

การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำควมด้วยคอมพิวเตอร์
IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR
DETERMINATION OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES BY
HALL EFFECT MEASUREMENT

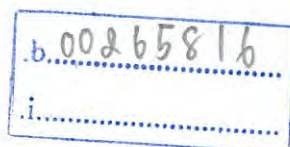


โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำควมด้วยคอมพิวเตอร์
IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR
DETERMINATION OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES BY
HALL EFFECT MEASUREMENT



จิรนนท์ เจริญพันธ์
ภัทรพล สอกระบัง



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในปีการศึกษา 2558 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR
DETERMINATION OF SEMICONDUCTOR PROPERTIES BY
HALL EFFECT MEASUREMENT



Jiranun Charoenphant
Phattaphol Sokjabok

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ
 ความคุมด้วยคอมพิวเตอร์
 Improvement of Computer-Based System for Determination of
 Semiconductor Properties by Hall Effect Measurement

ชื่อนักศึกษา นางสาวจิรนนท์ เจริญพันธ์ รหัสนักศึกษา 55051469
 นายภัทรพล ศอกจะบก รหัสนักศึกษา 55051579

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา
 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.พิชานันท์ สีเศรษฐ์โสภณ ประธานกรรมการ	พ.พิชานันท์ สี.
อ.ภูมินทร์ จินดาจิราวัฒน์ กรรมการ	ภูมินทร์
อ.ธนภรณ์ สีสาวพัฒนานนท์ กรรมการ	ธนภรณ์
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	วราวุฒิ
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การปรับปรุงระบบวัดปรากฏการณ์ฮอลล์เพื่อหาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจิรนนท์ เจริญพันธ์	รหัสนักศึกษา 55051469
	นายภัทรพล ศอกจะบก	รหัสนักศึกษา 55051579
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ใช้ร่วมกับวิธีของเวนเดอร์เพาท์ซึ่งควบคุมการวัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นระบบการวัดทั้งหมดประกอบด้วย กล้องควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า สนามแม่เหล็กถาวรความเข้มขนาด 5500 G เครื่องกำเนิดกระแส เครื่องวัดแรงดันทางไฟฟ้า พร้อมด้วยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถควบคุม การสับขั้วไฟฟ้า การทำงานของเครื่องกำเนิดกระแส บันทึกค่าแรงดันทางไฟฟ้า พร้อมด้วยหน้าต่างการทำงานติดต่อกับผู้ใช้งาน และ แสดงผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า ชนิด ความหนาแน่น และ สภาพคล่องของพาหะ สภาพต้านทานของวัสดุจะถูกทำการวัดด้วยวิธีการของเวนเดอร์เพาท์เพื่อป้องกันการเกิดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความต้านระหว่างรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับตัวอย่าง และ แรงดันฮอลล์ทั้งหมด 8 ค่า เกิดจากการป้อนย้อนกลับของทิศการไหลของกระแส และ กลับทิศทางของสนามแม่เหล็ก จะถูกนำมาเฉลี่ยค่า กล้องควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า ทำหน้าสับขั้วไฟฟ้าในขณะที่ทำการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและแรงดันฮอลล์นั้น ประกอบขึ้นจากรีเลย์ 4 ช่อง 5 V ซึ่งสามารถควบคุมการสับขั้วไฟฟ้าผ่านทาง ET-EASY MEGA2560 Arduino board ผลการทดสอบระบบการควบคุมการสับไฟฟ้าทั้งสี่ขั้วสามารถทำหน้าที่การสับขั้วไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง ผลการวัดตัวอย่างทดสอบ 2 ตัวอย่าง ที่ทราบค่า 2 ตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ ซิลิกอนที่มีการโด๊ปด้วยโบรอนที่สภาพต้านทานทางไฟฟ้า 30-50 โอห์ม – เซนติเมตร และ ซิลิกอนที่มีการโด๊ปด้วยแอนติโมนีที่สภาพต้านทานทางไฟฟ้า 0.01-0.05 โอห์ม – เซนติเมตร โปรแกรมแสดงผลการวัดพบว่าค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ และ สภาพคล่อง มีค่าสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่ได้จาก American Society for Testing and Materials.

คำสำคัญ : ปรากฏการณ์ฮอลล์ วิธีการวัดแบบเวนเดอร์เพาท์ การคายประจุ สารกึ่งตัวนำ

Title	Improvement of Computer-Based System for Determination of Semiconductor Properties by Hall Effect Measurement	
Students	Miss.Jiranun charoenphant	Student ID 55051469
	Mr.Phattaphol Sokjabok	Student ID 55051579
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Warawoot Thowladda	
Co-Advisor	Dr. S.Tipawan Khlayboonme	

Abstract

This special project focused on the development of an automatic measurement system under van der Pawk and Hall effect measurement. This system was used to determine electrical properties of semiconductor materials. It consists of a switching control box, a permanent magnet with a constant magnetic field of 5500 G, a current source, a voltmeter and software. In this special, the software was developed with LabVIEW software for relying on automation switching the current source and voltmeter to all side of the sample. It has windows for interfacing with the user and displays resistivity, carrier type, carrier concentration and mobility after complete of the measurement. The resistivity was measured by the four-point probe technique under van der Pawk method. The resultant eight values of Hall voltage were measured via the four electrodes under conditions of reverse of the directions of magnetic field and current injected into the sample. The switching control box, including four-channel relay with 5 V, was controlled via an ET-EASY MEGA2560 Arduino board. To verify the electrical property measurements provided by the developed system, two silicon wafers were used: p-type B-doped Si with resistivity of 30-50 W-cm and n-type Sb-doped Si with resistivity of 0.01-0.05 W-cm. The values of resistivity, carrier concentration and mobility agreed well with those from American Society for Testing and Materials.

Keywords : Hall effect, Van der Pauw Method, Discharge electron, Semiconductor

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

รศ.ดร. วรารุณี เถาลัดดา ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องมือ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำโครงการพิเศษนี้และยังเป็นประโยชน์ในการนำความรู้และเทคนิคต่างๆไปใช้ในหน้าที่การงานในอนาคตได้อีกด้วย อีกทั้งยังอดทนให้คนไม่ชยันได้ทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จนเกิดความรู้ความสามารถในด้านใหม่ๆ จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ซึ่งคอยแนะนำและสนับสนุนการทำโครงการพิเศษนี้ในทุกๆ ด้าน ทั้งด้านทักษะความรู้ความสามารถในการทำงานและสนับสนุนเครื่องมือต่างๆการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่มีความสำคัญที่สุดในชีวิต ได้แก่ บิดา มารดา ปู่ ย่า ตา และยาย ผู้คอยอบรมเลี้ยงดูและสนับสนุนทุกอย่างในทางที่ดี เนื่องจากกำลังใจเหล่านี้จึงทำให้โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

จิรนนท์ เจริญพันธ์
ภัทรพล ศอกจะบก



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารกึ่งตัวนำ	5
2.1.1 ระดับพลังงาน (Energy Levels)	6
2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิด n และ p	7
2.2 ความต้านทานไฟฟ้า	8
2.3 van der Pauw Method	9
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)	10
2.4.1 พาหะที่อยู่นบนแผ่นสารตัวอย่างเป็นอิเล็กตรอน	10
2.4.2 พาหะที่อยู่นบนแผ่นสารตัวอย่างเป็นโฮลอิเล็กตรอน	11
2.7 รีเลย์	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการสร้างส่วนประกอบ	16
3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร	16
3.1.2 วงจรรีเลย์และตัวควบคุม	17
3.1.3 Digital multimeter และ Current source	19
3.1.4 แผ่นวาง sample	20
3.2 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล	21
3.3 ขั้นตอนการทดลองวัด	37
3.3.1 การวัดด้วยมือ	37
3.3.2 การวัดด้วยระบบอัตโนมัติ	37

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม	38
4.2 ผลการทดลอง	46
4.3 อภิปรายผล	60
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการดำเนินงาน	3
2.1 แสดงการวัดฮอลล์ตาม van der Pauw configuration ทั้ง 4 กรณี	14
4.1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชั้นที่ทราบค่าแล้ว	46
4.2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	46
4.3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	48
4.4 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	48
4.5 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีวัด Auto	50
4.6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีแบบ Auto	51
4.7 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีแบบ Auto	52
4.8 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto กับค่าที่ทราบ	53
4.9 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	54
4.10 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	55
4.11 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	56
4.12 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีแบบ Auto	57
4.13 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีแบบ Auto	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
4.14 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ในลักษณะ สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีแบบ Auto	59
4.15 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto กับค่าที่ทราบ	60



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การวัดค่าความต้านทาน R	5
2.2 (ก) อะตอม Si และ (ข) อะตอม Ge	5
2.3 ภาพจำลองพันธะโควาเลนต์ของอะตอม Si หนึ่งอะตอม	6
2.4 ภาพจำลองแถบพลังงาน	6
2.5 การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 5 (แอนติโมนี)	7
2.6 การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3 (โบรอน)	7
2.7 ความต้านทานของจุดสัมผัส	8
2.8 ความต้านทานของสายดิน	8
2.9 ความต้านฉนวน	9
2.10 แสดงลักษณะการติดคอนแทคส์ของสารตัวอย่างแบบต่างๆ	9
2.11 แสดงการติดคอนแทคส์เพื่อวัดความต้านทาน	9
2.12 ปรากฏการณ์ฮอลล์ของพาหะ ที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮล	12
2.13 การวัดฮอลล์แบบ van der Pauw	13
2.14 รีเลย์	14
2.15 โครงสร้างของรีเลย์	15
2.16 สภาวะการทำงานของรีเลย์	15
3.1 สนามแม่เหล็กถาวร	16
3.2 สนามแม่เหล็กถาวร(ต่อ)	17
3.3 วงจรสวิตช์รีเลย์	17
3.4 Relay Moule 4 channel 5 V	18
3.5 ET-EASY MEGA2560	18
3.6 โปรแกรม Arduino	18
3.7 Digital multimeter(ซ้าย)และ Current source (ขวา)	19
3.8 สาย GPIB (ซ้าย) และ สาย 408JE (ขวา)	19
3.9 แผ่นพีซีบีที่นำมากัดเป็นแผ่นสำหรับวาง Sample	20
3.10 ลักษณะการต่อขั้วของ Sample เพื่อวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	20
3.11 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจากปุ่ม	21
3.12 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจากKeyboard	22
3.13ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบโดยเราสามารถเลือกได้สองรูปแบบ ทั้งการวัดแบบแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์	23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบโดยเราสามารถเลือกได้สองรูปแบบ ทั้งการวัดแบบแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์(ต่อ)	24
3.15 ไดอะแกรมแสดงการคำนวณของระบบ	25
3.16 ไดอะแกรมแสดงการแสดงผลและการจบการทำงานของระบบ	26
3.17 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager เปิดไฟล์เซ็ทอัพ	27
3.18 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager	27
3.19 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager เลือกตำแหน่งในการติดตั้งโปรแกรม	28
3.20 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager รอโปรแกรมทำการติดตั้ง	28
3.21 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager ติดตั้งโปรแกรมสำเร็จ	28
3.22 เปิดโปรแกรม VI Package Manager	29
3.23 พิมพ์ 'Arduino' ใน search box ที่อยู่บนมุมบนขวาโปรแกรม VIPM	30
3.24 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	30
3.25 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	31
3.26 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	31
3.27 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	31
3.28 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	32
3.29 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	32
3.30 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	32
3.31 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	33
3.32 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	33
3.33 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	33
3.34 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA	34
3.35 เปิดโปรแกรม Arduino เพื่ออัปโหลด Firmware ลงใน Controller	34
3.36 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller เลือกไฟล์ที่ต้องการอัปโหลด	35
3.37 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller เลือกบอร์ดที่ใช้ในการอัปโหลดไฟล์	35
3.38 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller เลือกพอร์ทที่ใช้	36
3.39 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller รันโปรแกรม	36
3.40 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller อัปโหลดเสร็จสมบูรณ์	37
4.1 หน้าต่างSetting ใช้สำหรับเชื่อมต่อบอร์ด Arduino, Digital multimeter, Current Source, การเลือกรูปแบบการวัดและป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการวัด	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 หน้าต่างSetting เมื่อเราทำการเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว,เลือกรูปแบบในการวัดเป็นการวัดแบบแวนเดอร์พาว,ป้อนค่าต่างๆครบถ้วน ต้องทำการกดปุ่ม Measurement แล้วกด Ctrl R เพื่อ Run Program	38
4.3 หน้าต่างการวัดแวนเดอร์พาว เป็นหน้าต่างที่แสดงค่าการวัดในแต่ละครั้งของการสับขั้วไฟฟ้า	39
4.4 หน้าต่างรวมของการวัดแวนเดอร์พาว เป็นหน้าต่างที่แสดงค่าเฉลี่ยของการวัดและทำการคำนวณค่าที่เราต้องการทราบให้เรียบร้อยแล้ว พร้อมทั้งแสดงค่าที่คำนวณได้	39
4.5 หน้าต่างการบันทึกผลที่เราทำการวัดได้จากโปรแกรม	40
4.6 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการบันทึกค่าจากโปรแกรม	40
4.7 ในโปรแกรมสามารถทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้โดยการกดเลือกรูปแบบของการวัดเป็นปรากฏการณ์ฮอลล์, กดปุ่มMeasurementและกด Ctrl R เพื่อ Run Program	41
4.8 หน้าต่างวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ การวัดนอกสนามแม่เหล็ก, การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น,การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	41
4.9 เมื่อทำการวัดค่าปรากฏการณ์ฮอลล์นอกสนามแม่เหล็กแล้วจะมี pop-up ให้ทำการตรวจสอบว่าเราทำการใส่แผ่น sample ด้านไหนเพื่อที่โปรแกรมจะได้มีการปรับรูปแบบของการวัดให้มีความสอดคล้องกับแผ่น sample ที่นำมาวัด	42
4.10 หน้าต่างการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น (ใส่sampleให้ที่ติดขั้วอยู่ด้านบน)	42
4.11 หน้าต่างเมื่อทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้นเสร็จแล้วจะมี pop-up ให้เราทำการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็ก(ในความจริงแล้วไม่สามารถกลับสนามมาเหล็กได้จึงทำการกลับด้านของแผ่น sample แทน)	43
4.12 หน้าต่างเมื่อเราทำการกลับแผ่นsample ระบบก็จะทำการวัดต่อ	43
4.13 หน้าต่างรวมเมื่อการวัดครบทั้ง 3 ช่วงก็จะมีการแสดงค่าที่เราได้จากการคำนวณและบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำนั้นที่เรานำมาวัดด้วยว่าเป็นชนิดใด	44
4.14 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม	44
4.15 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม	45
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	49
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$] ด้วยวิธีแบบ Auto	51
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับ แรงดันไฟฟ้าของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega.cm$] ด้วยเครื่องมือระบบอัตโนมัติ	52
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \Omega.cm$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	55
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับ แรงดันไฟฟ้า ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \Omega.cm$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual	56
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว (A) กับแรงดันไฟฟ้า (V) ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \Omega.cm$] ด้วยวิธีแบบ Auto	58
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \Omega.cm$] ด้วยวิธีแบบ Auto	59

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Si	ซิลิคอน
Ge	เยอรมาเนียม
E_g	ช่องว่างพลังงาน
E_c	พลังงานต่ำสุดของแถบพลังงานไฟฟ้า
E_v	พลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
E_A	ระดับผู้รับ
E_D	ระดับผู้ให้
E_H	สนามไฟฟ้าฮอลล์
F_B	แรงสนามแม่เหล็ก
R_H	สัมประสิทธิ์ฮอลล์
V_H	ความต่างศักย์ฮอลล์
n_s	ความเข้มข้นของพาหะที่ผิวหน้า
μ_m	ความคล่องตัวของพาหะ
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า
R_s	ความต้านทานที่ผิวหน้า
I	กระแสไฟฟ้า
V	ความต่างศักย์ไฟฟ้า
J	ความหนาแน่นของกระแส
B	สนามแม่เหล็ก
n	ความหนาแน่นของพาหะ
Ω	โอห์มหน่วยของความต้านทาน
K	เคลวินหน่วยอุณหภูมิ
R	ความต้านทาน
N-type	สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
P-type	สารกึ่งตัวนำชนิดพี
USB	Universal Serial Bus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) หรือฮอลล์เอฟเฟค เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ค้นพบโดย เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปีพ.ศ.2422 สิ่งที่เขาค้นพบมีหลักการโดยสรุปดังนี้ แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือเกิดแรงดันโดยเรียกว่าแรงดันฮอลล์ (Hall Voltage) ขึ้นที่ตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสคงที่ให้แก่แผ่นตัวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านแผ่นตัวนำอย่างคงที่โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากซ้ายไปยังขวา

เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กมากระทำกับแผ่นตัวนำในทิศทางตั้งฉากจะทำให้ประจุพาหะ (Charge Carrier) ของตัวนำที่เปี่ยมกันไป เช่น ประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนมีประจุเป็นประจุลบทำให้ด้านบนของแผ่นตัวนำมีขั้วทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบ ส่วนด้านล่างของแผ่นตัวนำจะมีขั้วตรงข้ามกับด้านบน นั่นคือมีประจุเป็นบวก เมื่อทำการวัดความต่างศักย์ระหว่างด้านบนกับด้านล่างของแผ่นตัวนำจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นแรงดันลบ โดยขนาดของแรงดันที่วัดได้นั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่มากระทำ หากความเข้มของสนามแม่เหล็กมากก็จะทำให้เกิดแรงดันมาก และถ้าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลง แรงดันที่วัดได้ก็จะน้อยตามไปด้วย ส่วนกรณีที่มีการกลับขั้วแม่เหล็กจะทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่ากลับขั้วกับกรณีที่กล่าวมา ตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นอิเล็กตรอนได้แก่ ตัวนำไฟฟ้าทั่วไป สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) ส่วนตัวนำที่มีประจุพาหะเป็นบวกได้แก่ สารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-type) ปัจจุบันฮอลล์เอฟเฟคจะอยู่ในรูปของวงจรรวมหรือ IC(Integrated Circuit) ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสารกึ่งตัวนำจะทำให้แรงดันเอาท์พุทที่มีค่าสูงกว่าตัวนำไฟฟ้าทั่วไป

การวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เช่น ความต้านทาน ความหนาแน่นของพาหะ สภาพความคล่องตัวของพาหะ เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยการวัดส่งผลให้ทราบถึงคุณสมบัติ รวมทั้งสามารถทำให้ปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อกระบวนการผลิตจะได้สมบัติของต่างๆของสารกึ่งตัวนำได้หลายค่าด้วยการวัดเพียงครั้งเดียว เช่น ความต้านทานที่ผิวหน้า (Sheet Resistance : R_s) ความหนาแน่นของพาหะที่ผิวหน้า (Sheet Carrier Concentration : n_s) ความคล่องตัวของพาหะข้างมาก (Majority Carrier Mobility : μ_m) สภาพต้านทานไฟฟ้า (Bulk Electrical Resistivity : ρ) เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดได้อย่างง่ายอีกด้วย จึงทำให้การวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์นี้เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ในห้องปฏิบัติการที่เราใช้ส่วนใหญ่เป็นการวัดมือ ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการจดบันทึกผลและทำการคำนวณผล

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างกระบวนการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แบบอัตโนมัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัด การบันทึกค่า รวมไปถึงลดระยะเวลาในการวัด โดยรวมไปถึงการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นคือการเก็บประจุของแผงวงจรหรือแผ่น PCB ประจุที่ค้างอยู่ในวงจรอาจจะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนได้เมื่อเราทำการใช้งานเครื่องมือวัดซึ่งถ้าเราสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้นี้อาจจะทำให้เครื่องมือที่เราสร้างขึ้นมานั้นเกิดความเสถียรมากขึ้นและมีความแม่นยำในการวัดค่าอีกด้วยเพื่อนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการในงบประมาณที่ไม่มากนักเกินไป โดยการประยุกต์จากการวัดมือที่ใช้อยู่เข้ากับวงจรเพื่อทำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานให้สามารถใช้งานและประมวลผลได้อย่างสะดวกสบายมากขึ้นและมีความเหมาะสมกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการและเรายังสามารถนำโปรแกรมที่เราได้ทำการเขียนขึ้นเพื่อนำไปพัฒนาต่อในงานอื่นๆได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 2) เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 3) เพื่อสร้างเครื่องมือวัดที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงในห้องปฏิบัติการ
- 4) เพื่อการสอบเทียบการทำงานของเครื่องมือกับชิ้นสารที่ได้มาตรฐาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 2) ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
- 3) ทำการวัดชิ้นงานที่ทราบค่าสภาพความต้านทานและความหนาแน่นของพาหะด้วยระบบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น
- 4) ทำ วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 วิธีดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนในการดำเนินงาน
สิงหาคม - กันยายน	- ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์ - ศึกษาหลักการทำงานของระบบการวัดวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ - ศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ - ศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างระบบการวัด
ตุลาคม - พฤศจิกายน	- จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการใช้ในการทำการวิจัย - ออกแบบชุดวางแม่เหล็กของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ - วางแผนการสร้างระบบ เขียนโปรแกรม และรวมไปถึงการวิเคราะห์
ธันวาคม - มกราคม	- ทำการทดลองการวัดสารกึ่งตัวนำกับเครื่องมือที่มีโดยการวัดด้วยมือ - วัดความสม่ำเสมอของค่าของสนามแม่เหล็ก - สร้างระบบการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์ - ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการควบคุมการทำงานของระบบเครื่องมือวัด - ทำการทดลองใช้ระบบที่ได้สร้างขึ้นมาว่าสามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพหรือไม่
กุมภาพันธ์ - เมษายน	- ทำการวัดชิ้นงานที่ทราบค่า - วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองเพื่อทำการปรับปรุงให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมเพื่อนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมอื่นๆ พร้อมทั้งเข้าใจหลักการต่างๆของการเขียนโปรแกรม
- 2) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ฮอลล์ รวมไปถึงหลักการการทำงานของระบบการวัดผล
- 3) ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
- 4) รู้และสามารถทำการออกแบบระบบของการวัดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจากระบบการวัดด้วยมือไปเป็นการวัดแบบอัตโนมัติ
- 5) สามารถนำเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนั้นไปทดลองใช้งานได้ในห้องปฏิบัติการจริง
- 6) สร้างความสะดวกสบายในการวัดผลการทดลองมากขึ้นและยังทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

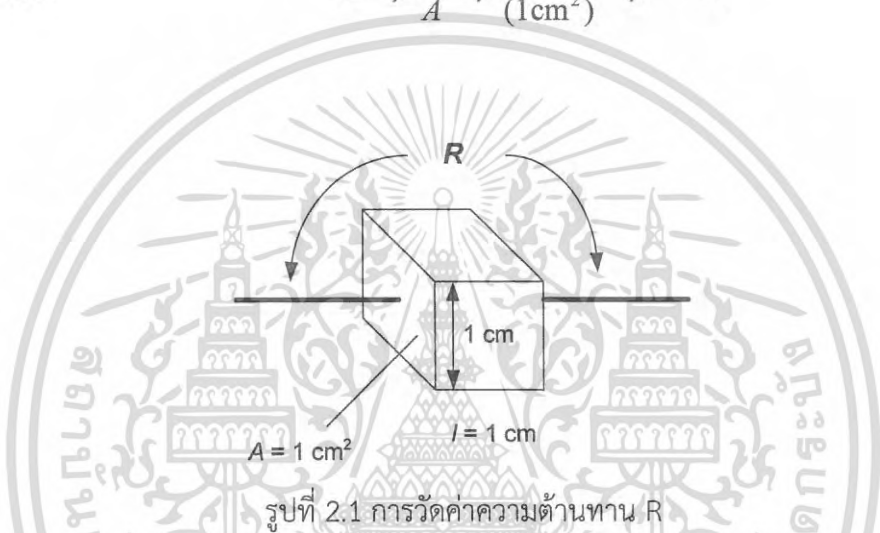
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ

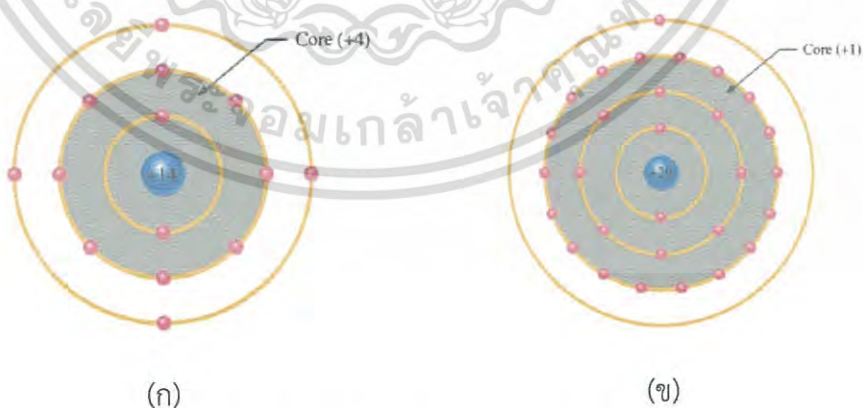
สารกึ่งตัวนำเป็นธาตุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างตัวนำไฟฟ้า(Conductor) และ ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ซึ่งเราสามารถแบ่งแยกได้โดยใช้ค่า ความนำจำเพาะ (Resistivity; ρ) ซึ่งหาได้จากการวัดค่าความต้านทาน R ของวัสดุที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.1

เนื่องจาก
$$\rho = \frac{RA}{l} \quad \Omega\text{-cm} \quad (2.1)$$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{(1\text{cm})}{(1\text{cm}^2)} = \rho \quad \Omega$$

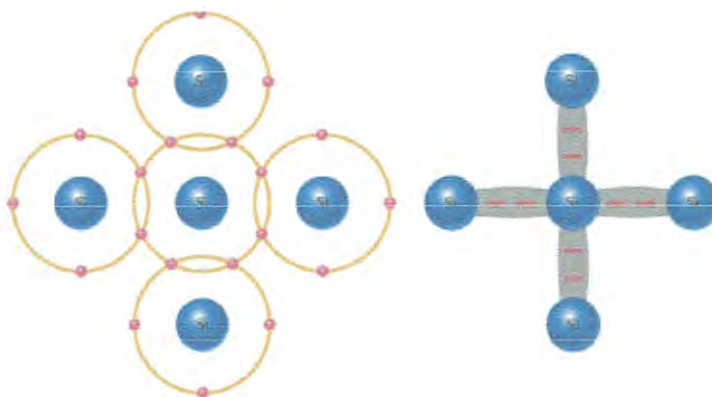


สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ได้แก่ธาตุ เยอรมันเนียม (Germanium; Ge) และซิลิกอน (Silicon; Si)



รูปที่ 2.2 (ก) อะตอม Si และ (ข) อะตอม Ge

รูปที่ 2.2 เป็นภาพจำลองอะตอมอย่างง่ายของ Si และ Ge ซึ่งจะเห็นได้ว่าอะตอมของ Si มีอิเล็กตรอนที่วงนอกสุดหรือ วาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 4 ตัว การที่อะตอมจะเสถียรได้อะตอมจะใช้อิเล็กตรอนร่วมกับอะตอม Si ที่อยู่ข้างเคียงซึ่งเรียกว่าพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



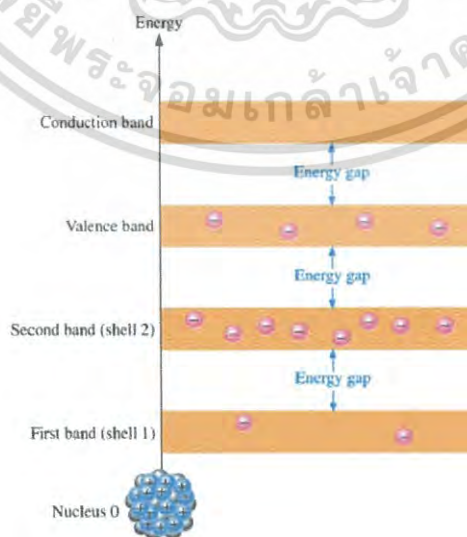
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองพันธะโควาเลนต์ของอะตอม Si หนึ่งอะตอม

2.1.1 ระดับพลังงาน (Energy Levels)

อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมจะแบ่งเป็นชั้นๆ โดยในแต่ละชั้นจะมีระดับพลังงานแตกต่างกัน โดยอิเล็กตรอนที่มีวงจรรอบนิวเคลียสเท่าใด ก็ยังมีระดับพลังงานสูงขึ้น รูปที่ 2.4 เป็นภาพจำลองแถบพลังงานของอิเล็กตรอนรอบๆนิวเคลียสของอะตอม

ความแตกต่างของระดับพลังงานที่ทำให้วาเลนซ์อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจร ซึ่งเรียกว่า แถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) ที่ใช้ในการยึดเกาะติดกันระหว่างอะตอม กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งเรียกว่า พลังงานนำกระแส (Conduction Energy) นี้เราเรียกว่า พลังงานช่องว่าง (Energy Gap; E_g) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เมื่อวาเลนซ์อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากความร้อนหรือแสงสว่าง จะมีระดับพลังงานสูงกว่า E_g ก็จะเข้าสู่ระดับพลังงานนำกระแส

สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าจะมี E_g มากกว่า 5 eV ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำจะมีแถบพลังงานนำกระแสซ้อนทับกับแถบพลังงานวาเลนซ์



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิด n และ p

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเจือสารที่ไม่บริสุทธิ์ลงไป ซึ่งเราเรียกว่าการโด๊ป (Doping) การเจือสารเจือปนเพียงเล็กน้อย จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นอย่างมาก

1. สารกึ่งตัวนำชนิด n (n-type Semiconductor)

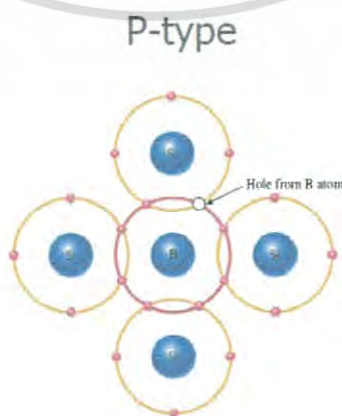
สารกึ่งตัวนำชนิด n ได้จากการเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 5 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น แอนติโมนี Sb, อาร์เซนิก As หรือ ฟอสฟอรัส P เป็นต้น ลงใน Ge หรือ Si บริสุทธิ์ รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 5 (แอนติโมนี) ทำให้เกิดวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อะตอมของสารเจือ อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่นี้ เมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย ก็พร้อมที่จะเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่นำไฟฟ้าได้ สารกึ่งตัวนำชนิด n มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ (Negative)



รูปที่ 2.5 การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 5 (แอนติโมนี)

2. สารกึ่งตัวนำชนิด p (p-type Semiconductor)

ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิด p จะได้จากการเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3 ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ โบรอน B, แกลเลียม Ga หรือ อินเดียม In เป็นต้น ลงใน Ge หรือ Si บริสุทธิ์ รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3 (โบรอน) ทำให้ขาดวาเลนซ์อิเล็กตรอนไปหนึ่งตัว เกิดเป็นช่องว่าง หรือ โฮล (Hole) ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวก (Positive)



รูปที่ 2.6 การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3 (โบรอน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความต้านทานไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลวดสายไฟ และอิเล็กตรอนจะวิ่งชนกับอะตอมของเส้นลวด เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น เรียกว่าความต้านทาน(Resistance) ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) ความต้านทานเกิดขึ้นทุกๆ ที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในสายไฟเท่านั้น ตัวอย่างความต้านทานต่างๆ มีดังนี้ ความต้านทานของสารตัวนำ ได้แก่ ความต้านทานของลวดสายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้า ความต้านทานของสารอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ความต้านทานของสารละลายกรดเกลือ กรดกำมะถัน น้ำเกลือ เป็นต้น ความต้านทานของจุดสัมผัส ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของสวิตช์หรือรอยเชื่อมต่อระหว่างสายไฟ ที่จุด สัมผัสนี้กระแสจะไหลได้ยากเพราะมีความต้านทานสูงความต้านทานของจุดสัมผัสนี้จะเป็นปัญหามากเมื่อให้กระแสไหลผ่าน เป็นจำนวนมากค่าความต้านทานนี้จะลดลงโดยการขัดผิวที่จุดสัมผัสให้เรียบหรือเพิ่มแรงกดที่จุดสัมผัส หรือบัดกรีเชื่อมต่อ ระหว่างสายไฟเสีย



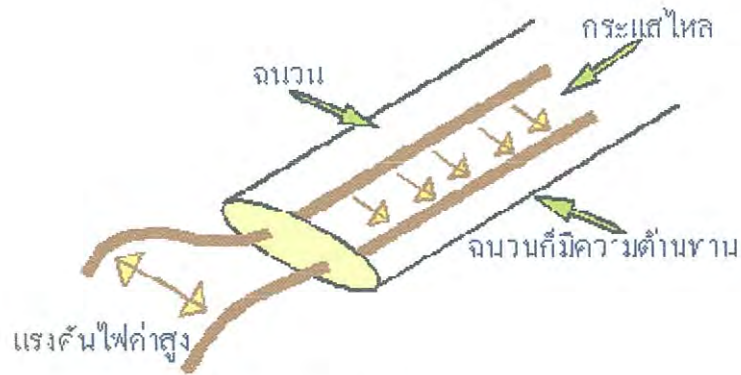
รูปที่ 2.7 ความต้านทานของจุดสัมผัส

ความต้านทานของสายดิน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินและแผ่นโลหะฝังลงดิน



รูปที่ 2.8 ความต้านทานของสายดิน

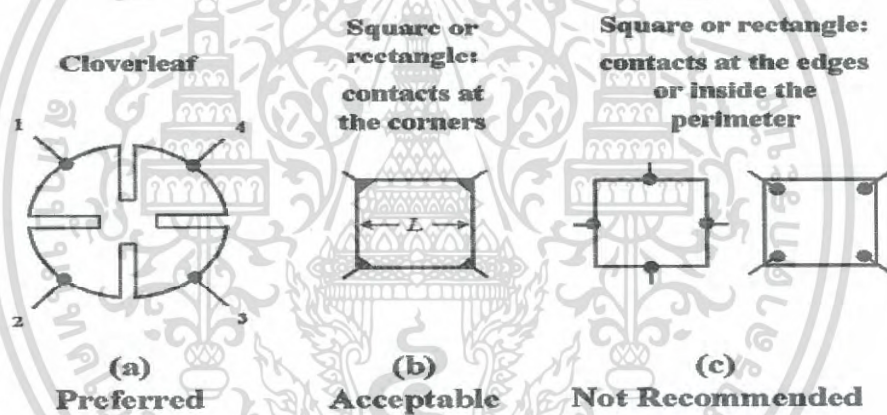
ความต้านทานของฉนวน มีประโยชน์ เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วจากสายไฟจะใช้ไวน์ลหรือยางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความต้านทานจำเพาะ สูงหุ้มสายไฟนั้นไว้ เราเรียกการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วนี้ว่า การฉนวน และวัสดุที่ใช้ในการฉนวนนี้ว่า ฉนวน แต่ฉนวนนั้นมิได้หมายความว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไม่ได้เลย



รูปที่ 2.9 ความต้านฉนวน

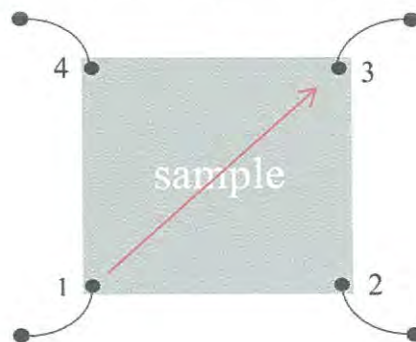
2.3 van der Pauw Method

Van der Pauw Method วิธีนี้ได้พัฒนาโดย Van der Pauw มีหลักการคิดดังนี้เมื่อพิจารณาสารตัวอย่างที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการติดคอนแทคส์ของสารตัวอย่างแบบต่างๆ

เมื่อติดคอนแทคส์ตรงมุมทั้งสี่มุม และจ่ายกระแสจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 2 (I_{12}) จากนั้นวัดความต่างศักย์บริเวณจุด 4 เทียบกับจุด 3 (V_{43}) ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการติดคอนแทคส์เพื่อวัดความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\left. \begin{aligned} R_a &= \frac{1}{4} \left(\frac{V_{43}}{I_{12}} + \frac{V_{12}}{I_{43}} + \frac{V_{34}}{I_{21}} + \frac{V_{21}}{I_{34}} \right) \\ R_b &= \frac{1}{4} \left(\frac{V_{23}}{I_{14}} + \frac{V_{32}}{I_{41}} + \frac{V_{14}}{I_{23}} + \frac{V_{23}}{I_{14}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

เมื่อ R_a คือ การวัดทุกขั้วในทิศทางเดียวกัน R_b คือ การวัดทุกขั้วในทิศทางตรงกันข้าม

จากสมการที่ (2.2) จะได้ค่าสภาพต้านทานตามแบบของ Van der Pauw เป็น

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln(2)} \left(\frac{R_a + R_b}{2} \right) F \quad (2.3)$$

กำหนดให้ $R_r = \frac{R_a}{R_b}$ และ F เป็น Correction factor มีค่าเป็น

$$\frac{R_r - 1}{R_r + 1} = \frac{F}{\ln(2)} \cosh^{-1} \left(e^{\frac{\ln(2)}{F}} \right) \quad (2.4)$$

ถ้าสมมุติสารตัวอย่างสมมาตร จะได้ว่า $R_r = 1$ ($R_a = R_b = R$) และ $F=1$ สมการ 2.2 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln(2)} R = 4.532tR \quad (2.5)$$

และ Sheet resistance (ρ_s) มีค่าเป็น

$$R_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln(2)} R = 4.532R \quad (2.6)$$

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากการจ่ายกระแสเข้าไปในสารตัวอย่างที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) กระทำต่อประจุพาหะบนแผ่นสารตัวอย่าง โดยแรงนี้จะทำให้พาหะถูกผลักไปสะสมที่ผิวด้านใดด้านหนึ่งของสารตัวอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพาหะ ซึ่งปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นเรียกว่า สนามฮอลล์ E_H โดนทิศทางของสนามฮอลล์ทิศทางของแรงหรือทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุพาหะบนแผ่นสารตัวอย่าง สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี ดังนี้คือ

2.4.1 พาหะที่อยู่บนแผ่นสารตัวอย่างเป็นอิเล็กตรอน

พิจารณาแผ่นสารตัวอย่าง ℓ กว้าง w และหนา t ดังรูปที่ 2.12 เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่สารตัวอย่างในทิศ $-x$ และผ่านกระแสเข้าไปในทิศ $+y$ พบว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง $-y$ ด้วยความเร็ว V ทำให้เกิดแรงจากสนามแม่เหล็ก (F_B) กระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทาง $+z$ ตามสมการลอเรนซ์ คือ

$$\vec{F}_B = -e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปอยู่ด้าน +Z เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ (E_H) ในทิศทาง +Z ทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็น

$$\bar{F}_E = -e\bar{E}_H \quad (2.8)$$

และเมื่ออยู่ในสภาพสมดุลขนาดของแรงทางแม่เหล็กจะเท่ากับขนาดของแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นสมการ (2.7) = (2.8) จะได้

$$\begin{aligned} eE_H &= evB \\ E_H &= vB \end{aligned} \quad (2.9)$$

และจากความหนาแน่นของกระแส

$$j = \frac{i}{A} = nev$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{j}{ne} \quad (2.10)$$

แทนสมการ 2.8 ในสมการ 2.9 จะได้

$$E_H = \frac{jB}{ne} = R_H jB \quad (2.11)$$

เมื่อ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall coefficient) โดย $R_H = \frac{1}{ne}$

2.4.2 พาหะที่อยู่บนแผ่นสารตัวอย่างเป็นอิเล็กตรอน

เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่สารตัวอย่างในทิศ -X และผ่านกระแสเข้าไปในทิศ +y พบว่าโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง +y ด้วยความเร็ว v ทำให้เกิดแรงจากสนามแม่เหล็ก (F_B) กระทำต่ออิเล็กตรอนในทิศทาง +Z ดังรูปที่ 2.12 จะได้สมการโลเรนซ์ คือ

$$F_B = e\bar{v} \times \bar{B} \quad (2.12)$$

เมื่อประจุของโฮลเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนแต่มีค่าบวก ทำให้โฮลถูกผลักไปอยู่ด้าน +Z เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H ในทิศทาง -Z ทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็น

$$F_E = eE_H \quad (2.13)$$

และจากสมการ 2.11 สามารถเขียน R_H ใหม่ได้เป็น

$$R_H = \frac{E_H}{jB} \quad (2.14)$$

และเนื่องจาก $E = \frac{V}{d}$ จากรูปความกว้างของแผ่นสารเป็น w จะได้ว่า

$$E_H = \frac{V_H}{w} \quad (2.15)$$

และ $j = \frac{i}{A}$ เมื่อ $A = wt$ คือ พื้นที่ๆ กระแสวิ่งผ่านจะได้ว่า

$$j = \frac{i}{wt} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าจากสมการ (2.15) และ (2.16) ลงในสมการ 2.14 จะได้

$$R_H = \frac{V_H t}{i B} \quad (2.17)$$

เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วย ของ cm^3 / C จะได้

$$R_H (\text{cm}^3 / C) = \frac{V_H (mV) t (\text{\AA})}{i (mA) B (G)} \quad (2.18)$$

เมื่อ R_H คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ในหน่วย cm^3 / C

V_H คือ ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage) ในหน่วย mV

t คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน

B คือ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กในหน่วย Gauss

i คือ กระแสในหน่วย mA

และนอกจากนี้ยังสามารถหาค่าอื่นๆ ได้อีกคือ

$$n_B = \frac{1}{R_H (\text{cm}^3 / C) \cdot q} \quad (2.19)$$

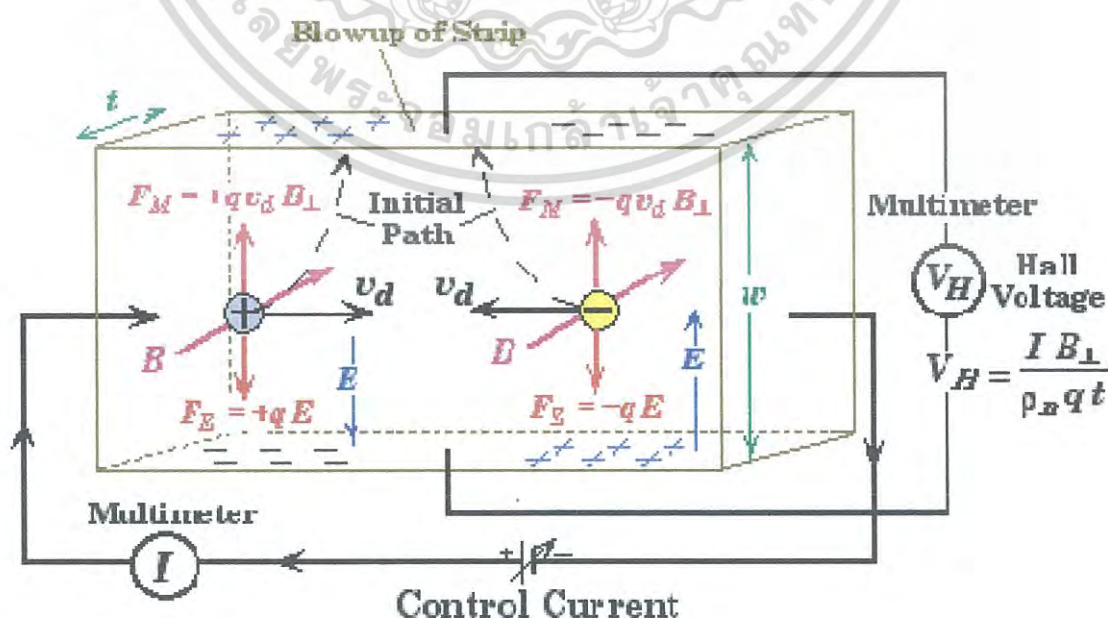
เมื่อ n_B คือ ความหนาแน่นของพาหะ (cm^{-3})

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน 1.6×10^{-19} คูลอมป์

$$\mu_H = \frac{R_H (\text{cm}^3 / C)}{\rho (\Omega \text{cm})} \quad (2.20)$$

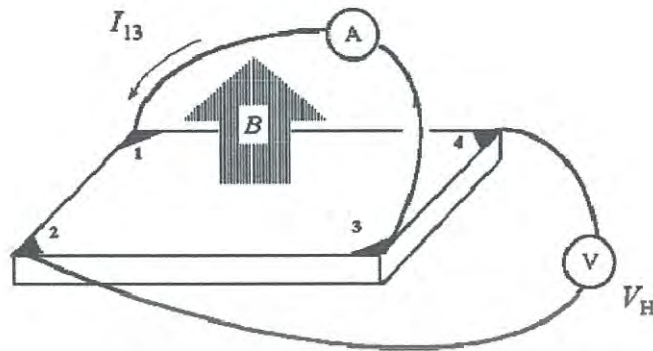
เมื่อ ρ คือ ค่าสภาพต้านทานในหน่วย $\Omega \cdot \text{cm}$

μ_H คือ ค่าโมบิลิตีในหน่วย $\text{cm}^2 / V\text{s}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่ 2.12 ปรัชญาการณฮอลล์ของพาหะ ที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮล
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = V_{24P}$$



รูปที่ 2.13 การวัดฮอลล์แบบ van der Pauw

โดยวิธีการวัดฮอลล์แบบ van der Pauw ดังรูปที่ 2.13 แสดงสมการดังนี้

$$\vec{E} = \rho \vec{j} + \rho \mu_H (\vec{j} \times \vec{B}) \quad (2.21)$$

โดยถือว่าสมการ 2. เทอมของ Magneto resistive ($\mu_H^2 B^2$) มีค่าน้อยมากและ ถ้า $B = 0$ ความต่างศักย์ระหว่างจุดที่ 2 และ 4 คือ

$$(V_4 - V_2)_{B=0} = \int_{r_2}^{r_4} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \rho \int_{r_2}^{r_4} \vec{j} \cdot d\vec{r} \quad (2.22)$$

และถ้าใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปจะได้

$$(V_4 - V_2)_B = \rho \int_{r_2}^{r_4} \vec{j}' \cdot d\vec{r} + \rho \mu_H \int_{r_2}^{r_4} (\vec{j}' \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \quad (2.23)$$

ถ้าถือว่าความหนาแน่นกระแส (Current density) ไม่เปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็กดังนั้น $\vec{j}' = \vec{j}$ สมการ (2.22) เขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{H42} = (V_4 - V_2)_B - (V_4 - V_2)_{B=0} = \rho \mu_H \int_{r_2}^{r_4} (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot d\vec{r} \quad (2.24)$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสารตัวอย่าง ดังนั้นสมการ (2.23) เขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{H42} = \frac{\rho \mu_H B I}{t} \quad (2.25)$$

และจากสมการ (2.247) นำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้ดังนี้

$$R_H = \frac{V_{H42} t}{IB} \quad (2.26)$$

จากนั้นหาความหนาแน่นพาหะ และค่าโมบิลิตี้ ตามสมการ (2.18) และ (2.19)

ในการทดลองต้องพยายามกำจัด Error จากการทดลองให้ได้มากที่สุด ดังนั้นจะจ่ายกระแสและวัดความต่างศักย์ในรูปแบบต่างๆ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.13 โดยในแต่ละแบบจะเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าและพุ่งออกจากสารตัวอย่าง และนำมาหาค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 2.1 การหาค่าความต่างศักย์เฉลี่ย แสดงดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 - V_3 - V_4}{4} \quad (2.27)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงการวัดฮอลล์ตาม van der Pauw configuration ทั้ง 4 กรณี

I	B	Case I	Case II	Case III	Case IV
		I_{24}	I_{42}	I_{13}	I_{31}
		V_{13}	V_{31}	V_{42}	V_{24}
+	+	$V_1(I)$	$V_1(II)$	$V_1(III)$	$V_1(IV)$
-	+	$V_2(I)$	$V_2(II)$	$V_2(III)$	$V_2(IV)$
+	-	$V_3(I)$	$V_3(II)$	$V_3(III)$	$V_3(IV)$
-	-	$V_4(I)$	$V_4(II)$	$V_4(III)$	$V_4(IV)$
V_H		$V_H(I)$	$V_H(II)$	$V_H(III)$	$V_H(IV)$
$V_{H(avg)}$		$\frac{1}{4}\{V_H(I) + V_H(II) + V_H(III) + V_H(IV)\}$			

*เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวกคือสนามแม่เหล็กพุ่งออกจากสารตัวอย่างดังรูปที่ 2.13

2.5 รีเลย์

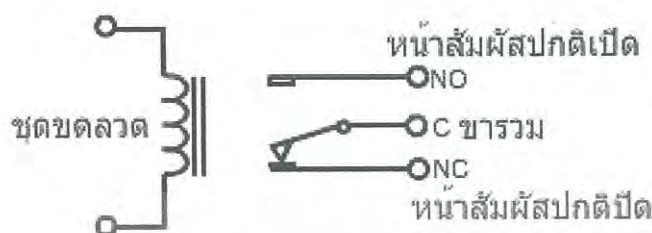
รีเลย์ (relay) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ ตัด-ต่อวงจร คล้ายกับสวิตช์ โดยใช้หลักการหน้าสัมผัส และการที่จะให้มันทำงานก็ต้องจ่ายไฟให้มันตามที่กำหนด เพราะเมื่อจ่ายไฟให้กับตัวรีเลย์ มันจะทำให้หน้าสัมผัสติดกัน กลายเป็นวงจรปิด และตรงข้ามทันทีที่ไม่ได้จ่ายไฟให้มัน มันก็จะกลายเป็นวงจรเปิด ไฟที่เราใช้ป้อนให้กับตัวรีเลย์ก็จะเป็นไฟที่มาจากเพาเวอร์้าของเครื่อง ดังนั้นทันทีที่เปิดเครื่อง ก็จะทำให้รีเลย์ทำงาน



รูปที่ 2.14 รีเลย์

ภายในโครงสร้างของ รีเลย์ จะประกอบไปด้วยขดลวด 1 ชุด และ หน้าสัมผัส ซึ่งในหน้าสัมผัส 1 ชุด ซึ่งจะประกอบไปด้วย หน้าสัมผัสแบบปกติปิด (Normally Close หรือ NC.) ซึ่งในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะปกติ ขานี้จะต่ออยู่กับขาร่วม (C) และ หน้าสัมผัสแบบปกติเปิด (Normally Open หรือ NO.) ขานี้จะต่อเข้ากับขาร่วม (C) เมื่อขดลวดมีแรงดันตกคร่อม หรือกระแสไหลผ่าน (ในปริมาณที่เพียงพอ) ใน รีเลย์ 1 ตัว อาจมีหน้าสัมผัสมากกว่า 1 ชุด ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ผลิต



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของรีเลย์

รีเลย์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนหลักก็คือ

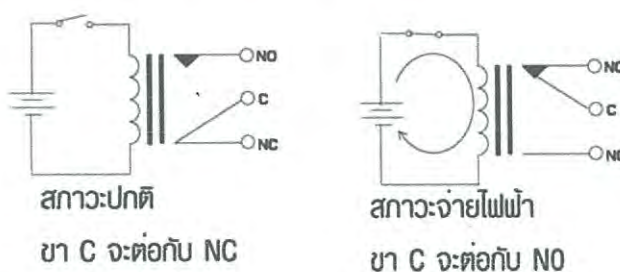
1. ส่วนของขดลวด (coil) เหนียวนำกระแสต่ำ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้แกนโลหะไปกระตุ้นให้หน้าสัมผัสต่อกัน ทำงานโดยการรับแรงดันจากภายนอกต่อคร่อมที่ขดลวด เหนียวนำนี้ เมื่อขดลวดได้รับแรงดัน (ค่าแรงดันที่รีเลย์ต้องการขึ้นกับชนิดและรุ่นตามที่ผู้ผลิตกำหนด) จะเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้แกนโลหะด้านในไปกระตุ้นให้แผ่นหน้าสัมผัสต่อกัน
2. ส่วนของหน้าสัมผัส (contact) ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ที่เราต้องการนั่นเอง

ต่อไปมาดูจุดต่อใช้งานมาตรฐาน ประกอบด้วย

- จุดต่อ NC ย่อมาจาก normal close หมายความว่าปกติปิด หรือ หากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนียวนำหน้าสัมผัสจะติดกัน โดยทั่วไปเรามักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการให้ทำงานตลอดเวลาเช่น
- จุดต่อ NO ย่อมาจาก normal open หมายความว่าปกติเปิด หรือหากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนียวนำหน้าสัมผัสจะไม่ติดกัน โดยทั่วไปเรามักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมการเปิดปิดเช่น โคมไฟสนามหน้าบ้าน
- จุดต่อ C ย่อมาจาก common คือจุดรวมที่ต่อมาจากแหล่งจ่ายไฟ

หลักการทำงานของรีเลย์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด จะทำให้ขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กไปดึง แผ่นหน้าสัมผัสให้ดึงลงมา แต่หน้าสัมผัสอีกอันทำให้มีกระแสไหลผ่านหน้าสัมผัสไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.16 สภาวะการทำงานนของรีเลย์ ำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการสร้างส่วนประกอบ

ในโครงการพิเศษนี้ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนด้วยกันได้แก่

1. Hardware เช่น วงจร Relay ใช้ในการสับขั้วไฟฟ้า , บอร์ด Arduino ET-EASY MEGA2560 ใช้ในการควบคุมวงจร Relay , Digital multimeter ใช้ในการวัดค่าความต่างศักย์ , Current Source ใช้ในการจ่ายกระแส, แผ่น Sample

2. Software คือ โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการทำงานของระบบ จากนั้นจึงนำส่วนประกอบเหล่านี้มาใช้งานร่วมกันโดยรายละเอียดในการสร้างส่วนประกอบต่างๆมีดังนี้

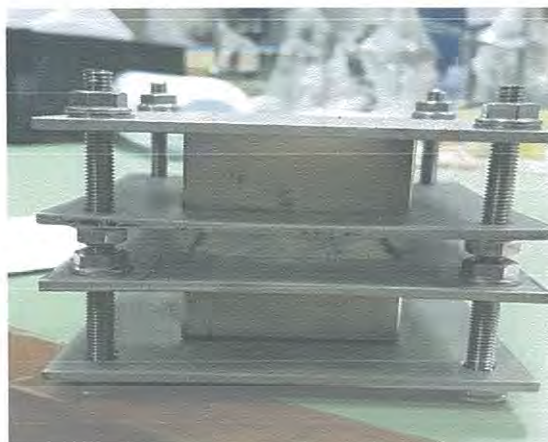
1. สนามแม่เหล็กถาวร
2. Relay Module 4 channel 5V
3. Arduino ET-EASY MEGA2560
4. Digital multimeter
5. Current source
6. สาย GPIB
7. สาย 408JE
8. แผ่น Sample

3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

ชุดสนามแม่เหล็กถาวรมันเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ดังนั้นการสร้างชุดสนามแม่เหล็กถาวรขึ้นมาต้องมีความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และต้องการทราบค่าที่แท้จริงของสนามแม่เหล็กที่ใช้ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เรานำไปใช้มีค่าความแรงถึง 5500G จึงต้องนำมาวัดอย่างหนาแน่น โดยการออกแบบชุดในการยึดและวางของแม่เหล็กใช้โปรแกรม SOLIDWORKS



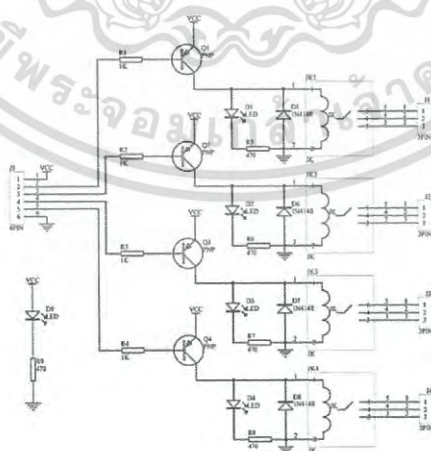
รูปที่ 3.1 สนามแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3.2 สนามแม่เหล็กถาวร(ต่อ)

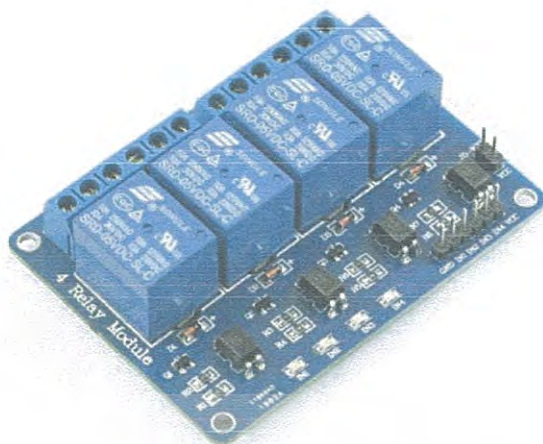
3.1.2 วงจรรีเลย์และตัวควบคุม

การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในที่นี้จะใช้เทคนิคแวนเดอร์พาฟ และเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสองวิธีนี้จะต้องมีการสลับขั้วไฟฟ้าในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นวงจรสวิตช์รีเลย์ ดังรูป 3.3 และซึ่งรีเลย์ที่เราเลือกใช้คือ Relay Module 4 channel 5 V แสดงดังรูปที่ 3.4 ตัวควบคุมการสับสวิตซ์จึงสำคัญมากสำหรับการวัดเพราะสามารถควบคุมการสับสวิตซ์ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านตัวควบคุมได้ ตัวควบคุมที่ใช้ในโครงงานนี้คือ ET-EASY MEGA2560 ดังรูป 3.5 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กที่มีพอร์ตเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และสามารถใช้โปรแกรม Arduino สั่งการโดยใช้ภาษาซีแล้วอัปโหลดลงบอร์ด ซึ่งหน้าของโปรแกรมของ Arduino แสดงดังรูปที่ 3.6 ตัวควบคุม ET-EASY MEGA1280 นอกจากจะควบคุมวงจรสวิตช์รีเลย์แล้วยังควบคุมไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่องอีกด้วย ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานจะติดอยู่ที่หน้าของเครื่อง

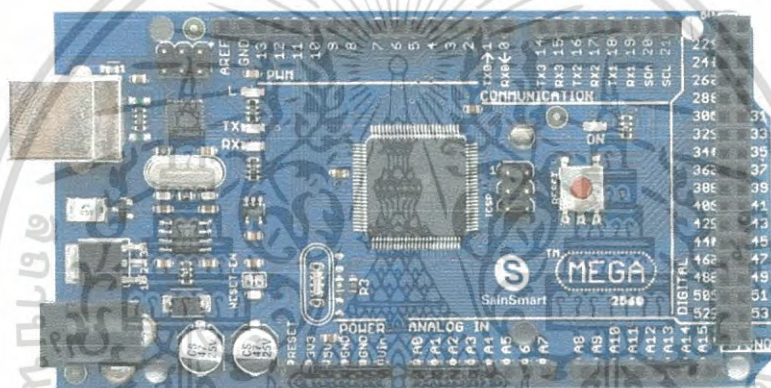


รูปที่ 3.3 วงจรสวิตช์รีเลย์

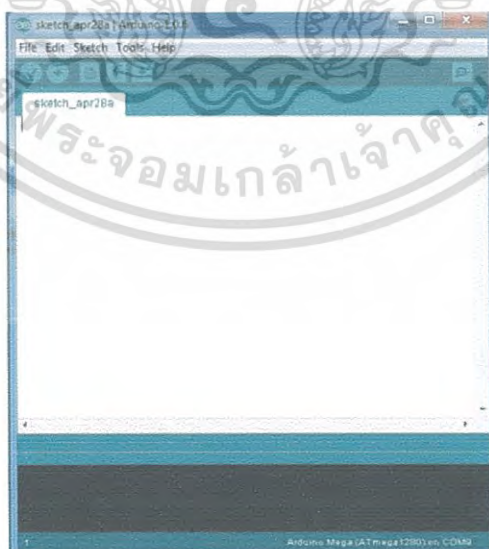
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 Relay Module 4 channel 5 V



รูปที่ 3.5 ET-EASY MEGA2560



รูปที่ 3.6 โปรแกรม Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

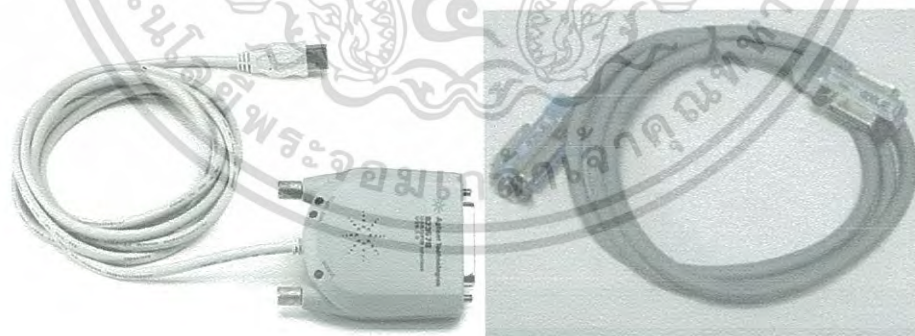
3.1.3 Digital multimeter และ Current source

เนื่องจากการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาฟและปรากฏการณ์ฮอลล์ จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมี Digital multimeter และ Current source เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้าดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 Digital multimeter (ซ้าย) และ Current source (ขวา)

Digital multimeter และ Current source สามารถควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่าน GPIB/USB โดยการ Interface และเราจะใช้สาย 408JE ดังรูป 3.8 เพื่อควบคุมทั้งสองเครื่องพร้อมกัน โดยต่อแบบขนานระหว่างเครื่องทั้งสองเครื่อง เพื่อที่จะเพิ่มความสะดวกสบายในการใช้เครื่องวัดมากขึ้น

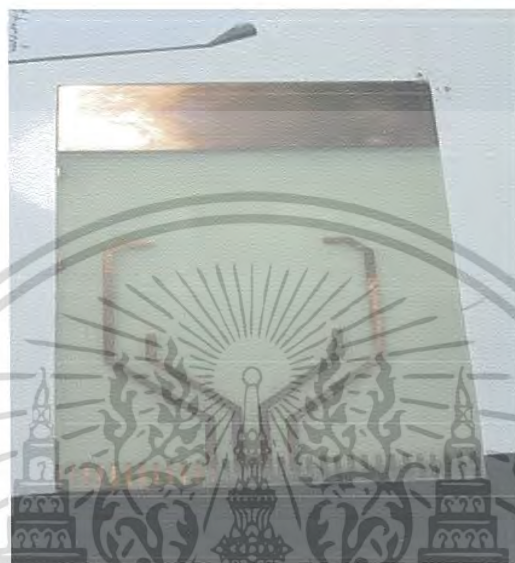


รูปที่ 3.8 สาย GPIB (ซ้าย) และ สาย 408JE (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

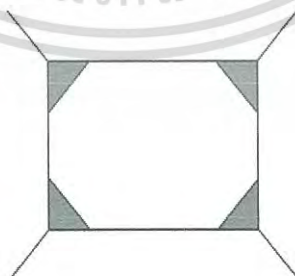
3.1.4 แผ่นวาง Sample

การวัดหาค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาว และเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ จำเป็นต้องสร้างแผ่นวาง Sample ด้วยโปรแกรม Altium designer เพื่อนำไปกัดแผ่นพีซีบี เพื่อที่จะวาง Sample และต่อขั้วของ Sample เข้ากับ Digital multimeter เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ Sample และ Current source เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Sample



รูปที่ 3.9 แผ่นพีซีบีที่นำมากัดเป็นแผ่นสำหรับวาง Sample

และในการออกแบบแผ่นsampleนั้นจะต้องคำนึงถึงการใช้งานในการวัดด้วยเนื่องจากการวัดนั้นจะต้องมีการกลับทิศทางของสนามแม่เหล็กเพื่อช่วยในการวัดแต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยากเราจึงต้องทำการกลับแผ่นsampleแทนการกลับสนามแม่เหล็ก แต่เราจะต้องมีConnector ที่สามารถใช้งานได้ทั้งสองด้านเพื่อใช้ในการวัด

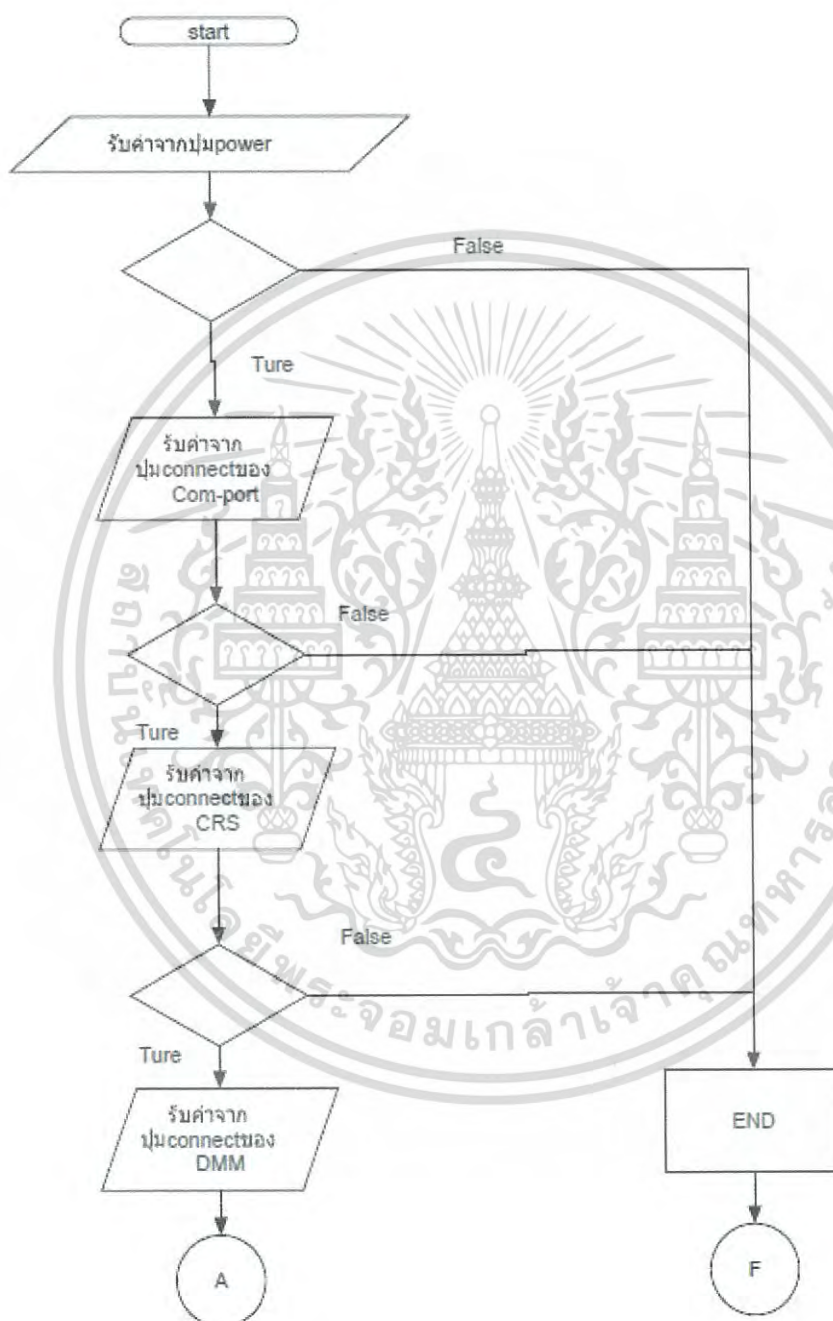


รูปที่ 3.10 ลักษณะการต่อขั้วของ Sample เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

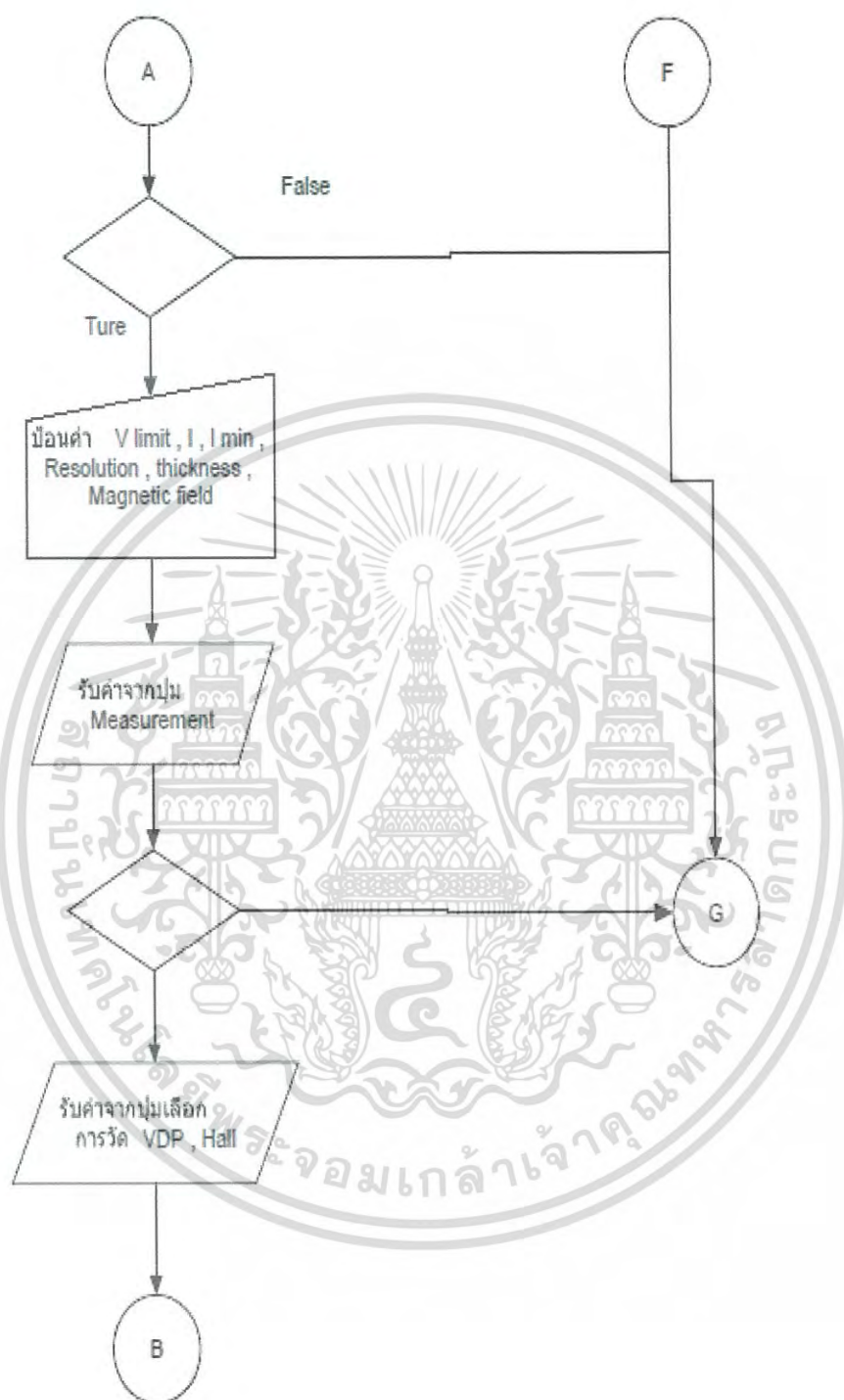
3.2 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

เนื่องจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นมีความต้องการที่จะให้เป็นระบบอัตโนมัติ ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานและบันทึกผล โดยมีกระบวนการทำงานดังนี้



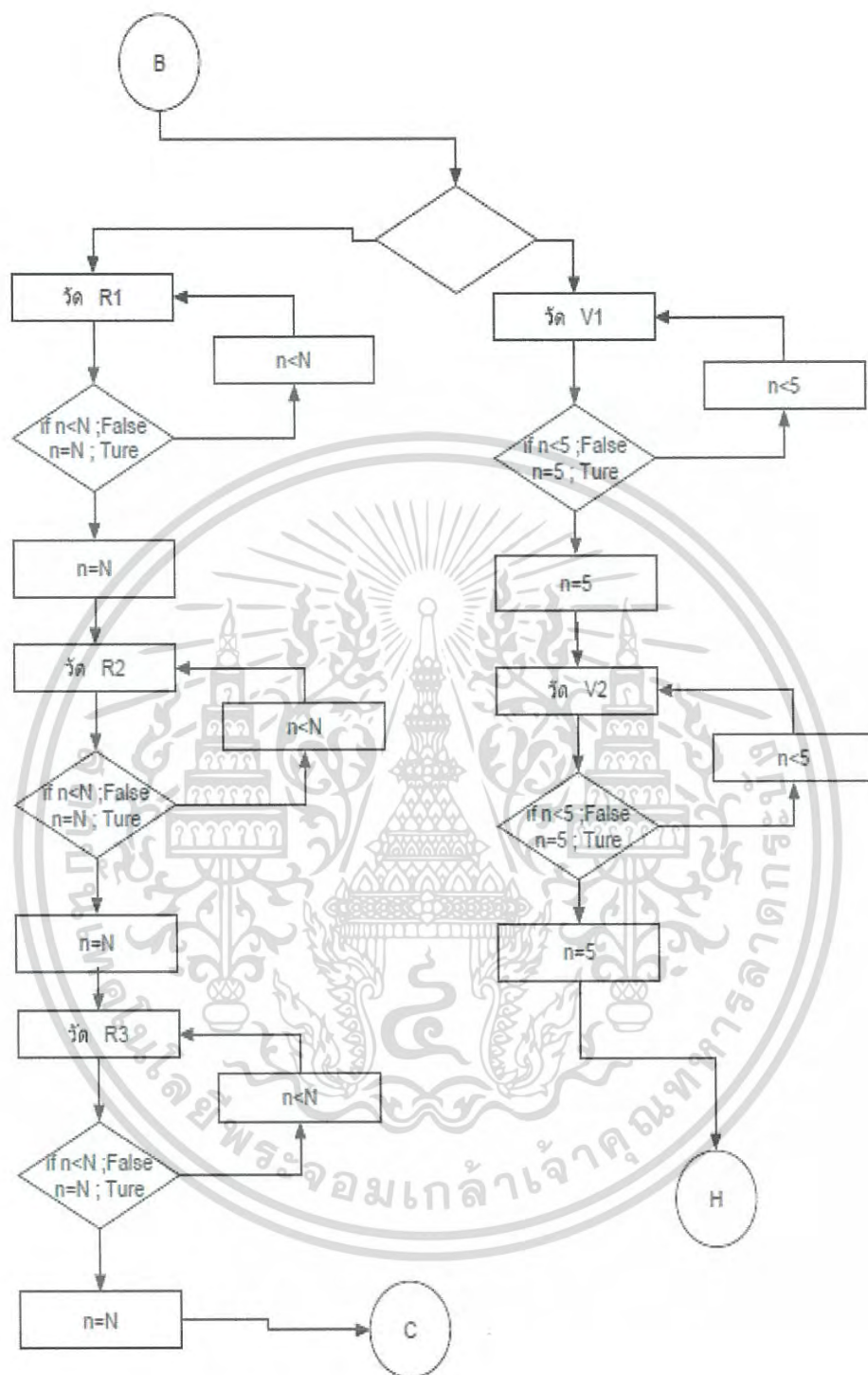
รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมแสดงการรับค่าจากปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



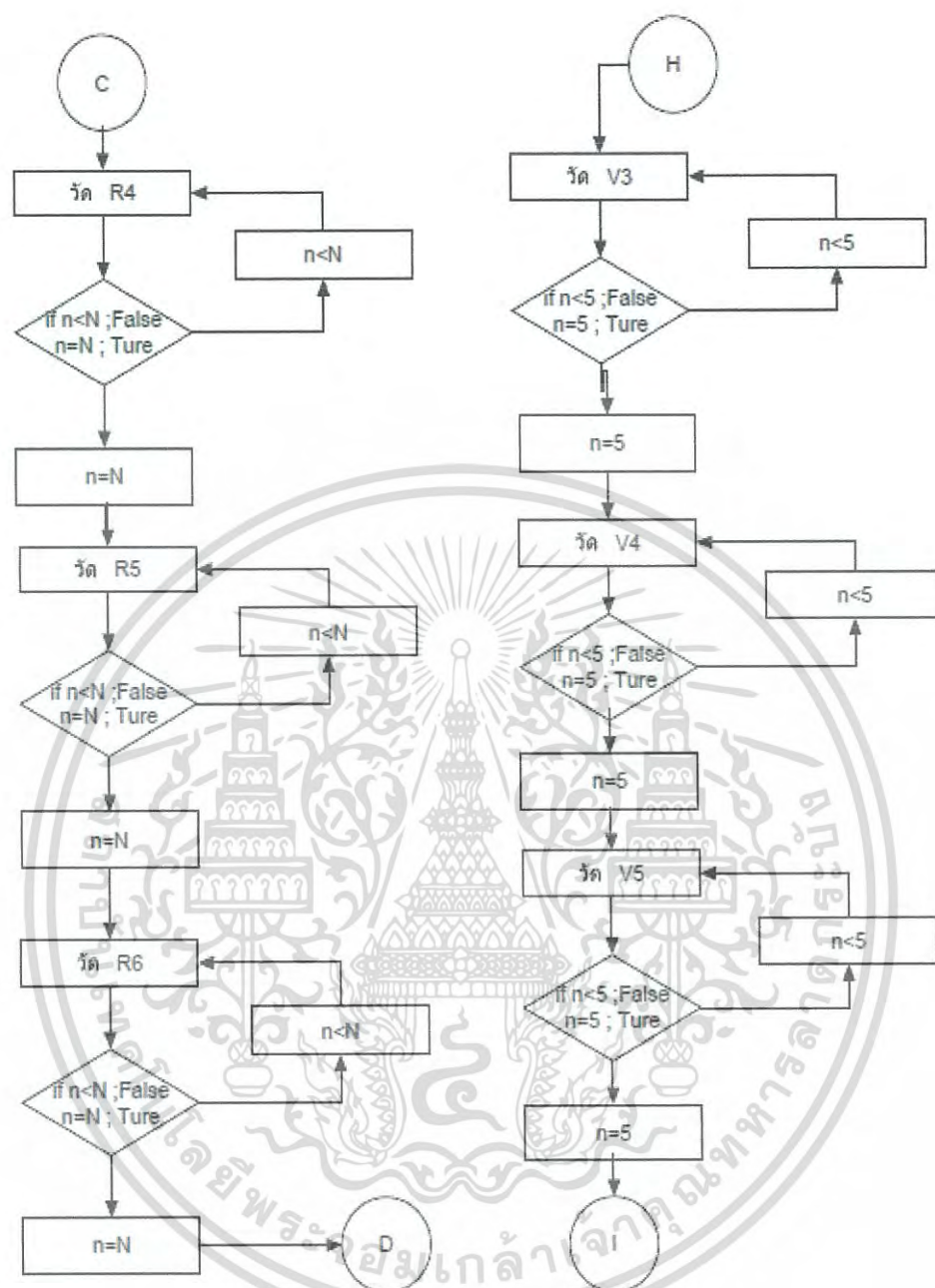
รูปที่ 3.12 ไตอะแกรมแสดงการรับค่าจากKeyboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



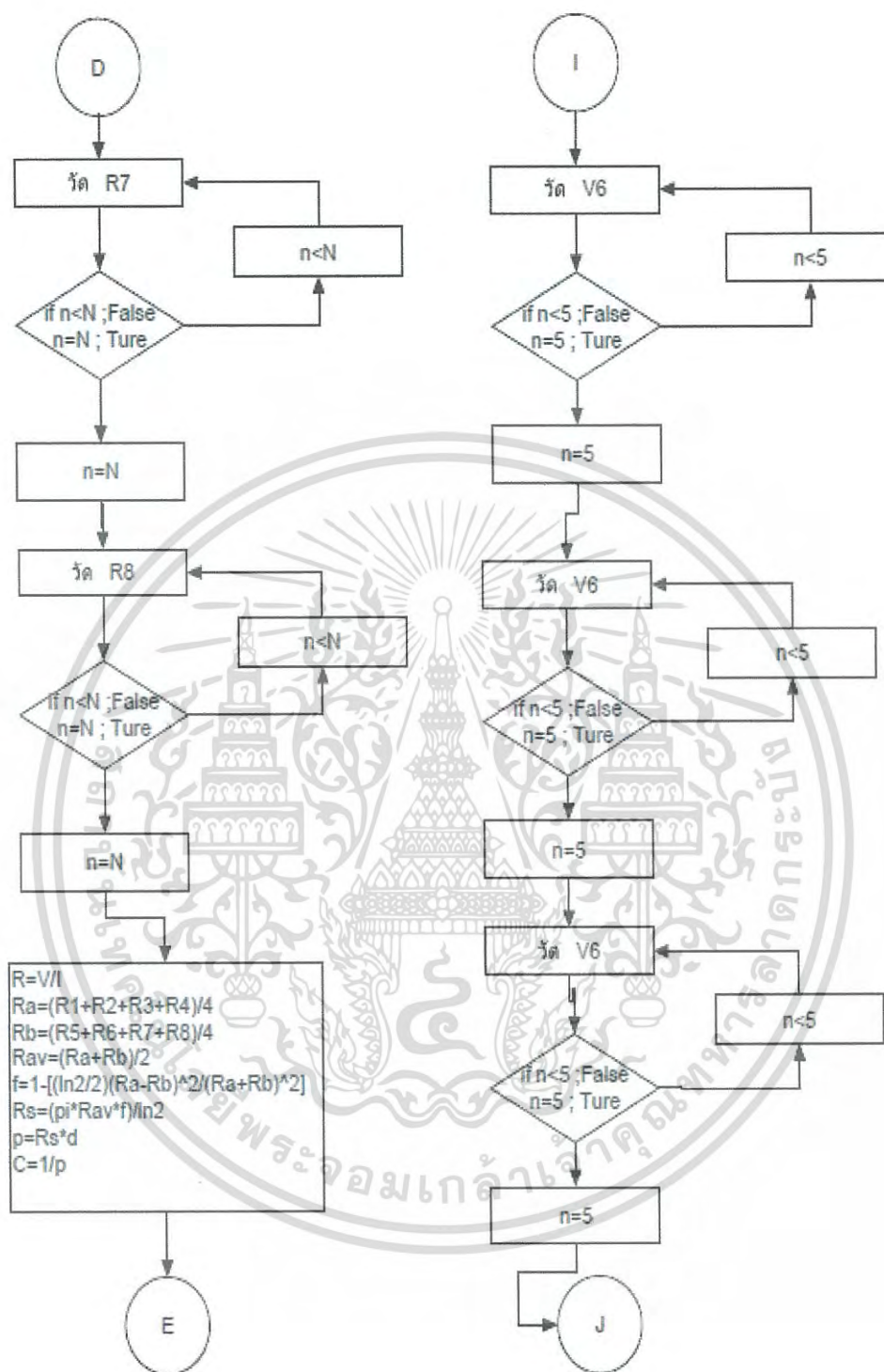
รูปที่ 3.13 ไตอะแกรมแสดงการทำงานของระบบโดยเราสามารถเลือกได้สองรูปแบบทั้งการวัดแบบ
แวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



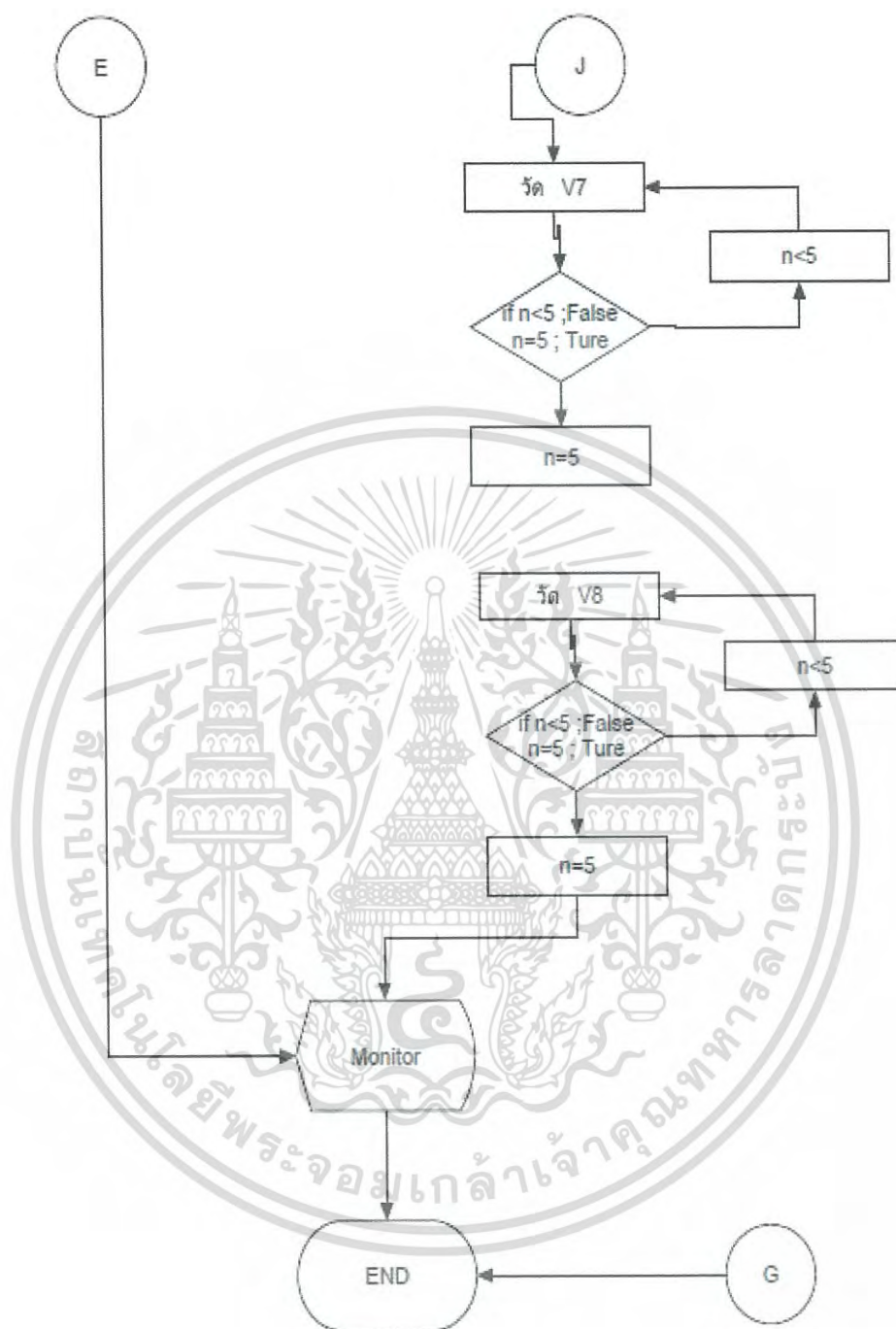
รูปที่ 3.14 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบโดยเราสามารถเลือกได้สองรูปแบบทั้งการวัดแบบ
แวนเดอร์ฟาวและปรากฏการณ์ฮอลล์(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ไดอะแกรมแสดงการคำนวณของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ไดอะแกรมแสดงการแสดงผลและการจบการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงงานพิเศษนี้เรามีการใช้ บอร์ดArduino ในการควบคุมการสับขั้วไฟฟ้าเราจึงต้องเขียนโค้ดเพื่ออัปเดตลงบอร์ดคอนโทรลเลอร์ โดยเราใช้โปรแกรม Arduino ในการเขียนคำสั่งโดยใช้ภาษา C# ในการเขียนโค้ดเพื่ออัปเดตลงบอร์ดนี้เป็นการเขียนคำสั่งเพื่อให้บอร์ดสามารถติดต่อสื่อสารและทำงานตามที่โปรแกรม LabVIEW ของเราสั่งการได้ การเขียนโปรแกรม LabVIEW ติดต่อกับ Arduino มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW
2. ติดตั้ง โปรแกรม VI Package Manager

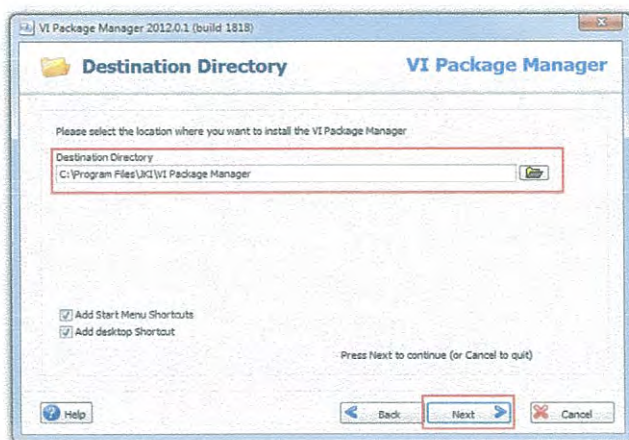


รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager เปิดไฟล์เซ็ทอัพ

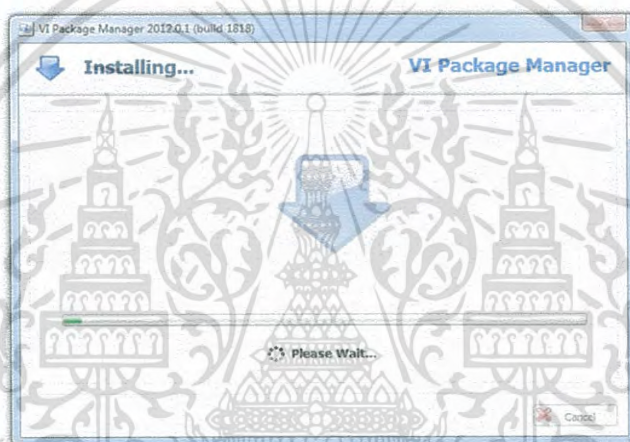


รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager

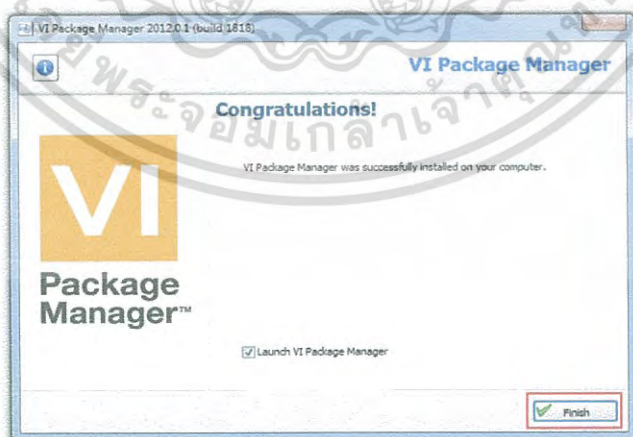
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager เลือกตำแหน่งในการติดตั้งโปรแกรม



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager รอโปรแกรมทำการติดตั้ง



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการติดตั้ง VI Package Manager ติดตั้งโปรแกรมสำเร็จ

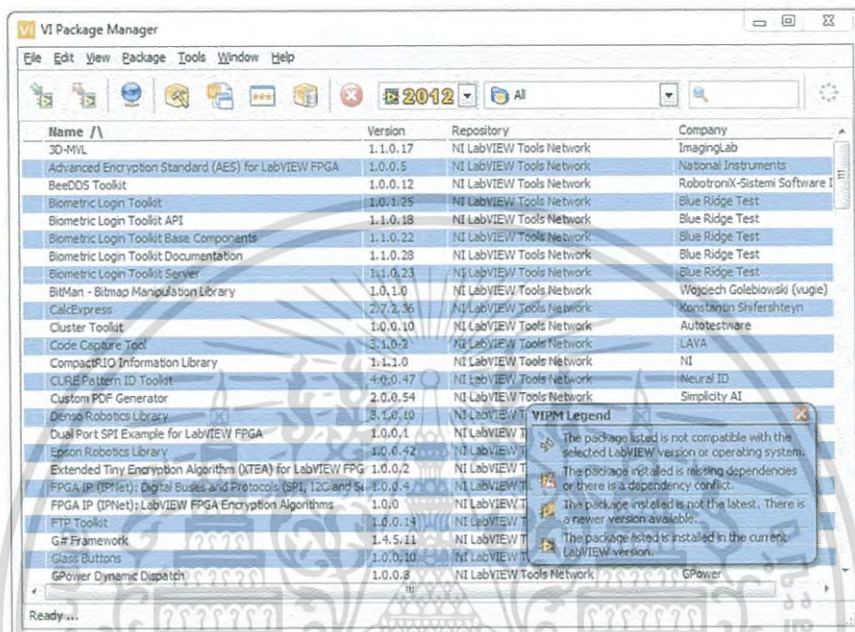
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ติดตั้ง NI LabVIEW Interface for Arduino Toolkit.

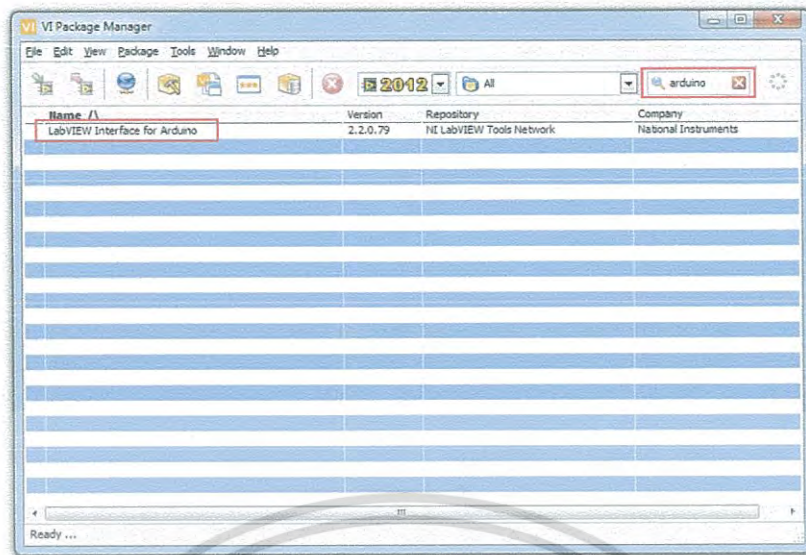
หลังจากทำการติดตั้ง โปรแกรม VIPM เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยให้คลิกที่ลิงค์

vipm://national_instruments_lib_labview_interface_for_arduino โปรแกรม VIPM จะถูก
เปิดขึ้นมาและทำตามขั้นตอนดังนี้.

ขั้นตอนการติดตั้ง NI LabVIEW Interface for Arduino Toolkit. ผ่านโปรแกรม VIPM



รูปที่ 3.22 เปิดโปรแกรม VI Package Manager



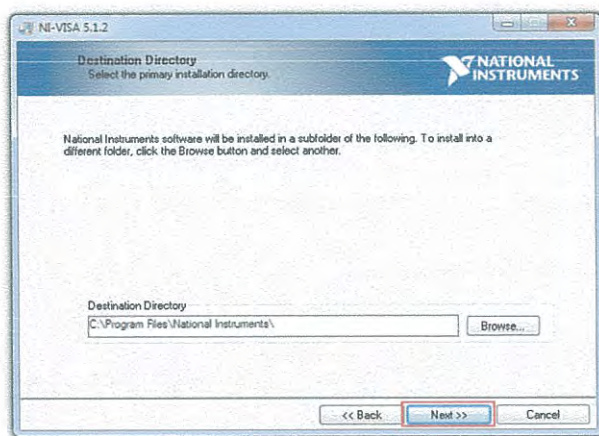
รูปที่ 3.23 พิมพ์ 'Arduino' ใน search box ที่อยู่บนเมนูบนขวาโปรแกรม VIPM

4. ติดตั้ง NI-VISA ตัวนี้จะเป็น Library ที่จะติดต่อ Com port (RS232, RS485) ของ Labview

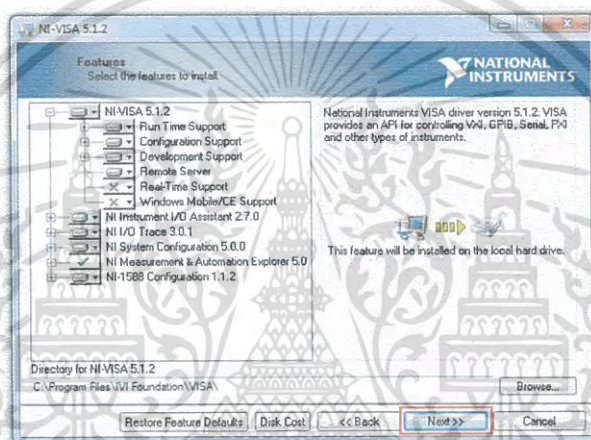


รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

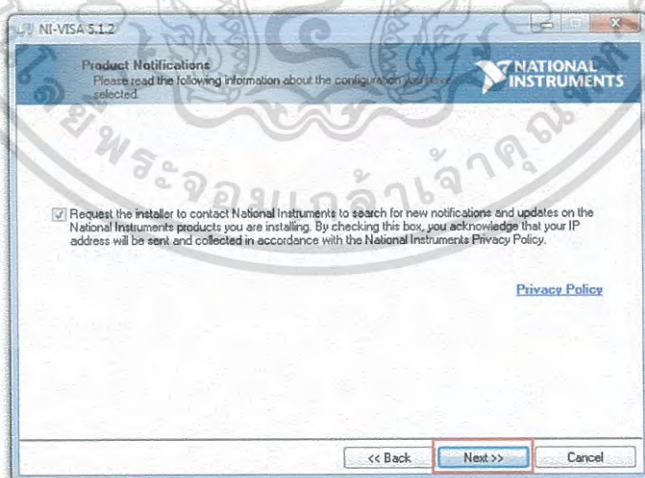
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA เลือกตำแหน่งในการติดตั้งโปรแกรม

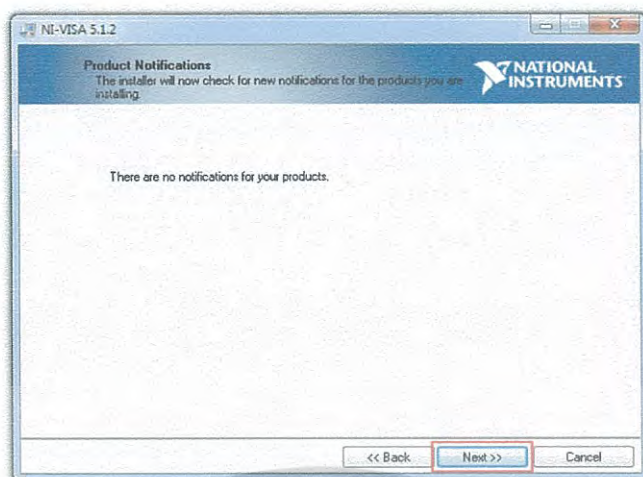


รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

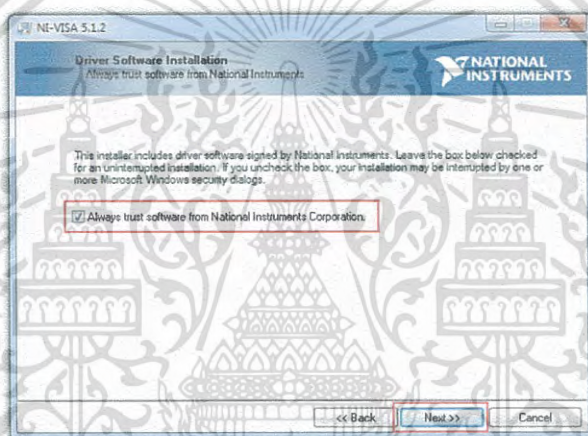


รูปที่ 3.27 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

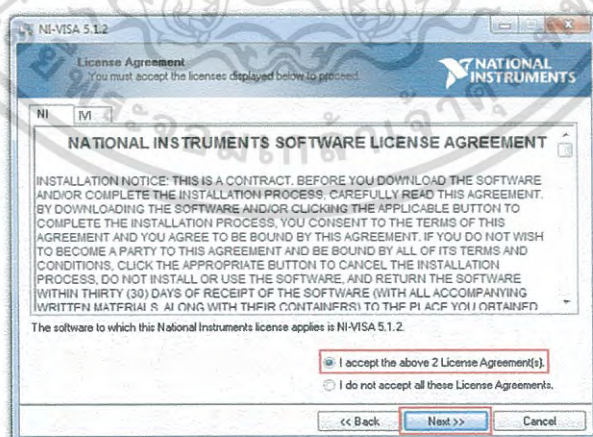
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

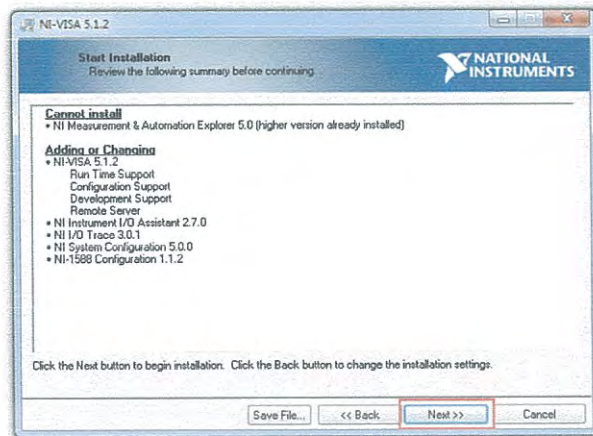


รูปที่ 3.29 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

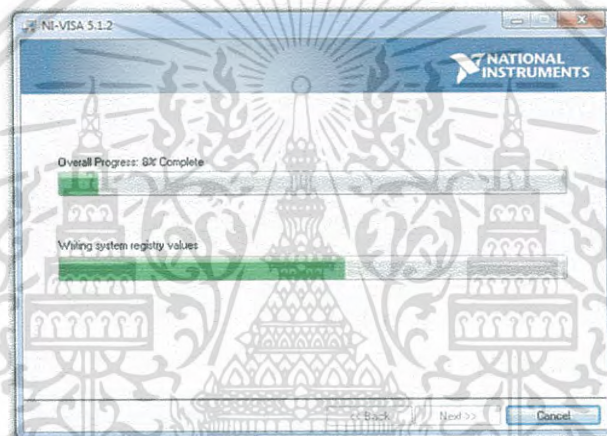


รูปที่ 3.30 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

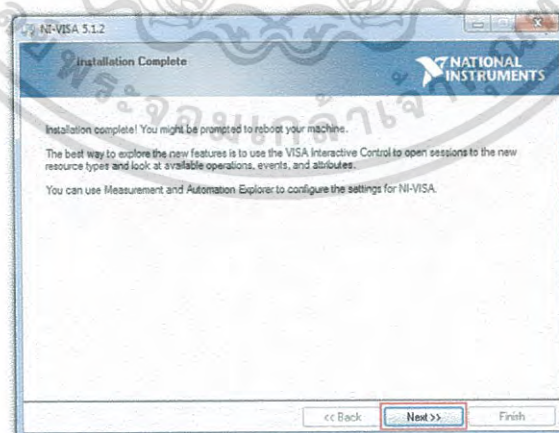
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

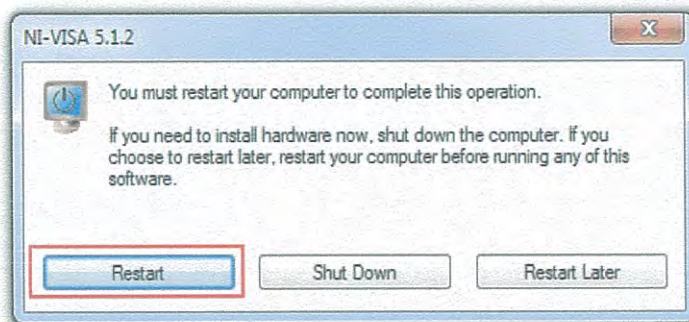


รูปที่ 3.32 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA



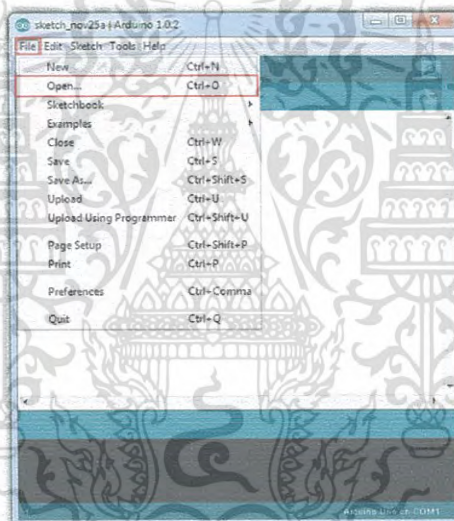
รูปที่ 3.33 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



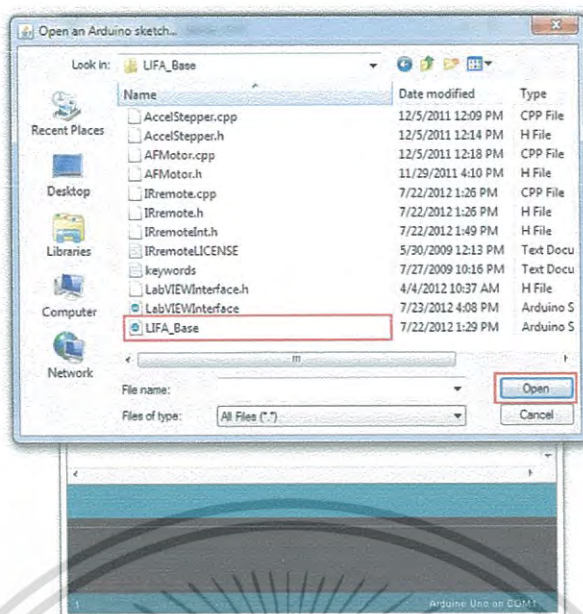
รูปที่ 3.34 ขั้นตอนการติดตั้ง NI-VISA

5. ติดตั้งโปรแกรม Arduino IDE เพื่อทำการอัปโหลด Firmware เข้าไปใน Controller.

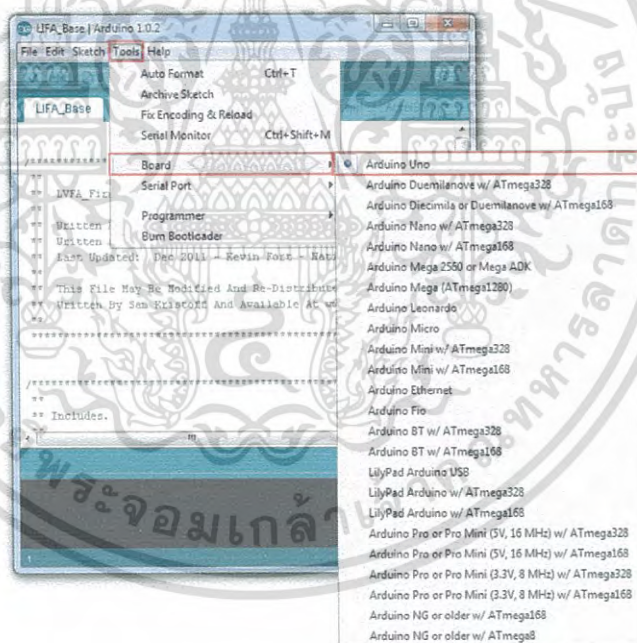


รูปที่ 3.35 เปิดโปรแกรม Arduino เพื่ออัปโหลด Firmware ลงใน Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

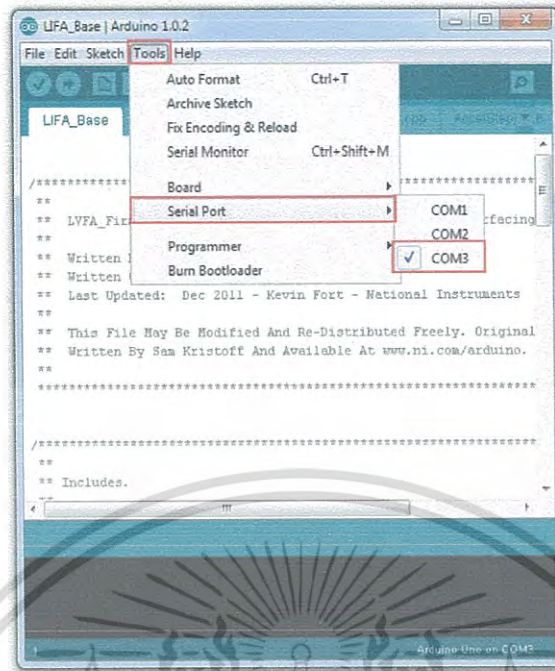


รูปที่ 3.36 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller เลือกไฟล์ที่ต้องการอัปโหลด

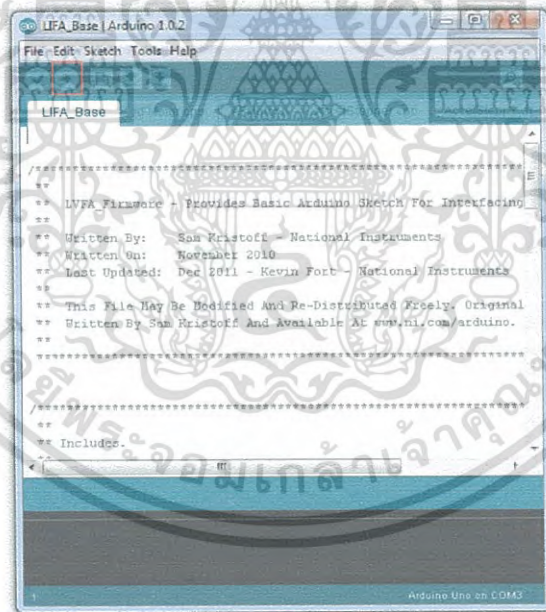


รูปที่ 3.37 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller เลือกบอร์ดที่ใช้ในการอัปโหลดไฟล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller เลือกพอร์ทที่ใช้



รูปที่ 3.39 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller รันโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.40 ขั้นตอนการอัปโหลด Firmware ลงใน Controller อัปโหลดเสร็จสมบูรณ์

3.3 ขั้นตอนการทดลองวัด

3.3.1 การวัดด้วยมือ

เป็นการวัดแบบแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยการต่อขั้วโดยตรง ส่วนการสับชั้วก็ทำการเปลี่ยนขั้วเอง ที่ต้องทำการวัดด้วยมือเนื่องจากเราไม่ทราบว่าการวัดด้วยระบบอัตโนมัตินั้นมีการสับชั้วถูกต้องหรือไม่ เราจึงใช้วิธีการวัดมือเป็นตัวอ้างอิง

3.3.2 การวัดด้วยระบบอัตโนมัติ

เป็นการวัดจากโปรแกรมที่ได้สร้างขึ้นเพื่อให้ในการควบคุม โดยระบบอัตโนมัตินั้นจะทำการเปรียบเทียบกับค่าในการวัดด้วยมือ

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองคือ Sb doped Si wafer และ B doped Si wafer ทั้งสองชิ้นทราบค่าของความหนาและค่า Resistivity ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจากบริษัทที่มีความน่าเชื่อถือที่มีการขายชิ้นงานทั้งสองชิ้นนี้ ส่วนค่า Bulk carrier concentration ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Hurdling Services ซึ่งเป็นค่าที่น่าเชื่อถือได้ ดังนั้นเราจึงทำการวัดเครื่องมือของเราเพื่อให้ในการเปรียบเทียบผลจากการวัดว่าได้ผลที่มีความใกล้เคียงกับค่าที่อ้างอิงหรือไม่

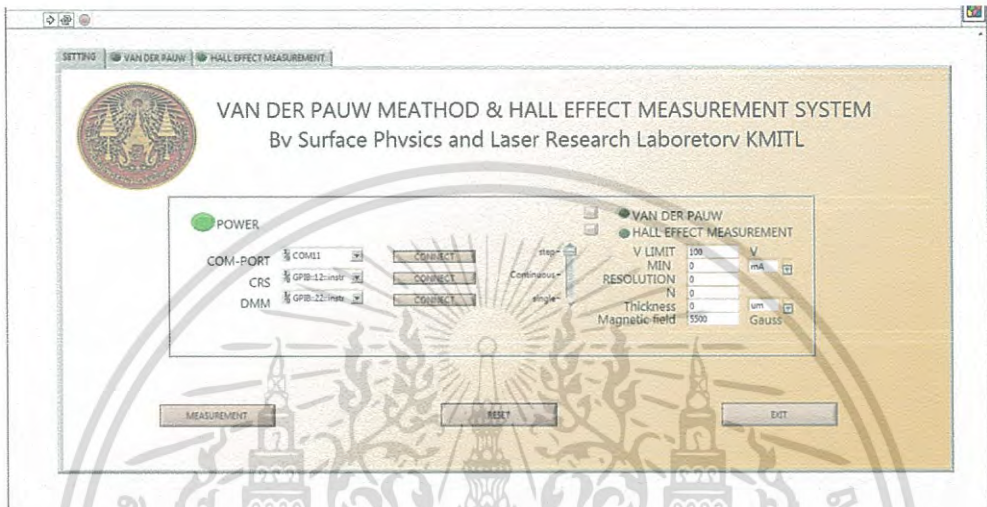
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

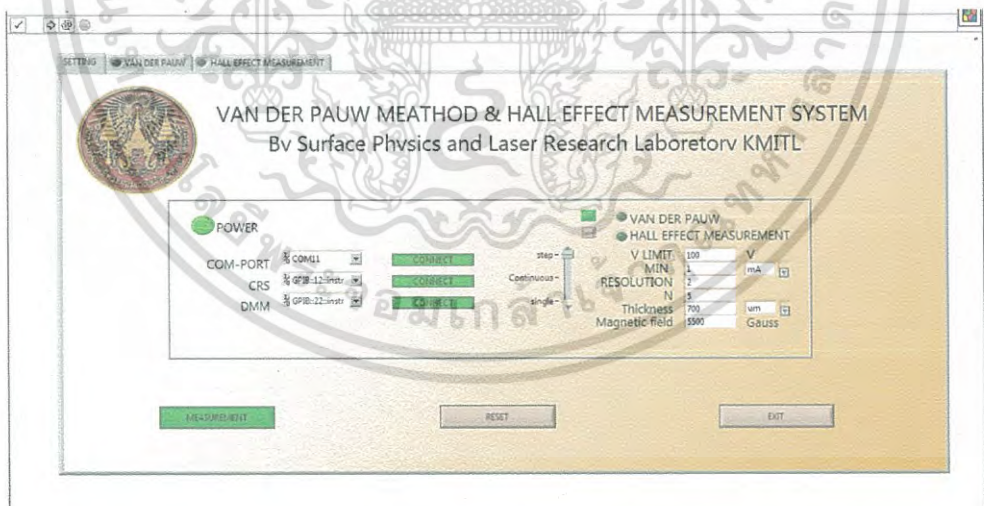
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรม

เนื่องจากการสร้างระบบการวัดนั้นจะต้องมีโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการสับขั้วไฟฟ้า ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยมีรูปแบบของโปรแกรมและกระบวนการทำงานดังนี้

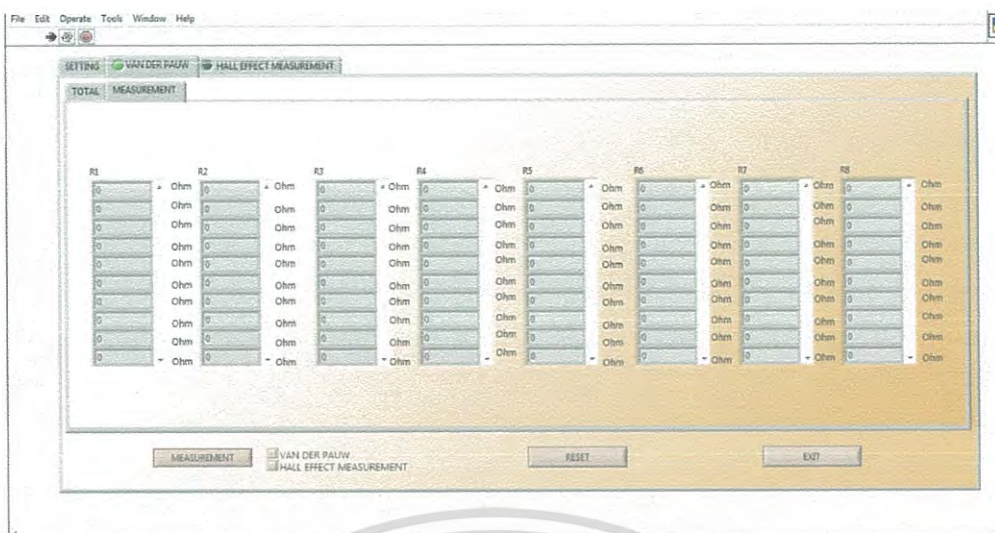


รูปที่ 4.1 หน้าต่างSetting ใช้สำหรับเชื่อมต่อบอร์ด Arduino, Digital multimeter, Current Source, การเลือกรูปแบบการวัดและป้อนค่าต่างๆที่ใช้ในการวัด

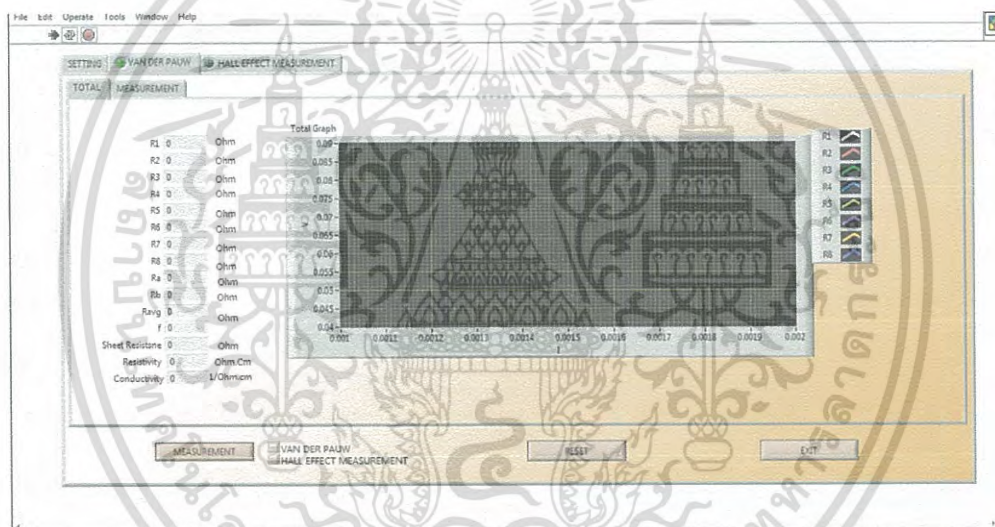


รูปที่ 4.2 หน้าต่างSetting เมื่อเราทำการเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว,เลือกรูปแบบในการวัดเป็นการวัดแบบ แวนเดอร์พาว,ป้อนค่าต่างๆครบถ้วน ต้องทำการกดปุ่ม Measurement แล้วกด Ctrl R เพื่อ Run Program

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

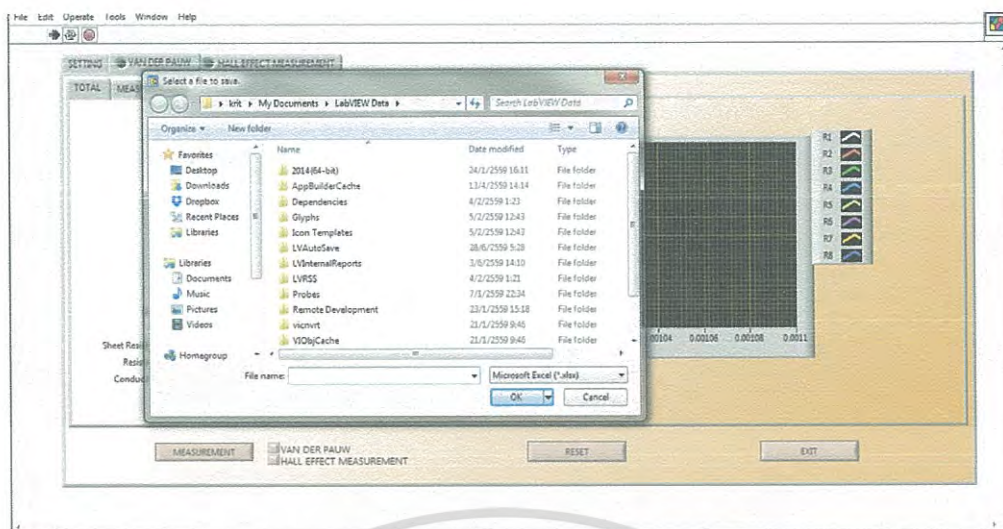


รูปที่ 4.3 หน้าต่างการวัดแวนเดอร์พาว เป็นหน้าต่างที่แสดงค่าการวัดในแต่ละครั้งของการสับขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.4 หน้าต่างรวมของการวัดแวนเดอร์พาว เป็นหน้าต่างที่แสดงค่าเฉลี่ยของการวัดและทำการคำนวณค่าที่เราต้องการทราบให้เรียบร้อยแล้วพร้อมทั้งแสดงค่าที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

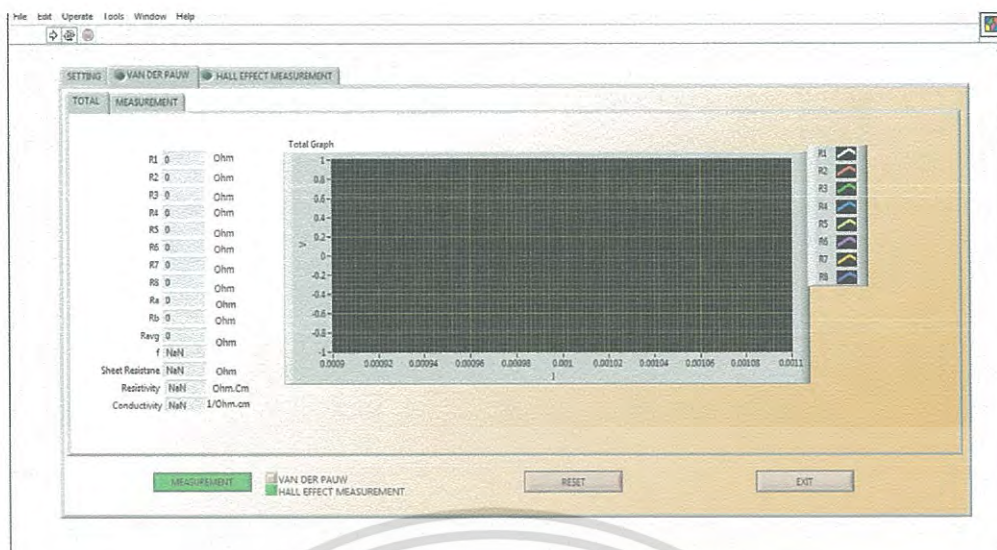


รูปที่ 4.5 หน้าต่างการบันทึกผลที่เราทำการวัดได้จากโปรแกรม

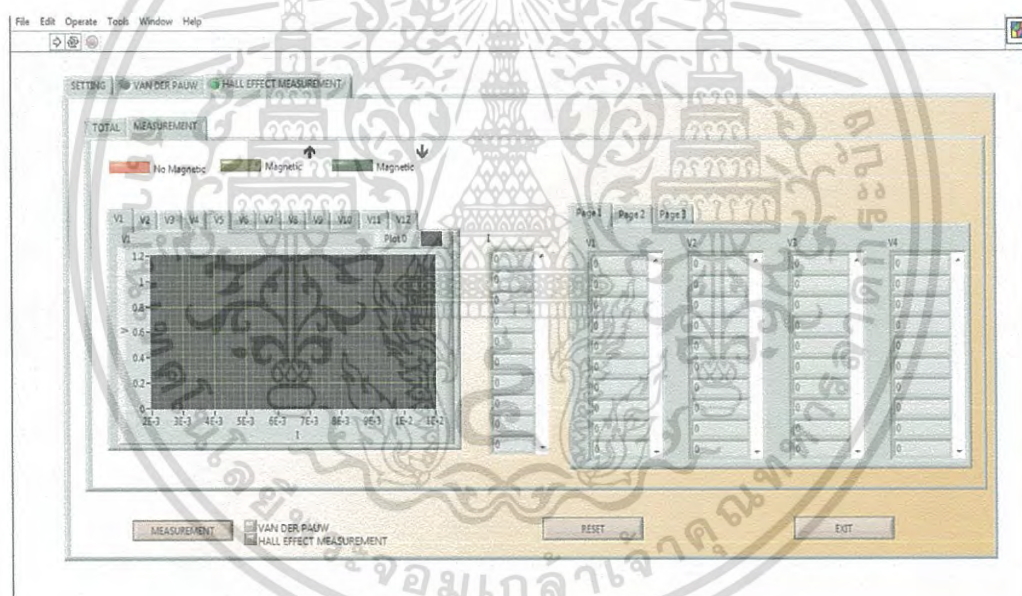
	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	J1	K1	L1	M1	N1	O1	P1	Q1	R1
1	Untitled 1	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Untitled 8	Untitled 9	Untitled 10	Untitled 11	Untitled 12	Untitled 13	Untitled 14			
2	100	0.001	118.5422	90.74281	182.9043	309.3903	121.9656	134.8487	197.8707	207.9384	145.1149	160.3235	691.5836	48.41085	0.020657			
3		0.003	131.1861	102.288	166.8697	160.7891	126.5731	130.4731	190.0404	196.8243								
4		0.005	124.9689	103.2607	160.2482	151.6591	127.7489	129.1229	187.1132	192.9608								
5		0.007	138.0803	106.4426	155.9908	137.99	129.5655	128.1478	184.0194	191.8534								
6		0.009	139.2737	108.7941	153.8671	129.0099	132.3173	127.983	178.8211	189.5819								
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้จากการบันทึกค่าจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

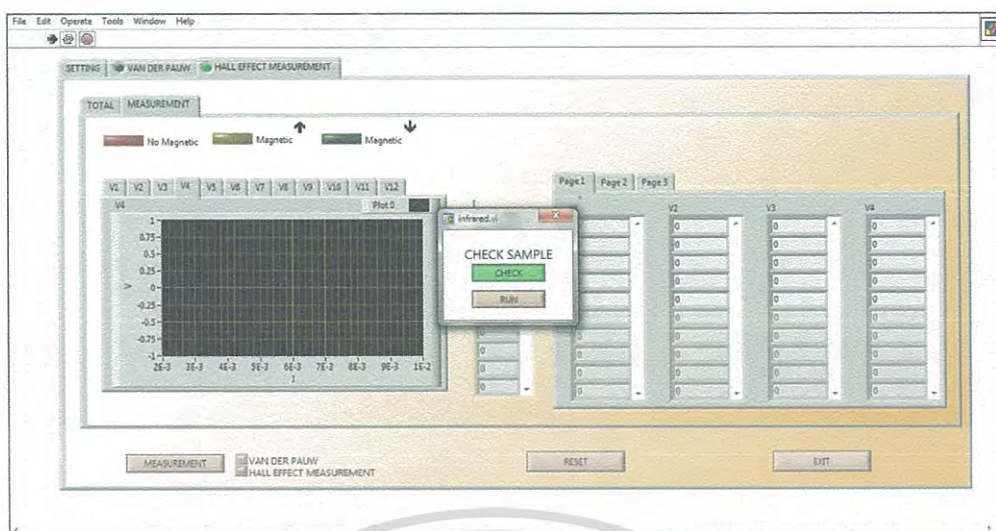


รูปที่ 4.7 ในโปรแกรมสามารถทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ได้โดยการกดเลือกรูปแบบของการวัดเป็นปรากฏการณ์ฮอลล์, กดปุ่ม Measurement และกด Ctrl R เพื่อ Run Program

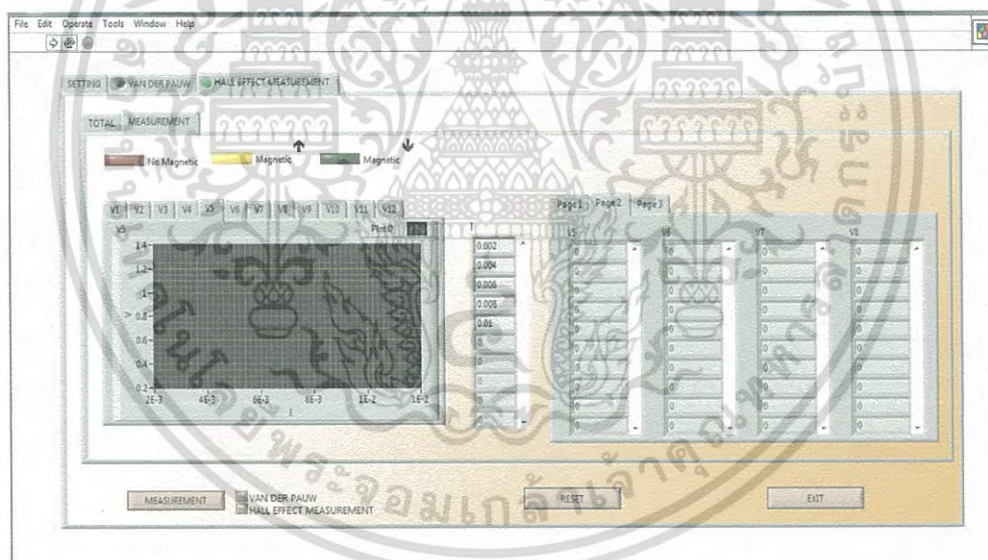


รูปที่ 4.8 หน้าต่างวัดปรากฏการณ์ฮอลล์โดยในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ การวัดนอกสนามแม่เหล็ก, การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น, การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

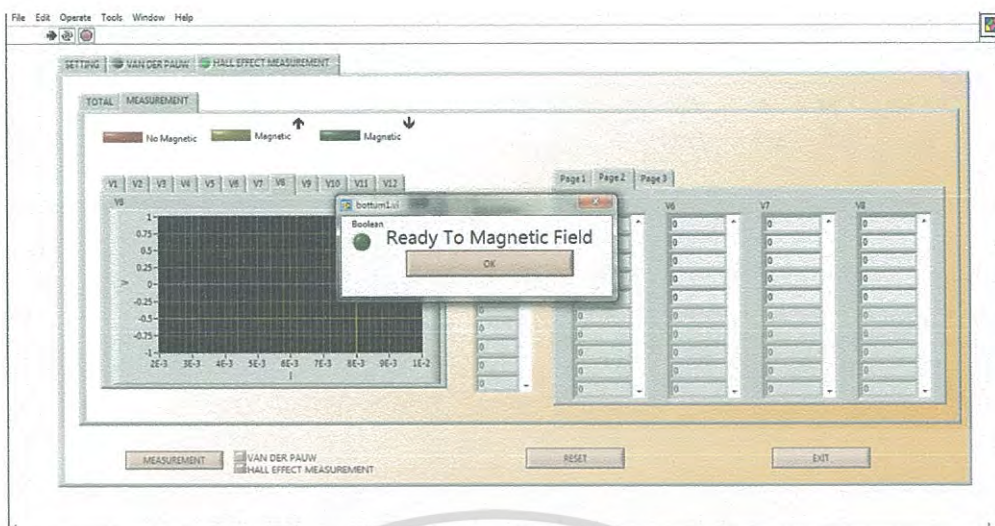


รูปที่ 4.9 เมื่อทำการวัดค่าปรากฏการณ์ฮอลล์นอกสนามแม่เหล็กแล้วจะมี pop-up ให้ทำการตรวจสอบว่าเราทำการใส่แผ่น sample ด้านไหนเพื่อที่โปรแกรมจะได้มีการปรับรูปแบบของการวัดให้มีความสอดคล้องกับแผ่น sample ที่นำมาวัด

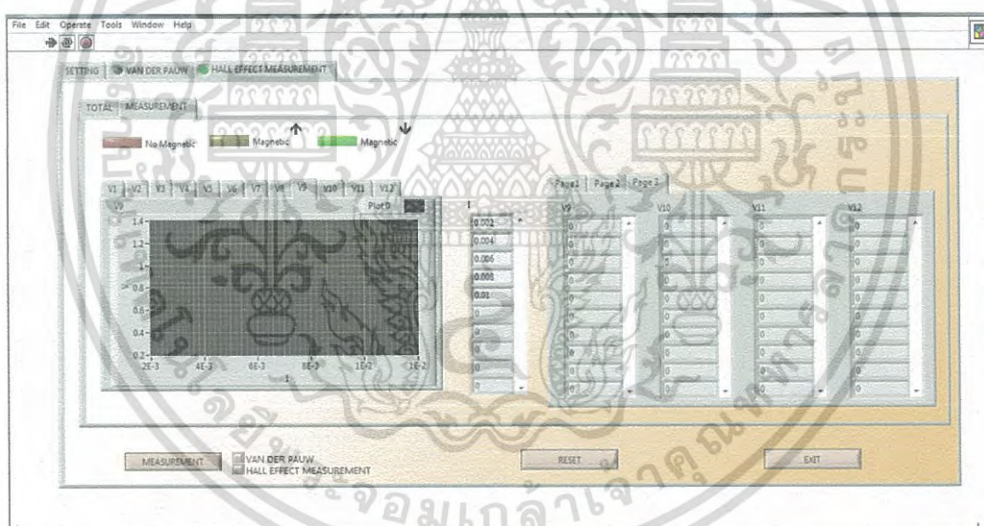


รูปที่ 4.10 หน้าต่างการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น (ใส่ sample ให้ที่ติดขั้วอยู่ด้านบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

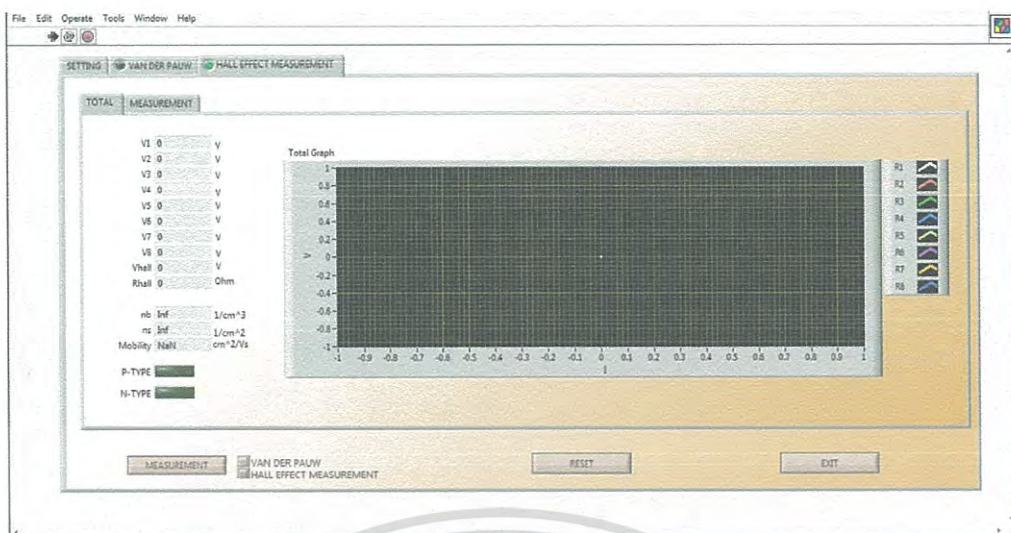


รูปที่ 4.11 หน้าต่างเมื่อทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กที่คงที่เสร็จแล้วจะมี pop-up ให้เราทำการเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็ก (ในความจริงแล้วไม่สามารถกลับสนามมาเหล็กได้จึงทำการกลับด้านของแผ่น sample แทน)

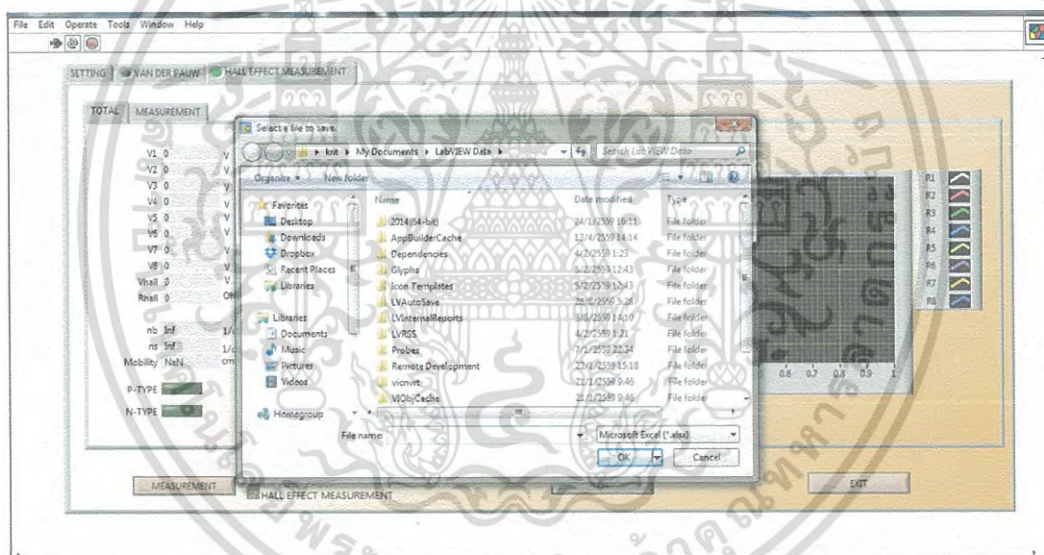


รูปที่ 4.12 หน้าต่างเมื่อเราทำการกลับแผ่นsample ระบบก็จะทำการวัดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

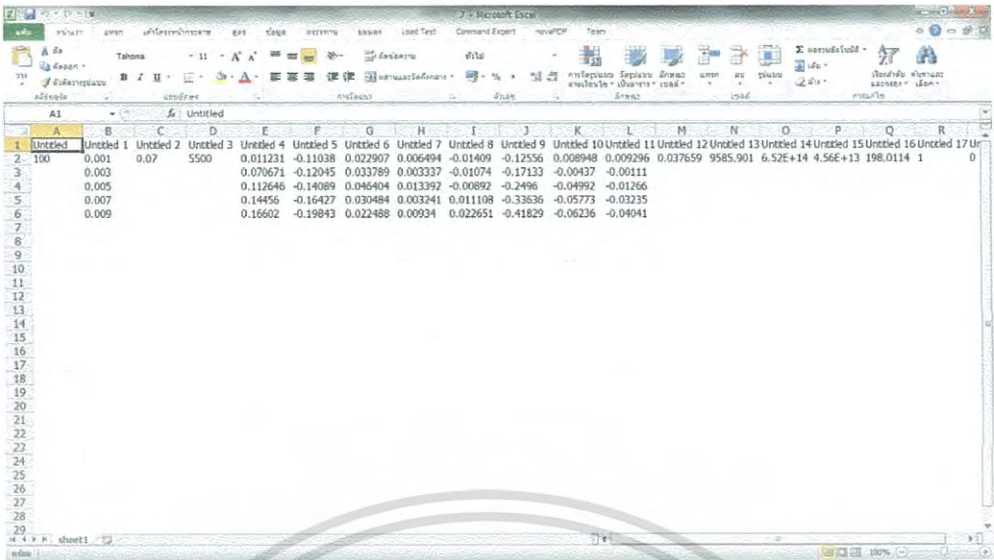


รูปที่ 4.13 หน้าต่างรวมเมื่อการวัดครบทั้ง 3 ช่วงก็จะมีการแสดงค่าที่หาได้จากการคำนวณ และบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำนั้นที่เรานำมาวัดด้วยว่าเป็นชนิดใด



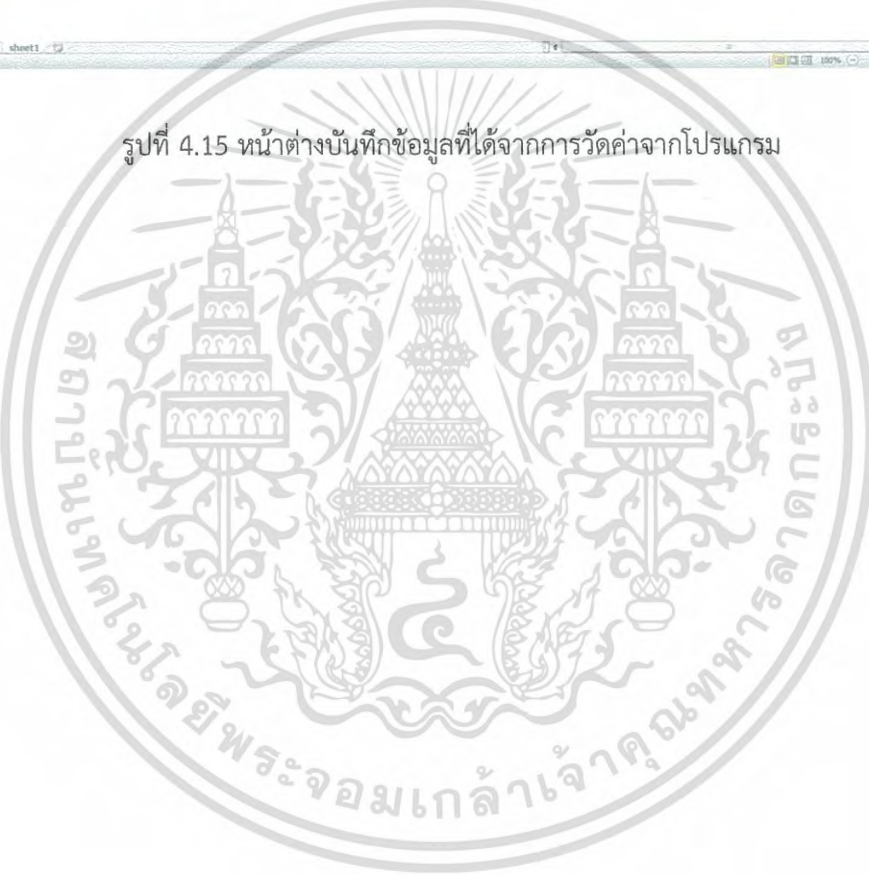
รูปที่ 4.14 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Untitled 8	Untitled 9	Untitled 10	Untitled 11	Untitled 12	Untitled 13	Untitled 14	Untitled 15	Untitled 16	Untitled 17
1	100	0.001	0.07	5500	0.011231	-0.11038	0.022907	0.006494	-0.01409	-0.12556	0.008948	0.009296	0.037659	9585.901	6.52E+14	4.56E+13	198.0114
2		0.003			0.070671	-0.12045	0.033789	0.003337	-0.01074	-0.17133	-0.00437	-0.00111					
3		0.005			0.112646	-0.14089	0.046404	0.013392	-0.00892	-0.2496	-0.04992	-0.01266					
4		0.007			0.14456	-0.16427	0.030484	0.003241	0.011108	-0.33636	-0.05773	-0.03235					
5		0.009			0.16602	-0.19843	0.022488	0.00934	0.022651	-0.41829	-0.06236	-0.04041					
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	

รูปที่ 4.15 หน้าต่างบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าจากโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลอง

เนื่องจากเรามีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของแวนเดอร์พาว และปรากฏการณ์ฮอลล์ เราจึงทำการวัดค่าของแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และ ค่ามาตรฐานที่เราทราบจากจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นว่า ระบบที่เราสร้างนั้นมีความเชื่อถือได้และมีค่าใกล้เคียงกัน ในการทดลองเราใช้ชิ้นงาน 2 ชิ้นได้แก่ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50\ \Omega\cdot\text{cm}$] และ sample 2 Sb-doped [0.01-0.05 $\Omega\cdot\text{cm}$] โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชิ้นที่ทราบค่าแล้ว

Si wafer	Doping	Type	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	ความหนา (μm)	Bulk carrier concentration (cm^{-3})
ชิ้นที่ 1	Boron(B)	P	30-50	700	$1.33\times 10^{14} - 1.35\times 10^{15}$
ชิ้นที่ 2	Antimony(Sb)	N	0.01-0.05	500	4.53×10^{18}

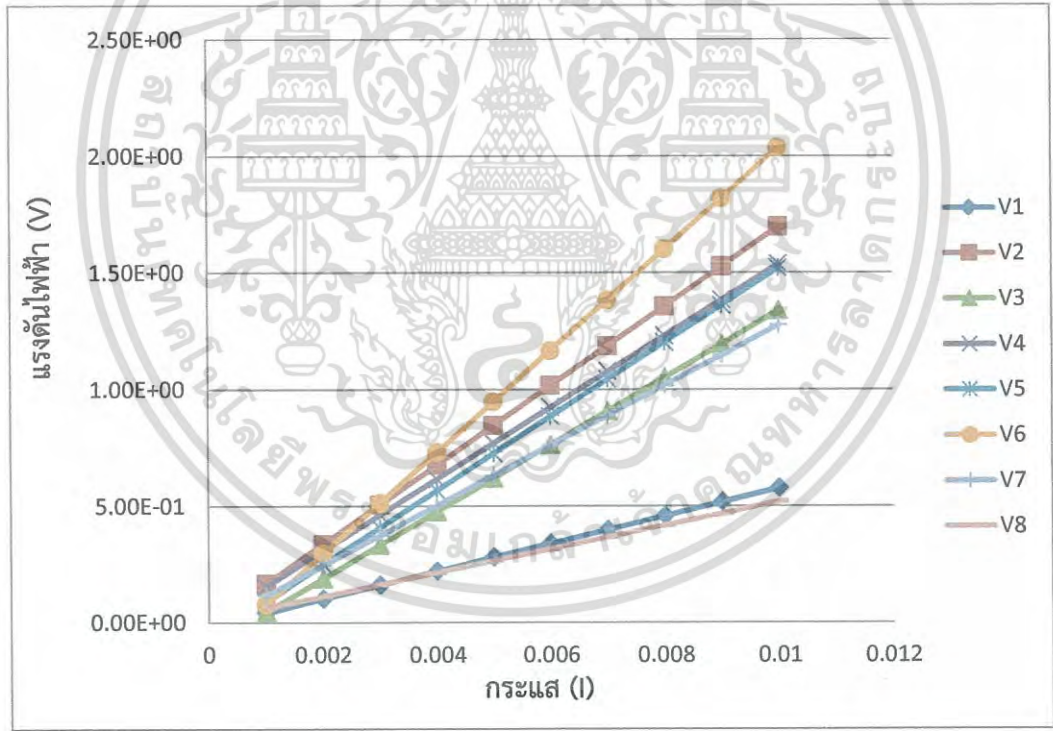
(ที่มา: American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services)

ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของsample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50\ \Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (A)	V1 (V)	2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.001	4.26E-02	1.66E-01	4.50E-02	1.56E-01	9.03E-02	7.76E-02	1.16E-01	6.27E-02
0.002	1.02E-01	3.36E-01	1.89E-01	3.09E-01	2.49E-01	2.95E-01	2.45E-01	1.14E-01
0.003	1.62E-01	5.06E-01	3.33E-01	4.63E-01	4.08E-01	5.13E-01	3.74E-01	1.64E-01
0.004	2.21E-01	6.76E-01	4.76E-01	6.16E-01	5.67E-01	7.31E-01	5.03E-01	2.15E-01
0.005	2.81E-01	8.47E-01	6.20E-01	7.70E-01	7.26E-01	9.48E-01	6.32E-01	2.66E-01

ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของsample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50\ \Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual (ต่อ)

I (A)	V1 (V)	2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.006	3.40E-01	1.02E+00	7.64E-01	9.24E-01	8.85E-01	1.17E+00	7.61E-01	3.17E-01
0.007	4.00E-01	1.19E+00	9.08E-01	1.08E+00	1.04E+00	1.38E+00	8.90E-01	3.68E-01
0.008	4.59E-01	1.36E+00	1.05E+00	1.23E+00	1.20E+00	1.60E+00	1.02E+00	4.19E-01
0.009	5.19E-01	1.53E+00	1.20E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.82E+00	1.15E+00	4.70E-01
0.010	5.78E-01	1.70E+00	1.34E+00	1.54E+00	1.52E+00	2.04E+00	1.28E+00	5.20E-01



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample1[B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50\ \Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

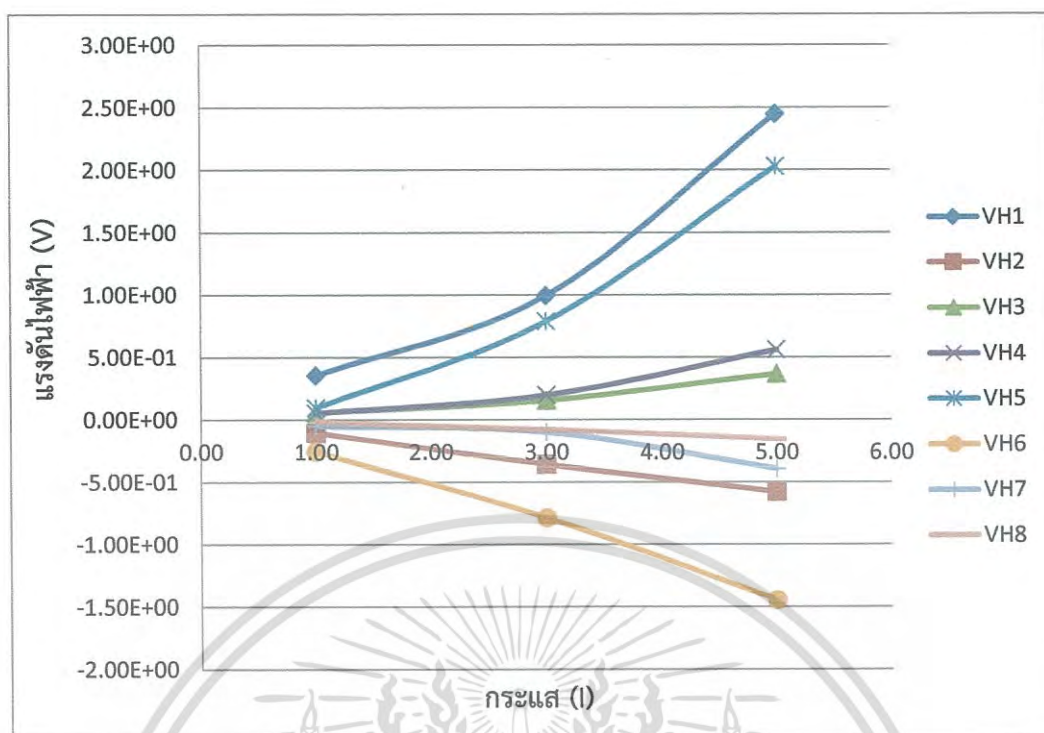
ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$] ลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

Current (mA)	VH1 (I31/V24)	VH2 (I13/V24)	VH3 (I24/V13)	VH4 (I42/V13)
1	3.58E-01	-1.05E-01	5.63E-02	5.44E-02
3	9.96E-01	-3.57E-01	1.57E-01	1.98E-01
5	2.45E+00	-5.77E-01	3.69E-01	5.61E-01

ตารางที่ 4.4 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

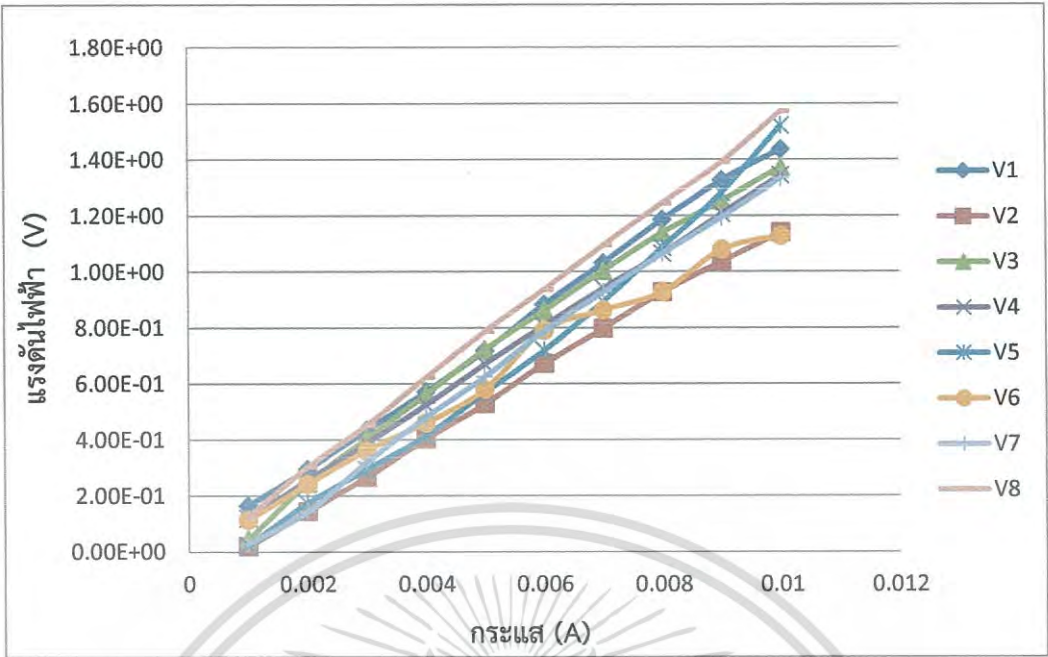
Current (mA)	VH5 (I31/V24)	VH6 (I13/V24)	VH7 (I24/V13)	VH8 (I42/V13)
1	9.64E-02	-2.56E-01	-4.88E-02	-1.45E-02
3	7.89E-01	-7.84E-01	-1.00E-01	-7.81E-02
5	2.03E+00	-1.45E+00	-3.92E-01	-1.55E-01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีแบบ Auto

ตารางที่ 4.6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30-50 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีแบบ Auto

Current (mA)	VH1 (I31/V24)	VH2 (I13/V24)	VH3 (I24/V13)	VH4 (I42/V13)
1.00	5.79E-02	1.46E-02	-2.40E-03	9.40E-03
3.00	1.37E-01	6.04E-02	-5.20E-03	4.00E-02
5.00	1.75E-01	1.12E-01	-3.60E-03	7.38E-02

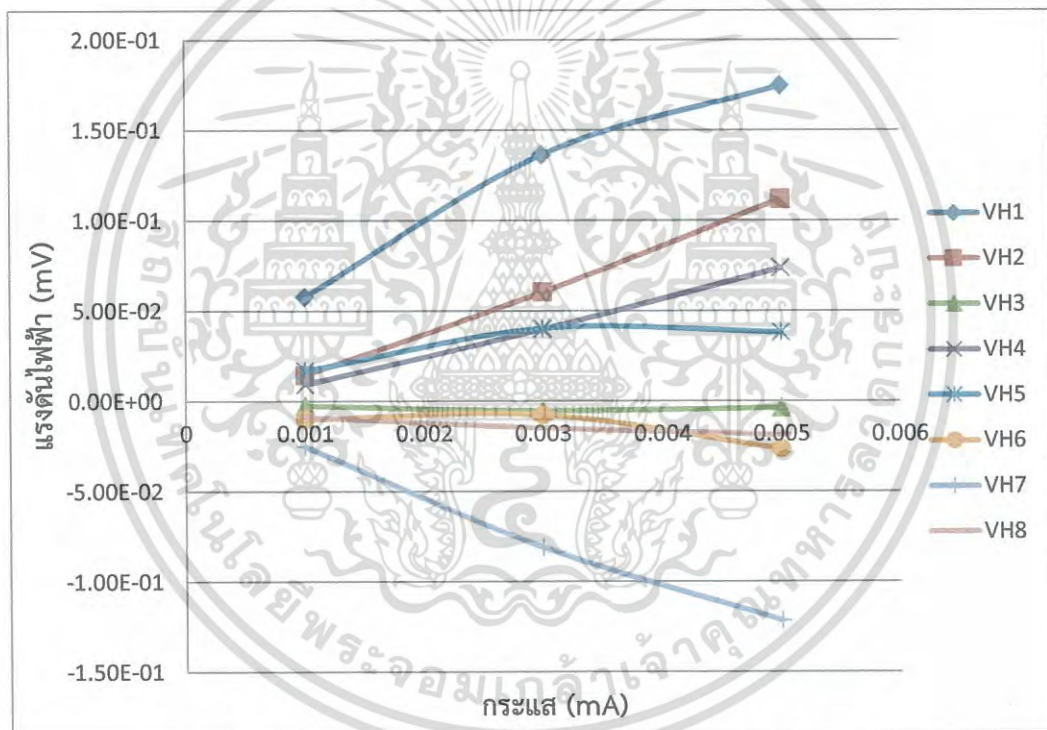
ตารางที่ 4.5 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ sample1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีวัด Auto

I (A)	v1 (V)	v2 (V)	v3 (V)	v4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.001	1.66E-01	1.93E-02	4.52E-02	1.20E-01	2.35E-02	1.15E-01	2.98E-02	1.27E-01
0.002	2.96E-01	1.45E-01	2.46E-01	2.57E-01	1.74E-01	2.43E-01	1.44E-01	3.04E-01
0.003	4.35E-01	2.68E-01	4.05E-01	3.89E-01	2.95E-01	3.63E-01	3.21E-01	4.53E-01
0.004	5.72E-01	4.03E-01	5.62E-01	5.25E-01	4.14E-01	4.61E-01	4.81E-01	6.23E-01
0.005	7.19E-01	5.28E-01	7.23E-01	6.71E-01	5.69E-01	5.80E-01	6.26E-01	7.88E-01
0.006	8.83E-01	6.72E-01	8.62E-01	8.08E-01	7.19E-01	7.90E-01	7.88E-01	9.37E-01
0.007	1.03E+00	7.97E-01	1.00E+00	9.41E-01	8.94E-01	8.63E-01	9.28E-01	1.10E+00
0.008	1.19E+00	9.28E-01	1.14E+00	1.07E+00	1.09E+00	9.28E-01	1.07E+00	1.25E+00
0.009	1.33E+00	1.04E+00	1.25E+00	1.21E+00	1.28E+00	1.08E+00	1.20E+00	1.39E+00
0.010	1.44E+00	1.14E+00	1.37E+00	1.34E+00	1.52E+00	1.13E+00	1.33E+00	1.57E+00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีแบบ Auto

Current (mA)	VH5 (I31/V24)	VH6 (I13/V24)	VH7 (I24/V13)	VH8 (I42/V13)
1.00	1.69E-02	-9.80E-03	-2.50E-02	-8.70E-03
3.00	4.04E-02	-7.50E-03	-8.09E-02	-1.48E-02
5.00	3.83E-02	-2.64E-02	-1.22E-01	-1.86E-02



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับ แรงดันไฟฟ้าของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยเครื่องมือระบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

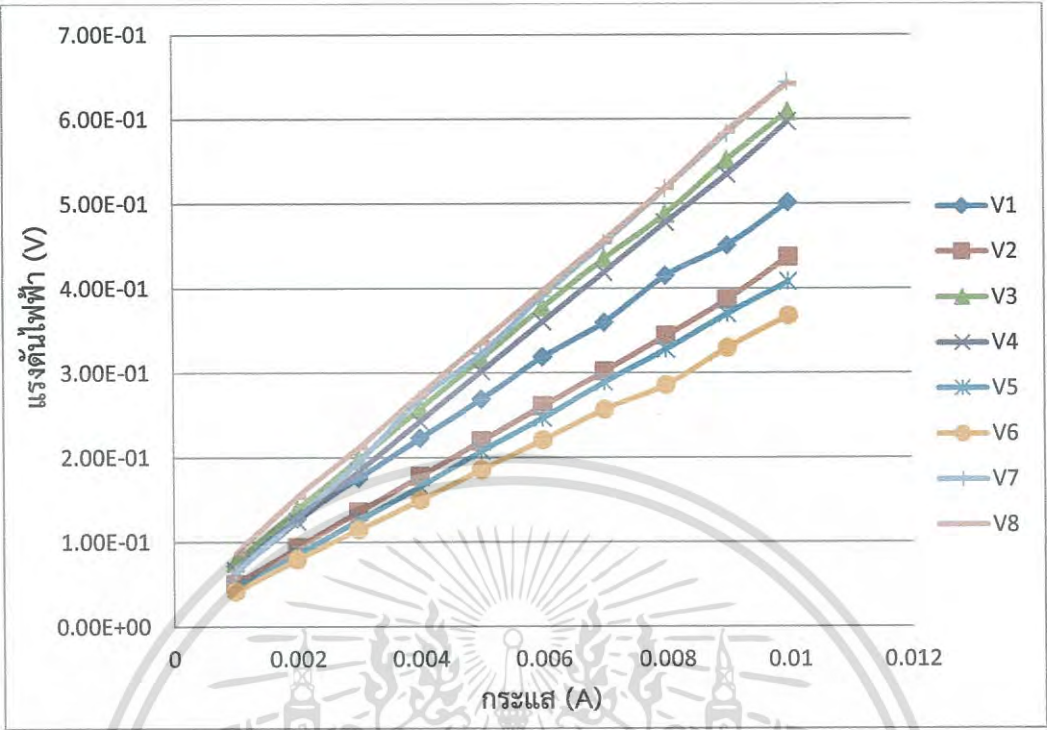
ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 1 [B-doped Si , $\rho = 30\text{-}50\ \Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto กับค่าที่ทราบ

	ค่าที่ทราบ	วิธีแบบ Manual	วิธีแบบ Auto
R_a		123.12 Ω	126.16 Ω
R_b		123.71 Ω	123.43 Ω
R_{av}		123.41 Ω	123.41 Ω
V_H		$2.98\times10^{-2}V$	$5.98\times10^{-2}V$
Sheet resistance		559.08 Ω	565.61 Ω
Resistivity	30-50	39.13 $\Omega\cdot\text{cm}$	39.59 $\Omega\cdot\text{cm}$
Sheet carrier concentration		$3.4649\times10^{13}\text{ cm}^{-2}$	$2.8704\times10^{13}\text{ cm}^{-2}$
Majority mobility	466.42	$322.63\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$	$343.14\text{ cm}^2/V\cdot\text{s}$
Bulk carrier concentration	$1.33\times10^{14} - 1.35\times10^{15}$	$4.9499\times10^{14}\text{ cm}^{-3}$	$4.1005\times10^{14}\text{ cm}^{-3}$
Conductivity		$2.55\times10^{-2}\text{ cm}^{-3}$	$2.52\times10^{-2}\text{ cm}^{-3}$
Type	P	P	P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของsample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega.\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

I (A)	v1 (V)	v2 (V)	v3 (V)	v4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.001	7.20E-02	5.10E-02	7.70E-02	6.70E-02	4.60E-02	4.20E-02	6.50E-02	8.70E-02
0.002	1.28E-01	9.40E-02	1.39E-01	1.25E-01	8.60E-02	8.00E-02	1.29E-01	1.54E-01
0.003	1.76E-01	1.36E-01	1.98E-01	1.84E-01	1.26E-01	1.15E-01	1.95E-01	2.12E-01
0.004	2.23E-01	1.78E-01	2.58E-01	2.43E-01	1.66E-01	1.50E-01	2.69E-01	2.75E-01
0.005	2.69E-01	2.20E-01	3.17E-01	3.02E-01	2.08E-01	1.86E-01	3.23E-01	3.36E-01
0.006	3.19E-01	2.61E-01	3.78E-01	3.61E-01	2.47E-01	2.21E-01	3.91E-01	3.97E-01
0.007	3.60E-01	3.02E-01	4.35E-01	4.19E-01	2.89E-01	2.57E-01	4.53E-01	4.57E-01
0.008	4.15E-01	3.44E-01	4.88E-01	4.78E-01	3.28E-01	2.86E-01	5.18E-01	5.19E-01
0.009	4.51E-01	3.87E-01	5.52E-01	5.35E-01	3.70E-01	3.30E-01	5.83E-01	5.86E-01
0.010	5.02E-01	4.37E-01	6.09E-01	5.97E-01	4.08E-01	3.68E-01	6.44E-01	6.42E-01



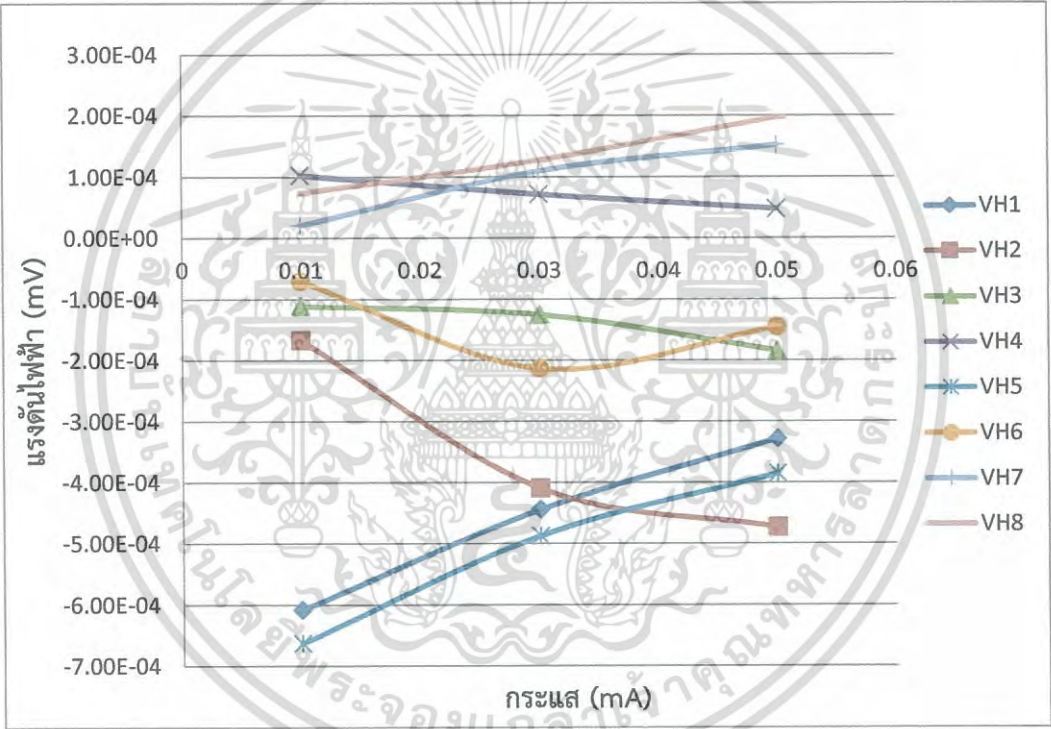
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวกับแรงดันไฟฟ้าของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

ตารางที่ 4.10 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

Current (mA)	VH1 (I31/V24)	VH2 (I13/V24)	VH3 (I24/V13)	VH4 (I42/V13)
10	-6.08E-04	-1.67E-04	-1.11E-04	1.03E-04
30	-4.44E-04	-4.09E-04	-1.25E-04	7.20E-05
50	-3.28E-04	-4.73E-04	-1.84E-04	4.80E-05

ตารางที่ 4.11 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

Current (mA)	VH5 (I31/V24)	VH6 (I13/V24)	VH7 (I24/V13)	VH8 (I42/V13)
10	-6.63E-04	-7.00E-05	2.10E-05	7.40E-05
30	-4.87E-04	-2.13E-04	1.10E-04	1.28E-04
50	-3.85E-04	-1.45E-04	1.52E-04	1.98E-04

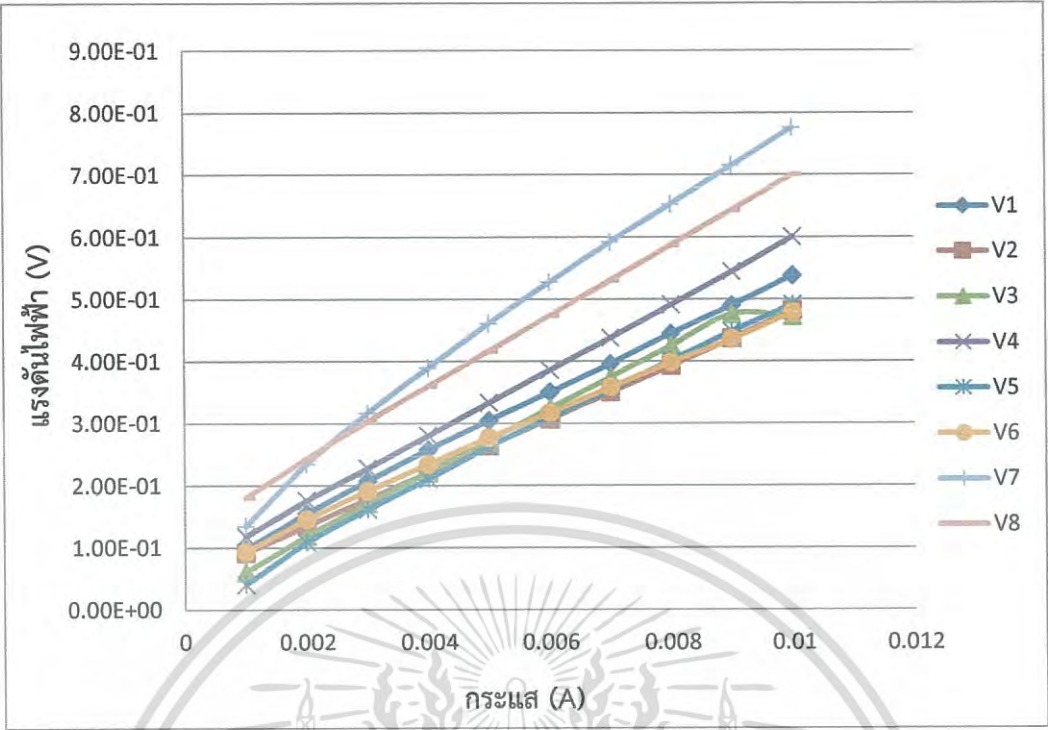


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับ แรงดันไฟฟ้า ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของsample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega.\text{cm}$] ด้วยวิธีแบบ Auto

I (A)	v1 (V)	v2 (V)	v3 (V)	v4 (V)	V5 (V)	V6 (V)	V7 (V)	V8 (V)
0.001	9.81E-02	9.19E-02	6.07E-02	1.18E-01	4.60E-02	4.20E-02	6.50E-02	8.70E-02
0.002	1.56E-01	1.36E-01	1.19E-01	1.76E-01	8.60E-02	8.00E-02	1.29E-01	1.54E-01
0.003	2.08E-01	1.78E-01	1.72E-01	2.28E-01	1.26E-01	1.15E-01	1.95E-01	2.12E-01
0.004	2.58E-01	2.21E-01	2.23E-01	2.80E-01	1.66E-01	1.50E-01	2.69E-01	2.75E-01
0.005	3.05E-01	2.64E-01	2.74E-01	3.33E-01	2.08E-01	1.86E-01	3.23E-01	3.36E-01
0.006	3.50E-01	3.07E-01	3.25E-01	3.86E-01	2.47E-01	2.21E-01	3.91E-01	3.97E-01
0.007	3.97E-01	3.50E-01	3.75E-01	4.38E-01	2.89E-01	2.57E-01	4.53E-01	4.57E-01
0.008	4.45E-01	3.93E-01	4.26E-01	4.91E-01	3.28E-01	2.86E-01	5.18E-01	5.19E-01
0.009	4.91E-01	4.37E-01	4.76E-01	5.45E-01	3.70E-01	3.30E-01	5.83E-01	5.86E-01
0.010	5.38E-01	4.82E-01	4.73E-01	6.01E-01	4.08E-01	3.68E-01	6.44E-01	6.42E-01



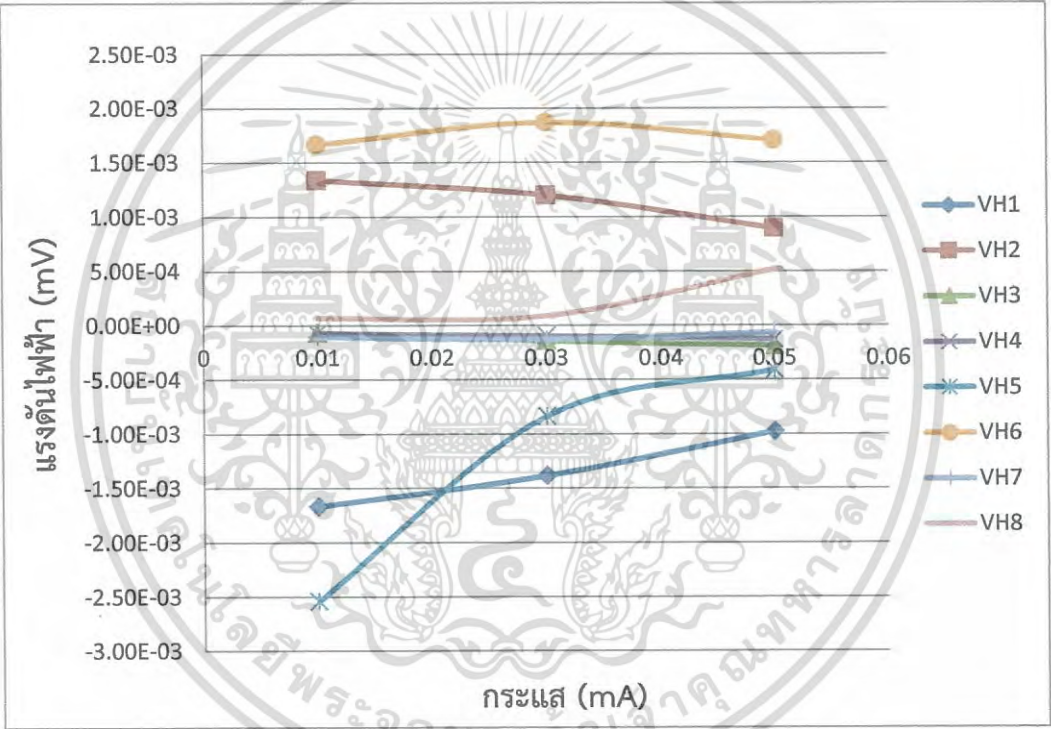
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว (A) กับแรงดันไฟฟ้า (V) ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีแบบ Auto

ตารางที่ 4.13 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ด้วยวิธีแบบ Auto

Current (mA)	VH1 (I31/V24)	VH2 (I13/V24)	VH3 (I24/V13)	VH4 (I42/V13)
10	-1.67E-03	1.34E-03	-6.30E-05	-7.10E-05
30	-1.38E-03	1.20E-03	-1.39E-04	-9.50E-05
50	-9.76E-04	8.96E-04	-1.88E-04	-1.28E-04

ตารางที่ 4.14 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01\text{-}0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง ด้วยวิธีแบบ Auto

Current (mA)	VH5 (I31/V24)	VH6 (I13/V24)	VH7 (I24/V13)	VH8 (I42/V13)
10	-2.54E-03	1.67E-03	-1.04E-04	6.90E-05
30	-8.39E-04	1.87E-03	-1.27E-04	9.00E-05
50	-4.09E-04	1.71E-03	-6.20E-05	5.18E-04



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ กับแรงดันไฟฟ้า ของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01\text{-}0.05 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$] ด้วยวิธีแบบ Auto

ตารางที่ 4.15 ตารางเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ sample 2 [Sb-doped Si , $\rho = 0.01-0.05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$] ด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto กับค่าที่ทราบ

	ค่าที่ทราบ	วิธีแบบManual	วิธีแบบ Auto
R_a		$5.67 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$	$6.80 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$
R_b		$5.35 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$	$7.51 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$
R_{av}		$5.51 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$	$7.15 \times 10^{-2} \text{ } \Omega$
V_H		$-5.70 \times 10^{-5} V$	$-1.24 \times 10^{-4} V$
Sheet resistance		$2.49 \times 10^{-1} \text{ } \Omega$	$3.24 \times 10^{-1} \text{ } \Omega$
Resistivity	0.01-0.05	$1.17 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$	$1.52 \times 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$
Sheet carrier concentration		$1.82 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	$8.34 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$
Majority mobility	137.97	$93.96 \text{ cm}^2 / V \cdot s$	$117.18 \text{ cm}^2 / V \cdot s$
Bulk carrier concentration	4.53×10^{18}	$3.87 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1.77 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Conductivity		$84.99 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$	$65.74 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$
Type	N	N	N

4.3 อภิปรายผล

จากการทดลองผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการวัดแบบ Manual และวิธีแบบ Auto โดยการวัดชิ้นงานเราสามารถนำผลการคำนวณได้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ Sheet resistance : R_s , Resistivity : ρ , Sheet carrier concentration : n_s , Majority carrier mobility : μ_m , Bulk electrical resistivity : N_B และ Conductivity : σ โดยการวัดทั้ง sample 1 และ sample 2 ค่าที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service ค่า Resistivity และค่า Bulk carrier concentration ที่ได้อยู่ในช่วงที่กำหนดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ทำเพื่อพัฒนาระบบการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์ ที่สามารถใช้ร่วมกับการวัดแบบแวนเดอร์พาวซึ่งควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ในการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการวัด โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานั้น จะสามารถทำการสับซั้วไฟฟ้า กำหนดการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแส บันทึกราคาแรงดันไฟฟ้า พร้อมด้วยหน้าต่างการทำงานติดต่อกับผู้ใช้งาน และ แสดงผลของการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ได้แก่ สภาพต้านทานไฟฟ้า ชนิด ความหนาแน่น และ สภาพคล่องของพาหะ โดยในการวัดค่าของ สภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถวัดได้จากการวัดแบบแวนเดอร์พาว เพื่อป้องกันการเกิดสภาพต้านทาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความต้านทานของรอยต่อของซั้วไฟฟ้า เป็นการทดลองเพื่อสร้างเครื่องมือวัดที่ สามารถใช้งานได้จริง โดยมีขั้นตอนการทดลองระบบการวัดของระบบที่สร้างขึ้นมากับการวัดแบบ Manual เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าระบบที่สร้างขึ้นมีการสับซั้วได้ถูกต้องและนำค่าที่วัดได้นั้นมา เปรียบเทียบกับค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ด้วยชิ้นงาน Si wafer สองชิ้นที่มีค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่ง ตัวนำที่แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองดังนี้

ค่า Sheet resistance ของ sample 1 จากการแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบ อัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 559.08Ω , 565.61Ω และค่าที่น่าเชื่อถือ สามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Sheet resistance ของ sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบ อัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $2.49 \times 10^{-1} \Omega$, $3.24 \times 10^{-1} \Omega$ และค่าที่ น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Resistivity ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติ และค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $39.13 \Omega \cdot \text{cm}$, $39.59 \Omega \cdot \text{cm}$ และ $30-50 \Omega \cdot \text{cm}$

ค่า Resistivity ของ sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติ และค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $1.17 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, $1.52 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ และ $0.01-0.05 \Omega \cdot \text{cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Sheet carrier concentration ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $3.46 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $2.87 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

ค่า Sheet carrier concentration ของ sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $1.82 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, $8.34 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

ค่า Majority mobility ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $322.63 \text{ cm}^2 / V \cdot s$, $343.14 \text{ cm}^2 / V \cdot s$ และ $466.42 \text{ cm}^2 / V \cdot s$

ค่า Majority mobility ของ sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $93.96 \text{ cm}^2 / V \cdot s$, $117.18 \text{ cm}^2 / V \cdot s$ และ $137.97 \text{ cm}^2 / V \cdot s$

ค่า Bulk carrier concentration ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $4.94 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $4.10 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.33 \times 10^{14} - 1.35 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

ค่า Bulk carrier concentration ของ sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $3.87 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1.77 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และ $4.53 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

ค่า Conductivity ของ sample 1 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $2.55 \times 10^{-2} \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$, $2.52 \times 10^{-2} \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$ และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Conductivity ของ sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ $84.99 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$, $65.74 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$ และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ชนิดของสารกึ่งตัวนำของชิ้นงาน Si wafer sample 1 จากการแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ ชนิดพี , ชนิดพี และชนิดพี

ชนิดของสารกึ่งตัวนำของชิ้นงาน Si wafer sample 2 จากการวัดแบบ Manual จากเครื่องมือเราระบบอัตโนมัติและค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ ชนิดเอ็น , ชนิดเอ็น และชนิดเอ็น

จะเห็นได้จากการทดลองระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เราสร้างขึ้นสามารถวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services จึงสรุปได้ว่าเครื่องมือของเราสามารถใช้ในการทดลองได้จริง และมีผลการทดลองที่น่าเชื่อถือได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียม Sample ที่ใช้ในการทดลองผลการทดลองต้องมีความชำนาญในการเตรียมสาร ทำความสะอาดชิ้นงานตัวอย่างและต้องต่อขั้วไฟฟ้าให้ถูกต้องตามระเบียบของแวนเดอร์พาวถึงจะได้ค่าที่แม่นยำ ควรเลือกใช้แผ่นวาง Sample ที่มีเข็มสัมผัสกับ Sample ได้โดยตรง
2. ควรเลือกช่วงของการจ่ายกระแสให้เหมาะกับชิ้นงาน ตามข้อจำกัดของเครื่อง Current source และ Digital multimeter
3. ควรใช้ Current source ที่มีค่า Volt Limit สูง เพื่อที่จะทำให้เลือกจ่ายกระแสได้หลายช่วงตามชิ้นงานต่างๆ
4. เมื่อมีการกลับชิ้นงานควรมีการรอสักระยะเพื่อให้ประจุนั้นอยู่ในสภาพที่สมดุล จะทำให้ได้ค่าที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กิจบูลย์ ชีวพันธุ์ศรี. (2554) LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนากระบวนการวัดและควบคุม. กรุงเทพฯ.

.ซีเอ็ดยูเคชั่น

นายกรณิศ นาคศิษฐ์คุณงาม, นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก นางสาวปวีณา เมฆสุกใส 2557 “การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร.

2557. สารกึ่งตัวนำ. [Online]. Available : <http://www.kmitl.ac.th/~s2010384/diode.htm>.

2557. ปรากฏการณ์ฮอลล์. [Online]. Available : http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/phy3_1.htm

2557. ความต้านทานไฟฟ้า. [Online]. Available :

<http://www.edu.nu.ac.th/wbi/355203/resistance1.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้