขไทย
วรัญญา วรรัชชัย

รฟท.
๖๗๙๔ ก

๖๐๐๒๖๖ ๘๐๒

เลขหมู่ 2058
เลขทะเบียน 143882
วัน,เดือน,ปี 04 ต.ค. 2559

b. 12809319
i.

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR MEASURING OF
CONDUCTIVITY OF LIQUIDS USING HALL EFFECT SENSOR



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2558
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดค่าความนำทางไฟฟ้าของของเหลวด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

THE DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR MEASURING OF CONDUCTIVITY OF LIQUIDS USING HALL EFFECT SENSOR

นักศึกษาผู้จัดทำ นายวิสุทธิ จรัสโรจน์กำจร รหัสนักศึกษา 55011166
นางสาวปวิณนา สุขไทย รหัสนักศึกษา 55010741
นางสาววรัญญา วรรัชชัย รหัสนักศึกษา 55011092

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตน์นะ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดค่าความนำทางไฟฟ้าของของเหลวด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

THE DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR MEASURING OF CONDUCTIVITY OF LIQUIDS USING HALL EFFECT SENSOR

นักศึกษาผู้จัดทำ	นายวิสุทธิ์ จรัสโรจน์กำจร	รหัสนักศึกษา	55011166
	นางสาววิมณา สุขไทย	รหัสนักศึกษา	55010741
	นางสาววรัญญา วรรัชชัย	รหัสนักศึกษา	55011092
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตน์ะ		
ปีการศึกษา	2558		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการออกแบบเครื่องมือสำหรับวัดค่าความนำทางไฟฟ้าของของเหลวด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จุดมุ่งหมายคือเพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดความนำไฟฟ้าไปใช้ในการแยกน้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งเทียมโดยทำการทดสอบน้ำผึ้งแท้กับน้ำผึ้งเทียมว่ามีค่าความนำไฟฟ้าต่างกันหรือไม่ และสร้างเครื่องมือวัดความนำนี้โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงเลือกใช้หลักการของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ในการสร้างเครื่องมือวัดความนำไฟฟ้านี้ขึ้นมาเนื่องจากมีขนาดที่เล็กแต่กลับมีประสิทธิภาพสูง ในขั้นต้นของการทดลองนั้นทำการทดสอบของเหลวที่หาได้โดยทั่วไปเพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดความนำนี้สามารถแยกกลุ่มความนำไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน จากนั้นจึงนำไปทดสอบกับน้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งเทียมเพื่อทดสอบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้สามารถแยกกลุ่มความนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันและมีความหนืดสูงได้หรือไม่ ซึ่งเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนี้สามารถแยกความนำไฟฟ้าของน้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งที่มีส่วนผสมอื่นออกได้อย่างชัดเจน การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดที่สร้างจากแกนเหล็กสองชนิดที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า แกนทรงกระบอกและแกนรูปวงกลมมีค่าความผิดพลาดของเครื่องมือเท่ากับ 1.44% และ 13.02% ตามลำดับ สรุปได้ว่าแกนทรงกระบอกมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่าแกนรูปวงกลมและมีค่าความผิดพลาดของเครื่องมืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อสังเกตจากกราฟของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นมากน้อยในอัตราส่วนเท่าๆกัน แกนทรงกระบอกจะมีความเป็นเชิงเส้นและมีความไวในการสร้างสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าแกนรูปวงกลมอีกด้วย

ฉบับที่ 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	THE DESIGN OF AN INSTRUMENT FOR MEASURING OF CONDUCTIVITY OF LIQUIDS USING HALL EFFECT SENSOR	
Authors	Mr. Wisut	Jarusrojkamjorn
	Ms. Pawinna	Sukthai
	Ms. Waranya	Wanthichai
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Witsarut	Sriratana
Year	2015	

ABSTRACT

This thesis proposes the design of an instrument for measuring of conductivity of liquids using Hall Effect sensor. The purposes of the thesis are, first to develop the instrument's conductivity in distinguishing pure honey from honey syrup and secondly to create this instrument base on DC generator. Considering its small size and high efficiency, Hall Effect sensor is conformed when creating this instrument. In the first part of the experiment, ordinary liquids are tested in order to ensure that this instrument can clearly distinguish each conductivity group of liquids. After that, pure honey and honey syrup are tested in the experiment to ensure that this conductivity instrument can clearly distinguish the conductivity of high viscosity liquids. The study on the efficiency of this instrument that made of two different coils shows that the error of the one made of ferrite rod core is 1.44% and for the ferrite toroid core is 13.02%. This result concluded that the ferrite rod core has less error than ferrite toroid core. However, such error is considered an acceptable value; it can be observed that the graph comparing the voltages of the solutions with different concentration levels in the same amount, ferrite rod core has a more linear and also a more sensitivity for creating a magnetic field than ferrite toroid core.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้จัดทำสำเร็จล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตน์ ที่คอยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมไปถึงให้ความช่วยเหลือปัญหาและอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน มาโดยตลอด ในการทำปริญญาโทนี้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกๆท่านที่ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ซึ่งให้โอกาสในการได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยให้กำลังใจ และเป็นแรงบันดาลใจในจัดทำปริญญาโทเสมอมา คุณความดีที่พึงมีจากการทำปริญญาโทนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบแต่ บิดามารดา รวมทั้งคณาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 สารสำคัญของปริศยานิพนธ์.....	1
1.2 หลักการและเหตุผลของปริศยานิพนธ์.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของปริศยานิพนธ์.....	1
1.4 ขอบเขตของปริศยานิพนธ์.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect).....	4
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์.....	7
2.2.1 Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์.....	7
2.2.2 การทำงานของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์.....	8
2.2.3 ข้อมูล Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ที่ใช้ในปริศยานิพนธ์.....	9
2.3 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก.....	10
2.3.1 ความเป็นมาเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.3.2 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก.....	11
2.3.3 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	12
2.3.4 ความซึมซาบได้ (Permeability).....	13
2.3.5 กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก.....	14
2.3.5.1 สนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรง.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5.2 สนามแม่เหล็กของทอรรอยด์.....	15
2.4 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction).....	15
2.5 ตัวเหนี่ยวนำ.....	16
2.5.1 การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนำ.....	17
2.5.1.1 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor).....	17
2.5.1.2 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรรอยด์ (Toroidal Core Inductor).....	17
2.5.2 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ.....	18
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ.....	18
2.5.4 สูตรการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ.....	19
2.6 การนำไฟฟ้า (Conductivity).....	20
2.6.1 การนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	20
2.6.2 ความนำไฟฟ้า (Conductance, G).....	21
2.6.3 สภาพนำไฟฟ้า.....	21
2.6.4 ประโยชน์ของการหาค่าสภาพนำไฟฟ้า.....	22
บทที่ 3 โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจร.....	23
3.1 โครงสร้างของวงจร.....	23
3.1.1 วงจรของสนามแม่เหล็กและการนำไฟฟ้าของสารละลาย.....	23
3.1.2 วงจรจัดระดับเงื่อนไขของสัญญาณ (Signal conditioning).....	25
3.1.2.1 ฮอลเอฟเฟคเซนเซอร์.....	25
3.1.2.2 วงจรกรองความถี่ (Low Pass Filter).....	26
3.1.2.3 Instrumentation Amplifier (AD524).....	26
3.2 หลักการทำงานของวงจร.....	27
3.3 วงจรที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.4 ชิ้นงานสำเร็จ.....	29
3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 9 ของ Instrumentation Amplifier (AD524).....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 แกนทรงกระบอก.....	31
4.1.2 แกนรูปวงกลม.....	32
4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 ของ Instrumentation Amplifier (AD524)	33
4.2.1 แกนทรงกระบอก.....	33
4.2.2 แกนรูปวงกลม.....	34
4.3 เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นเป็น อัตราส่วนต่างๆ.....	35
4.3.1 แกนทรงกระบอก.....	35
4.3.2 แกนรูปวงกลม.....	36
4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด(I:Ampere).....	37
4.4.1 แกนทรงกระบอก.....	37
4.4.2 แกนรูปวงกลม.....	38
4.5 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B: Tesla).....	39
4.5.1 แกนทรงกระบอก.....	40
4.5.2 แกนรูปวงกลม.....	43
4.6 คำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดโดยใช้วิธีทางสถิติ.....	45
4.7 คำนวณหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้ามาตรฐาน....	46
4.7.1 แกนทรงกระบอก.....	47
4.7.2 แกนรูปวงกลม.....	48
4.8 ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ.....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	50
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	53

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดโดยใช้วิธีทางสถิติ.....	45
4.2 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้า.....	47
มาตรฐานของแกนทรงกระบอก	
4.3 ตารางแสดงการคำนวณหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้า.....	48
มาตรฐานของแกนรูวงกลม	
4.4 ตารางแสดงค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และVIIของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	4
2.2 แสดงการวัดความต่างศักย์ฮอลล์ VH.....	5
2.3 แสดงตัวรับรู้ฮอลล์.....	7
2.4 แสดงการต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์.....	8
2.5 แสดงการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	8
2.6 แสดงรูปร่างของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302.....	9
2.7 แสดงวงจรภายในของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302.....	9
2.8 แสดงรายละเอียดการเชื่อมต่อฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302.....	9
2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก.....	10
2.10 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ.....	11
2.11 แสดงวงจรแม่เหล็กทอรอยด์.....	12
2.12 แสดงแนวการวางตัวของเข็มทิศรอบลวดตัวนำ.....	14
2.13 แสดงทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม.....	15
2.14 แสดงสนามแม่เหล็กภายในทอรอยด์.....	15
2.15 แสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.16 แสดงจำนวนขดลวดมากขึ้นความต่างศักย์มากขึ้น.....	16
2.17 แสดงตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่.....	18
2.18 แสดงค่าความซึมซาบได้ของวัสดุชนิดต่างๆ.....	19
2.19 แสดงการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	20
3.1 แสดงขดลวดแกนทรงกระบอก (เพอร์ไรต์).....	23
3.2 แสดงขดลวดแกนรูปวงกลม (ทอรอยด์).....	23
3.3 แสดงโพรบที่ทำจากแอสตันเลส 304.....	24
3.4 แสดงน้ำชนิดต่างๆที่ใช้ทดลอง.....	25
3.5 แสดงรูปร่างของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302.....	25
3.6 แสดงวงจรรองความถี่ต่ำ.....	26
3.7 แสดงวงจรภายในของ Instrumentation Amplifier.....	26
3.8 แสดงวงจรของ AD524.....	27
3.9 แสดงรูปวงจรรวมทั้งหมด.....	28
3.10 แสดงรูปวงจรที่ใช้ในการทดลอง.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

3.11 แสดงชิ้นงานสำเร็จ.....	29
3.12 แสดงเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก EXTECH SDL 900.....	29
4.1 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 9 ของ.....	31
Instrumentation Amplifier (AD524) (Vout: Volt) ของแกนทรงกระบอก	
4.2 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 9 ของ.....	32
Instrumentation Amplifier (AD524) (Vout: Volt) ของแกนรูปวงกลม	
4.3 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 ของ.....	33
Instrumentation Amplifier (AD524) (Vhall: Volt) ของแกนทรงกระบอก	
4.4 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 ของ.....	34
Instrumentation Amplifier (AD524) (Vhall: Volt) ของแกนรูปวงกลม	
4.5 กราฟแสดงค่า Vout ของน้ำเชื่อมความเข้มข้นต่างกันของแกนทรงกระบอก.....	35
4.6 กราฟแสดงค่า Vout ของน้ำเกลือความเข้มข้นต่างกันของแกนทรงกระบอก.....	35
4.7 กราฟแสดงค่า Vout ของน้ำเชื่อมความเข้มข้นต่างกันของแกนรูปวงกลม.....	36
4.8 กราฟแสดงค่า Vout ของน้ำเกลือความเข้มข้นต่างกันของแกนรูปวงกลม.....	36
4.9 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของแกนทรงกระบอก.....	37
4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของแกนรูปวงกลม.....	38
4.11 แสดงวิธีการวัดแกนทรงกระบอกแบบต่างๆ.....	39
4.12 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม A ของแกนทรงกระบอก.....	40
4.13 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม B ของแกนทรงกระบอก.....	40
4.14 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม C ของแกนทรงกระบอก.....	41
4.15 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม D ของแกนทรงกระบอก.....	41
4.16 แสดงวิธีการวัดแกนรูปวงกลมแบบต่างๆ.....	42
4.17 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม A ของแกนรูปวงกลม.....	43
4.18 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม B ของแกนรูปวงกลม.....	43
4.19 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม C ของแกนรูปวงกลม.....	44
4.20 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม D ของแกนรูปวงกลม.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 สารสำคัญของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและออกแบบเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวต่างชนิดกันบนพื้นฐานของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ที่ให้เอาท์พุทเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำการวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่ควบคุมได้โดยความเข้มข้นแม่เหล็กที่ได้นั้นขึ้นอยู่กับของเหลวต่างชนิดกันที่นำมาทดสอบ สุดท้ายนำเอาท์พุทของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ที่ได้มาคำนวณให้เป็นหน่วยมาตรฐานของความนำและหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้ามาตรฐาน

1.2 หลักการและเหตุผลของปริญญานิพนธ์

สร้างเครื่องมือวัดความนำไฟฟ้าของของเหลวโดยใช้หลักการของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ เพื่อพัฒนาไปใช้ในการแยกน้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งเทียม โดยทดสอบน้ำผึ้งแท้กับน้ำผึ้งเทียมว่ามีค่าความนำไฟฟ้าต่างกันหรือไม่ ปกติแล้วในของเหลวที่มีความหนืดสูงนั้นเครื่องมือวัดความนำไฟฟ้าจะไม่สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้าได้หรือเรียกได้ว่าค่าความนำที่วัดได้นั้นมีค่าน้อยมากและแทบไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้น จึงเลือกใช้หลักการของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์มาใช้ในการสร้างเครื่องวัดความนำไฟฟ้าขึ้น โดยเมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านโพรบที่จุ่มลงในของเหลวนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโพรบจะถูกนำไปสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแกนสองชนิด ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะตรวจวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กนั้น แล้วให้เอาท์พุทออกมาเป็นโวลต์ จากนั้นนำค่าเอาท์พุทที่ได้เข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อขยายผลต่างแรงดัน แล้วนำไปแสดงผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงทำให้สามารถแยกแยะค่าความนำไฟฟ้าที่มีค่าต่างกันไม่มากให้แยกกันชัดเจนได้

1.3 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาหลักการเกิดและการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์
3. เพื่อศึกษาค่าความนำไฟฟ้ามาตรฐานของของเหลวชนิดต่างๆ
4. ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าบนหลักการของ ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์
5. เพื่อสร้างเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าที่สามารถแยกความแตกต่างของค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆได้อย่างชัดเจน
6. เพื่อนำเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าที่สร้างขึ้นไปพัฒนาเพื่อแยกน้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สร้างเครื่องมือวัดที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1.4 ขอบเขตของปริญญาโท

1. ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำ มีประสิทธิภาพและมีขนาดพกพาได้
2. สร้างเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวโดยใช้หลักการของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์
3. ศึกษาประสิทธิภาพการสร้างสนามแม่เหล็กและค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (B: Tesla) ของแกนสองชนิด คือแกนเฟอร์ไรต์และแกนทอรอยด์
4. สร้างเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าที่สามารถแบ่งกลุ่มความนำไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน
5. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการแปลงค่าที่ได้จากการวัดเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ออกมามีความละเอียดมากขึ้น
6. ศึกษาค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวและหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้า (G: Siemens)
7. หาประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นโดยอ้างอิงจากค่ามาตรฐาน

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
2. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการเพื่อวางแผนการจัดทำโครงการ
3. สร้างแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
4. หาข้อมูลของอุปกรณ์และจัดซื้ออุปกรณ์ที่จะใช้ในการทำโครงการ
5. สร้างแบบจำลองของโครงการ
6. ทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้น
7. ทำการทดลอง
8. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
9. แก้ไขปัญหาและจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากการทดลอง
10. จัดทำเอกสารของโครงการและสรุปรายงาน
11. สรุปและประเมิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. การนำความรู้ที่ได้เรียนมาทั้งในด้านทฤษฎีและปฏิบัติมาปรับและประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับโครงการที่ทำ และสามารถต่อยอดในอนาคตได้
2. ช่วยฝึกกระบวนการคิด การวางแผน การวิเคราะห์ปัญหา และการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทำโครงการ



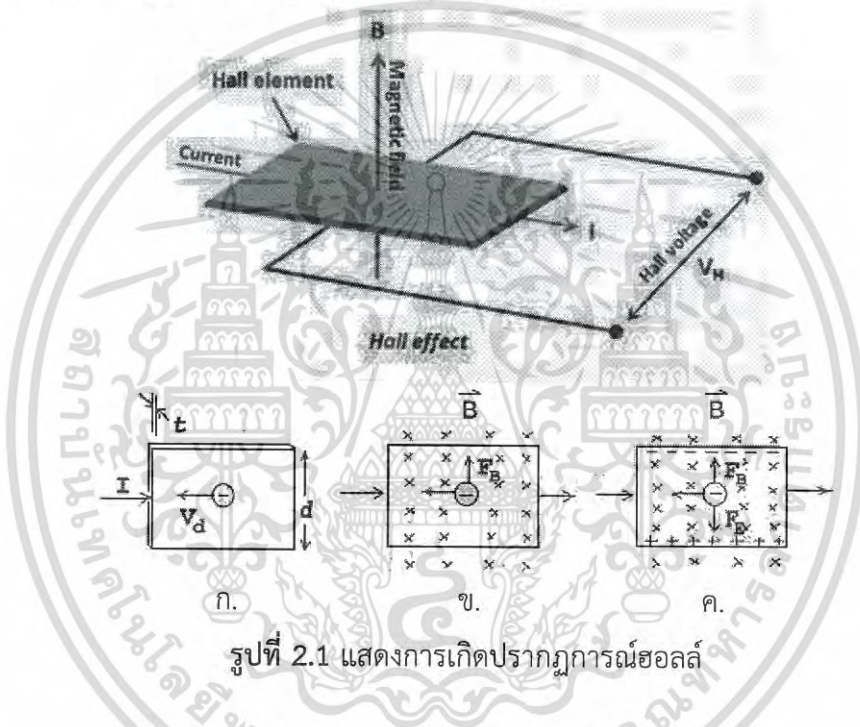
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อาจอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.1 ดังนี้

รูป 2.1 ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current) I ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน V_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าจากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูป 2.1 ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษ จะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง

รูป 2.1 ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field) E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า F_E กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไป

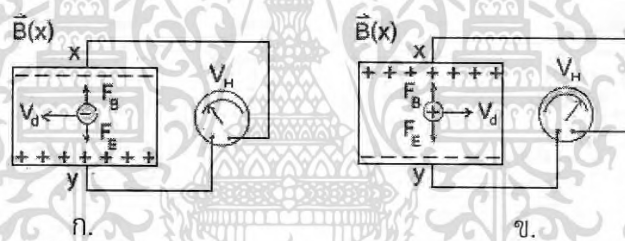
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบี่ยงเบน สนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำบางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ V ดังนี้

$$E_H = \frac{V}{d} \quad (1)$$

ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (hall potential difference หรือ hall voltage) V_H พบว่า ความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อแผ่นตัวนำบางทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน และเจอร์เมเนียม ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความต่างศักย์ฮอลล์จะมีค่าน้อยกว่ามาก (เหตุผลพิจารณาได้จากสมการ (7) หรือสมการ (8) ในตอนท้าย) จากสมการ (1) จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \quad (2)$$



รูปที่ 2.2 แสดงการวัดความต่างศักย์ฮอลล์ V_H

เราสามารถวัด V_H โดยต่อมิลลิโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด x และจุด y ดังรูปที่ 2.2 ก. สภาพชี้ของ V_H ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จากมิลลิโวลต์มิเตอร์ จากรูป 2.2 ก พหุประจุคืออิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าพหุประจุมีประจุบวก ทิศของ V_d และ E_H จะตรงข้ามกับในรูป 2 ก แต่ทิศของ F_B และ F_E ยังคงเดิม ดังแสดงในรูป 2.2 ข. ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพชี้ของ V_H จะตรงข้ามกับกรณีที่พหุประจุมีประจุลบ

จากรูป 2.2 ค. ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน เราจะได้

$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (3)$$

$$E_H = V_d B$$

จากสมการ (2) จะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = E_H d$$

$$V_H = V_d B d \quad (4)$$

เนื่องจากอัตราเร็วเคลื่อนลอย V_d มีค่า

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (5)$$

เมื่อ n คือจำนวนพาหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพาหะประจุ) และ A คือพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำบาง แทนสมการ (5) ลงในสมการ (4) จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (6)$$

เนื่องจาก $t = \frac{A}{d}$ คือความหนาของแผ่นตัวนำบาง ดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (7)$$

สมการ (7) เขียนได้ใหม่เป็น

$$B = neti^{-1} V_H \quad (8)$$

ปริมาณ V_H , I และ t ในสมการ (8) หาได้จากการวัด ส่วนค่า n ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ส่วนฉนวนมีจำนวนพาหะประจุน้อยมาก แต่ก็ยอมให้กระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยผ่าน

จากการศึกษาพบว่า สารกึ่งตัวนำที่เจือสิ่งเจือปนมีค่า $n \approx 10^{22}$ ต่อลูกบาศก์เมตร และโลหะทั่วไปมีค่า $n \approx 10^{28}$ ต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเราจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการ (8) ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา หน่วยเดิมของความเข้มของสนามแม่เหล็กคือ เกาส์ (gauss) โดยที่ 1 เทสลา = 10⁴ เกาส์

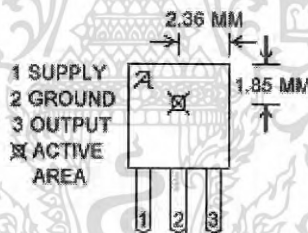
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

แม่เหล็ก (magnet) เป็นสิ่งที่สามารถดูดวัสดุบางชนิดได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูดสารบางอย่างได้ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กในบริเวณโดยรอบแม่เหล็ก เราสามารถตรวจสอบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหรือไม่ โดยใช้เข็มทิศ แต่เราไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าใด นักวิทยาศาสตร์พยายามวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการต่างๆ แต่ในปัจจุบันเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวกและรวดเร็วโดยใช้ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์

2.2.1 Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำ Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์สามารถวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้แม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโซลีนอยด์และสนามแม่เหล็กใกล้เส้นลวดตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้



รูปที่ 2.3 แสดงตัวรับรู้ฮอลล์

ตัวรับรู้ฮอลล์เป็นวงจรรวมมีขนาดและลักษณะดังรูปที่ 2.3 และมีสมบัติดังนี้

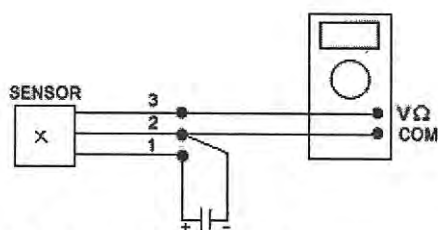
input voltage 4.5-6 V

offset voltage 2.5 V (ประมาณ)

sensitivity 13 V/T

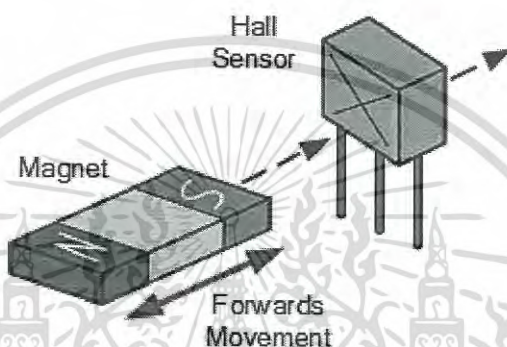
เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และ ต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา 2 และขา 3 ดังรูปที่ 2.3 โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เรียกว่า offset voltage ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อกับขา 1 และขา 2 แต่จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์

2.2.2 การทำงานของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์



รูปที่ 2.5 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำแม่เหล็กเข้าใกล้ active area ของตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็ก กล่าวคือถ้านำขั้วใต้เข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้านำขั้วเหนือเข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าลดลง ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไปมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ดังนี้

$$B = (V_{out(-B)} - V_{out(+B)})(S)^{-1}$$

เมื่อ : $V_{out(-B)}$ = ความต่างศักย์ขณะมีขั้วเหนือ

$V_{out(+B)}$ = ความต่างศักย์ขณะมีขั้วใต้

S = สัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเทสลา

B = ความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา

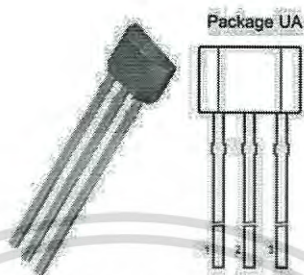
ตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนได้แก่ ตัวนำไฟฟ้าทั่วไป สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type) ส่วนตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นประจุบวกได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type)

ปัจจุบันฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะอยู่ในรูปของวงจรรวมหรือ IC (Integrated Circuit) ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะให้แรงดันเอาต์พุตสูงกว่าตัวนำไฟฟ้าทั่วไป

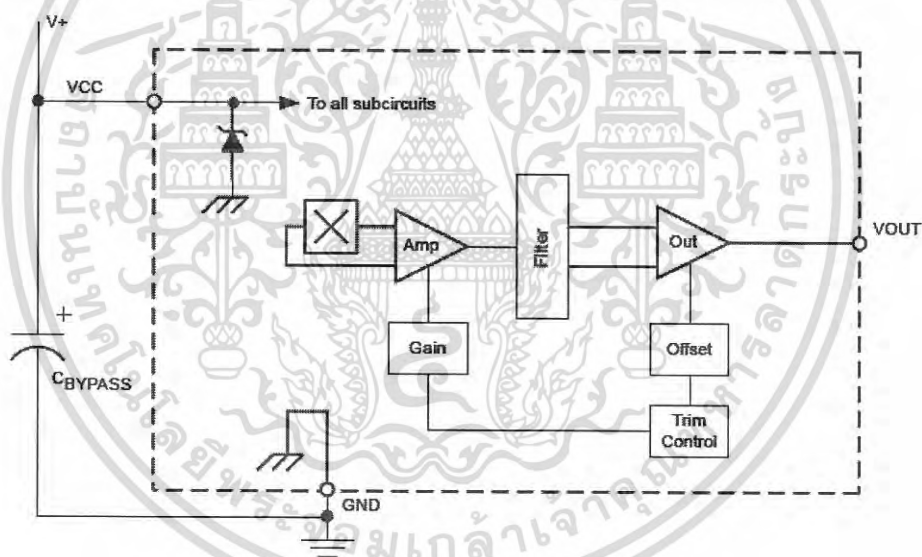
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ข้อมูล Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ที่ใช้ในปริญญาบัตร

เลือกใช้ Continuous-Time Ratiometric Linear ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ICs เบอร์ A1302 เพื่อตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

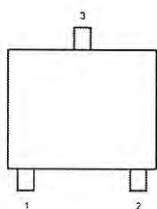


รูปที่ 2.6 แสดงรูปร่างของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302

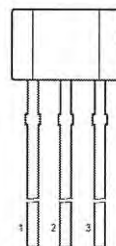


ฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรม

รูปที่ 2.7 แสดงวงจรภายในของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302



Package LH SOT23W Pin-out Diagram



Package UA, 3-Pin SIP Pin-out Diagram

รูปที่ 2.8 แสดงรายละเอียดการเชื่อมต่อฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ A1302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

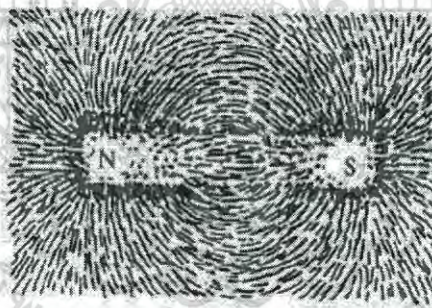
จากรูปที่ 8 นั้น เราเลือกใช้เป็น Package UA ดังนั้น เราจะต่อ V_{CC} เข้าที่ขา 1, ต่อ V_{OUT} เข้าที่ขา 3 และต่อ GND เข้าที่ขา 2

2.3 ทฤษฎีสนามแม่เหล็ก

2.3.1 ความเป็นมาเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

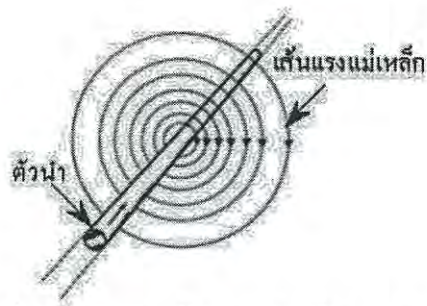
กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆเส้นลวด ลักษณะของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นลวดและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า แม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งใช้สร้างแม่เหล็กที่มีกำลังสูงและใช้สำหรับทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยกระแสไฟฟ้าแม่เหล็กไฟฟ้า หมายถึง อำนาจแม่เหล็กที่เกิดจากการที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวัตถุตัวนำหมายความว่าถ้าปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลในวัตถุตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆตัวนำ

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำนั้น แต่อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีเพียงจำนวนเล็กน้อย ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การจะเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กทำได้โดยการนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดลวด เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดในแต่ละส่วนของเส้นลวดตัวนำจะเสริมอำนาจกัน ทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก

เมื่อนำกระดาษแข็งวางบนแท่งแม่เหล็กโรยเศษผงเหล็กละเอียดบนกระดาษแล้วค่อยๆเคาะด้วยนิ้วเบาๆ ผงเหล็กจะเรียงตัวตามเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้ว N ไปขั้ว S อย่างสวยงามดังรูปที่ 2.9 โดยในที่ที่มีเส้นแรงแม่เหล็ก เรียกว่ามี สนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.10 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ

รูปที่ 2.10 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปวงกลม โดยเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปในทิศของการขั้วสกรูเกลียวขวาเมื่อกระแสมีทิศทางพุ่งเข้าและจะไปในทิศการขั้วสกรูเกลียวซ้ายเมื่อกระแสพุ่งออก

การศึกษานามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก พบว่า เส้นสนามแม่เหล็กแผ่ออกจากขั้วเหนือบริเวณสามมิติ บริเวณใกล้ขั้วแม่เหล็กทั้งสองจะมีเส้นสนามแม่เหล็กหนาแน่นยิ่งกว่าบริเวณอื่นๆ ถ้าพิจารณาพื้นที่บริเวณสนามแม่เหล็ก เรียกสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่นี้ว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก ใกล้ขั้วแม่เหล็กจะมีฟลักซ์แม่เหล็กหนาแน่น และฟลักซ์แม่เหล็กจะหนาแน่นน้อยลงเมื่ออยู่บริเวณห่างขั้วแม่เหล็ก

2.3.2 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

อัตราส่วนระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กต่อพื้นที่ที่ตั้งฉากกับสนามหนึ่งตารางหน่วย เรียกว่า ขนาดของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ถ้าให้ ϕ เป็นขนาดฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ มีหน่วยเวเบอร์

A เป็นพื้นที่ตั้งฉากกับฟลักซ์แม่เหล็กหรือขนาดของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยตารางเมตร

B เป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก หรือความเข้มสนามแม่เหล็ก

จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

โดยที่ B มีหน่วยเป็นเวเบอร์ต่อตารางเมตรหรือเทสลา

2.3.3 ความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) หรือ แรงแม่เหล็ก (Magnetic force)

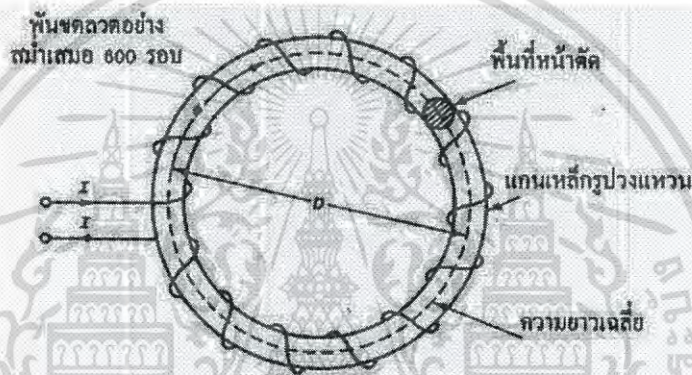
ความเข้มสนามแม่เหล็กคือ แรงแเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

วงจรมแม่เหล็กที่มีเส้นแรงแม่เหล็กสม่ำเสมอจะมีค่าของแรงแเคลื่อนแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคงที่ตลอดแนวของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น นั้นหมายความว่าความเข้มสนามแม่เหล็กคือ แอมแปร์/เมตร หรือ แอมแปร์-เทินส์/เมตร ใช้สัญลักษณ์

$$H = \frac{F}{l} = \frac{NI}{l}$$

เมื่อ	H	=	ความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแอมแปร์-เทินส์/เมตร
	l	=	ความยาวของวงจรมแม่เหล็กเป็นเมตร
	N	=	จำนวนรอบของขดลวดเป็นรอบ
	I	=	กระแสที่ไหลผ่านขดลวดเป็นแอมแปร์



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรมแม่เหล็กทอรรอยด์

ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ การพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำมากเกิดสนามแม่เหล็กมาก ในทางกลับกันถ้าพันจำนวนรอบน้อยการเกิดสนามแม่เหล็กก็น้อยตามไปด้วย
2. ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาก และถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยสนามแม่เหล็กเกิดน้อย
3. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน เช่น แกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแกนที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) หรือสารที่สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้ เช่น เหล็ก เพอร์ไรท์ เป็นต้น สารเหล่านี้จะช่วยเสริมอำนาจแม่เหล็กในขดลวดทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น
4. ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า แกนที่มีขนาดใหญ่จะให้สนามแม่เหล็กมาก ส่วนแกนที่มีขนาดเล็กจะให้สนามแม่เหล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ความซึมซาบได้ (Permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ

ความซึมซาบได้ คือ คุณสมบัติของตัวกลางที่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้ง่าย ความซึมซาบของสุญญากาศ (μ_0) มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร โดยทั่วไปเราจะกล่าวถึงเฉพาะความซึมซาบสัมพัทธ์ (μ_r) หมายถึงตัวกลาง เช่น เหล็กยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้เป็นกี่เท่าของอากาศ เมื่อใช้แรงแม่เหล็ก (H) เท่ากัน

ก) ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ หรือ ค่าคงที่ของแม่เหล็ก (Permeability of free space or magnetic constant) ใช้สัญลักษณ์ μ_0

อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กต่อความเข้มสนามแม่เหล็ก เรียกว่า “ความซึมซาบได้ของสุญญากาศ” หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “ค่าคงที่ของแม่เหล็ก” เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ_0 มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร

ดังนั้นในตัวกลางที่เป็นสุญญากาศ อากาศ หรือในวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก (Non-magnetic material) ค่าคงที่ของแม่เหล็กคือ

$$\mu_0 = \frac{B}{H} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ เฮนรีต่อเมตร}$$

และความเข้มสนามแม่เหล็กสำหรับวัสดุที่ไม่ใช่สารแม่เหล็ก คือ

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ แอมแปร์-เทินส์ต่อเมตร}$$

ข) ความซึมซาบได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ใช้สัญลักษณ์ μ_r

ในตัวกลางหรือวัสดุประเภทสารแม่เหล็กที่มีความซึมซาบได้สัมพัทธ์เป็น μ_r จะได้

$$\frac{B}{H} = \mu_r \mu_0$$

$$\text{หรือ } B = \mu_r \mu_0 H$$

ความซึมซาบได้สมบูรณ์ (absolute permeability) คือ $\mu = \mu_r \mu_0$ โดยที่ μ_0 เป็นค่าคงที่ของสมการ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร μ_r จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสารแม่เหล็ก และ μ_r ในอากาศจะมีค่าเท่ากับ 1

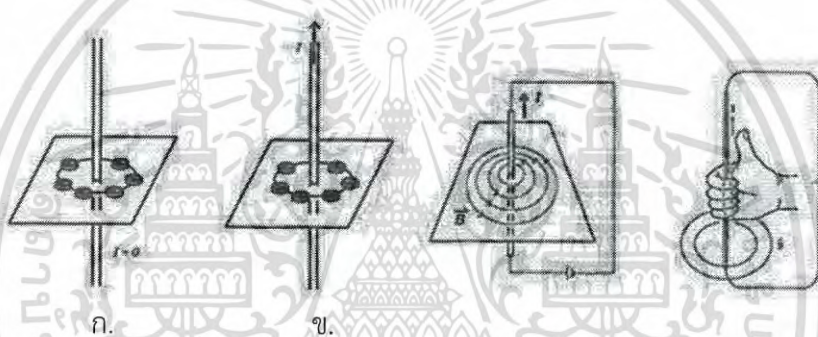
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

ในปี พ.ศ. 2363 ฮานส์ เออร์สเทด พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำนั้น สำหรับลวดตัวนำที่มีรูปร่างต่างกัน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนหรือแตกต่างจากสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กอย่างไร

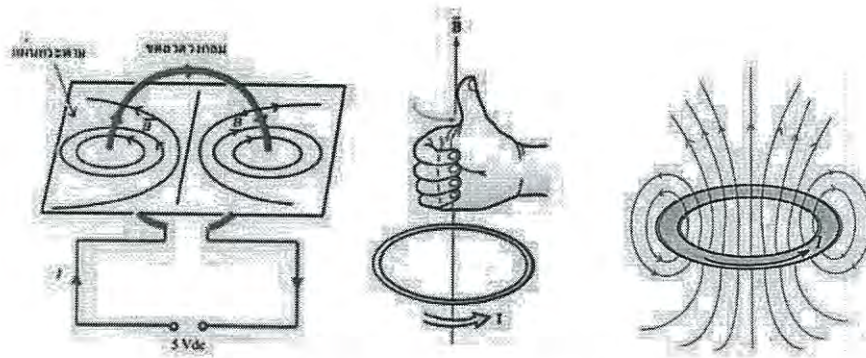
2.3.5.1. สนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรง

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านลวดตัวนำตรงจะเกิดสนามแม่เหล็กรอบลวดตัวนำ ซึ่งทราบได้จากการดูเข็มทิศเล็กๆ ที่วางรอบลวดตัวนำมีการเรียงตัวเป็นวง ทิศของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา (right hand rule) โดยกำมือขวารอบลวดตัวนำตรง ให้นิ้วแม่มือชี้ไปทางทิศของกระแสไฟฟ้า ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่คือ ทิศของสนามแม่เหล็ก เมื่อ กลับทิศของกระแสไฟฟ้า ทิศของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปด้วย



รูปที่ 2.12 แสดงแนวการวางตัวของเข็มทิศรอบลวดตัวนำตรงก่อนกระแสไฟฟ้าผ่านในรูป ก. และหลังผ่านในรูป ข. (2 รูปขวามือ คือ การใช้กฎมือขวาหาทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำตรง)

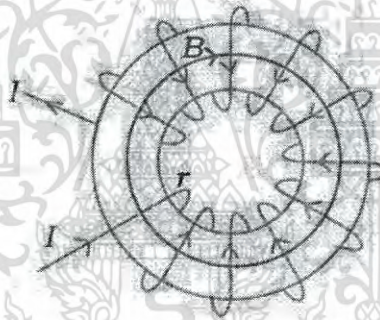
ถ้าผ่านกระแสไฟฟ้าไปในลวดตัวนำที่ถูกตัดเป็นวงกลม จะเกิดสนามแม่เหล็กรอบๆลวดตัวนำ นั้น การหาทิศของสนามแม่เหล็กยังคงใช้กฎมือขวา โดยการกำลวดตัวนำแต่ละส่วนจะได้ทิศ ของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำ ดังรูป ก. นอกจากนี้ ยังอาจใช้วิธีกำมือขวาวางบนระนาบ ของลวดตัวนำ โดยให้นิ้วทั้งสี่ส่วนตามทิศของกระแสไฟฟ้า นิ้วหัวแม่มือจะชี้ไปตามทิศของ สนามแม่เหล็ก ดังรูป ข. จะเห็นว่า ทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลมมีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก



รูปที่ 2.13 แสดงทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม

2.3.5.2 สนามแม่เหล็กของทอรรอยด์

เมื่อนำลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลายๆรอบเรียงกันเป็นรูปทรงกระบอกแล้วขด เป็นวงกลม ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่า ทอรรอยด์ (toroid) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์



รูปที่ 2.14 แสดงสนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์

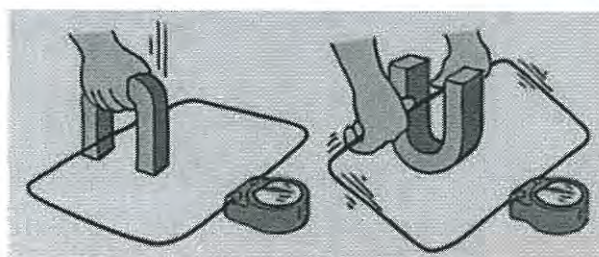
ซึ่งหาทิศของสนามได้ด้วยการกำมือขวารอบแกนของทอรรอยด์ ให้นิ้วทั้งสี่วนตามทิศของกระแสไฟฟ้า นิ้วหัวแม่มือจะชี้ทิศของสนามแม่เหล็กดังรูป สนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์มีค่าไม่สม่ำเสมอ โดยสนามแม่เหล็กที่ขอบด้านในมีค่าสูงกว่าสนามแม่เหล็กที่ขอบด้านนอก ปัจจุบันมีการนำหลักการของทอรรอยด์ไปสร้างสนามแม่เหล็กในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ชั้นสูง เช่น ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชัน (fusion nuclear reaction) ที่เรียกว่า โทคามัค (tokamak) คาดว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันจะเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สำคัญในอนาคต

2.4 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

ฟาราเดย์และเฮนรีค้นพบว่ากระแสไฟฟ้าสามารถสร้างขึ้นได้โดยการเคลื่อนแม่เหล็กเข้าออกขดลวดตั้งรูปด้านล่างซ้าย อีกวิธีหนึ่งคือเคลื่อนขดลวดไปตัดกับสนามแม่เหล็ก ดังรูปด้านล่างขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลคือได้ความต่างศักย์เท่ากันถ้าอัตราเร็วในการเคลื่อนวัตถุเท่ากัน



รูปที่ 2.15 แสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

ยิ่งขดลวดมีจำนวนขดลวดมากจะได้ความต่างศักย์มากขึ้น ถ้าเพิ่มจำนวนวงของขดลวดมากขึ้นเท่าตัว ความต่างศักย์จะเพิ่มขึ้นเท่าตัวด้วย นั่นหมายความว่าถ้าเพิ่มจำนวนขดลวดขึ้น 10 เท่าก็จะมี ความต่างศักย์เพิ่มขึ้น 10 เท่า ดังนั้นจะดูเหมือนว่าเราสามารถสร้างความต่างศักย์ได้ไม่จำกัดแต่ในความจริง แล้วปัญหาอยู่ที่การสร้างแม่เหล็กขนาดใหญ่มาเหนี่ยวนำกับขดลวดจำนวนหลายรอบนั้น



รูปที่ 2.16 แสดงจำนวนขดลวดมากขึ้นความต่างศักย์มากขึ้น

เนื่องจากความต่างศักย์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ยิ่งเราเคลื่อนมือเร็วความต่างศักย์จะเพิ่มสูงขึ้น และถ้าเพิ่มจำนวนรอบขดลวดจะมีความต่างศักย์สูงขึ้น ปรากฏการณ์ที่เหนี่ยวนำความต่างศักย์ด้วยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในขดลวดแบบนี้ เราเรียกว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

2.5 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำหรืออินดักเตอร์ (Inductor) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานอีกตัวหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานใน วงจรไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลาย บทบาทสำคัญของตัวเหนี่ยวนำคือ ทำให้เกิดการ พองตัวและการยุบตัวของสนามแม่เหล็กขึ้นมา เมื่อจ่ายแรงดันและกระแสให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น บนตัวเหนี่ยวนำนี้มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน นำไปสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องใช้ไฟฟ้าได้

ตัวเหนี่ยวนำเป็นเส้นลวดตัวนำจำพวกทองแดงขดลวดเป็นวงเรียงกันหลายๆ รอบ ลักษณะ การพันเส้นลวดตัวนำแตกต่างกัน ทำให้ตัวเหนี่ยวนำแตกต่างกัน เรียกว่าขดลวดหรือคอยล์

(Coil) การพันจำนวนรอบของตัวเหนี่ยวนำมีผลต่อความเหนี่ยวนำ (Inductance) ในตัวเหนี่ยวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้น พันจํานวนรอบน้อยความเหนี่ยวนําน้อย พันจํานวนรอบมากความเหนี่ยวนํามาก จํานวนรอบยังมีผลต่อปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วย จํานวนรอบน้อย สนามแม่เหล็กเกิดน้อย จํานวนรอบมาก สนามแม่เหล็กเกิดมาก

เมื่อนําเส้นลวดตัวนํามาพันเป็นขด จะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนําก่อเกิดการเสริมแรงกัน เกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้นและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น

หลักการทํางานของตัวเหนี่ยวนําใช้หลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทําให้เกิดการเหนี่ยวนําขึ้น

2.5.1 การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนํา

การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนํา เรียกตามโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนํา ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยขดลวดพันรอบแกน ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ, แกนเหล็ก, หรือแกนเฟอร์ไรท์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนําไฟฟ้า แบ่งออกได้เป็น

- 1) ตัวเหนี่ยวนําแกนอากาศ (Air Core Inductor)
- 2) ตัวเหนี่ยวนําแกนผงเหล็กอัด (Powdered - Iron Core Inductor)
- 3) ตัวเหนี่ยวนําแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor)
- 4) ตัวเหนี่ยวนําแกนทอรอยด์ (Toroidal Core Inductor)
- 5) ตัวเหนี่ยวนําแกนเหล็กแผ่น (Laminated - Iron Core Inductor)

2.5.1.1 ตัวเหนี่ยวนําแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor)

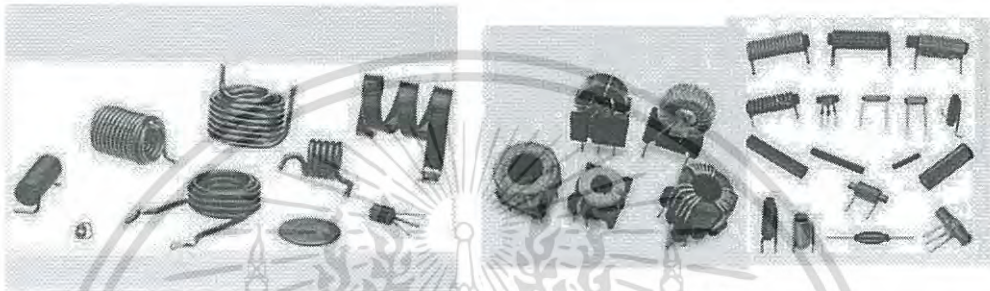
ตัวเหนี่ยวนําแกนเฟอร์ไรต์ เป็นตัวเหนี่ยวนําที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทําด้วยเฟอร์ไรต์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์มีความแตกต่างกันหลายอย่าง เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับแมงกานีส แมกนีเซียมกับทองแดง นิกเกิลกับสังกะสี และแมงกานีสกับสังกะสี เป็นต้น แต่ละชนิดของเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนําแตกต่างกัน ข้อดีของตัวเหนี่ยวนําแกนเฟอร์ไรต์ คือ สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง

2.5.1.2 ตัวเหนี่ยวนําแกนทอรอยด์ (Toroidal Core Inductor)

ตัวเหนี่ยวนําแกนทอรอยด์ เป็นตัวเหนี่ยวนําที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทําด้วยผลเหล็กชนิดอัดแน่น หรือเฟอร์ไรต์ โดยสร้างขึ้นเป็นรูปวงแหวน ขดลวดถูกพันรอบแกนทอรอยด์โดยรอบ ข้อดีของการใช้แกนทอรอยด์ คือ เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอก และสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ไม่เข้ามารบกวน สามารถทําให้ตัวเหนี่ยวนําแบบนี้มีความเหนี่ยวนําสูงในขนาดที่สร้างได้เล็กลง นิยมนําไปใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงที่ต้องการหาค่าความเหนี่ยวนําสูงและมีสนามแม่เหล็กรบกวนต่ำ

2.5.2 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีหลายแบบหลายขนาด วัสดุที่ใช้ทำแทนที่นิยมนักคือ แกนอากาศ ,แกนเหล็ก และแกนเฟอร์ไรต์ ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติ ตัวเหนี่ยวนำนี้ ทำมาจากขดลวดทองแดง แกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้งสองข้าง รูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาวแบบทรงกระบอก มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น โซลินอยด์, เซอร์เฟสเมาส์, โซ๊ค, ทอร์รอยด์ และแบบแถบสี ฯลฯ เป็นต้น



รูปที่ 2.17 แสดงตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำถูกกำหนดโดย 4 ปัจจัย ดังนี้

1) จำนวนรอบของขดลวด

ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้นดังแสดงในรูป สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วยสนามแม่เหล็ก ปริมาณมากนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำ ที่เรียกว่า "Counter EMF หรือ Back EMF" และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

$$L \propto N$$

2) พื้นที่ของขดลวด

ถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใดๆ ดังแสดงในรูป จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$L \propto A$

3) ความยาวของขดลวด

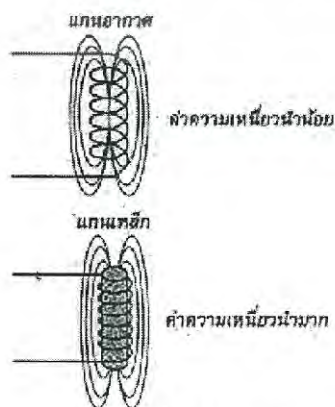
ถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบ ขยายพื้นที่ออก (นั่นคือความยาวของขดลวดเพิ่มขึ้น) ดังแสดงในรูป ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลงในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้น (ความยาวของขดลวดสั้นลง) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด

$$L \propto \frac{1}{l}$$

4) วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด

ตัวเหนี่ยวนำส่วนมากมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวกนิกเกิล โคบอลต์ เหล็กเฟอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าความซาบซึมได้ จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ โดยถ้าค่าความซาบซึมได้ของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังแสดงในตารางแสดงตัวอย่างของวัสดุหลายชนิดที่นำมาใช้ทำแกน

$$L \propto \mu$$



ค่าความซาบซึมได้ของวัสดุชนิดต่างๆ	
วัสดุ	ค่าความซาบซึมได้ (μ)
อากาศ หรือสุญญากาศ	1.26×10^{-6}
นิกเกิล	8.28×10^5
โคบอลต์	7.56×10^5
เหล็กทอ	1.1×10^4
เหล็กแท่ง	5.56×10^4
แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	6.9×10^3
เหล็กซิลิกอน	8.8×10^3
เฟอร์ไรต์	0.126
ซูเปอร์มาลอย	1.26

รูปที่ 2.18 แสดงค่าความซาบซึมได้ของวัสดุชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 สูตรการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

จากปัจจัยทั้ง 4 ประการที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงสามารถนำมาเขียนเป็นสูตรการคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำได้ดังนี้

$$L = \frac{N^2 \times A \times \mu}{l}$$

โดยที่ L = ค่าความเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี่

N = จำนวนของขดลวด

A = พื้นที่ของขดลวด มีหน่วยเป็นตารางเมตร

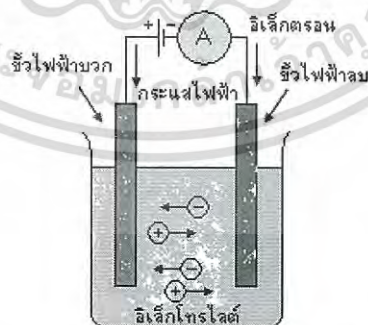
μ = ค่าความซาบซึมได้

l = ความยาวของวัสดุที่นำมาทำแกน มีหน่วยเป็นเมตร

2.6 การนำไฟฟ้า (Conductivity)

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางหลายๆชนิด เรียกสมบัติของตัวกลางที่ยอมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านได้ว่า “ตัวนำไฟฟ้า” ขณะที่มีการเคลื่อนที่ในตัวนำแสดงว่า “มีการนำไฟฟ้า”

2.6.1 การนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.19 แสดงการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีลักษณะดังนี้

- 1) อิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้
- 2) อิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายของกรด เบส หรือ เกลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) การนำไฟฟ้าในอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เกิดได้โดยการจุ่มแผ่นโลหะ 2 แผ่น ลงในอิเล็กทรอนิกส์ แล้วต่อเข้ากับขั้วของแบตเตอรี่ พบว่าแผ่นโลหะทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้านลบ สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและขั้วไฟฟ้านลบ จะมีผลทำให้อิเล็กทรอนิกส์แตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ไอออนบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้านลบและไอออนลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก แสดงว่ากระแสไฟฟ้าในอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าบวก (ไอออนบวก) และประจุไฟฟ้านลบ (ไอออนลบ)

2.6.2 ความนำไฟฟ้า (Conductance: G)

ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของตัวนำ มีค่าเท่ากับค่าส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำ นั่นคือ

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \quad \text{โดยที่} \quad R = \frac{\rho l}{A}$$

มีหน่วยเป็น (โอห์ม)⁻¹ หรือ ซีเมนส์ (S)

2.6.3 สภาพนำไฟฟ้า

คือ ความสามารถในการนำไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้า คือ ส่วนกลับของสภาพต้านทานของสารนั้น

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

มีหน่วยเป็น (โอห์ม.เมตร)⁻¹, โมห์ (mho) หรือ ซีเมนส์ต่อเมตร (S/m)

สภาพการนำไฟฟ้า เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของน้ำ โดยจะบ่งบอกถึงความสามารถของการนำกระแสไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้านี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นทั้งหมดของสารที่มีประจุที่ละลายอยู่ในน้ำ อุณหภูมิของน้ำในขณะที่ทำการตรวจวัดชนิดของสารที่มีประจุแต่ละชนิด การมีอยู่ของสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอนไอออนของคลอไรด์ ไนเตรต ซัลเฟต และฟอสเฟต (แอนไอออนคือไอออนที่มีประจุลบ) หรือ แคทไอออนของโซเดียม แมกนีเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม (แคทไอออนคือไอออนที่มีประจุบวก)

นอกจากนี้การนำไฟฟ้าในแหล่งน้ำนั้นยังได้รับผลกระทบโดยตรงจากลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่แหล่งน้ำนั้นไหลผ่านอีกด้วย โดยน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่หินแกรนิตมักจะมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ เพราะหินแกรนิตประกอบด้วยสารที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนและน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินจะมีการนำไฟฟ้าที่สูง เพราะว่ามีสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออน น้ำที่ถูกล่อยลงสู่แหล่งน้ำอาจส่งผลต่อไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการนำไฟฟ้าทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำตังนั้น ความล้นเหลวของการจัดการระบบท่อน้ำตัง จะส่งผลให้การนำไฟฟ้ามีค่าสูงเนื่องจากในน้ำตังมีคลอไรด์ ฟอสเฟต และไนเตรต ส่วนการปนเปื้อนของน้ำมันจะส่งผลให้การนำไฟฟ้ามีค่าต่ำ

หน่วยพื้นฐานที่ใช้วัดการนำไฟฟ้า คือ โหมห์หรือซีเมนส์ ค่าการนำไฟฟ้าวัดเป็น ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตรหรือไมโครโหมห์ต่อเซนติเมตรโดยทั่วไป ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ

การวัดค่าการนำไฟฟ้าทำได้โดยการใช้หัววัด (probe) และเครื่องวัด (meter) โดยการใส่แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วในหัววัดซึ่งจุ่มลงไปในการลดลงของแรงดันไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการต้านของน้ำจะนำไปใช้คำนวณค่าการนำไฟฟ้าต่อเซนติเมตรเครื่องวัดจะแปลงค่าเป็นไมโครโหมห์ต่อเซนติเมตร และแสดงผลให้ผู้ตรวจวัดทราบ

2.6.4 ประโยชน์ของการหาค่าสภาพนำไฟฟ้า

สภาพนำไฟฟ้านี้มีประโยชน์ในการประเมินหรือคาดคะเนปริมาณสารบางชนิด หรือคุณภาพของน้ำได้หลายประการ เช่น

- 1) สามารถใช้ในการตรวจสอบความผิดปกติของน้ำ ในกรณีที่ได้รับผลกระทบจากการประกอบกิจการอุตสาหกรรม ที่มีการระบายน้ำตังที่มีสารที่มีประจุอยู่มาลงสู่แหล่งน้ำ
- 2) ใช้ในการคาดคะเนปริมาณของแข็งทั้งหมดในตัวอย่งน้ำ กรณืที่ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็ง ทั้งหมด และสภาพนำไฟฟ้าแล้ว
- 3) ใช้ในการคาดคะเนผลของประจุไฟฟ้าต่างๆ ที่มีผลต่อสมดุลเคมี ผลทางกายภาพที่มีต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ และผลกระทบต่ออัตราการกักตัวของสารเคมีต่างๆ
- 4) ใช้ในการประเมิน หรือตรวจความบริสุทธิ์ของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่างๆ เช่น การกลั่น การกรอง หรือ การบำบัด แบบออสโมซิสผันกลับ (reversed osmosis) เป็นต้น เพื่อให้ทราบว่าน้ำนั้นมีคุณภาพเหมาะสม ที่จะใช้ตาม วัตถุประสงค์หรือไม่
- 5) ใช้ในการคำนวณคาดคะเนจำนวนสารประกอบไอออนิก ที่จะใช้ในการตกตะกอน และการทำให้สารละลาย เป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

โครงสร้างและหลักการทำงานของวงจร

3.1 โครงสร้างของวงจร

ประกอบด้วยสองส่วนใหญ่ๆ คือ วงจรของสนามแม่เหล็กและการนำไฟฟ้าของสารละลาย และ วงจรขยายผลต่างแรงดัน

3.1.1 วงจรของสนามแม่เหล็กและการนำไฟฟ้าของสารละลาย

3.1.1.1 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ คือ แกนทรงกระบอก (เฟอร์ไรต์) และแกนรูปวงกลม (ทอรอยด์) โดยลวดทองแดงที่ใช้พันแกนทั้งสองนั้นเป็นชนิดเดียวกัน มีความยาวเท่ากันคือ 10 เมตร



รูปที่ 3.1 แสดงขดลวดแกนทรงกระบอก (เฟอร์ไรต์)



รูปที่ 3.2 แสดงขดลวดแกนรูปวงกลม (ทอรอยด์)

3.1.1.2 โพรบ

สำหรับการทดลองนี้เราจะใช้โพรบที่ทำจากสแตนเลส 304 โพรบที่ใช้จะทำหน้าที่ถ่ายเทอิเล็กทรอนิกส์

สแตนเลส 304 เป็นสแตนเลสในตระกูลออสเทนนิติก มีโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 9 เปอร์เซ็นต์ เป็นสแตนเลสที่ The American Iron and Steel Institute (AISI) แนะนำให้ใช้เป็นพื้นผิวที่สัมผัสอาหาร (food contact surface)



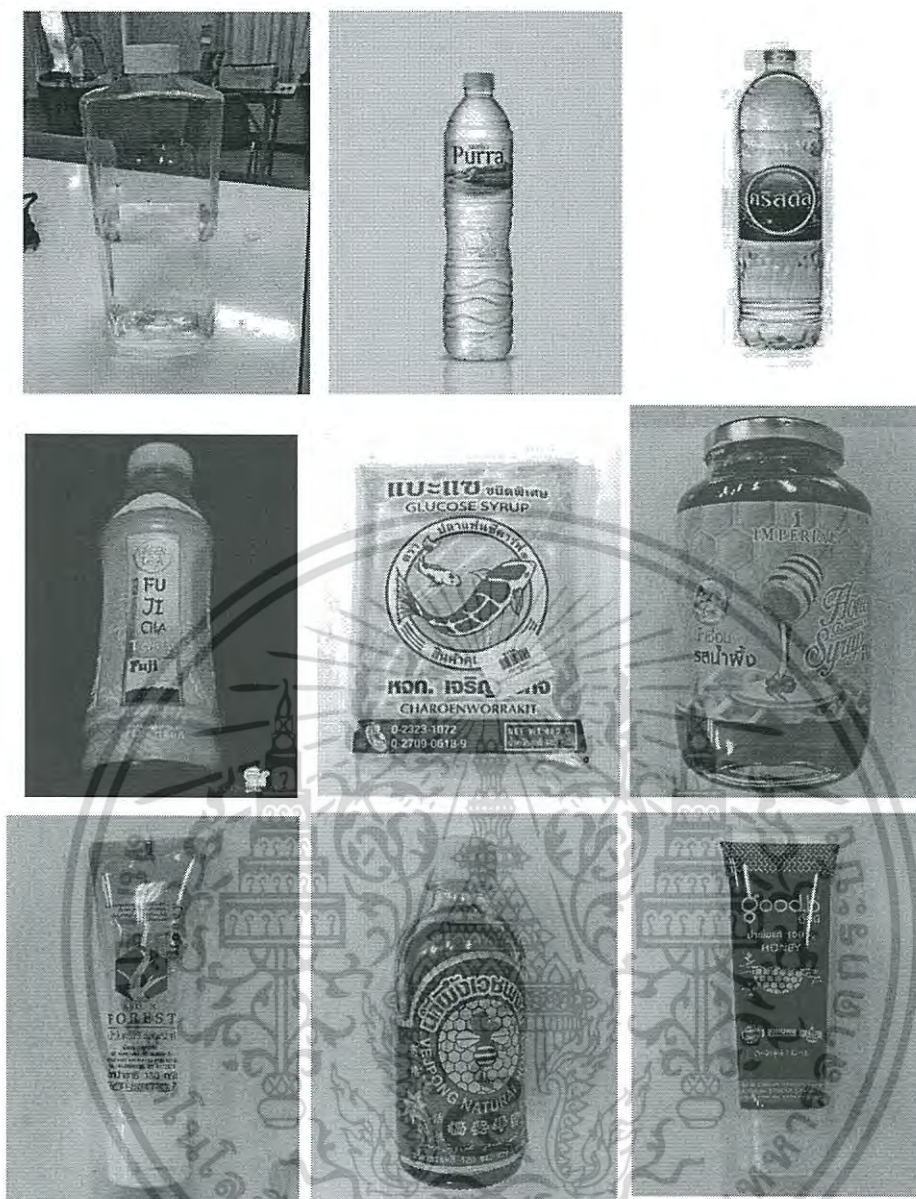
รูปที่ 3.3 แสดงโพรบที่ทำจากสแตนเลส 304

3.1.1.3 ของเหลวตัวอย่าง

เรานำหลักการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มาใช้ โดยจะป้อนการเสไฟฟ้าผ่านโพรบทั้งสองแท่งที่จุ่มในของเหลว ของเหลวที่นำมาทดลองได้แก่

- 1) น้ำ DI
- 2) น้ำแร่ Purra
- 3) น้ำดื่ม Crystal
- 4) น้ำประปา
- 5) ชาเขียวฟูจิ
- 6) น้ำผึ้งแท้ตรา Sun Forest
- 7) น้ำผึ้งแท้ตราเวซพงส์
- 8) น้ำผึ้งแท้ตรา Good.B
- 9) Glucose Syrup
- 10) น้ำผึ้งเทียมตรา Imperial

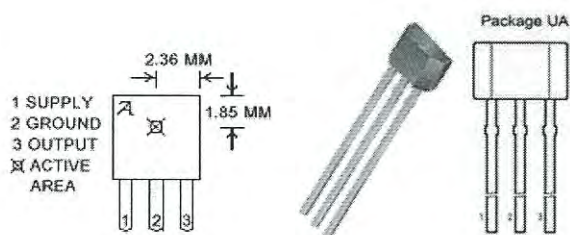
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงของเหลวตัวอย่างที่ใช้ทดลอง

3.1.2 วงจรจัดระดับเงื่อนไขของสัญญาณ (Signal conditioning)

3.1.2.1 ฮอลเอฟเฟคเซนเซอร์



รูปที่ 3.5 แสดงรูปร่างของฮอลเอฟเฟคเซนเซอร์ A1302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

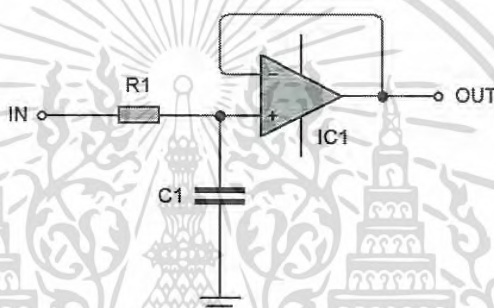
ตัวรับรูดอลต์เป็นวงจรรวม มีขนาดและลักษณะดังรูป และมีสมบัติดังนี้

ก) input voltage 4.5-6 V

ข) offset voltage 2.5 V (ประมาณ)

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และ ต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา 2 และขา 3 โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เรียกว่า offset voltage ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับโวลเตจของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อกับขา 1 และขา 2 แต่จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

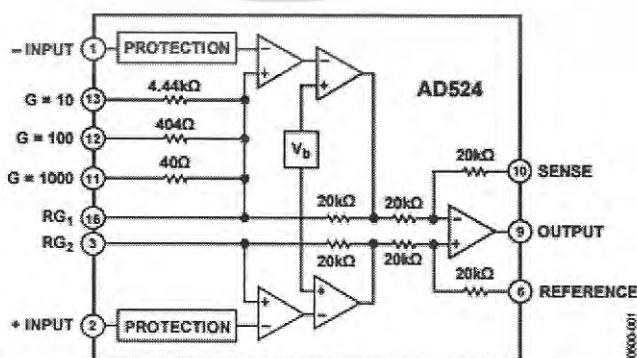
3.1.2.2 วงจรรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรรองความถี่ต่ำ

วงจรรองความถี่ คือวงจรที่เลือกความถี่ให้ผ่านไปได้ โดยใช้คุณสมบัติของ RLC ที่มีการตอบสนองต่อความถี่ต่างกัน โดยวงจรรองความถี่ต่ำผ่านจะตัดความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดทิ้งไป (ความถี่ที่กำหนดจะถูกเรียกว่าความถี่ตัดผ่าน)

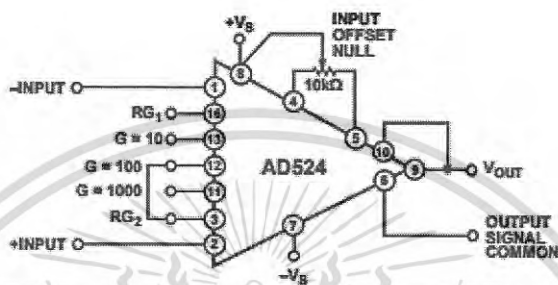
3.1.2.3 Instrumentation Amplifier (AD524)



รูปที่ 3.7 แสดงวงจรรภายในของ Instrumentation Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของ Instrumentation Amplifier เป็นการนำค่าสัญญาณอินพุตทั้ง 2 ค่า มาเปรียบเทียบกัน โดยจะทำการขยายผลต่างแรงดันที่เกิดจากการเปรียบเทียบดังกล่าว ซึ่งจะมีขนาดของ Gain เท่ากับ 10, 100 และ 1000 เท่า ในวงจรที่เราใช้ทดลองนั้น จะเลือกใช้ขนาดของ Gain เท่ากับ 10 ข้อดีของ Instrumentation Amplifier คือ มีความเที่ยงตรงสูง มีความเป็นเชิงเส้นสูง ป้องกันสัญญาณรบกวนได้ดี มีค่า Offset Voltage ต่ำ มีค่า CMRR สูงถึง 120 dB และมีการป้องกันการลัดวงจรในขาอินพุตทั้งสอง

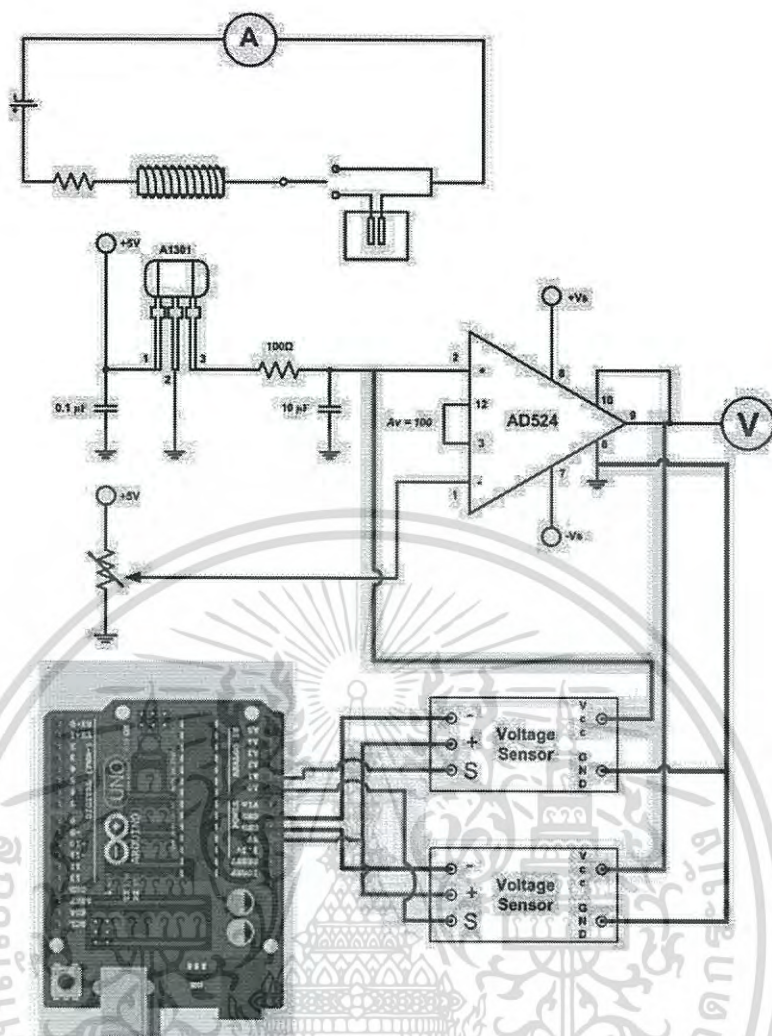


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรของ AD524

3.2 หลักการทำงานของวงจร

การทำงานของหลักของวงจรจะเป็นวงจรขยายแรงดันจากผลต่างระหว่างขา 1 (-) และขา 2 (+) ของ Instrumentation Amplifier เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงขึ้น ซึ่งกำลังขยายที่ใช้คือ 10 เท่า ($G = 10$) โดยที่ขา 2 (+) จะรับสัญญาณมาจากฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ โดยจะตรวจวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดในวงจรของสนามแม่เหล็ก โดยสัญญาณที่ออกจากขา 3 ของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะผ่านวงจรรองความถี่ต่ำก่อนสัญญาณจะเข้าขา 2 ของ Instrumentation Amplifier ส่วนขา 1 (-) ของ Instrumentation Amplifier จะรับสัญญาณมาจากแหล่งจ่าย 5 โวลต์ที่ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ ซึ่งตัวต้านทานปรับค่าได้นี้จะใช้ในการปรับค่าเริ่มต้น (set point) ที่เอาต์พุตของ Instrumentation Amplifier ตามที่ต้องการ

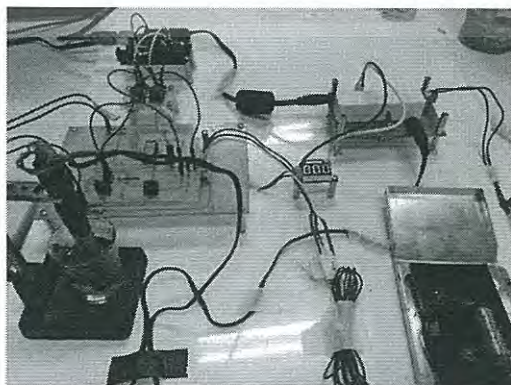
จากนั้นจะเปรียบเทียบผลต่างแรงดันระหว่างขา 1 และ 2 ของ Instrumentation Amplifier แล้วขยายผลต่างแรงดันที่ได้ด้วยอัตราขยาย 10 เท่าจากนั้นจะนำเอาต์พุตที่ได้เข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเราจะใช้ Arduino UNO R3 เอาต์พุตที่ออกจากขา 3 ของ ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์และขา 9 ของ Instrumentation Amplifier จะนำไปเข้า Arduino Standard Voltage Sensor Module เพื่อใช้วัดแรงดันไฟฟ้าทางขา Analog ของ Arduino



รูปที่ 3.9 แสดงรูปวงจรรวมทั้งหมด

3.3 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

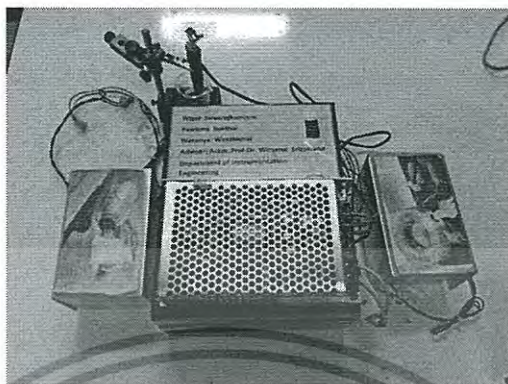
จากรูปวงจรรวมในหัวข้อที่ผ่านมา นำมาแสดงเป็นรูปวงจรถริงที่ใช้ในการทดลองได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 แสดงรูปวงจรถริงที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ชิ้นงานสำเร็จ



รูปที่ 3.11 แสดงชิ้นงานสำเร็จ

3.5 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.12 แสดงเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก EXTECH SDL 900

เครื่องมือนี้ใช้วัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กที่สร้างจากแกนชนิดต่างๆ ซึ่งจะมีหน่วยการวัดเป็นเกาส์หรือมิลลิเทสลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองวัดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขา 2 และ 9 ของ Instrumentation Amplifier จะทำการแฉมปลิงค่า โดยใช้ Arduino UNO R3 จะใช้ 2 แกนเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กคือแกนรูปวงกลม (ทอรอยด์) และแกนทรงกระบอก (เฟอไรต์)

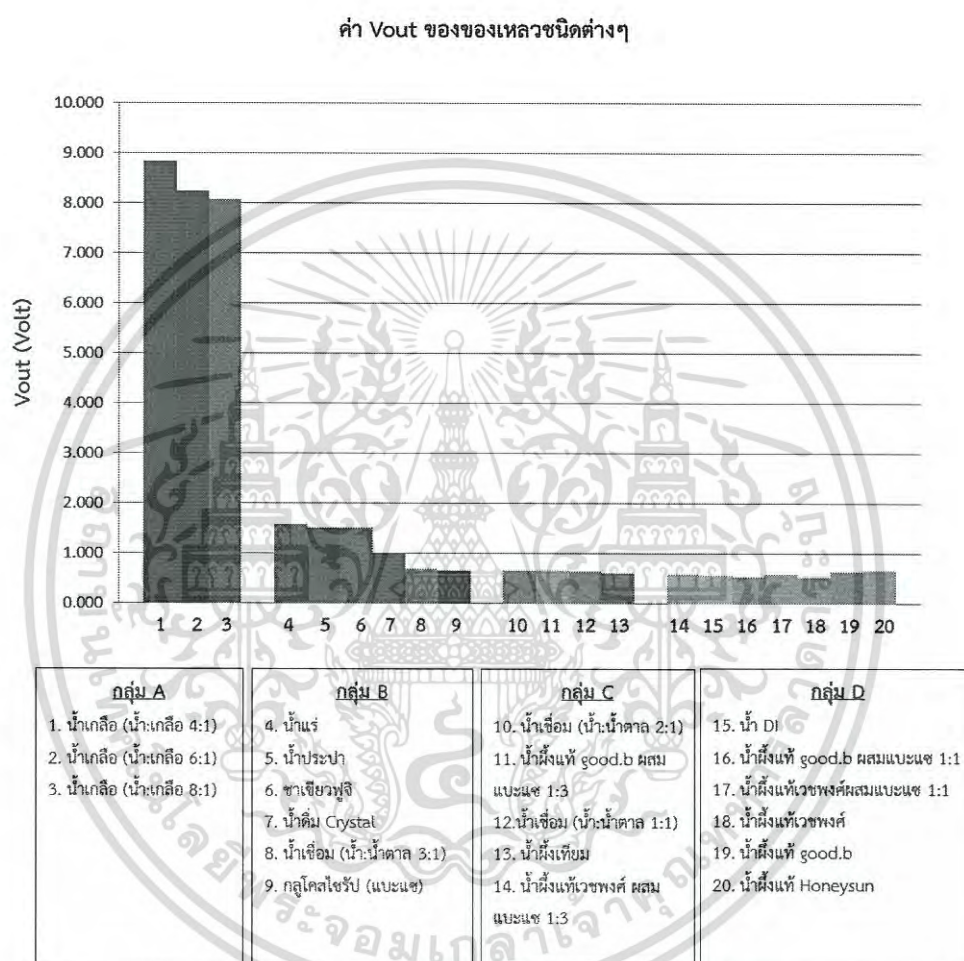
จากค่าต่างๆที่วัดได้ เราจะจัดประเภทของของเหลวเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. กลุ่ม A กลุ่มที่มีความนำไฟฟ้าสูงมาก คือของเหลวที่มีความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 ถึง 8.8 โวลต์ แสดงถึงจำนวนไอออนที่แตกตัวในน้ำได้เยอะมาก ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวมีค่าสูงมาก
2. กลุ่ม B กลุ่มที่มีความนำไฟฟ้าสูง คือของเหลวที่มีความต่างศักย์ตั้งแต่ 0 ถึง 1.5 โวลต์ แสดงถึงจำนวนไอออนและแร่ธาตุที่แตกตัวในน้ำได้เยอะ ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวมีค่าสูง
3. กลุ่ม C กลุ่มที่มีความนำไฟฟ้าปานกลาง คือของเหลวที่มีความต่างศักย์ไม่เกิน 1 โวลต์ แสดงถึงจำนวนไอออนที่แตกตัวในน้ำน้อยและเป็นของเหลวที่มีความหนืด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของของเหลวลดลง
4. กลุ่ม D กลุ่มที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ คือของเหลวที่มีความต่างศักย์ไม่เกิน 1 โวลต์ แสดงถึงแทบจะไม่มีไอออนที่แตกตัวในน้ำได้ผสมอยู่ และเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของของเหลวลดลงมาก ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวจึงมีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 9 ของ Instrumentation Amplifier (AD524) (V_{out} : Volt)

4.1.1 แกนทรงกระบอก

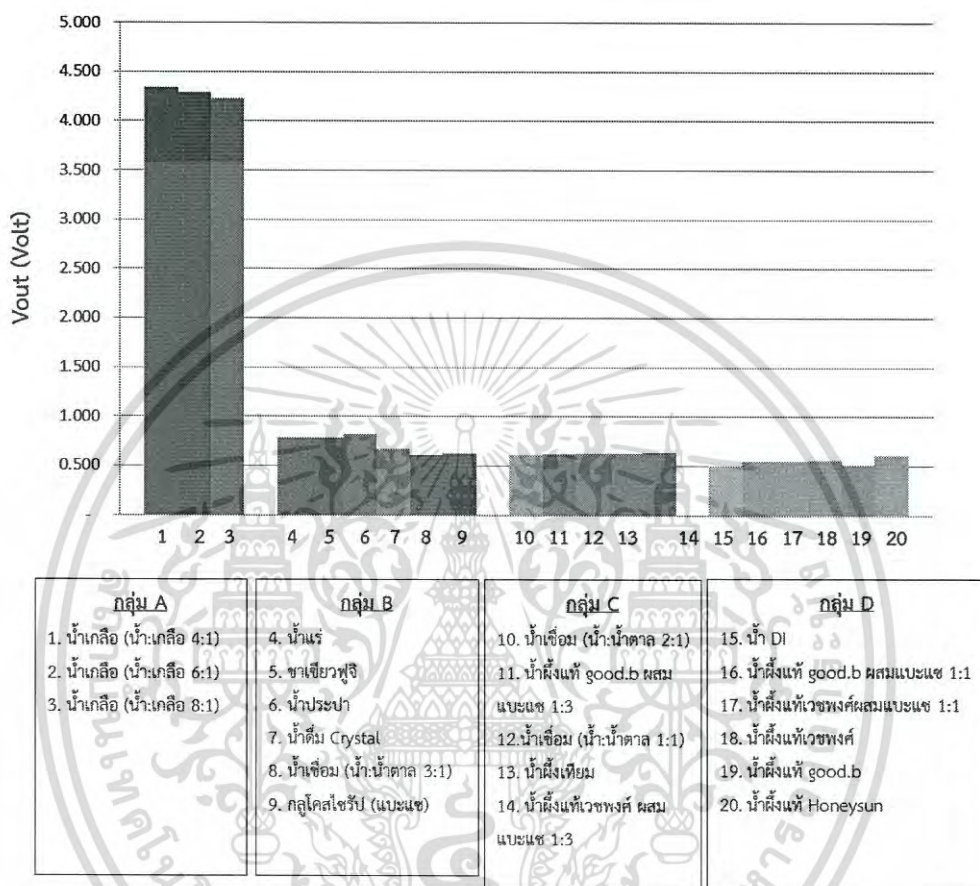


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 9 ของ Instrumentation Amplifier (AD524) ของแกนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 แกนรูปวงกลม

ค่า Vout ของของเหลวชนิดต่างๆ



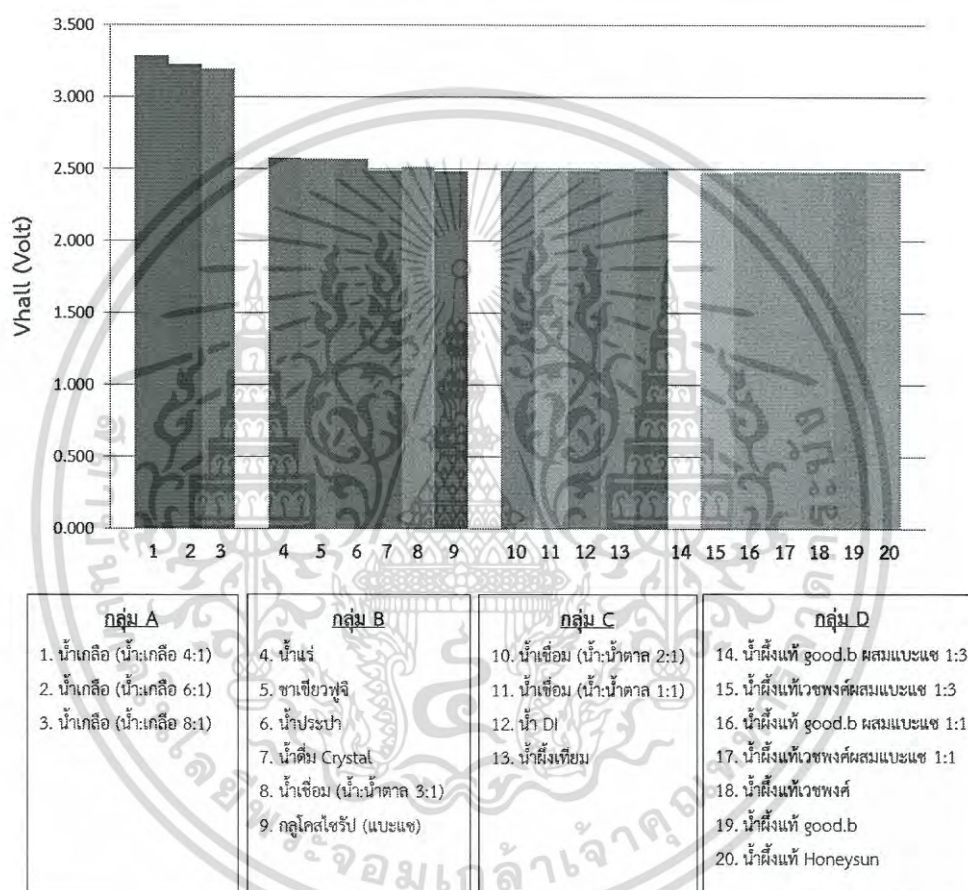
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 9 ของ Instrumentation Amplifier (AD524) ของแกนรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 ของ Instrumentation Amplifier (AD524) (V_{hall} : Volt)

4.2.1 แกนทรงกระบอก

ค่า V_{hall} ของของเหลวชนิดต่างๆ

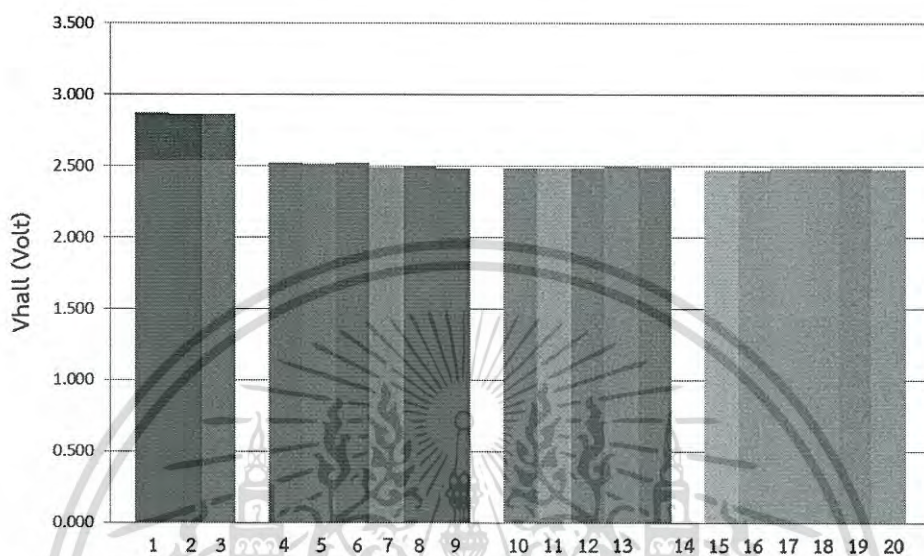


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 ของ Instrumentation Amplifier (AD524) ของแกนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แกนรูปวงกลม

ค่า Vhall ของของเหลวชนิดต่างๆ



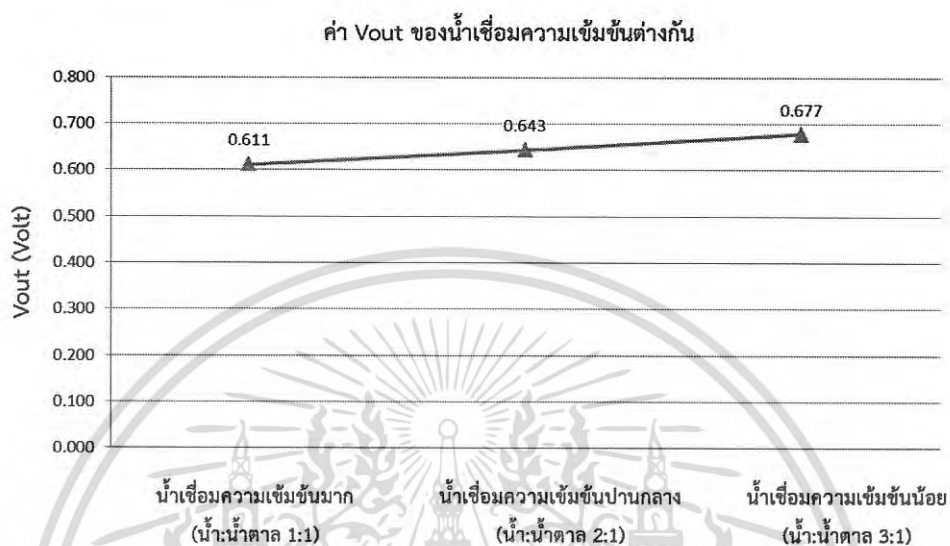
กลุ่ม A	กลุ่ม B	กลุ่ม C	กลุ่ม D
1. น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 4:1)	4. น้ำแร่	10. น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 2:1)	15. น้ำ DI
2. น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 6:1)	5. ชาเขียวฟูจิ	11. น้ำผึ้งแท้ good.b ผสม แยะแซ 1:3	16. น้ำผึ้งแท้ good.b ผสมแยะแซ 1:1
3. น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 8:1)	6. น้ำประปา	12. น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 1:1)	17. น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์ ผสมแยะแซ 1:1
	7. น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 3:1)	13. น้ำผึ้งเทียม	18. น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์
	8. น้ำดื่ม Crystal	14. น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์ ผสม แยะแซ 1:3	19. น้ำผึ้งแท้ good.b
	9. กลูโคสไซรัป (แยะแซ)		20. น้ำผึ้งแท้ Honeysun

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 ของ Instrumentation Amplifier (AD524) ของแกนรูปวงกลม

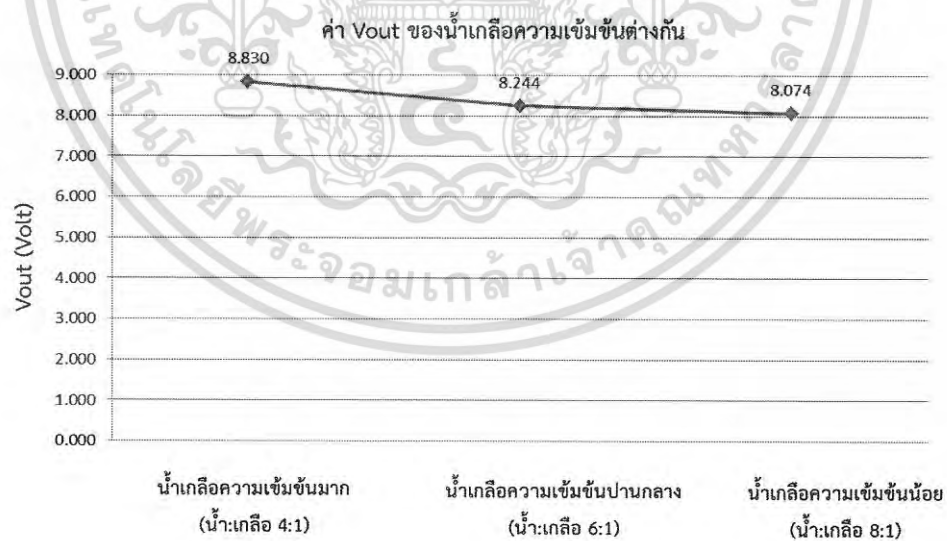
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 เปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นเป็นอัตราส่วนต่างๆ

4.3.1 แกนทรงกระบอก



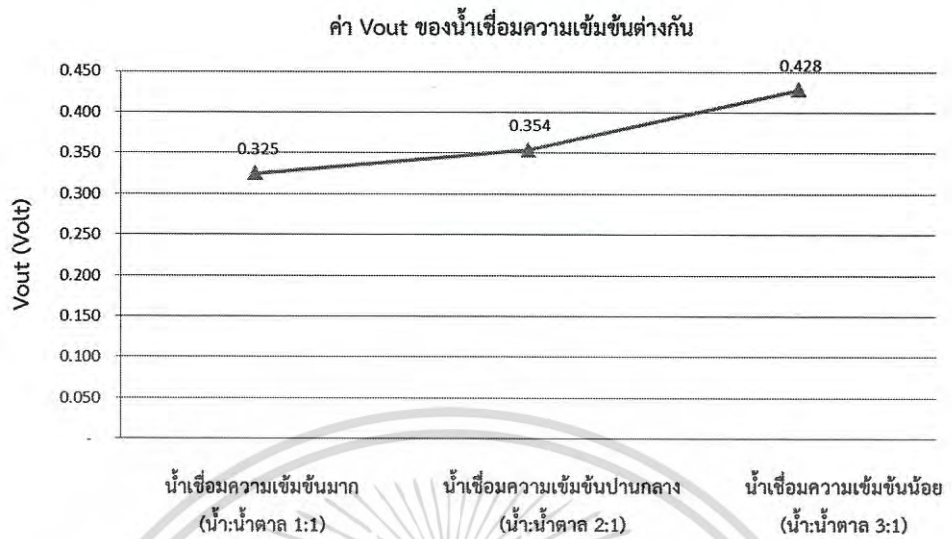
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า V_{out} ของน้ำเชื่อมความเข้มข้นต่างกันของแกนทรงกระบอก



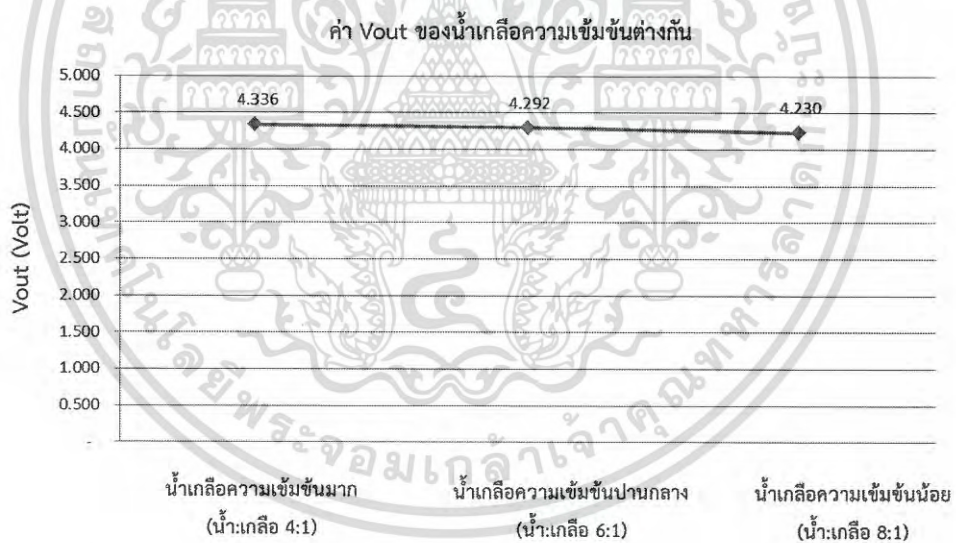
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า V_{out} ของน้ำเกลือความเข้มข้นต่างกันของแกนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แกนรูปวงกลม



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า V_{out} ของน้ำเชื่อมความเข้มข้นต่างกันของแกนรูปวงกลม

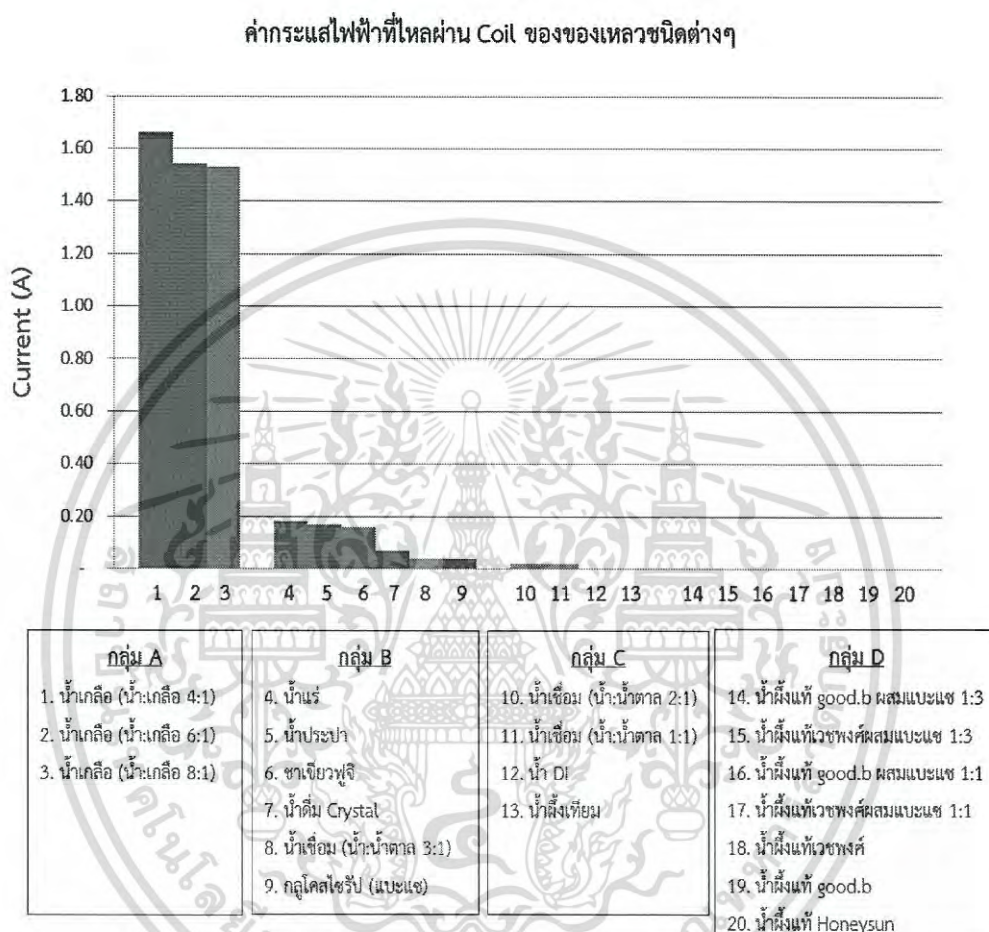


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่า V_{out} ของน้ำเกลือความเข้มข้นต่างกันของแกนรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด (I: Ampere)

4.4.1 แกนทรงกระบอก

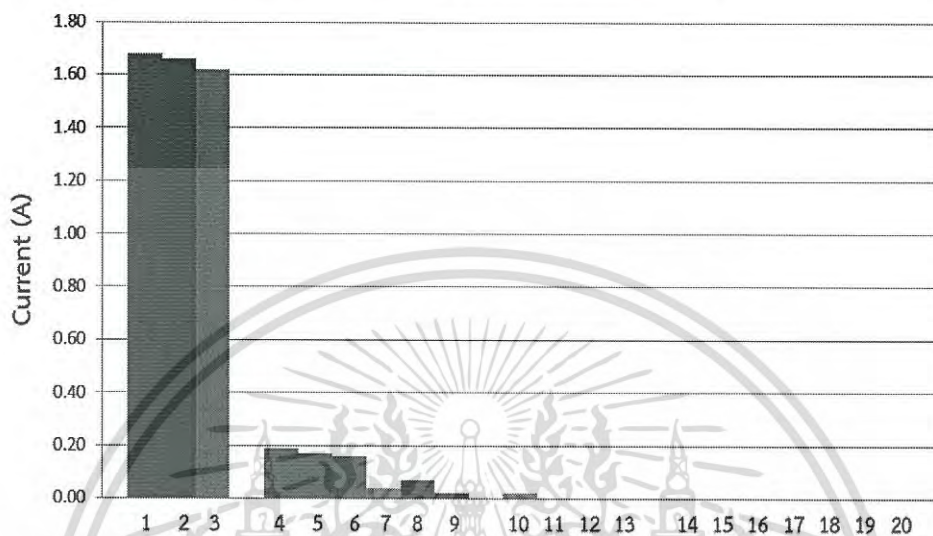


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของแกนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 แกนรูปวงกลม

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Coil ของของเหลวชนิดต่างๆ



กลุ่ม A	กลุ่ม B	กลุ่ม C	กลุ่ม D
1. น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 4:1)	4. น้ำแร่	10. น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 2:1)	14. น้ำผึ้งแท้ good.b ผสมเบเนช 1:3
2. น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 6:1)	5. ชาเขียวฟูจิ	11. น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 1:1)	15. น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์ผสมเบเนช 1:3
3. น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 8:1)	6. น้ำประปา	12. น้ำ DI	16. น้ำผึ้งแท้ good.b ผสมเบเนช 1:1
	7. น้ำดื่ม Crystal	13. น้ำผึ้งเทียม	17. น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์ผสมเบเนช 1:1
	8. น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 3:1)		18. น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์
	9. กูลิโคสไซรัป (เบเนช)		19. น้ำผึ้งแท้ good.b
			20. น้ำผึ้งแท้ Honeysun

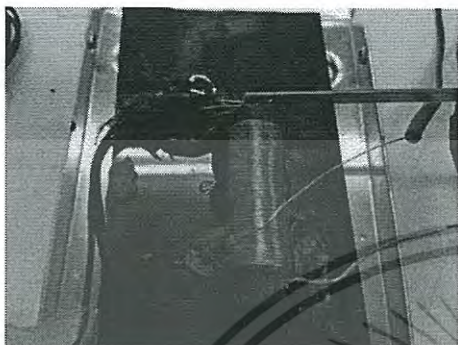
รูปที่ 4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของแกนรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

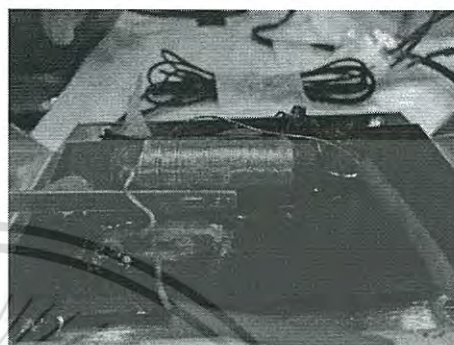
4.5 ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก

วิธีการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนทรงกระบอกแบบต่างๆ ดังนี้

วัดแกนแบบที่ 1 (South Pole)



วัดแกนแบบที่ 4 (Right Side)



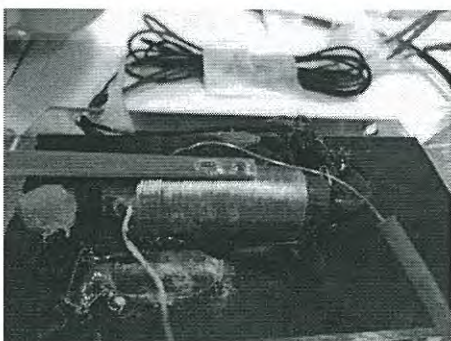
วัดแกนแบบที่ 2 (North Pole)



วัดแกนแบบที่ 5 (Left Side)



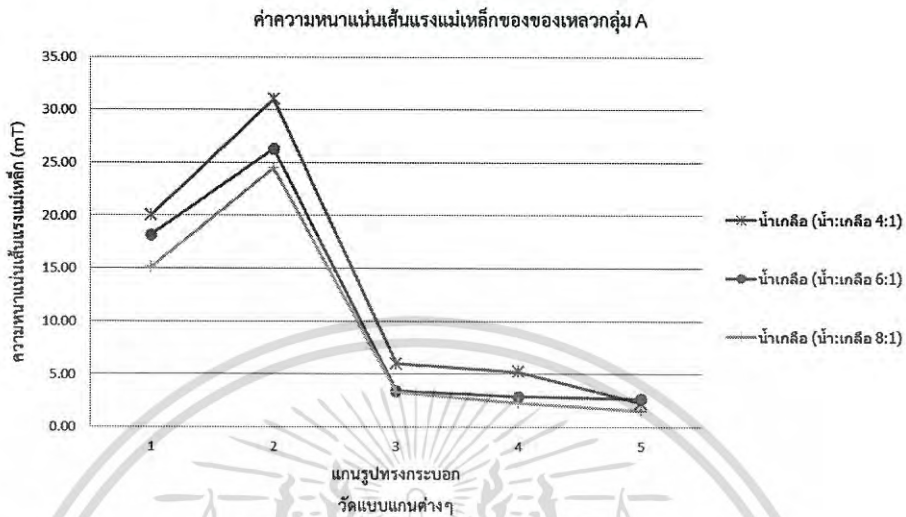
วัดแกนแบบที่ 3 (Top Side)



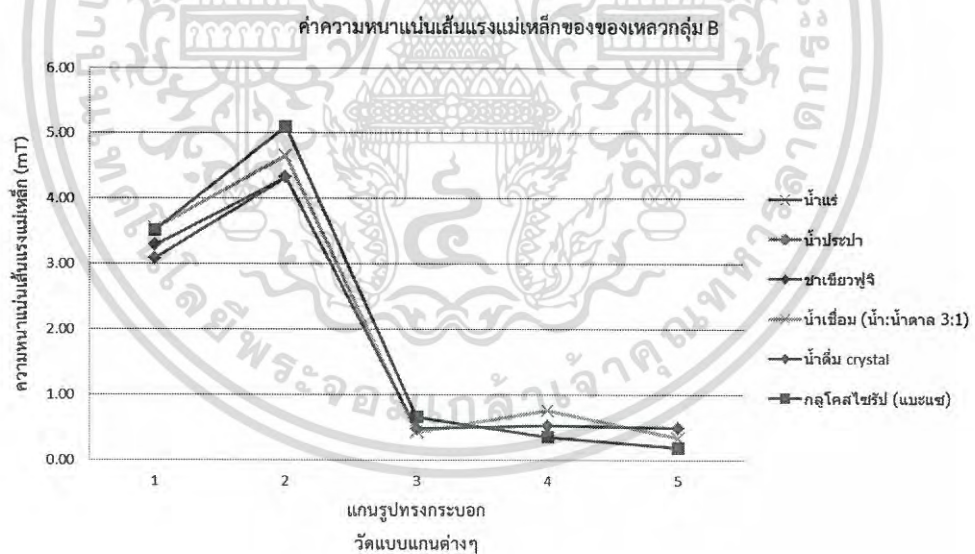
รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการวัดแกนทรงกระบอกแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 แกนทรงกระบอก

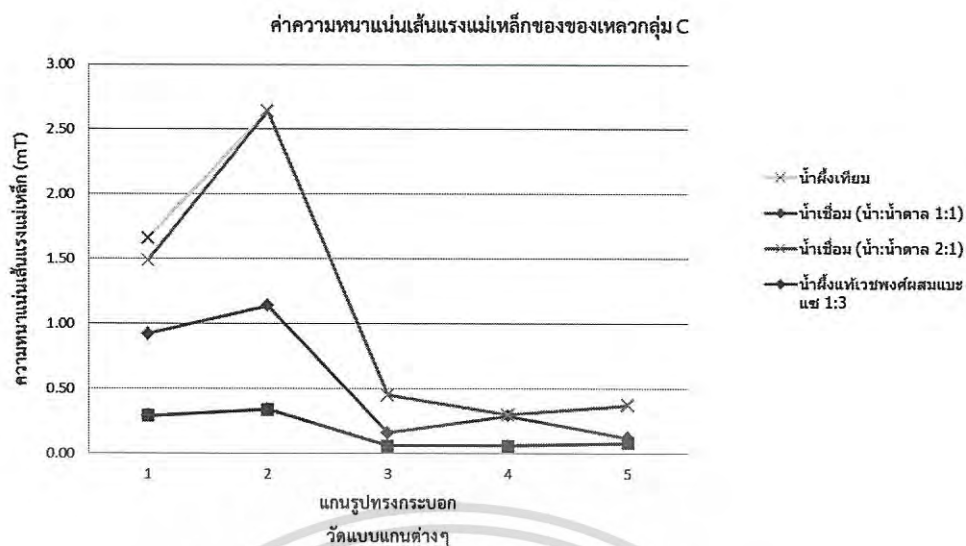


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม A ของแกนทรงกระบอก

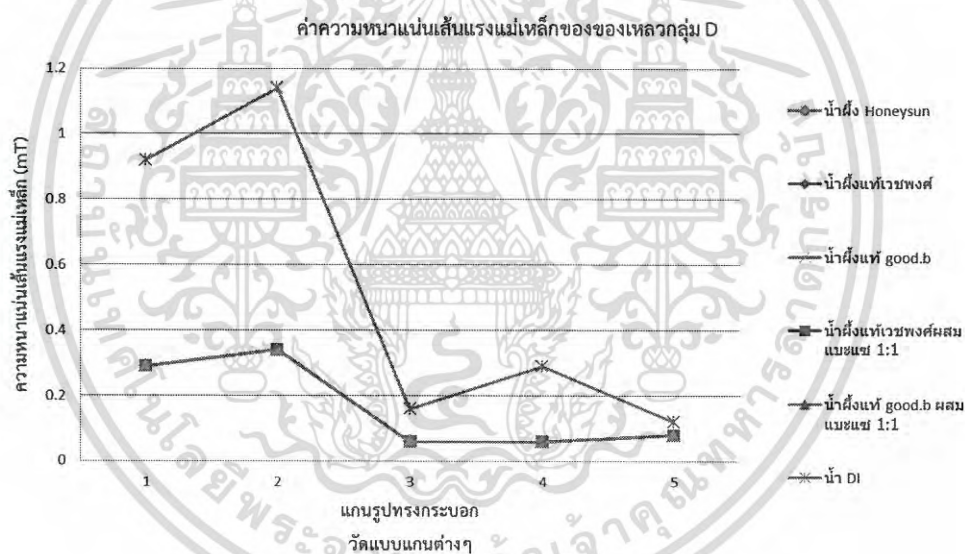


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม B ของแกนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม C ของแกนทรงกระบอก



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม D ของแกนทรงกระบอก

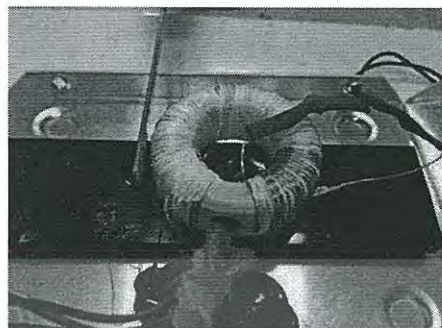
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนรูปวงกลมแบบต่างๆ ดังนี้

วัดแกนแบบที่ 1 (Front Side)



วัดแกนแบบที่ 3 (Side)



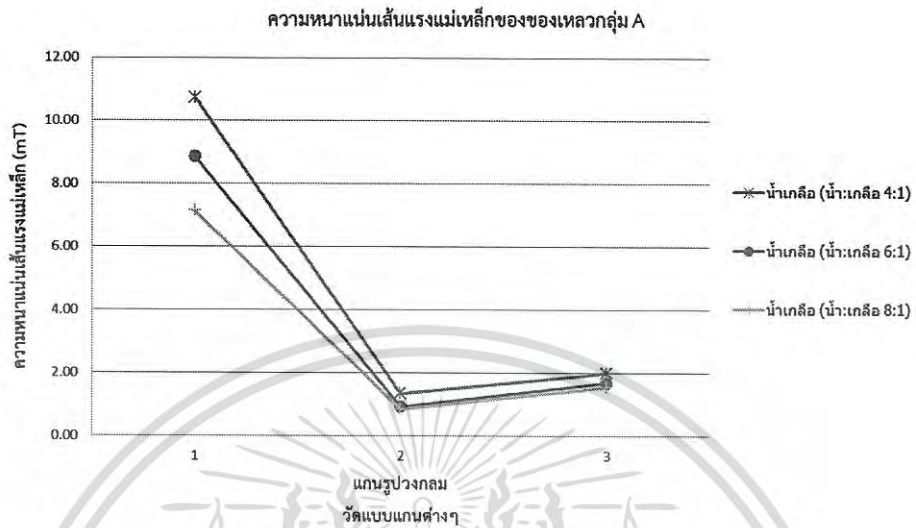
วัดแกนแบบที่ 2 (Center of core)



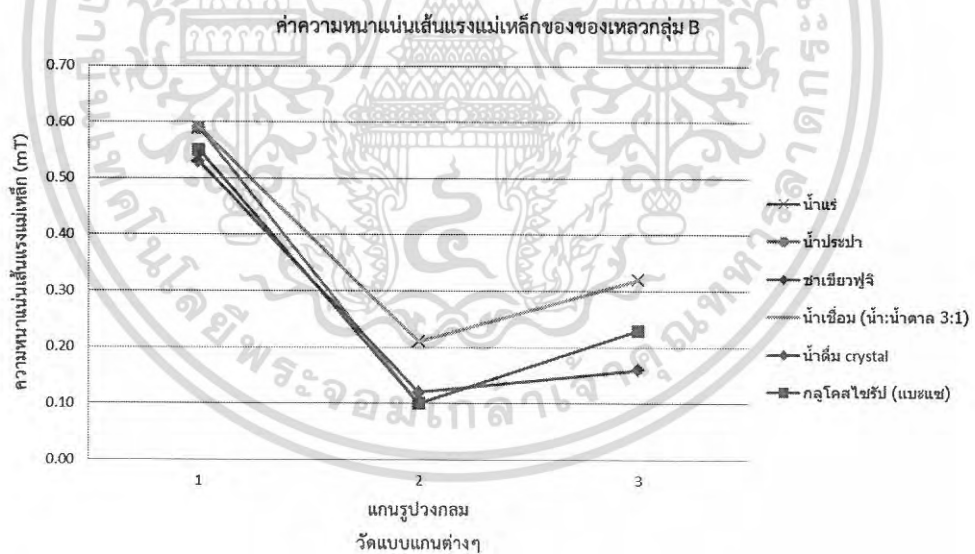
รูปที่ 4.16 แสดงวิธีการวัดแกนรูปวงกลมแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 แกนรูปวงกลม

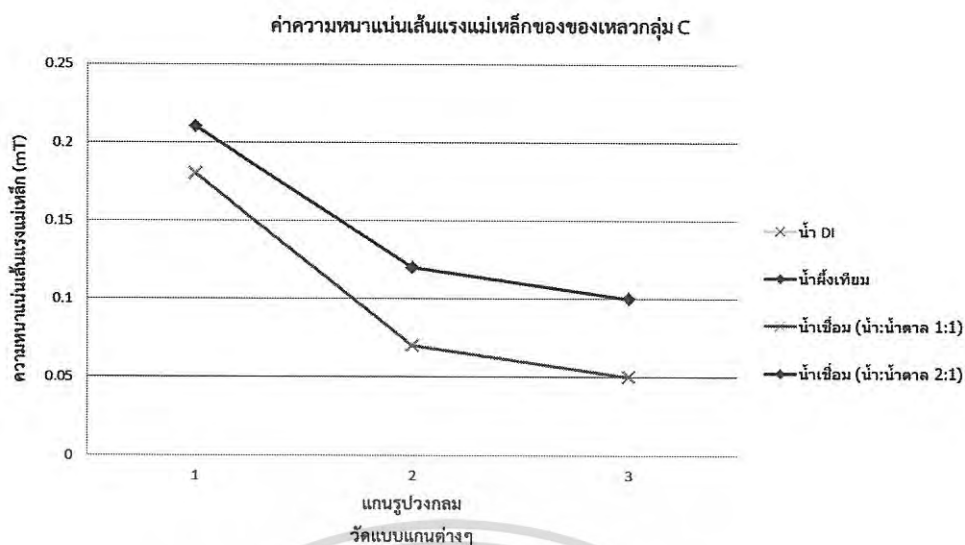


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม A ของแกนรูปวงกลม

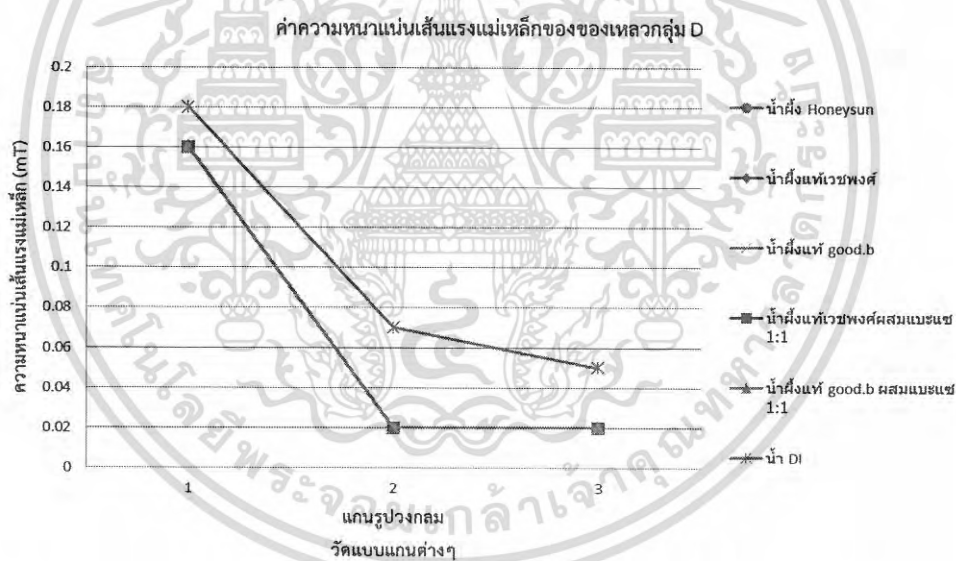


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม B ของแกนรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม C ของแกนรูปวงกลม



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของของเหลวกลุ่ม D ของแกนรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 คำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดโดยใช้วิธีทางสถิติ

หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความต่างศักย์จากขา Instrumentation Amplifier

แกนทรงกระบอก			แกนรูปวงกลม		
number of sampling	V _{hall} (V)	V _{out} (V)	number of sampling	V _{hall} (V)	V _{out} (V)
1	2.49	0.57	1	2.49	0.49
2	2.47	0.49	2	2.47	0.49
3	2.47	0.54	3	2.47	0.56
4	2.49	0.59	4	2.47	0.49
5	2.49	0.57	5	2.47	0.49
6	2.47	0.47	6	2.49	0.51
7	2.49	0.52	7	2.49	0.56
8	2.49	0.57	8	2.47	0.51
9	2.49	0.54	9	2.49	0.54
10	2.49	0.54	10	2.47	0.51
11	2.49	0.47	11	2.49	0.54
12	2.47	0.52	12	2.47	0.46
13	2.49	0.59	13	2.49	0.54
14	2.47	0.49	14	2.49	0.56
15	2.49	0.54	15	2.47	0.51
16	2.49	0.44	16	2.47	0.51
17	2.49	0.52	17	2.47	0.51
18	2.49	0.57	18	2.47	0.46
19	2.49	0.54	19	2.49	0.51
20	2.49	0.52	20	2.49	0.49
Average	2.479	0.530	Average	2.478	0.512
Standard deviation	0.0105	0.0417	Standard deviation	0.0102	0.0300

ตารางที่ 4.1 แสดงการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดโดยใช้วิธีทางสถิติ

จากตารางการคำนวณ จะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน V_{hall} ของแกนทรงกระบอกเท่ากับ 0.0105 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน V_{out} ของแกนทรงกระบอกเท่ากับ 0.0417 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน V_{hall} ของแกนรูปวงกลมเท่ากับ 0.0102 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน V_{out} ของแกนรูปวงกลมเท่ากับ 0.0300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 คำนวณหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้า มาตรฐาน

วิธีการแปลงจากค่าความต่างศักย์ที่ขา ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ เป็น สภาพการนำไฟฟ้า
จาก Data Sheet ของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ จะได้สมการ

$$B = \frac{|V_{hall} - V_{offset}|}{S}$$

B = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

V_{hall} = ความต่างศักย์ที่เอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ (V)

V_{offset} = ความต่างศักย์ set point ที่เอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ (V)

S = สัมประสิทธิ์ความไว (mV/G)

จาก data sheet ของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

$$S \text{ ที่อุณหภูมิ } 25^{\circ}\text{C} = 1.3 \text{ mV/G} = 13 \text{ V/T} ; \text{ที่ } 1 \text{ G} = 10^{-4}$$

จากสูตรความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $B = \mu H = \mu \frac{NI}{l}$

$$\text{จะได้ } I = \frac{Bl}{\mu N}$$

μ = ค่าซึมซาบสนามแม่เหล็ก

H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก

N = จำนวนรอบ

I = กระแสที่ไหลผ่านขดลวด

l = ความยาวของวงจรมแม่เหล็ก

4.7.1 แกนทรงกระบอก

Description	Variable	Formula	Value	Unit
Output voltage of Hall Effect Sensor	V_{hall}		2.479	Volt
คำนวณหาค่า flux density				
Flux density	B	$B = \frac{ V_{hall} - V_{offset} }{13}$	0.00069	Tesla
คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด				
Length of Magnetic circuit	l		0.037	meter
Number of Turns	N		298	turns
Permeability	μ	Initial Permeability = 2300, free space permeability = $4\pi \times 10^{-7}$	0.003	-
Current	I	$I = \frac{Bl}{\mu N}$	2.98E-05	Ampere
คำนวณหาค่าความต้านทานของของเหลว				
Resistance of liquid	R	$R = \frac{Vs - (R_1 + R_2)I}{I}$	5.38E+05	Ω
คำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว				
Conductance	G	$G = \frac{1}{R}$	1.86E-06	mho
คำนวณหาสภาพความนำไฟฟ้าของของเหลว				
Conductivity	σ	$\sigma = \frac{Gl}{A}$	0.203	$\mu\text{S/cm}$
Standard conductivity	σ_s	Pure water	0.200	$\mu\text{S/cm}$
Error		$Error = \frac{ \sigma - \sigma_s }{\sigma_s} \times 100$	1.44	%
		Error	1.44	%

ตารางที่ 4.2 แสดงคำนวณหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้ามาตรฐานของแกนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 แกนรูปวงกลม

Description	Variable	Formula	Value	Unit
Output voltage of Hall Effect Sensor	V_{hall}		2.478	Volt
คำนวณหาค่า flux density				
Flux density	B	$B = \frac{ V_{hall} - V_{offset} }{13}$	0.00062	Tesla
คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด				
Length of Magnetic circuit	l		0.02575	meter
Number of Turns	N		215	turns
Permeability	μ	Initial Permeability = 2300, free space permeability = $4\pi \times 10^{-7}$	0.003	-
Current	I	$I = \frac{Bl}{\mu N}$	2.55E-05	Ampere
คำนวณหาค่าความต้านทานของของเหลว				
Resistance of liquid	R	$R = \frac{V_s - (R_1 + R_2)I}{I}$	6.27E+05	ohm
คำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว				
Conductance	G	$G = \frac{1}{R}$	1.59E-06	mho
คำนวณหาสภาพความนำไฟฟ้าของของเหลว				
Conductivity	σ	$\sigma = \frac{Gl}{A}$	0.174	$\mu\text{S/cm}$
Standard conductivity	σ_s	Pure water	0.200	$\mu\text{S/cm}$
Error		$Error = \frac{ \sigma - \sigma_s }{\sigma_s} \times 100$	13.02	%
		Error	13.02	%

ตารางที่ 4.3 แสดงคำนวณหาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือโดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้า

มาตรฐานของแกนรูปวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการคำนวณจะได้ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือ แกนทรงกระบอกเท่ากับ 1.44 % และแกนรูปวงกลมเท่ากับ 13.02 % โดยเทียบจากค่าความนำไฟฟ้ามาตรฐาน

4.8 ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ

ค่าความนำไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณ โดยมีค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดที่ได้จากการคำนวณหัวข้อที่ 4.7

No.	Liquids	แกนทรงกระบอก		แกนรูปวงกลม	
		V _{hall} (Volt)	Conductivity (μ S/cm) ที่ค่า Error = 1.44%	V _{hall} (Volt)	Conductivity (μ S/cm) ที่ค่า Error = 13.02%
1	น้ำ DI	2.479	0.20	2.478	0.17
2	น้ำแร่	2.576	2.39	2.519	1.07
3	น้ำดื่ม Crystal	2.512	0.95	2.497	0.59
4	น้ำประปา	2.567	2.19	2.514	0.96
5	ชาเขียวฟูจิ	2.571	2.28	2.518	1.04
6	น้ำผึ้งแท้ Honeysun	2.473	0.07	2.472	0.04
7	น้ำผึ้งแท้ เวชพงศ์	2.474	0.09	2.473	0.07
8	น้ำผึ้งแท้ Good.b	2.471	0.02	2.472	0.04
9	น้ำผึ้งเทียม	2.487	0.38	2.484	0.30
10	กลูโคสไซรัป	2.484	0.32	2.483	0.28
11	น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์ผสมกลูโคสไซรัป (1:3)	2.495	0.56	2.494	0.52
12	น้ำผึ้งแท้เวชพงศ์ผสมกลูโคสไซรัป (1:1)	2.479	0.20	2.482	0.26
13	น้ำผึ้งแท้ Good.b ผสมกลูโคสไซรัป (1:3)	2.491	0.47	2.488	0.39
14	น้ำผึ้งแท้ Good.b ผสมกลูโคสไซรัป (1:1)	2.483	0.29	2.481	0.24
15	น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 1:1)	2.487	0.38	2.484	0.30
16	น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 2:1)	2.487	0.38	2.485	0.33
17	น้ำเชื่อม (น้ำ:น้ำตาล 3:1)	2.49	0.45	2.489	0.41
18	น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 4:1)	3.281	18.30	2.868	8.66
19	น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 6:1)	3.225	17.04	2.861	8.51
20	น้ำเกลือ (น้ำ:เกลือ 8:1)	3.196	16.38	2.858	8.44

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

เครื่องมือวัดความนำไฟฟ้าของของเหลวที่สร้างขึ้น เมื่ออ้างอิงจากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า เครื่องมือนี้ สามารถแยกกลุ่มของของเหลวที่มีความนำไฟฟ้าแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน โดยในกลุ่ม A คือกลุ่มที่มีความนำไฟฟ้าสูงมาก กลุ่ม B มีความนำไฟฟ้าสูง กลุ่ม C มีความนำไฟฟ้าปานกลางและ กลุ่ม D มีความนำไฟฟ้าต่ำ ซึ่งกลุ่มนี้นักจะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง เนื่องจากความหนืดเป็นอุปสรรคที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านของเหลวได้ กลุ่มตัวอย่างที่นำมาทดลองจะเป็นน้ำผึ้งแท้ยี่ห้อต่างๆ และน้ำผึ้งเทียมที่มีส่วนผสมอื่นๆ ผลการทดลองที่วัดได้ สามารถแยกได้ว่า น้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งเทียมมีความนำไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ตรงกับวัตถุประสงค์ของปริญญาณิพนธ์ที่ตั้งไว้

การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดที่สร้างจากแกนเหล็กสองชนิดที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า แกนทรงกระบอกและแกนรูปวงกลมมีความผิดพลาดของเครื่องมือเท่ากับ 1.44% และ 13.02% ตามลำดับ สรุปได้ว่าแกนทรงกระบอกมีความผิดพลาดน้อยกว่าแกนรูปวงกลมและมีความผิดพลาดของเครื่องมืออยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อสังเกตจากกราฟของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นมากน้อยในอัตราส่วนเท่าๆกัน แกนทรงกระบอกจะมีความเป็นเชิงเส้นและมีความไวในการสร้างสนามแม่เหล็กได้ดีกว่าแกนรูปวงกลมอีกด้วย

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จะเห็นได้ว่า ค่าความต่างศักย์ที่ได้จะมีค่าผิดพลาดไปบ้าง ค่าที่แฮมปลิงออกมา อาจจะมีค่าไม่นิ่ง มีการเปลี่ยนแปลงไปบ้าง ทั้งนี้เพราะค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวมีค่าน้อยมาก ทำให้สัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยจะมีผลกระทบอย่างมาก จึงแก้ปัญหาโดยการทำการทาวจรที่อยู่ในเครื่องมือวัดให้ได้อาห์พุทออกมาคงที่มากที่สุด

บรรณานุกรม

ช่วง ทมชิตชงค์. 2544. คู่มือครูสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 3.
บริษัทไฮเอ็ดพับลิชชิ่ง จำกัด.

นวกัฑราและทวีพล. 2555. คุณลักษณะสถิติของเครื่องมือวัด.
การวัดและเครื่องมือวัดประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.

รังสรรค์ ศรีสาคร. เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก. สาขาวิชาฟิสิกส์
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

Analog Devices. 2007. Precision Instrumentation Amplifier AD524.
USA : Analog Devices,2007.

Allegro MicroSystems LLC. Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor
ICs A1301 and A1302. USA : Allegro MicroSystems.

Measurement&Intrument. 2013. การวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า1. [Online]. Available :
<http://measurement2447.blogspot.com/2013/11/1.html>.

Electronics tutorials. 2016. Hall Effect Sensor. [Online]. Available :
<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.

Honey Well. HALL EFFECT SENSING AND APPLICATION. [Online]. Available :
<http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-sensors-magneto-resistive-hall-effect-applications-005715-2-en.pdf>.

Electromagnetic Field. [Online]. Available : http://www.cr-engineer.com/images/pulldown_1304840984/Electromagnetic%20Field%20EMF.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GRENELS CHILDREN. 2015. ความหมายของการนำไฟฟ้า. [Online]. Available :
<http://www.grendelschildren.com>

วีรจิต คุ่มวงศ์. การนำไฟฟ้า. [Online]. Available : <http://weerajit15.blogspot.com/p/blog-page.html>.

การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การตรวจวัดคุณภาพน้ำ. [Online]. Available :
http://www2.rid.go.th/research/Download_chem/chem_2.pdf.

มนตรี เงามเดช. แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก. [Online].
Available : <http://montri.rmutl.ac.th/assets/dc01.pdf>.

CWSByteMark. TYPES OF FERRITE MATERIALS. [Online]. Available :
http://www.cwsbytemark.com/CatalogSheets/Ferrite_datasheet_oct06/FR_MATL.pdf.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

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.

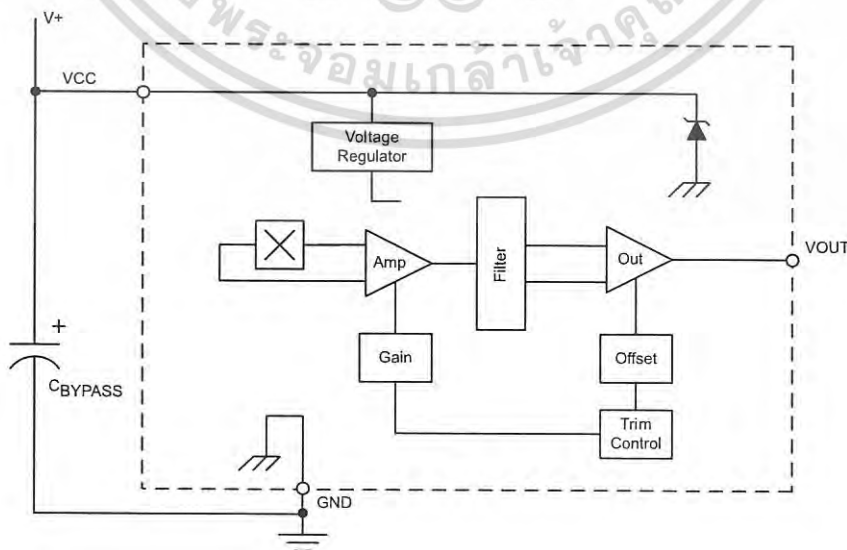
The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall sensing element, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall sensing element and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog 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°C to 125°C .

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

Functional Block Diagram



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Selection Guide

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

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

²Contact Allegro for additional packing options.



Absolute Maximum Ratings

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

A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

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

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Electrical Characteristics						
Supply Voltage	V_{CC}	Running, $T_J < 165^\circ\text{C}$	4.5	–	6	V
Supply Current	I_{CC}	Output open	–	–	11	mA
Output Voltage	$V_{OUT(High)}$	$I_{SOURCE} = -1\text{ mA}$, 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	μs
Output Resistance	R_{OUT}	$I_{SINK} \leq 1\text{ mA}$, $I_{SOURCE} \geq -1\text{ mA}$	–	2	5	Ω
Wide Band Output Noise, rms	V_{OUTN}	External output low pass filter $\leq 10\text{ kHz}$; Sens = nominal	–	150	–	μV
Ratiometry						
Quiescent Output Voltage Error with respect to ΔV_{CC} ¹	$\Delta V_{OUTQ(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Sensitivity Error with respect to ΔV_{CC} ²	$\Delta \text{Sens}_{(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Output						
Linearity	Lin	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 2.5	%
Symmetry	Sym	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Characteristics						
Quiescent Output Voltage	V_{OUTQ}	$B = 0\text{ G}$; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.4	2.5	2.6	V
Quiescent Output Voltage over Operating Temperature Range	$V_{OUTQ(\Delta T_A)}$	$B = 0\text{ G}$	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	$\text{Sens}_{(\Delta T_A)}$	A1301	1.8	–	3.2	mV/G
		A1302	0.85	–	1.75	mV/G

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

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

Characteristic Definitions

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

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

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

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

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

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

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

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:

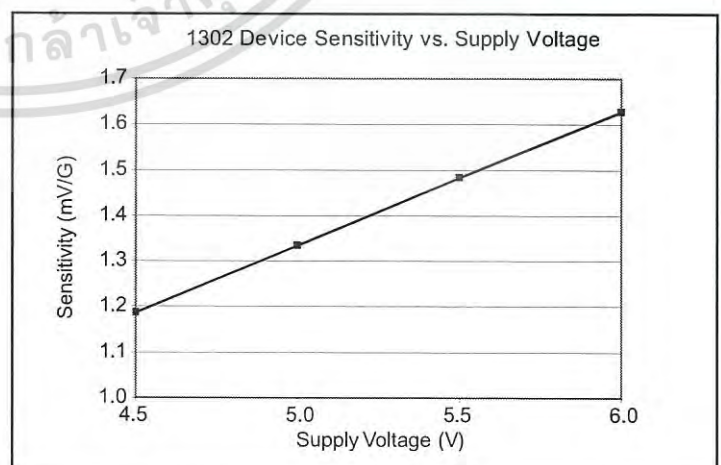
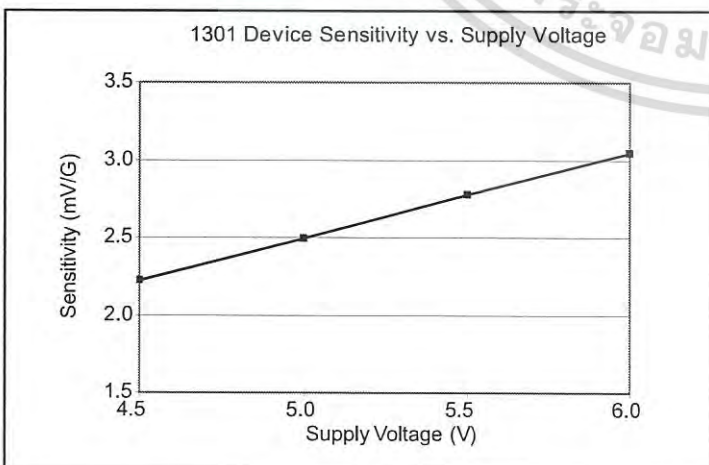
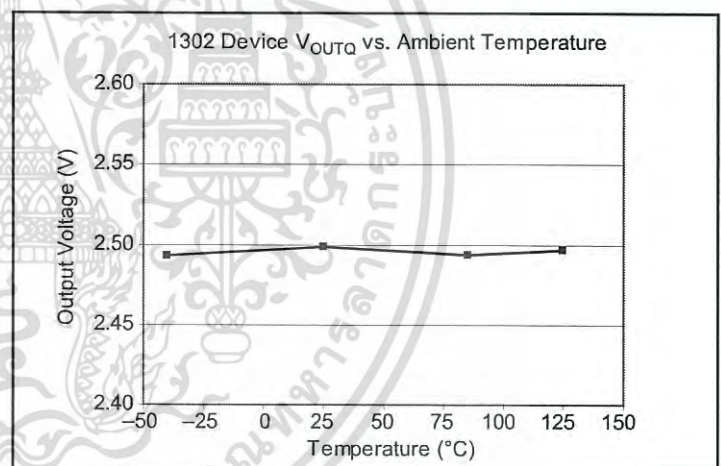
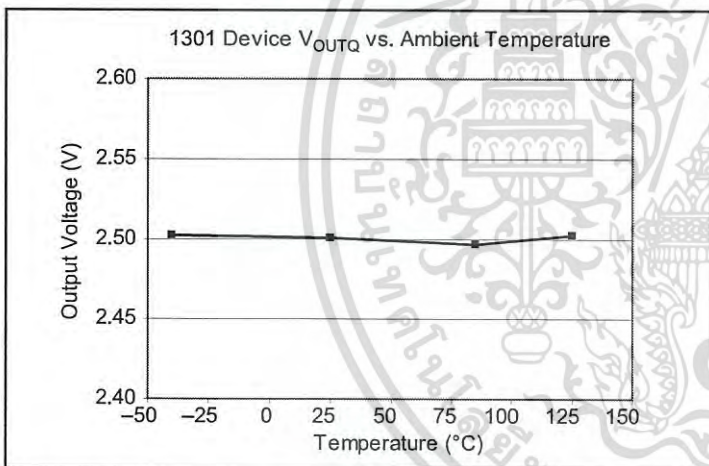
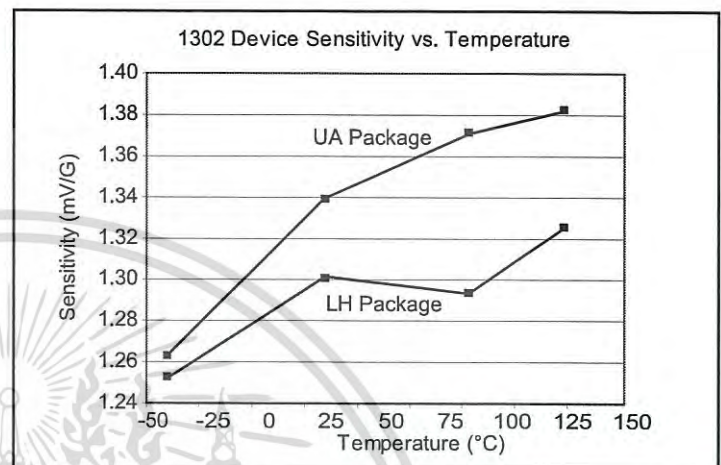
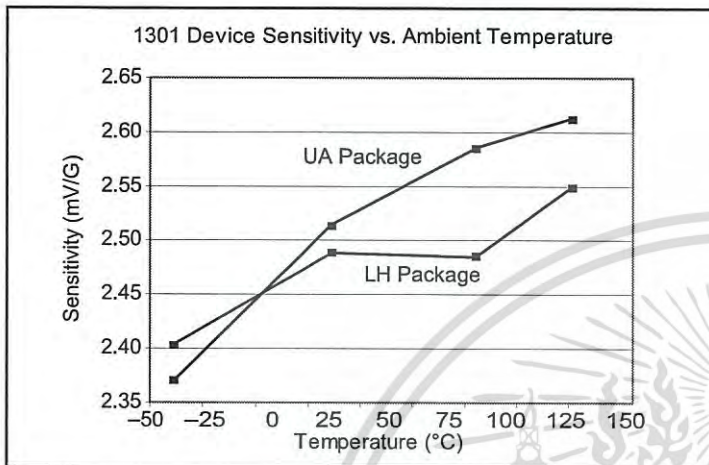
$$Lin+ = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(+B/2)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (6)$$

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

and output symmetry as:

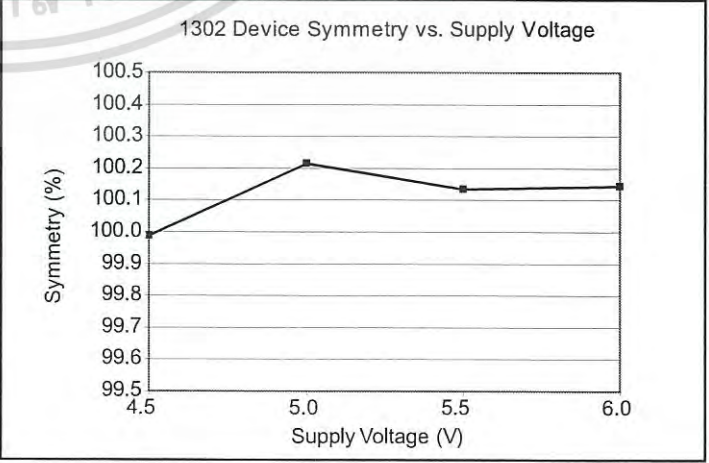
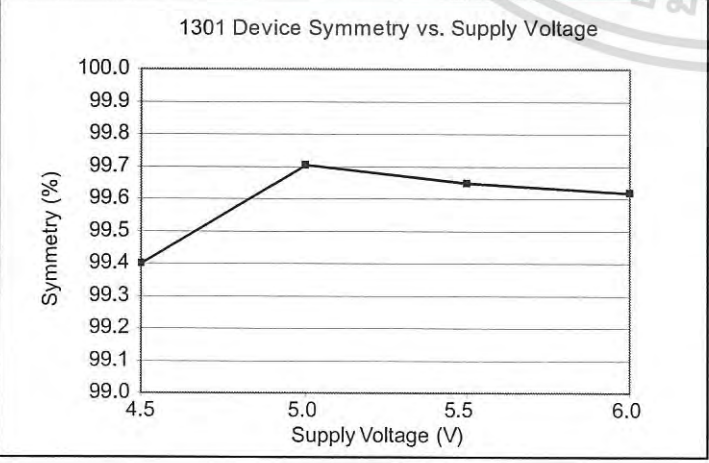
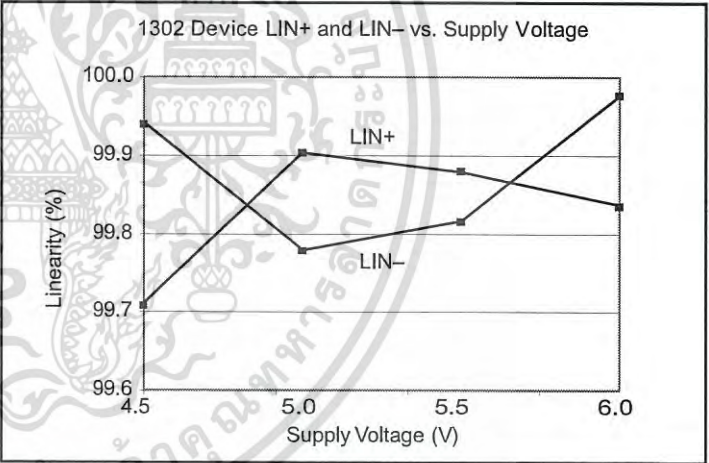
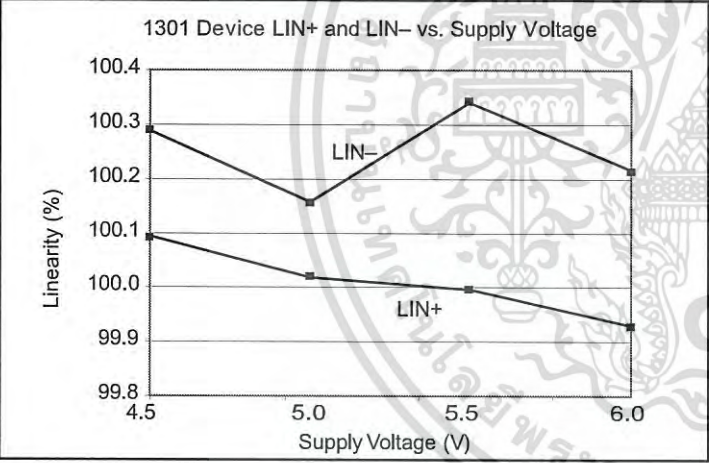
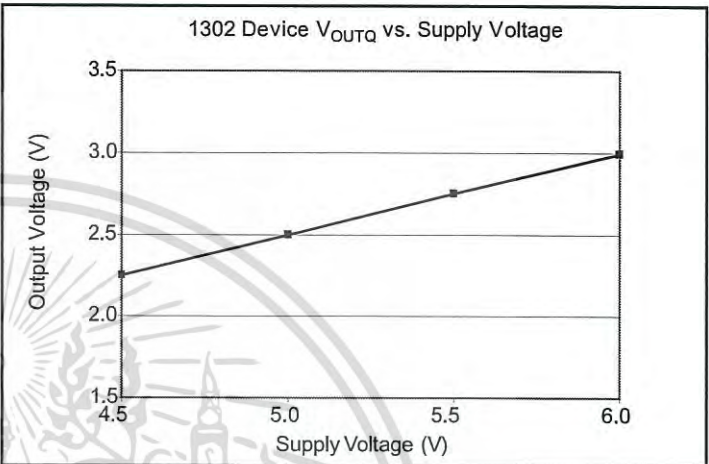
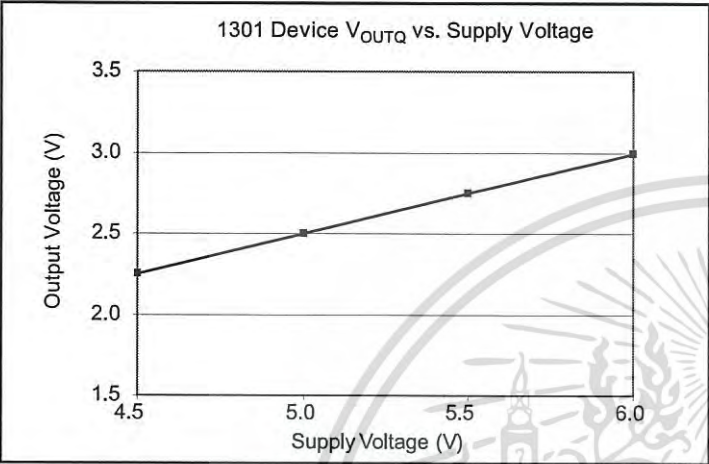
$$Sym = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{V_{OUTQ} - V_{OUT(-B)}} \times 100\% \quad (8)$$

Typical Characteristics (30 pieces, 3 fabrication lots)

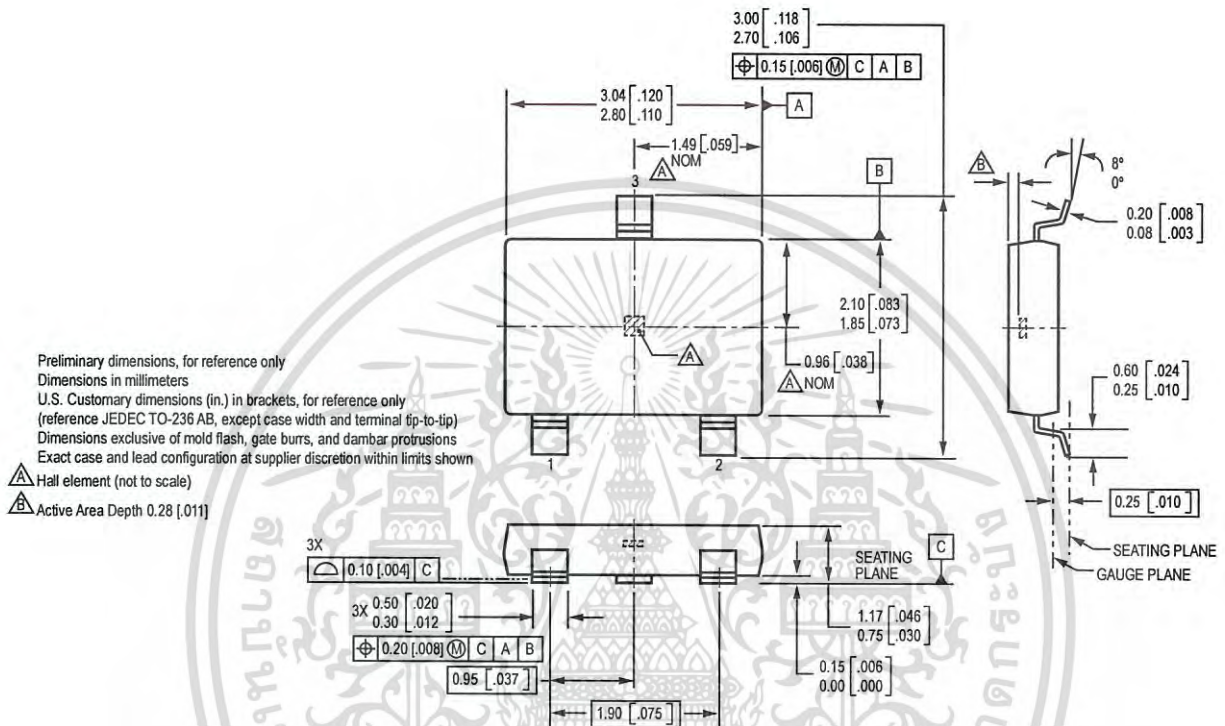


Continued on the next page...

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

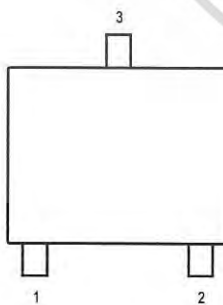


Package LH, 3-Pin; (SOT-23W)

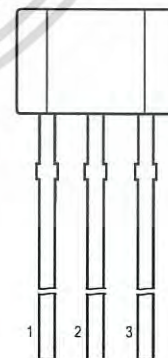


Pin-out Drawings

Package LH



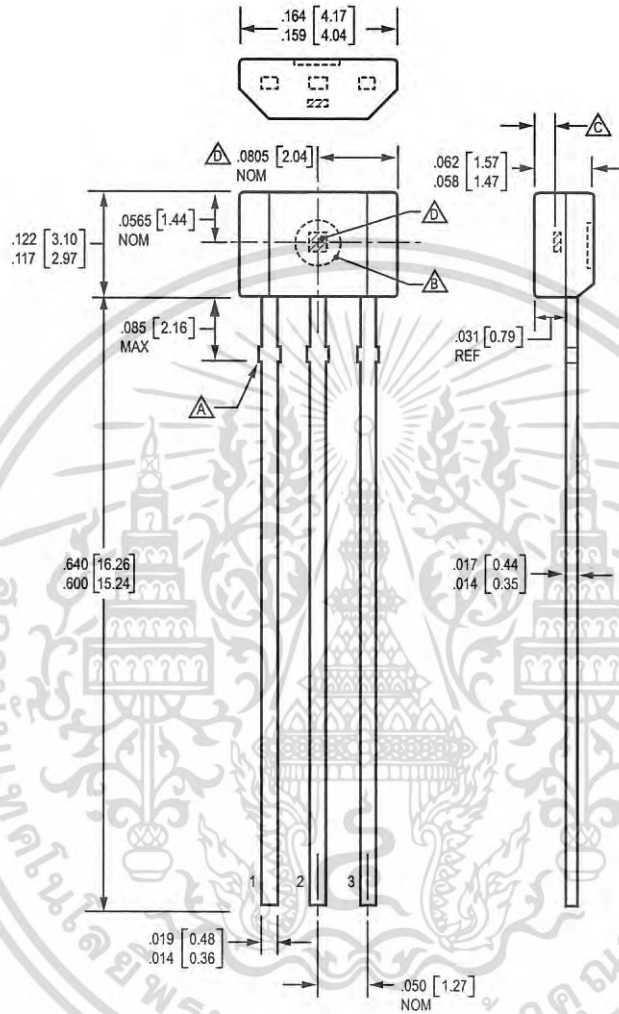
Package UA



Terminal List

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

Package UA, 3-Pin SIP



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

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

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

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

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

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

Copyright © 2005, 2006 Allegro MicroSystems, Inc.

FEATURES

- Low noise: 0.3 μV p-p at 0.1 Hz to 10 Hz
- Low nonlinearity: 0.003% (G = 1)
- High CMRR: 120 dB (G = 1000)
- Low offset voltage: 50 μV
- Low offset voltage drift: 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Gain bandwidth product: 25 MHz
- Pin programmable gains of 1, 10, 100, 1000
- Input protection, power-on/power-off
- No external components required
- Internally compensated
- MIL-STD-883B and chips available
- 16-lead ceramic DIP and SOIC packages and 20-terminal leadless chip carrier available
- Available in tape and reel in accordance with EIA-481A standard
- Standard military drawing also available

GENERAL DESCRIPTION

The AD524 is a precision monolithic instrumentation amplifier designed for data acquisition applications requiring high accuracy under worst-case operating conditions. An outstanding combination of high linearity, high common-mode rejection, low offset voltage drift, and low noise makes the AD524 suitable for use in many data acquisition systems.

The AD524 has an output offset voltage drift of less than 25 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, input offset voltage drift of less than 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, CMR above 90 dB at unity gain (120 dB at G = 1000), and maximum nonlinearity of 0.003% at G = 1. In addition to the outstanding dc specifications, the AD524 also has a 25 kHz bandwidth (G = 1000). To make it suitable for high speed data acquisition systems, the AD524 has an output slew rate of 5 V/ μs and settles in 15 μs to 0.01% for gains of 1 to 100.

As a complete amplifier, the AD524 does not require any external components for fixed gains of 1, 10, 100 and 1000. For other gain settings between 1 and 1000, only a single resistor is required. The AD524 input is fully protected for both power-on and power-off fault conditions.

The AD524 IC instrumentation amplifier is available in four different versions of accuracy and operating temperature range. The economical A grade, the low drift B grade, and lower drift,

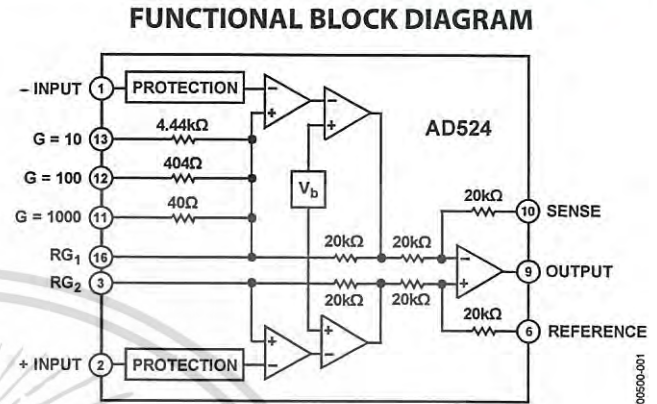


Figure 1.

higher linearity C grade are specified from -25°C to $+85^\circ\text{C}$. The S grade guarantees performance to specification over the extended temperature range -55°C to $+125^\circ\text{C}$. The AD524 is available in a 16-lead ceramic DIP, 16-lead SBDIP, 16-lead SOIC wide packages, and 20-terminal leadless chip carrier.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD524 has guaranteed low offset voltage, offset voltage drift, and low noise for precision high gain applications.
2. The AD524 is functionally complete with pin programmable gains of 1, 10, 100, and 1000, and single resistor programmable for any gain.
3. Input and output offset nulling terminals are provided for very high precision applications and to minimize offset voltage changes in gain ranging applications.
4. The AD524 is input protected for both power-on and power-off fault conditions.
5. The AD524 offers superior dynamic performance with a gain bandwidth product of 25 MHz, full power response of 75 kHz and a settling time of 15 μs to 0.01% of a 20 V step (G = 100).

Rev. F

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700
Fax: 781.461.3113
www.analog.com

©2007 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

TABLE OF CONTENTS

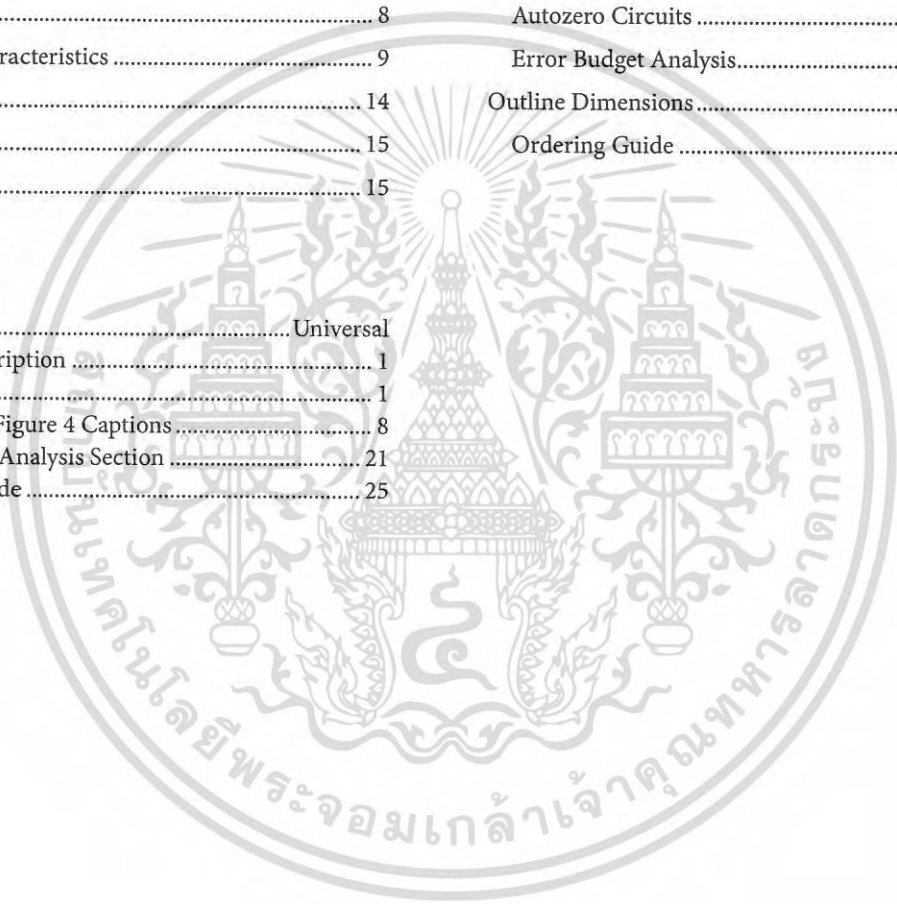
Features	1	Input Offset and Output Offset	15
Functional Block Diagram	1	Gain	16
General Description	1	Input Bias Currents	17
Product Highlights	1	Common-Mode Rejection	17
Revision History	2	Grounding	18
Specifications.....	3	Sense Terminal.....	18
Absolute Maximum Ratings.....	8	Reference Terminal	18
Connection Diagrams.....	8	Programmable Gain.....	20
ESD Caution.....	8	Autozero Circuits	20
Typical Performance Characteristics	9	Error Budget Analysis.....	21
Test Circuits.....	14	Outline Dimensions	24
Theory of Operation	15	Ordering Guide	25
Input Protection.....	15		

REVISION HISTORY

11/07—Rev. E to Rev. F

Updated Format.....	Universal
Changes to General Description	1
Changes to Figure 1	1
Changes to Figure 3 and Figure 4 Captions	8
Changes to Error Budget Analysis Section	21
Changes to Ordering Guide	25

4/99—Rev. D to Rev. E



SPECIFICATIONS

@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ and $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

All min and max specifications are guaranteed. Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at the final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels.

Table 1.

Parameter	AD524A			AD524B			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN							
Gain Equation (External Resistor Gain Programming)	$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			
Gain Range (Pin Programmable)	1 to 1000			1 to 1000			
Gain Error ¹							
G = 1			±0.05			±0.03	%
G = 10			±0.25			±0.15	%
G = 100			±0.5			±0.35	%
G = 1000			±2.0			±1.0	%
Nonlinearity							
G = 1			±0.01			±0.005	%
G = 10, G = 100			±0.01			±0.005	%
G = 1000			±0.01			±0.01	%
Gain vs. Temperature							
G = 1			5			5	ppm/°C
G = 10			15			10	ppm/°C
G = 100			35			25	ppm/°C
G = 1000			100			50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)							
Input Offset Voltage			250			100	μV
vs. Temperature			2			0.75	μV/°C
Output Offset Voltage			5			3	mV
vs. Temperature			100			50	μV
Offset Referred to the Input vs. Supply							
G = 1	70			75			dB
G = 10	85			95			dB
G = 100	95			105			dB
G = 1000	100			110			dB
INPUT CURRENT							
Input Bias Current			±50			±25	nA
vs. Temperature			±100			±100	pA/°C
Input Offset Current			±35			±15	nA
vs. Temperature			±100			±100	pA/°C

AD524

Parameter	AD524A			AD524B			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT							
Input Impedance							
Differential Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Differential Capacitance		10			10		pF
Common-Mode Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Common-Mode Capacitance		10			10		pF
Input Voltage Range							
Maximum Differential Input Linear (V _{DL}) ²	±10			±10			V
Maximum Common-Mode Linear (V _{CM}) ²		$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$		V
Common-Mode Rejection DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance							V
G = 1	70			75			dB
G = 10	90			95			dB
G = 100	100			105			dB
G = 1000	110			115			dB
OUTPUT RATING							
V _{OUT} , R _L = 2 kΩ		±10			±10		V
DYNAMIC RESPONSE							
Small Signal – 3 dB							
G = 1		1			1		MHz
G = 10		400			400		kHz
G = 100		150			150		kHz
G = 1000		25			25		kHz
Slew Rate		5.0			5.0		V/μs
Settling Time to 0.01%, 20 V Step							
G = 1 to 100		15			15		μs
G = 1000		75			75		μs
NOISE							
Voltage Noise, 1 kHz							
RTI		7			7		nV/√Hz
RTO		90			90		nV/√Hz
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz							
G = 1		15			15		μV p-p
G = 10		2			2		μV p-p
G = 100, 1000		0.3			0.3		μV p-p
Current Noise							
0.1 Hz to 10 Hz		60			60		pA p-p
SENSE INPUT							
R _{IN}		20			20		kΩ ± 20%
I _{IN}		15			15		μA
Voltage Range	±10			±10			V
Gain to Output		1			1		%
REFERENCE INPUT							
R _{IN}		40			40		kΩ ± 20%
I _{IN}		15			15		μA
Voltage Range	±10			±10			V
Gain to Output		1			1		%

Parameter	AD524A			AD524B			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
TEMPERATURE RANGE							
Specified Performance	-25		+85	-25		+85	°C
Storage	-65		+150	-65		+150	°C
POWER SUPPLY							
Power Supply Range	±6	±15	±18	±6	±15	±18	V
Quiescent Current		3.5	5.0		3.5	5.0	mA

¹ Does not include effects of external resistor, R_G .

² V_{OL} is the maximum differential input voltage at $G = 1$ for specified nonlinearity.

V_{OL} at the maximum = 10 V/G.

V_D = actual differential input voltage.

Example: $G = 10$, $V_D = 0.50$.

$V_{CM} = 12\text{ V} - (10/2 \times 0.50\text{ V}) = 9.5\text{ V}$.

@ $V_S = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ and $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

All min and max specifications are guaranteed. Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at the final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels.

Table 2.

Parameter	AD524C			AD524S			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN							
Gain Equation (External Resistor Gain Programming)		$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$		
Gain Range (Pin Programmable)		1 to 1000			1 to 1000		
Gain Error ¹							
G = 1			±0.02			±0.05	%
G = 10			±0.1			±0.25	%
G = 100			±0.25			±0.5	%
G = 1000			±0.5			±2.0	%
Nonlinearity							
G = 1			±0.003			±0.01	%
G = 10, G = 100			±0.003			±0.01	%
G = 1000			±0.01			±0.01	%
Gain vs. Temperature							
G = 1			5			5	ppm/°C
G = 10			10			10	ppm/°C
G = 100			25			25	ppm/°C
G = 1000			50			50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)							
Input Offset Voltage			50			100	μV
vs. Temperature			0.5			2.0	μV/°C
Output Offset Voltage			2.0			3.0	mV
vs. Temperature			25			50	μV
Offset Referred to the Input vs. Supply							
G = 1	80			75			dB
G = 10	100			95			dB
G = 100	110			105			dB
G = 1000	115			110			dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AD524

Parameter	AD524C			AD524S			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT CURRENT							
Input Bias Current vs. Temperature			±15			±50	nA
Input Offset Current vs. Temperature		±100			±100		pA/°C
			±10			±35	nA
		±100			±100		pA/°C
INPUT							
Input Impedance							
Differential Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Differential Capacitance		10			10		pF
Common-Mode Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Common-Mode Capacitance		10			10		pF
Input Voltage Range							
Maximum Differential Input Linear (V _{DL}) ²		±10			±10		V
Maximum Common-Mode Linear (V _{CM}) ²		$12 V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12 V - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$		V
Common-Mode Rejection DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance							V
G = 1		80			70		dB
G = 10		100			90		dB
G = 100		110			100		dB
G = 1000		120			110		dB
OUTPUT RATING							
V _{OUT} , R _L = 2 kΩ			±10			±10	V
DYNAMIC RESPONSE							
Small Signal – 3 dB							
G = 1			1			1	MHz
G = 10			400			400	kHz
G = 100			150			150	kHz
G = 1000			25			25	kHz
Slew Rate			5.0			5.0	V/μs
Settling Time to 0.01%, 20 V Step							
G = 1 to 100			15			15	μs
G = 1000			75			75	μs
NOISE							
Voltage Noise, 1 kHz							
RTI			7			7	nV/√Hz
RTO			90			90	nV/√Hz
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz							
G = 1			15			15	μV p-p
G = 10			2			2	μV p-p
G = 100, 1000			0.3			0.3	μV p-p
Current Noise							
0.1 Hz to 10 Hz			60			60	pA p-p
SENSE INPUT							
R _{IN}			20			20	kΩ ± 20%
I _{IN}			15			15	μA
Voltage Range		±10			±10		V
Gain to Output			1			1	%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Parameter	AD524C			AD524S			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
REFERENCE INPUT							
R_{IN}		40			40		$k\Omega \pm 20\%$
I_{IN}		15			15		μA
Voltage Range	10			10			V
Gain to Output		1			1		%
TEMPERATURE RANGE							
Specified Performance	-25		+85	-55		+85	$^{\circ}C$
Storage	-65		+150	-65		+150	$^{\circ}C$
POWER SUPPLY							
Power Supply Range	± 6	± 15	± 18	± 6	± 15	± 18	V
Quiescent Current		3.5	5.0		3.5	5.0	mA

¹ Does not include effects of external resistor R_G .

² V_{OL} is the maximum differential input voltage at $G = 1$ for specified nonlinearity.

V_{OL} at the maximum = $10 V/G$.

V_D = actual differential input voltage.

Example: $G = 10$, $V_D = 0.50$.

$V_{CM} = 12 V - (10/2 \times 0.50 V) = 9.5 V$.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Rev. F | Page 7 of 28

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	±18 V
Internal Power Dissipation	450 mW
Input Voltage ¹ (Either Input Simultaneously) $ V_{IN} + V_S $	<36 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (R)	-65°C to +125°C
(D, E)	-65°C to +150°C
Operating Temperature Range AD524A/AD524B/AD524C	-25°C to +85°C
AD524S	-55°C to +125°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	+300°C

¹ Maximum input voltage specification refers to maximum voltage to which either input terminal may be raised with or without device power applied. For example, with ±18 volt supplies maximum, V_{IN} is ±18 V; with zero supply voltage maximum, V_{IN} is ±36 V.

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

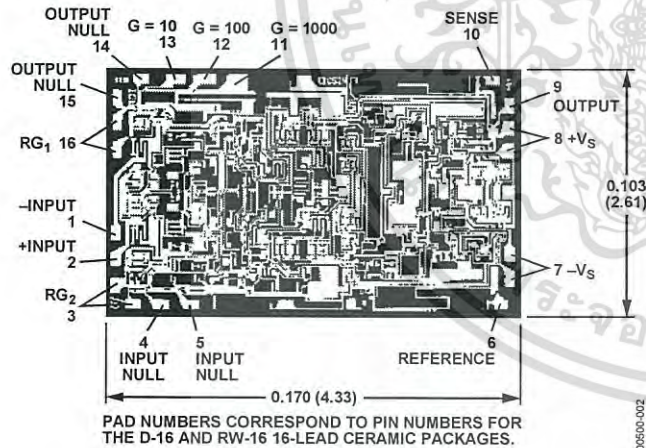


Figure 2. Metallization Photograph
Contact factory for latest dimensions;
Dimensions shown in inches and (mm)

CONNECTION DIAGRAMS

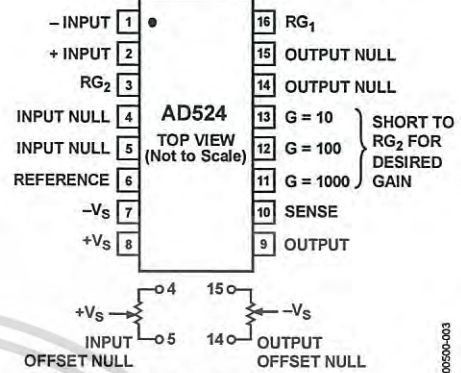


Figure 3. Ceramic (D) and SOIC (RW-16 and D-16) Packages

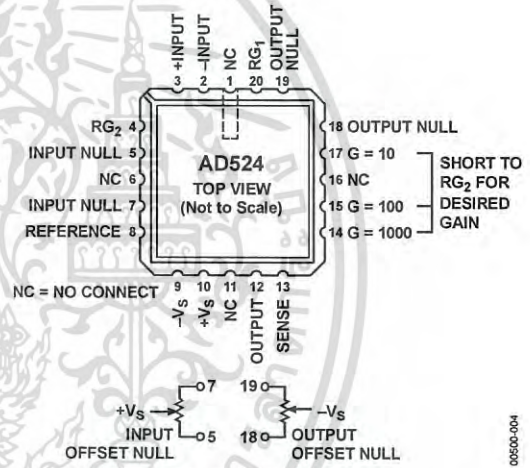


Figure 4. Leadless Chip Carrier (E)

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

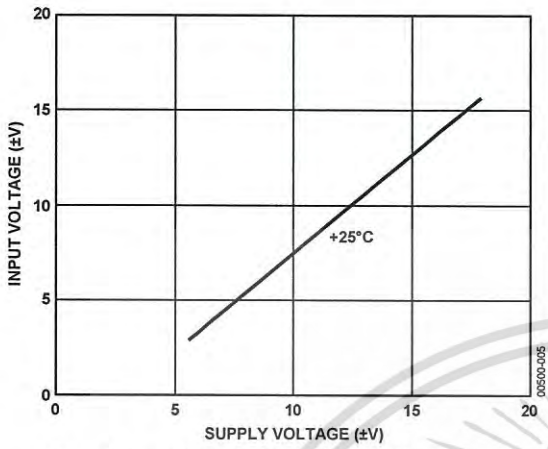


Figure 5. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, G = 1

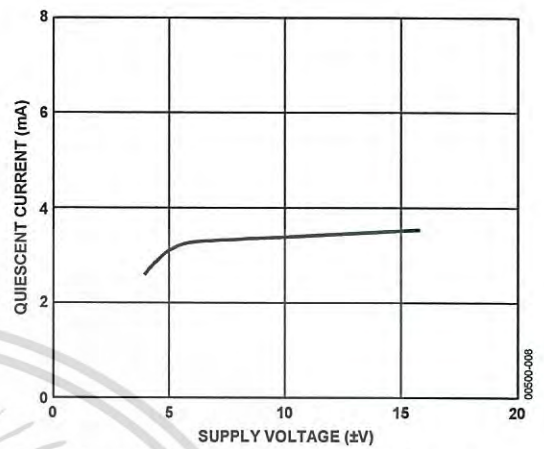


Figure 8. Quiescent Current vs. Supply Voltage

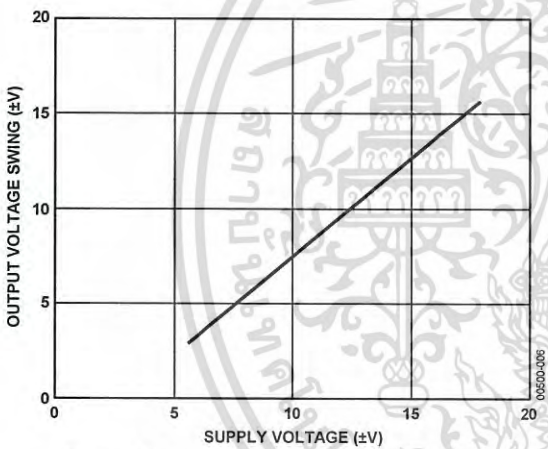


Figure 6. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

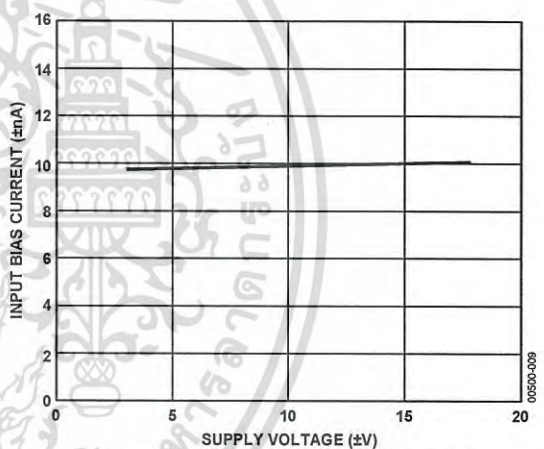


Figure 9. Input Bias Current vs. Supply Voltage

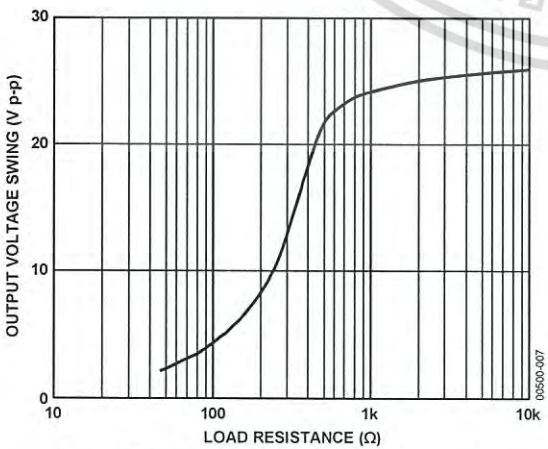


Figure 7. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

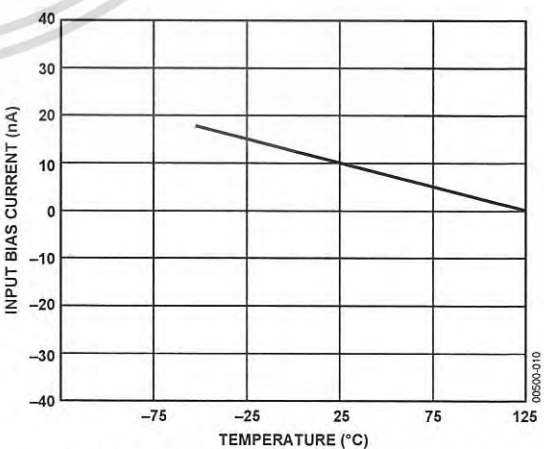


Figure 10. Input Bias Current vs. Temperature

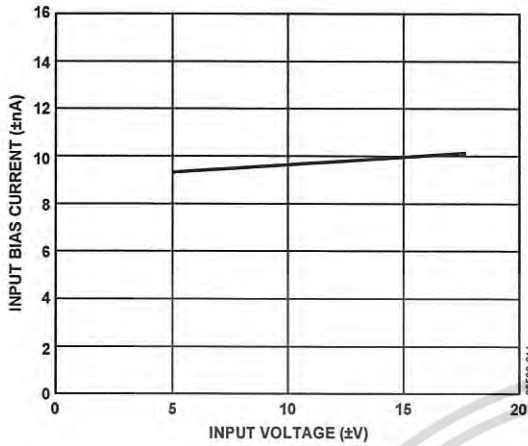


Figure 11. Input Bias Current vs. Input Voltage

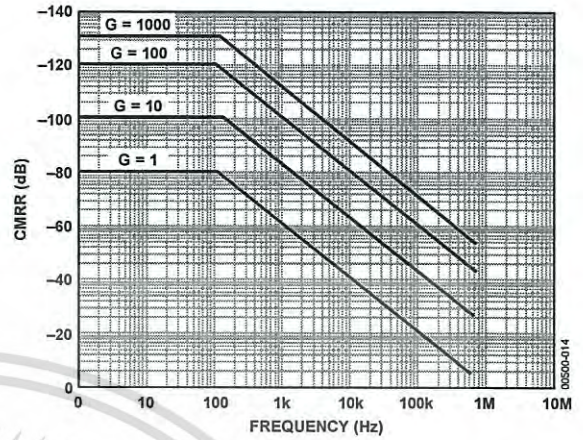


Figure 14. CMRR vs. Frequency, RTI, Zero to 1000 Source Imbalance

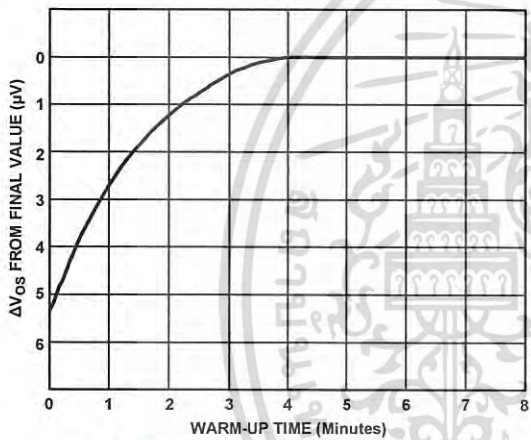


Figure 12. Offset Voltage, RTI, Turn-On Drift

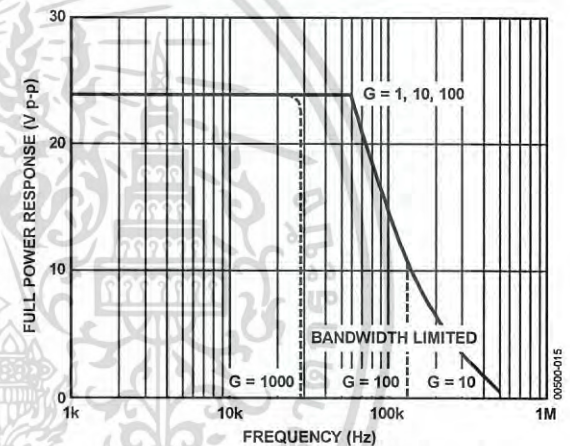


Figure 15. Large Signal Frequency Response

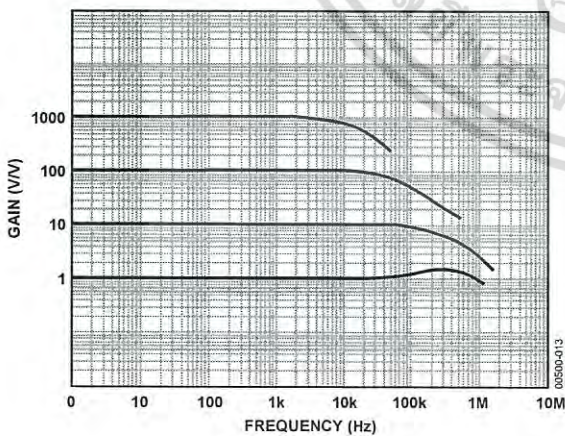


Figure 13. Gain vs. Frequency

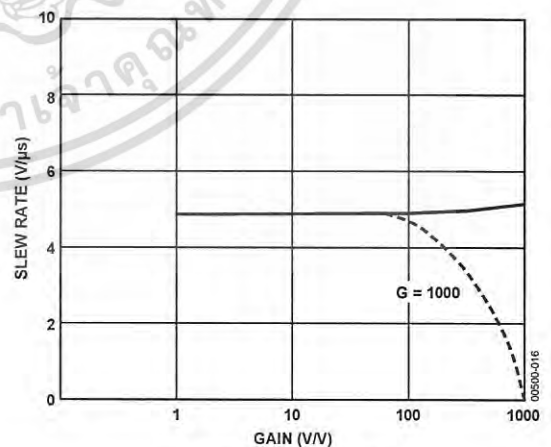


Figure 16. Slew Rate vs. Gain

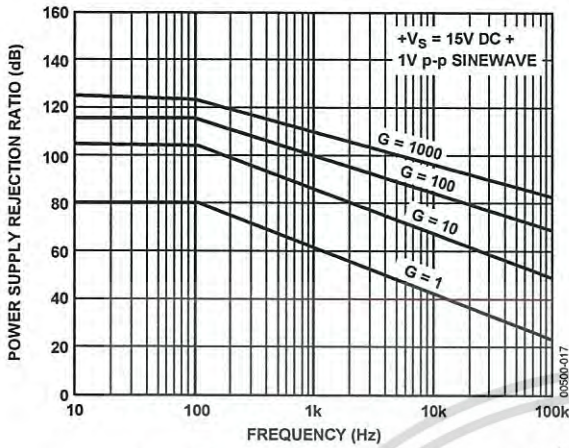


Figure 17. Positive PSRR vs. Frequency

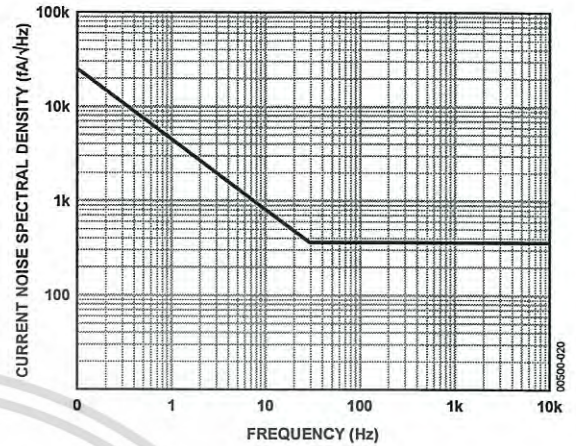


Figure 20. Input Current Noise vs. Frequency

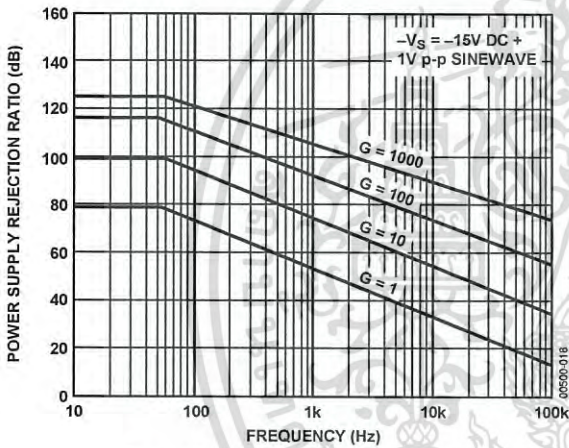


Figure 18. Negative PSRR vs. Frequency

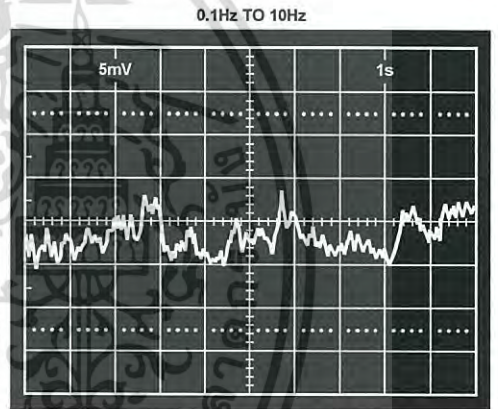


Figure 21. Low Frequency Noise, G = 1 (System Gain = 1000)

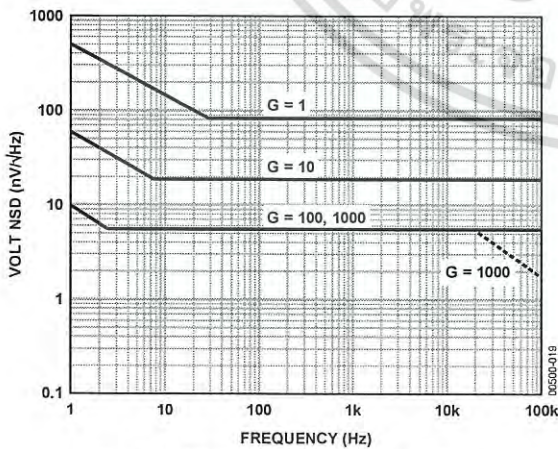


Figure 19. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

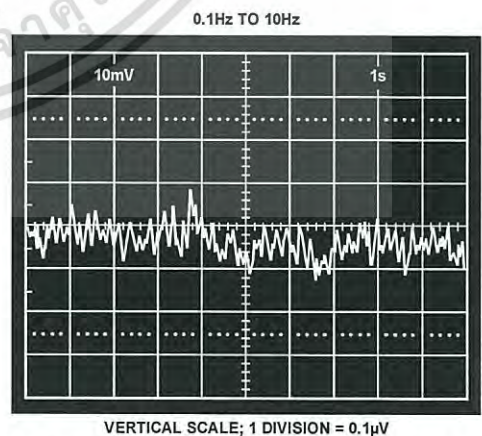


Figure 22. Low Frequency Noise, G = 1000 (System Gain = 100,000)

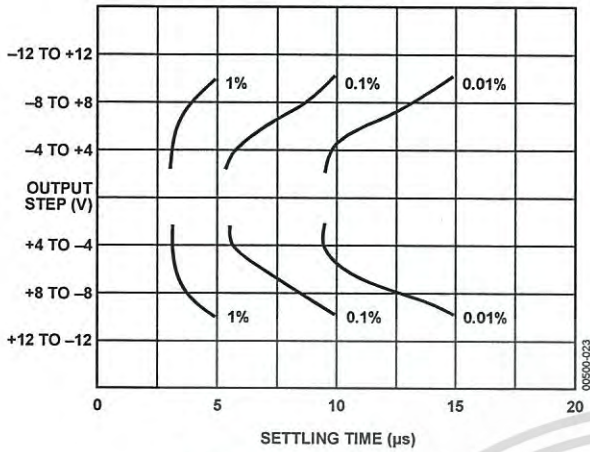


Figure 23. Settling Time, Gain = 1

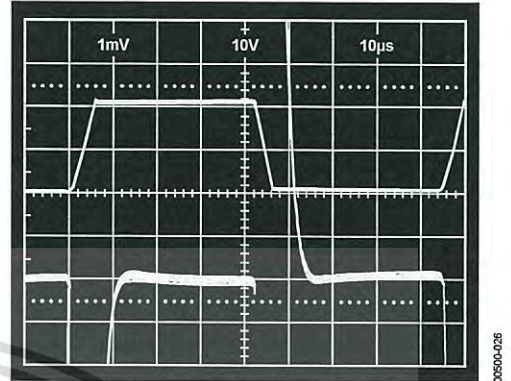


Figure 26. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 10

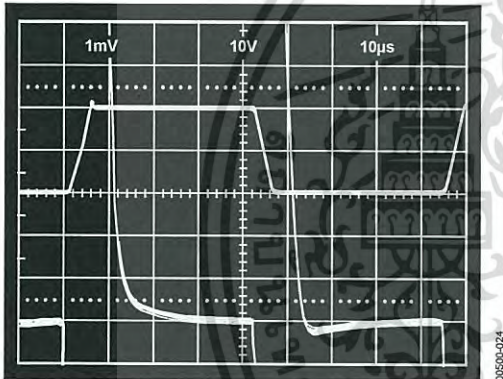


Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 1

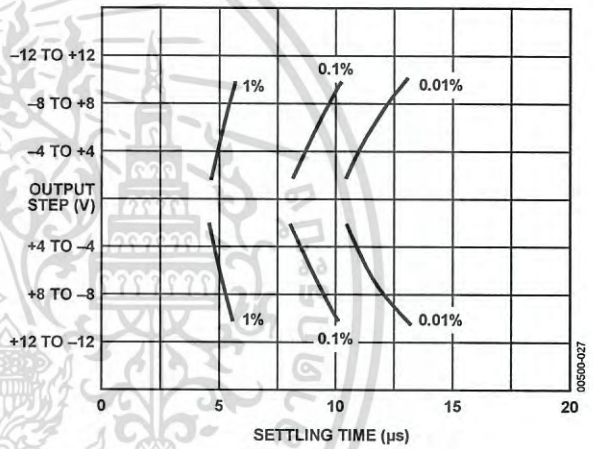


Figure 27. Settling Time, Gain = 100

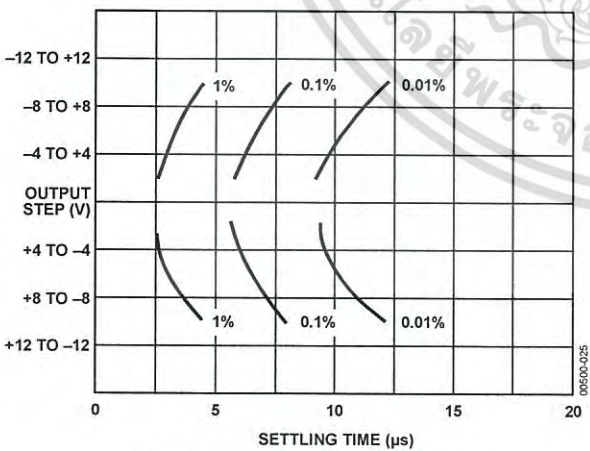


Figure 25. Settling Time, Gain = 10

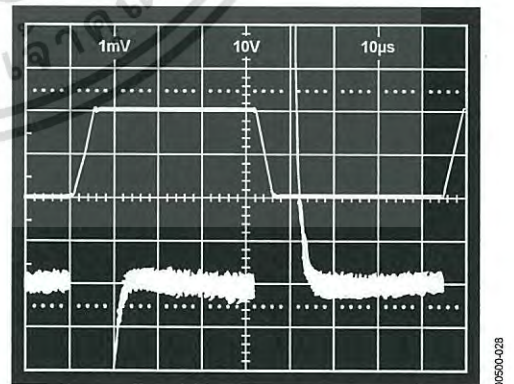


Figure 28. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 100

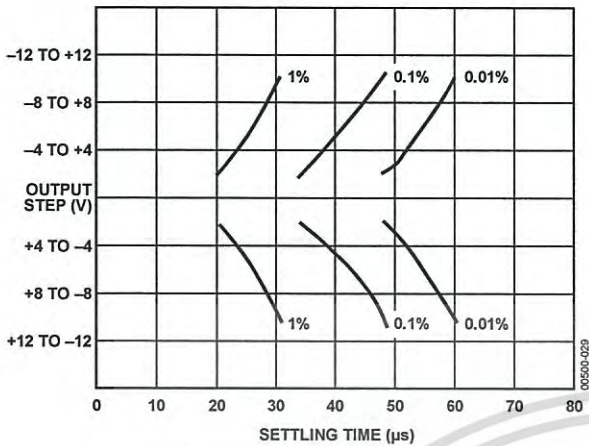


Figure 29. Settling Time, Gain = 1000

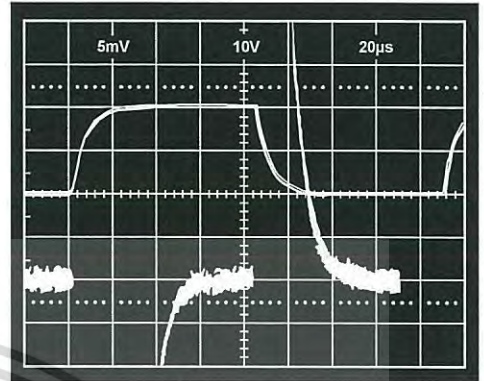


Figure 30. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 1000



TEST CIRCUITS

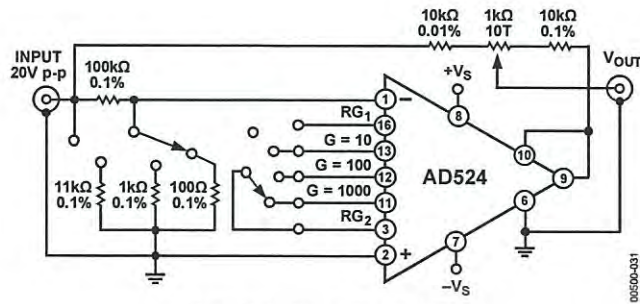


Figure 31. Settling Time Test Circuit

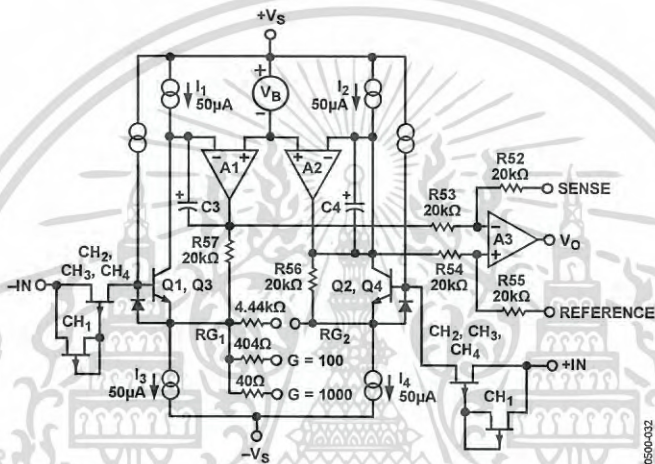


Figure 32. Simplified Circuit of Amplifier; Gain Is Defined as $((R56 + R57)/R_G) + 1$; For a Gain of 1, R_G Is an Open Circuit

THEORY OF OPERATION

The AD524 is a monolithic instrumentation amplifier based on the classic 3-op amp circuit. The advantage of monolithic construction is the closely matched components that enhance the performance of the input preamplifier. The preamplifier section develops the programmed gain by the use of feedback concepts. The programmed gain is developed by varying the value of R_G (smaller values increase the gain) while the feedback forces the collector currents (Q1, Q2, Q3, and Q4) to be constant, which impresses the input voltage across R_G .

As R_G is reduced to increase the programmed gain, the transconductance of the input preamplifier increases to the transconductance of the input transistors. This has three important advantages. First, this approach allows the circuit to achieve a very high open-loop gain of 3×10^8 at a programmed gain of 1000, thus reducing gain-related errors to a negligible 30 ppm. Second, the gain bandwidth product, which is determined by C3 or C4 and the input transconductance, reaches 25 MHz. Third, the input voltage noise reduces to a value determined by the collector current of the input transistors for an RTI noise of 7 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at $G = 1000$.

INPUT PROTECTION

As interface amplifiers for data acquisition systems, instrumentation amplifiers are often subjected to input overloads, that is, voltage levels in excess of the full scale for the selected gain range. At low gains (10 or less), the gain resistor acts as a current limiting element in series with the inputs. At high gains, the lower value of R_G does not adequately protect the inputs

from excessive currents. Standard practice is to place series limiting resistors in each input, but to limit input current to below 5 mA with a full differential overload (36 V) requires over 7k Ω of resistance, which adds 10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ of noise. To provide both input protection and low noise, a special series protection FET is used.

A unique FET design was used to provide a bidirectional current limit, thereby protecting against both positive and negative overloads. Under nonoverload conditions, three channels (CH₂, CH₃, CH₄) act as a resistance ($\approx 1 \text{ k}\Omega$) in series with the input as before. During an overload in the positive direction, a fourth channel, CH₁, acts as a small resistance ($\approx 3 \text{ k}\Omega$) in series with the gate, which draws only the leakage current, and the FET limits I_{DSS} . When the FET enhances under a negative overload, the gate current must go through the small FET formed by CH₁ and when this FET goes into saturation, the gate current is limited and the main FET goes into controlled enhancement. The bidirectional limiting holds the maximum input current to 3 mA over the 36 V range.

INPUT OFFSET AND OUTPUT OFFSET

Voltage offset specifications are often considered a figure of merit for instrumentation amplifiers. While initial offset may be adjusted to zero, shifts in offset voltage due to temperature variations causes errors. Intelligent systems can often correct this factor with an autozero cycle, but there are many small-signal high-gain applications that do not have this capability.

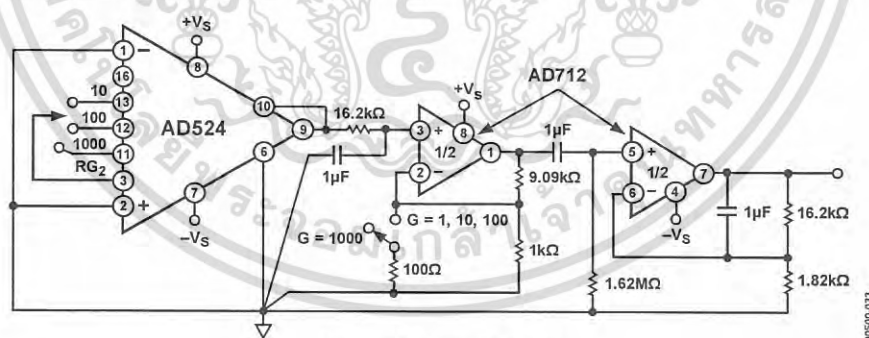


Figure 33. Noise Test Circuit

AD524

Voltage offset and drift comprise two components each; input and output offset and offset drift. Input offset is the component of offset that is directly proportional to gain, that is, input offset as measured at the output at $G = 100$ is 100 times greater than at $G = 1$. Output offset is independent of gain. At low gains, output offset drift is dominant, at high gains, input offset drift dominates. Therefore, the output offset voltage drift is normally specified as drift at $G = 1$ (where input effects are insignificant), whereas input offset voltage drift is given by drift specification at a high gain (where output offset effects are negligible). All input related numbers are referred to the input (RTI) that is the effect on the output is G times larger. Voltage offset vs. power supply is also specified at one or more gain settings and is also RTI.

By separating these errors, one can evaluate the total error independent of the gain setting used. In a given gain configuration, both errors can be combined to give a total error referred to the input (RTI) or output (RTO) by the following formulas:

$$\text{Total error RTI} = \text{input error} + (\text{output error}/\text{gain})$$

$$\text{Total error RTO} = (\text{gain} \times \text{input error}) + \text{output error}$$

As an illustration, a typical AD524 might have a $+250 \mu\text{V}$ output offset and a $-50 \mu\text{V}$ input offset. In a unity gain configuration, the total output offset would be $200 \mu\text{V}$ or the sum of the two. At a gain of 100, the output offset would be -4.75 mV or: $+250 \mu\text{V} + 100(-50 \mu\text{V}) = -4.75 \text{ mV}$.

The AD524 provides for both input and output offset adjustment. This simplifies very high precision applications and minimizes offset voltage changes in switched gain applications. In such applications, the input offset is adjusted first at the highest programmed gain, then the output offset is adjusted at $G = 1$.

GAIN

The AD524 has internal high accuracy pretrimmed resistors for pin programmable gains of 1, 10, 100, and 1000. One of the preset gains can be selected by pin strapping the appropriate gain terminal and RG_2 together (for $G = 1$, RG_2 is not connected).

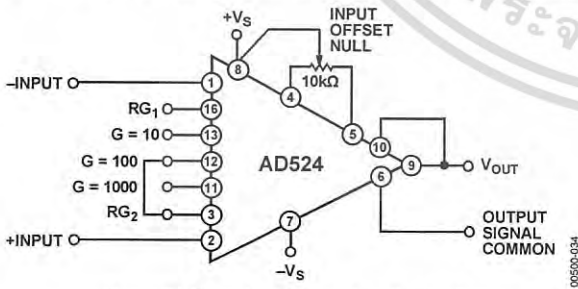


Figure 34. Operating Connections for $G = 100$

The AD524 can be configured for gains other than those that are internally preset; there are two methods to do this. The first method uses just an external resistor connected between Pin 3 and Pin 16 (see Figure 35), which programs the gain according to the following formula:

$$R_G = \frac{40 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

For best results, R_G should be a precision resistor with a low temperature coefficient. An external R_G affects both gain accuracy and gain drift due to the mismatch between it and the internal thin-film resistors. Gain accuracy is determined by the tolerance of the external R_G and the absolute accuracy of the internal resistors ($\pm 20\%$). Gain drift is determined by the mismatch of the temperature coefficient of R_G and the temperature coefficient of the internal resistors ($-50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ typical).

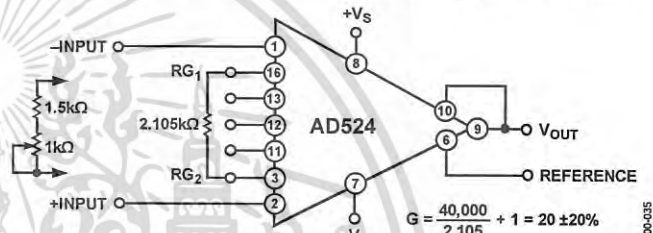


Figure 35. Operating Connections for $G = 20$

The second method uses the internal resistors in parallel with an external resistor (see Figure 36). This technique minimizes the gain adjustment range and reduces the effects of temperature coefficient sensitivity.

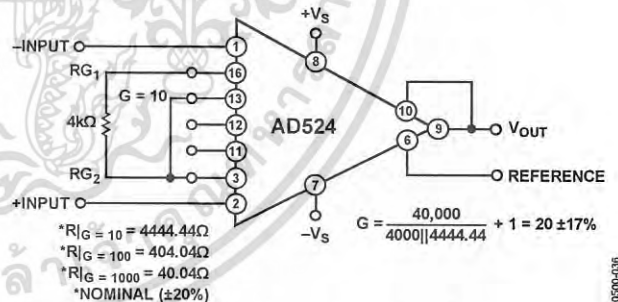


Figure 36. Operating Connections for $G = 20$, Low Gain Temperature Coefficient Technique

The AD524 can also be configured to provide gain in the output stage. Figure 37 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD524. R1, R2, and R3 should be made as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying R2 precisely sets the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of R1 and R3.

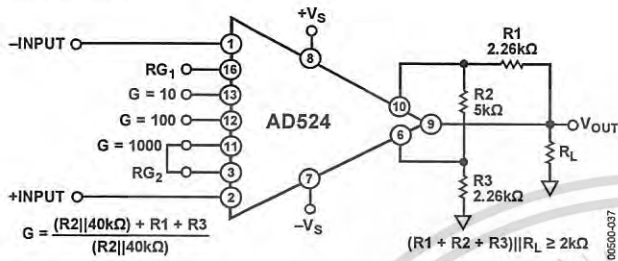


Figure 37. Gain of 2000

Table 4. Output Gain Resistor Values

Output Gain	R2	R1, R3	Nominal Gain
2	5 kΩ	2.26 kΩ	2.02
5	1.05 kΩ	2.05 kΩ	5.01
10	1 kΩ	4.42 kΩ	10.1

INPUT BIAS CURRENTS

Input bias currents are those currents necessary to bias the input transistors of a dc amplifier. Bias currents are an additional source of input error and must be considered in a total error budget. The bias currents, when multiplied by the source resistance, appear as an offset voltage. What is of concern in calculating bias current errors is the change in bias current with respect to signal voltage and temperature. Input offset current is the difference between the two input bias currents. The effect of offset current is an input offset voltage whose magnitude is the offset current times the source impedance imbalance.

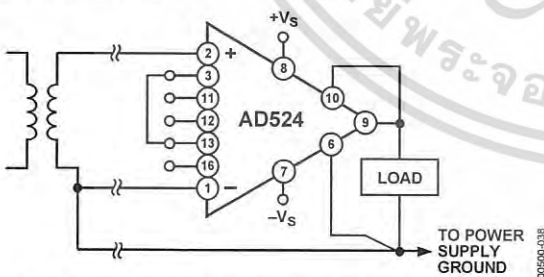


Figure 38. Indirect Ground Returns for Bias Currents—Transformer Coupled

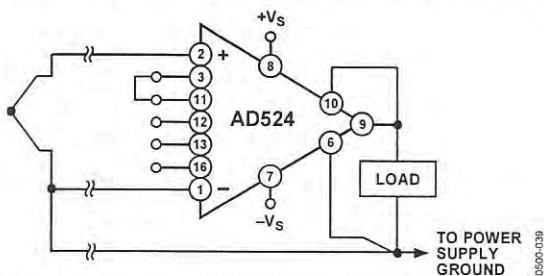


Figure 39. Indirect Ground Returns for Bias Currents—Thermocouple

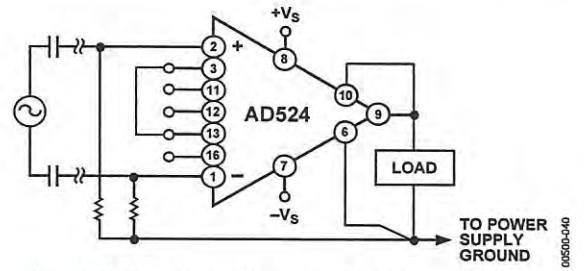


Figure 40. Indirect Ground Returns for Bias Currents—AC-Coupled

Although instrumentation amplifiers have differential inputs, there must be a return path for the bias currents. If this is not provided, those currents charge stray capacitances, causing the output to drift uncontrollably or to saturate. Therefore, when amplifying floating input sources such as transformers and thermocouples, as well as ac-coupled sources, there must still be a dc path from each input to ground.

COMMON-MODE REJECTION

Common-mode rejection is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed equal amounts. These specifications are usually given for a full-range input voltage change and a specified source imbalance. Common-mode rejection ratio (CMRR) is a ratio expression whereas common-mode rejection (CMR) is the logarithm of that ratio. For example, a CMRR of 10,000 corresponds to a CMR of 80 dB.

In an instrumentation amplifier, ac common-mode rejection is only as good as the differential phase shift. Degradation of ac common-mode rejection is caused by unequal drops across differing track resistances and a differential phase shift due to varied stray capacitances or cable capacitances. In many applications, shielded cables are used to minimize noise. This technique can create common-mode rejection errors unless the shield is properly driven. Figure 41 and Figure 42 show active data guards that are configured to improve ac common-mode rejection by bootstrapping the capacitances of the input cabling, thus minimizing differential phase shift.

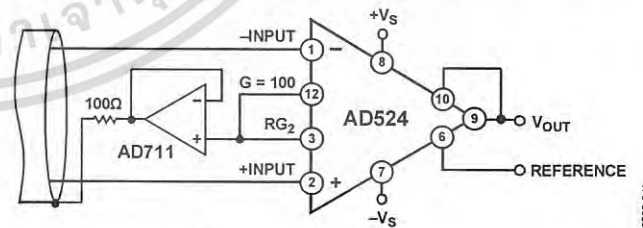


Figure 41. Shield Driver, G ≥ 100

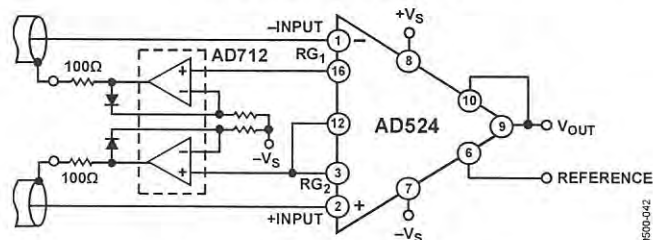


Figure 42. Differential Shield Driver

GROUNDING

Many data acquisition components have two or more ground pins that are not connected together within the device. These grounds must be tied together at one point, usually at the system power-supply ground. Ideally, a single solid ground would be desirable. However, because current flows through the ground wires and etch stripes of the circuit cards, and because these paths have resistance and inductance, hundreds of millivolts can be generated between the system ground point and the data acquisition components. Separate ground returns should be provided to minimize the current flow in the path from the sensitive points to the system ground point. In this way, supply currents and logic-gate return currents are not summed into the same return path as analog signals where they would cause measurement errors.

Because the output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal, an instrumentation amplifier can solve many grounding problems.

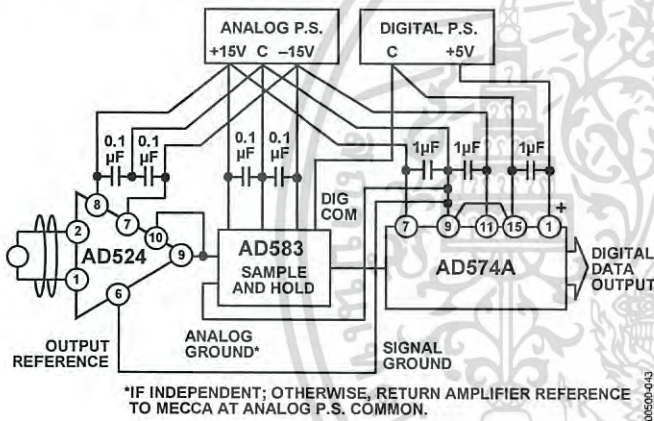


Figure 43. Basic Grounding Practice

SENSE TERMINAL

The sense terminal is the feedback point for the instrument amplifier's output amplifier. Normally, it is connected to the instrument amplifier output. If heavy load currents are to be drawn through long leads, voltage drops due to current flowing through lead resistance can cause errors. The sense terminal can be wired to the instrument amplifier at the load, thus putting the $I \times R$ drops inside the loop and virtually eliminating this error source.

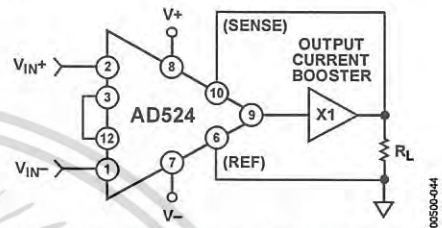


Figure 44. AD524 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ± 10 volt output swing into 2 k Ω . In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 44 shows how a high current booster may be connected inside the loop of an instrumentation amplifier to provide the required current boost without significantly degrading overall performance. Nonlinearities and offset and gain inaccuracies of the buffer are minimized by the loop gain of the AD524 output amplifier. Offset drift of the buffer is similarly reduced.

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal can be used to offset the output by up to ± 10 V. This is useful when the load is floating or does not share a ground with the rest of the system. It also provides a direct means of injecting a precise offset. It must be remembered that the total output swing is ± 10 V to be shared between signal and reference offset.

When the AD524 is of the 3-amplifier configuration it is necessary that nearly zero impedance be presented to the reference terminal.

Any significant resistance from the reference terminal to ground increases the gain of the noninverting signal path, thereby upsetting the common-mode rejection of the AD524.

In the AD524, a reference source resistance unbalances the CMR trim by the ratio of $20 \text{ k}\Omega / R_{\text{REF}}$. For example, if the reference source impedance is 1 Ω , CMR is reduced to 86 dB ($20 \text{ k}\Omega / 1 \Omega = 86 \text{ dB}$). An operational amplifier can be used to provide that low impedance reference point, as shown in Figure 45. The input offset voltage characteristics of that amplifier adds directly to the output offset voltage performance of the instrumentation amplifier.

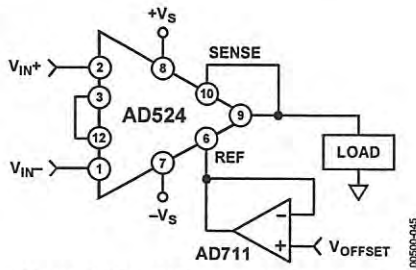
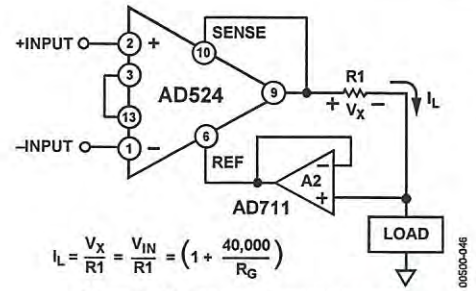


Figure 45. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

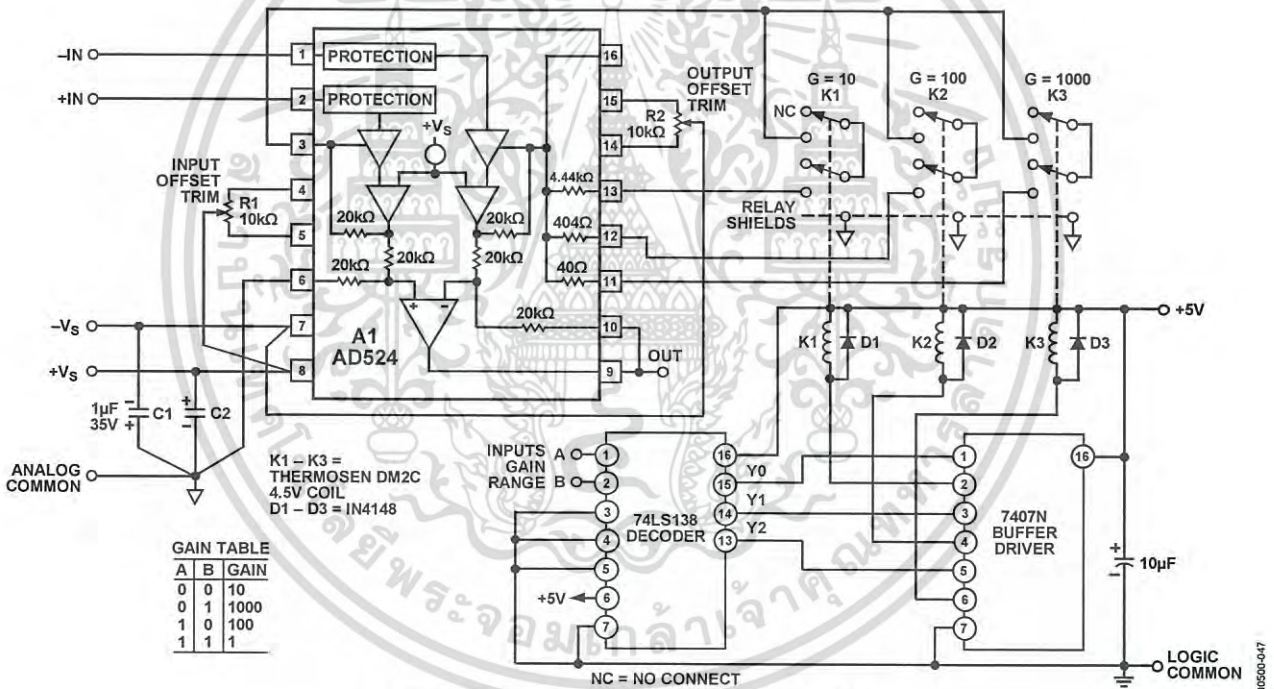
An instrumentation amplifier can be turned into a voltage-to-current converter by taking advantage of the sense and reference terminals, as shown in Figure 46.



$$I_L = \frac{V_x}{R_1} = \frac{V_{IN}}{R_1} = \left(1 + \frac{40,000}{R_G}\right)$$

Figure 46. Voltage-to-Current Converter

By establishing a reference at the low side of a current setting resistor, an output current may be defined as a function of input voltage, gain, and the value of that resistor. Because only a small current is demanded at the input of the buffer amplifier (A2) the forced current, I_L , largely flows through the load. Offset and drift specifications of A2 must be added to the output offset and drift specifications of the AD524.



GAIN TABLE		
A	B	GAIN
0	0	10
0	1	1000
1	0	100
1	1	1

Figure 47. Three-Decade Gain Programmable Amplifier

AD524

PROGRAMMABLE GAIN

Figure 47 shows the AD524 being used as a software programmable gain amplifier. Gain switching can be accomplished with mechanical switches such as DIP switches or reed relays. It should be noted that the on resistance of the switch in series with the internal gain resistor becomes part of the gain equation and has an effect on gain accuracy.

The AD524 can also be connected for gain in the output stage. Figure 48 shows an AD711 used as an active attenuator in the output amplifier's feedback loop. The active attenuation presents very low impedance to the feedback resistors, therefore minimizing the common-mode rejection ratio degradation.

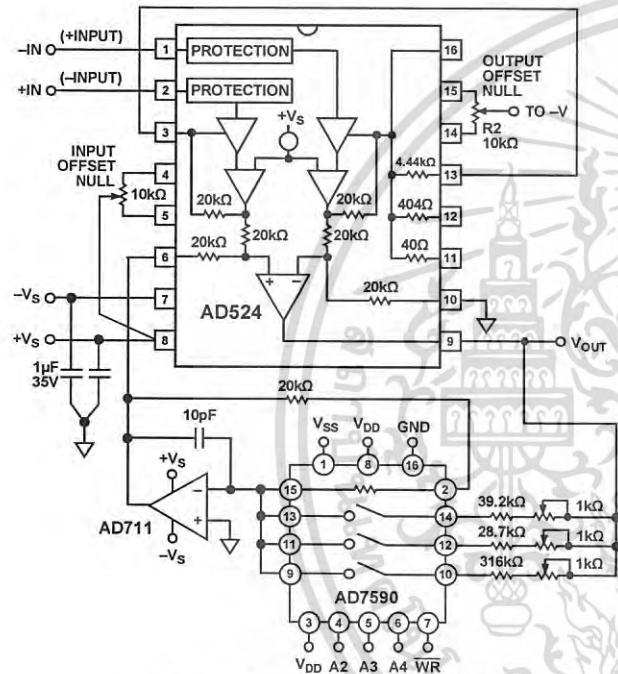


Figure 48. Programmable Output Gain

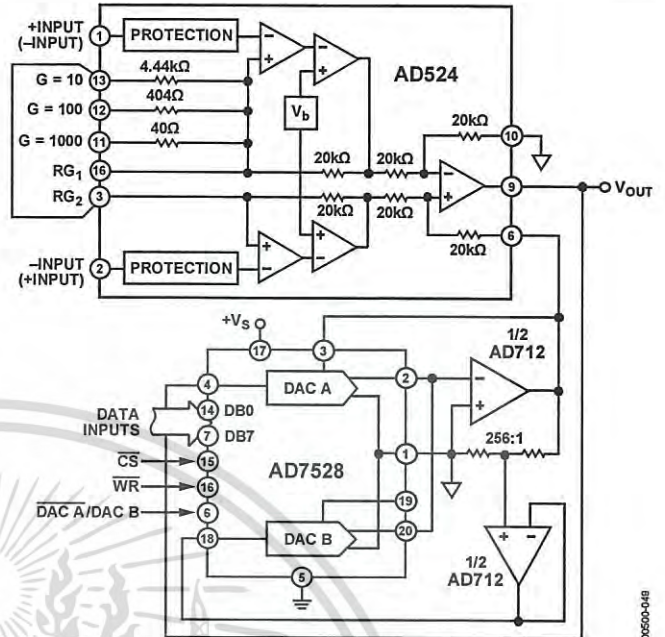


Figure 49. Programmable Output Gain Using a DAC

Another method for developing the switching scheme is to use a DAC. The AD7528 dual DAC, which acts essentially as a pair of switched resistive attenuators having high analog linearity and symmetrical bipolar transmission, is ideal in this application. The multiplying DAC's advantage is that it can handle inputs of either polarity or zero without affecting the programmed gain. The circuit shown uses an AD7528 to set the gain (DAC A) and to perform a fine adjustment (DAC B).

AUTOZERO CIRCUITS

In many applications, it is necessary to provide very accurate data in high gain configurations. At room temperature, the offset effects can be nulled by the use of offset trim potentiometers. Over the operating temperature range, however, offset nulling becomes a problem. The circuit of Figure 50 shows a CMOS DAC operating in bipolar mode and connected to the reference terminal to provide software controllable offset adjustments.

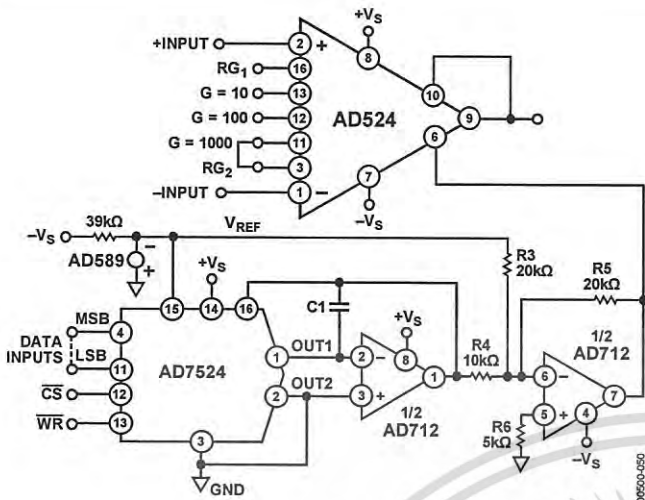


Figure 50. Software Controllable Offset

In many applications, complex software algorithms for autozero applications are not available. For those applications, Figure 51 provides a hardware solution.

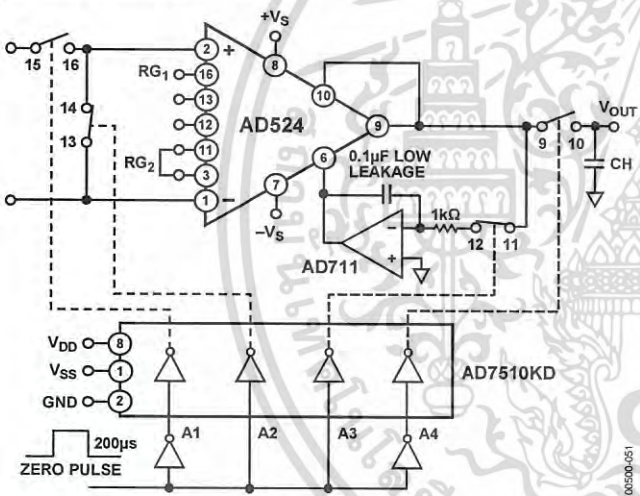


Figure 51. Autozero Circuit

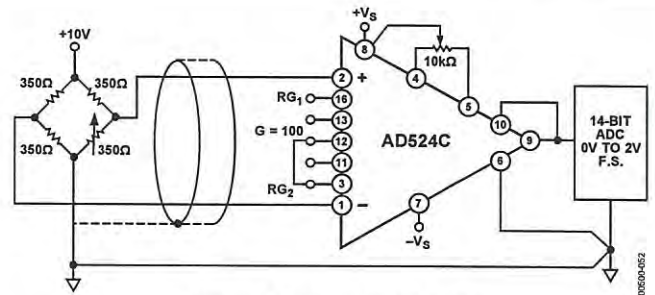


Figure 52. Typical Bridge Application

ERROR BUDGET ANALYSIS

To illustrate how instrumentation amplifier specifications are applied, review a typical case where an AD524 is required to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 52 shows a differential transducer, unbalanced by 100 Ω, supplying a 0 mV to 20 mV signal to an AD524C. The output of the I_A feeds a 14-bit ADC with a 0 V to 2 V input voltage range. The operating temperature range is -25°C to $+85^{\circ}\text{C}$. Therefore, the largest change in temperature, ΔT , within the operating range is from ambient to $+85^{\circ}\text{C}$ ($85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C}$).

In many applications, differential linearity and resolution are of prime importance in cases where the absolute value of a variable is less important than changes in value. In these applications, only the irreducible errors (45 ppm = 0.004%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the analog-to-digital output, the addition of an autogain/autozero cycle removes all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This also reduces errors to 0.004%.

AD524

Table 5. Error Budget Analysis

Error Source	AD524C Specifications	Calculation	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 25^\circ\text{C}$	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 85^\circ\text{C}$	Effect on Resolution
Gain Error	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\% = 2500 \text{ ppm}$	2500 ppm	2500 ppm	–
Gain Instability	25 ppm	$(25 \text{ ppm}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 1500 \text{ ppm}$	–	1500 ppm	–
Gain Nonlinearity	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.003\% = 30 \text{ ppm}$	–	–	30 ppm
Input Offset Voltage	$\pm 50 \mu\text{V}$, RTI	$\pm 50 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = \pm 2500 \text{ ppm}$	2500 ppm	2500 ppm	–
Input Offset Voltage Drift	$\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ –	$(\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 30 \mu\text{V}$ $30 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 1500 \text{ ppm}$	–	1500 ppm	–
Output Offset Voltage ¹	$\pm 2.0 \text{ mV}$	$\pm 2.0 \text{ mV}/20 \text{ mV} = 1000 \text{ ppm}$	1000 ppm	1000 ppm	–
Output Offset Voltage Drift ¹	$\pm 25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 25 \mu\text{V}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 1500 \mu\text{V}$ $1500 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 750 \text{ ppm}$	–	750 ppm	–
Bias Current-Source Imbalance Error	$\pm 15 \text{ nA}$	$(\pm 15 \text{ nA})(100 \Omega) = 1.5 \mu\text{V}$ $1.5 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 75 \text{ ppm}$	75 ppm	75 ppm	–
Bias Current-Source Imbalance Drift	$\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C})(100 \Omega)(60^\circ\text{C}) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 30 \text{ ppm}$	–	30 ppm	–
Offset Current-Source Imbalance Error	$\pm 10 \text{ nA}$	$(\pm 10 \text{ nA})(100 \Omega) = 1 \mu\text{V}$ $1 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 50 \text{ ppm}$	50 ppm	50 ppm	–
Offset Current-Source Imbalance Drift	$\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C}$	$(100 \text{ pA}/^\circ\text{C})(100 \Omega)(60^\circ\text{C}) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 30 \text{ ppm}$	–	30 ppm	–
Offset Current-Source Resistance-Error	$\pm 10 \text{ nA}$	$(10 \text{ nA})(175 \Omega) = 3.5 \mu\text{V}$ $3.5 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 87.5 \text{ ppm}$	87.5 ppm	87.5 ppm	–
Offset Current-Source Resistance-Drift	$\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C}$	$(100 \text{ pA}/^\circ\text{C})(175 \Omega)(60^\circ\text{C}) = 1 \mu\text{V}$ $1 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 50 \text{ ppm}$	–	50 ppm	–
Common Mode Rejection 5 V DC	115 dB	$115 \text{ dB} = 1.8 \text{ ppm} \times 5 \text{ V} = 8.8 \mu\text{V}$ $8.8 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 444 \text{ ppm}$	444 ppm	444 ppm	–
Noise, RTI (0.1 Hz to 10 Hz)	$0.3 \mu\text{V p-p}$	$0.3 \mu\text{V p-p}/20 \text{ mV} = 15 \text{ ppm}$	–	–	15 ppm
Total Error			6656.5 ppm	10516.5 ppm	45 ppm

¹ Output offset voltage and output offset voltage drift are given as RTI figures.

Figure 53 shows a simple application in which the variation of the cold-junction voltage of a Type J thermocouple-iron ± constantan is compensated for by a voltage developed in series by the temperature-sensitive output current of an AD590 semiconductor temperature sensor.

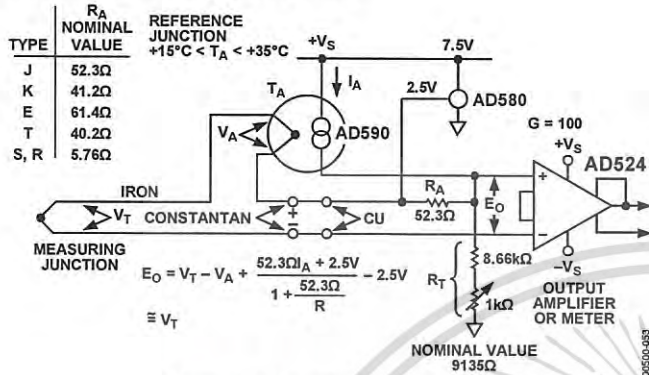


Figure 53. Cold-Junction Compensation

The circuit is calibrated by adjusting R_T for proper output voltage with the measuring junction at a known reference temperature and the circuit near 25°C. If resistors with low temperature coefficients are used, compensation accuracy is to within ±0.5°C, for temperatures between +15°C and +35°C.

Other thermocouple types may be accommodated with the standard resistance values shown in Table 5. For other ranges of ambient temperature, the equation in Figure 53 may be solved for the optimum values of R_T and R_A.

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 54 includes both autozero and autogain capability. By dedicating two of the differential inputs, one to ground and one to the A/D reference, the proper program calibration cycles can eliminate both initial accuracy errors and accuracy errors over temperature. The autozero cycle, in this application, converts a number that appears to be ground and then writes that same number (8-bit) to the AD7524, which eliminates the zero error. Because its output has an inverted scale, the autogain cycle converts the A/D reference and compares it with full scale. A multiplicative correction factor is then computed and applied to subsequent readings.

For a comprehensive study of instrumentation amplifier design and applications, refer to the *Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers (3rd Edition)*, available free from Analog Devices, Inc.

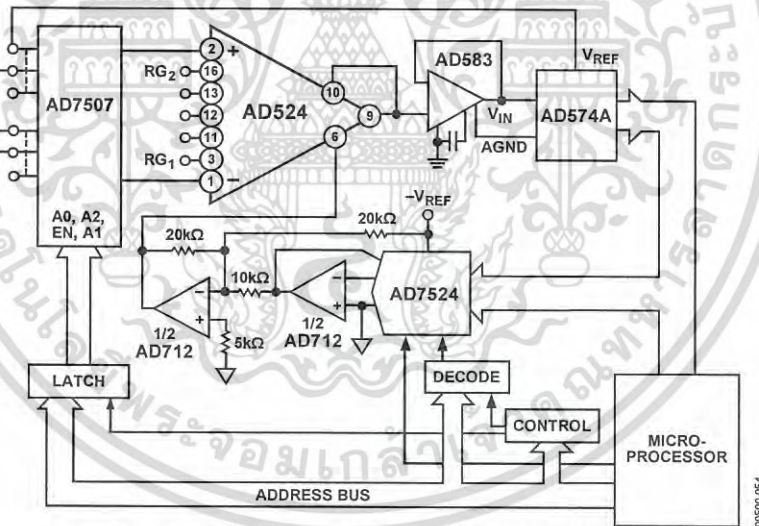
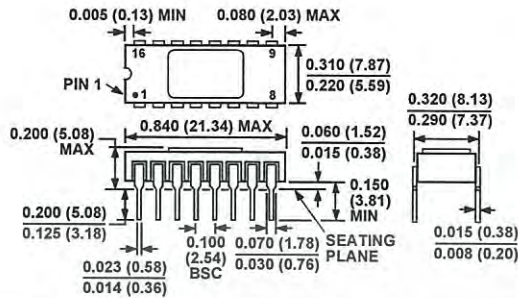


Figure 54. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

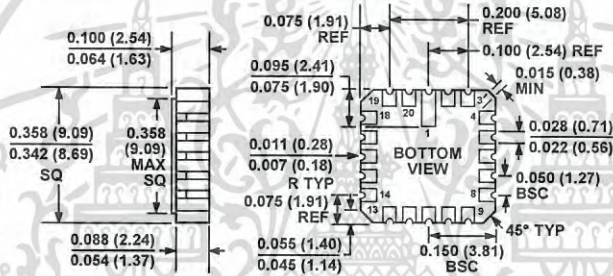
OUTLINE DIMENSIONS



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 55. 16-Lead Side-Brazed Ceramic Dual In-Line [SBDIP] (D-16)

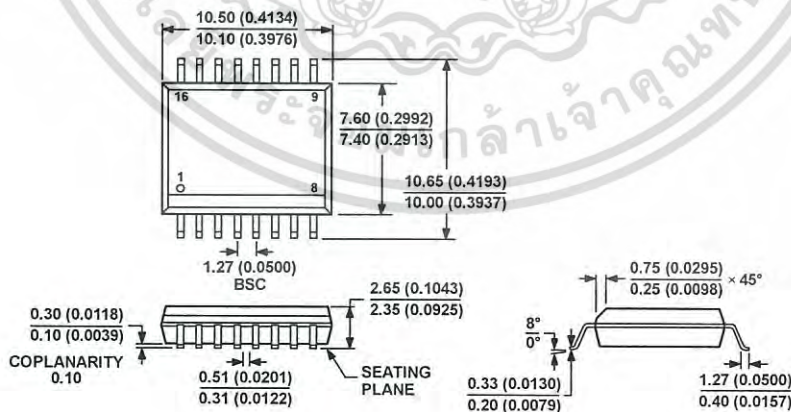
Dimensions shown in inches and (millimeters)



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 56. 20-Terminal Ceramic Leadless Chip Carrier [LCC] (E-20)

Dimensions shown in inches and (millimeters)



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-013-AA
CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 57. 16-Lead Standard Small Outline Package [SOIC_W] Wide Body (RW-16)

Dimensions shown in millimeters and (inches)

ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Package Description	Package Option
AD524AD	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524ADZ ¹	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524AE	-40°C to +85°C	20-Terminal LCC	E-20
AD524AR-16	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W	RW-16
AD524AR-16-REEL	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W, 13" Tape and Reel	RW-16
AD524AR-16-REEL7	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W, 7" Tape and Reel	RW-16
AD524ARZ-16 ¹	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W	RW-16
AD524ARZ-16-REEL7 ¹	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W, 7" Tape and Reel	RW-16
AD524BD	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524BDZ ¹	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524BE	-40°C to +85°C	20-Terminal LCC	E-20
AD524CD	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524CDZ ¹	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524SD	-55°C to +125°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524SD/883B	-55°C to +125°C	16-Lead SBDIP	D-16
5962-8853901EA ²	-55°C to +125°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524SE/883B	-55°C to +125°C	20-Terminal LCC	E-20
AD524SCHIPS	-55°C to +125°C	Die	

¹ Z = RoHS Compliant Part.

² Refer to the official DESC drawing for tested specifications.