การพัฒนาระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

DEVELOPMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT

นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม

นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก

นางสาวปวีณา เมฆสุกใส

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การพัฒนาระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

DEVELOPMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT

นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม

นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก

นางสาวปวีณา เมฆสุกใส

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT

MR. KRORANID NAKKASITKUNNAGM
MR. KITTITAT BOONTHAMNAK
MISS PAVEENA MEKSUKSAI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การพัฒนาระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ DEVELOPMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT
ชื่อนักศึกษา	นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม รหัสนักศึกษา 54050477 นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก รหัสนักศึกษา 54050483 นางสาวปวีณา เมฆสุกใส รหัสนักศึกษา 54050551
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โศภน	
อ. ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์	
อ. สุรชาติ กมลดิลก	
รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา	
ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การพัฒนาระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม รหัสนักศึกษา 54050477
	นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก รหัสนักศึกษา 54050483
	นางสาวปวีณา เมฆสุกใส รหัสนักศึกษา 54050551
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการพัฒนาระบบวัดสารกึ่งตัวนำโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์และแวนเดอร์พาวควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ชิ้นงานที่ต้องการวัดจะถูกต่อขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์พาว กระแสจะถูกป้อนและความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกวัดด้วยเครื่องจ่ายกระแสคงที่ แบบโปรแกรมได้ของ Keithley รุ่น 220 และดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของ Agilent รุ่น 34401A ตามลำดับ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกวัดภายในสนามแม่เหล็กขนาด 5000-6000 เกาส์คู่ของขั้วไฟฟ้าที่ถูกป้อนกระแสและคู่ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์จะถูกต่อผ่านรีเลย์ชนิด 1 หน้าสัมผัส จำนวน 16 ตัวและการสลับขั้วการวัดตามวิธีของแวนเดอร์พาวจะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA1280 การควบคุมระบบการวัดและแสดงผลจะทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์พีซี ซึ่งโปรแกรมควบคุมการทำงานถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา Visual basic คำสั่งการสลับขั้วการวัดจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ต USB คำสั่งควบคุมกระแสและควบคุมการอ่านค่าความต่างศักย์จะถูกส่งไปยังเครื่องจ่ายกระแส และเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ผ่านทางพอร์ต IEE488 ตามลำดับ ผลการวัดจะถูกส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์พีซีเพื่อประมวลผลและแสดงผลการวัด ระบบที่พัฒนาขึ้นถูกทดสอบโดยการวัดสารกึ่งตัวนำซิลิกอน พบว่าค่าที่วัดได้ได้แก่ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น สภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะข้างมากและชนิดของการโดป มีค่าที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลการวัดจากระบบอื่น

คำสำคัญ : ปรากฏการณ์ฮอลล์ ระบบวัดแวนเดอร์พาว สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	DEVELOPMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT
Students	Mr. Kroranid Nakkasitkunngam Student ID 54050477
	Mr. Kittitat Boonthamnak Student ID 54050483
	Miss Paveena Meksuksai Student ID 54050551
Degree	Bachelor of science in Applied Physics.
Department	Physics
Academic Year	2014
Advisor	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
Co-Advisor	Dr. S.Tipawan Khalayboonme

ABSTRACT

This special project proposes development of a computer-based system for determination of semiconductor properties by Hall effect measurement. Four electrodes with ohmic contacts are prepared on a surface of a tested sample by Van der Pauw method. Current is applied and potential difference id measured by a Keithley 220 programmable Current Source and an Agilent 34401A Digital Multimeter, respectively. The Hall effect is measured under a magnetic field of 5000-6000 G. The current and voltage electrodes are connected via sixteen 1-contact relays. The alternation of a pair of current and voltage electrodes are controlled by ET-EASY MEGA1280 microcontroller. The measurement system is controlled by computer PC. A controlled programmed is developed by Visual Basic programming. A control command to alter the pair of electrodes is transferred to the controller via an USB port. A current control command and voltage-measuring control command are transferred to the current source and multimeter via IEEE 488 port, respectively, The measurement results are processed and displayed by PC. The developed system was tested by measuring the properties of silicon wafers. The measurement results of sheet resistance, resistivity, conductivity, carrier concentration, majority mobility and doping type are in agree with those of another

Keywords : Hall effect, Semiconductor, Van der Pauw Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องมือ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำโครงงานพิเศษนี้และยังเป็นประโยชน์ในการนำความรู้และเทคนิคต่างๆไปใช้ในหน้าที่การงานในอนาคตได้อีกด้วย อีกทั้งยังอดทนให้คนไม่ขยันได้ทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จนเกิดความรู้ความสามารถในด้านใหม่ๆ จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ซึ่งคอยแนะนำและสนับสนุนการทำโครงงานพิเศษนี้ในทุกๆด้าน ทั้งด้านทักษะความรู้ความสามารถในการทำงานและสนับสนุนเครื่องมือต่างๆการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

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

นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม
นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก
นางสาวปวีณา เมฆสุกใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารกึ่งตัวนำ	4
2.1.1 คุณสมบัติของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮล	5
2.1.2 สารกึ่งตัวนำ เอ็กทรินซิค	9
2.1.3 สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น	10
2.1.4 สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี	10
2.2 ความต้านทานไฟฟ้า	11
2.3 Van der Pauw Method	12
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	14
2.4.1 พาหะที่อยู่บนแผ่นสารตัวอย่างเป็นอิเล็กตรอน	14
2.4.2 พาหะที่อยู่บนแผ่นสารตัวอย่างเป็นโฮล	15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก	20
3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร	20
3.1.2 ระบบขับเคลื่อน	21
3.1.3 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล	24
3.2 ระบบวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	26
3.2.1 วงจรสวิตช์รีเลย์และตัวควบคุม	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 Digital multimeter และ Current source	30
3.2.3 แผ่นวาง Sample	30
3.2.4 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก	33
4.1.1 ผลการทดลอง	37
4.2 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	39
4.2.1 ผลการทดลอง	42
4.3 สอบเทียบเครื่องมือ	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปการทดลอง	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก	71
ภาคผนวก ข	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2.1	แสดงการวัดฮอลล์ตาม van der Pauw configuration	19
4.1	ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชิ้นที่ทราบค่าแล้ว	42
4.2	ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชนิดที่ 1	43
4.3	ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด 1 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น	47
4.4	ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด ที่ 1 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง	48
4.5	ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชนิดที่ 1	52
4.6	ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชนิด 2	53
4.7	ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด 2 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น	58
4.8	ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด 2 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง	58
4.9	ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชนิดที่ 1	63
4.10	ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service	63
4.11	ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 1	64
4.12	ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 2	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างอะตอม	4
2.2	วาเลนซ์อิเล็กตรอนและพันธะโควาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	5
2.3	แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮลใน แถบพลังงานขณะได้รับสนามไฟฟ้า ε	6
2.4	แสดงการเคลื่อนที่ของน้ำและที่ว่างในหลอดแก้วเปรียบเทียบ กับการเกิด และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ	7
2.5	แสดงแบบจำ ลองการกระจายของอิเล็กตรอนในโลหะซึ่งมีลักษณะ เป็นเมฆหมอกอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ท่ามกลางอะตอมที่มีสภาพคล้ายไอออนบวก	9
2.6	แสดงทิศทางการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอิเล็กตรอน และโฮลมีทิศตรงกันข้าม	9
2.7	ความต้านทานของจุดสัมผัส	11
2.8	ความต้านทานของสายดิน	11
2.9	ความต้านฉนวน	12
2.10	แสดงลักษณะการติดคอนแทคส์ของสารตัวอย่างแบบต่างๆ	12
2.11	แสดงการติดคอนแทคส์เพื่อวัดความต้านทาน	13
2.12	แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนพาหะ ที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลล์	17
2.13	แสดงการวัดฮอลล์แบบ van der Pauw	17
3.1	ชุดสนามแม่เหล็กถาวร	20
3.2	MMC-2 5 Phase stepping motor driver	21
3.3	USB/GPIB Agilent Technolog	22
3.4	ไดอะแกรมควมคุมระบบขับเคลื่อนของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส	22
3.5	เสต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส	23
3.6	หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็น 110 V	24
3.7	โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16	24
3.8	โปรแกรม PC5180 1.4	25
3.9	USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว	25
3.10	การต่อขั้วแบบแวนเดอร์พาว	26
3.11	วงจรสวิตซ์รีเลย์	27
3.12	ET-EASY MEGA1280	28
3.13	โปรแกรม Arduino 23	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 วงจรสวิตซ์รีเลย์ และ ET-EASY MEGA1280	29
3.15 ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้า	29
3.16 Digital multimeterและ Current source	30
3.17 สาย 408JE ใช้ต่อขนานระหว่าง Digital multimeterและ Current source	30
3.18 แผ่นพีซีบีที่นำมากัดเป็นแผ่นสำหรับวาง Sample เสร็จเรียร้อยแล้ว	31
3.19 ลักษณะการต่อขั้วของ Sample เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์	31
3.20 ET-EASY MEGA1280 สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว	32
3.21 SAVE ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นไฟล์ XLS	32
4.1 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้	33
4.2 คอมพิวเตอร์สามารถเชื่อมกับGauss meterได้ จะสามารถเปิดโปรแกรม PC51801.4 ได้	34
4.3 การจัดวางอุปกรณ์กับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก	34
4.4 ใส่ Address ของ MMC-2	35
4.5 ใส่ค่าต่างๆลงไป	35
4.6 กดปุ่ม ขึ้น, ลง, ซ้าย, ขวา	36
4.7 ข้อมูลตัวอักษร	36
4.8 ข้อมูลตัวเลข	37
4.9 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับจุดกึ่งกลางระหว่างแม่เหล็ก 2 อัน	37
4.10 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับบนระหว่างแม่เหล็ก 2 อัน	38
4.11 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับล่างระหว่างแม่เหล็ก	38
4.12 รูปการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	39
4.13 สายต่อจากเครื่องเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปยังแผ่นวาง Sample	40
4.14 การต่อขั้วกับแผ่นวาง Sample แบบถูกต้อง	40
4.15 หน้าต่างการตั้งค่าของพารามิเตอร์	40
4.16 หน้าต่างแสดงค่าการวัดแบบ van der pauw	41
4.17 หน้าต่างการวัดในโหมดของ hall effect	41
4.18 หน้าต่างผลลัพธ์จากการคำนวณทั้งหมด	42
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1, 2 กับแรงดันไฟฟ้า 4, 3	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2, 3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,4	44
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2,1	44
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,2	45
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2,3	45
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,2	46
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,1	46
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,4	47
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	48
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	49
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	49
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	50
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	50
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	51
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	51
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	52
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,3	54
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,4	54
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2, 1	55
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,2	55
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2,3	56
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,2	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,1	57
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,4	57
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	59
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	59
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	60
4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น	60
4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	61
4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	61
4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	62
4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2 กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เช่น ความต้านทาน ความหนาแน่นของพาหะ สภาพความคล่องของพาหะเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยการวัดส่งผลให้ทราบถึงสมบัติ รวมทั้งสามารถทำให้ปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อกระบวนการผลิตจะได้สมบัติของสารตามต้องการ ระบบการวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์นั้น เป็นวิธีการที่สามารถวัดผลและคำนวณหาค่าต่างๆของสารกึ่งตัวนำได้หลายค่าด้วยการวัดเพียงครั้งเดียว เช่น ความต้านทานที่ผิวหน้า (sheet resistance : R_s) ความเข้มของพาหะที่ผิวหน้า (sheet carrier concentration : n_s) ความคล่องตัวของพาหะข้างมาก(majority carrier mobility: μ_m) สภาพต้านทานไฟฟ้า (bulk electrical resistivity: ρ) เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดได้อย่างง่ายดายด้วย จึงทำให้การวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากการวัดผลของแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ในห้องปฏิบัติการที่เราใช้ส่วนใหญ่เป็นการวัดมือ ซึ่งต้องใช้เวลาในการจดบันทึกผลและคำนวณผล

งานวิจัยชิ้นนี้จะช่วยให้การวัดโดยใช้ระบบฮอลล์ง่ายขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากกับห้องปฏิบัติการที่ต้องใช้วัดคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำ โดยประยุกต์จากการวัดมือที่ใช้อยู่เข้ากับวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และการเขียนโปรแกรมขึ้นมาเพื่อควบคุมการทำงานให้สามารถใช้งานและประมวลผลได้สะดวกสบายยิ่งขึ้น และใช้ในงบประมาณที่ไม่มากเหมาะสมกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์และแวนเดอร์พาว
2. เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์และแวนเดอร์พาว
3. เพื่อการสอบเทียบการทำงานของเครื่องมือกับชิ้นสารที่ได้มาตรฐาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์และแวนเดอร์พาว
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
3. ออกแบบและสร้างระบบการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการสอบเทียบการใช้ระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์กับสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า
5. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
สิงหาคม -กันยายน พ.ศ. 2557	- ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์ - ศึกษาคุณลักษณะและหลักการทำงานของระบบการวัดผลปรากฏการณ์ฮอลล์ - ศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
ตุลาคม - พฤศจิกายน พ.ศ. 2557	- จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิจัย - ออกแบบชุดวางแม่เหล็กของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ - วางแผนการสร้างระบบ เขียนโปรแกรม และวิเคราะห์ผล
ธันวาคม พ.ศ. 2557 – มกราคม พ.ศ. 2558	- ทดลองการวัดสารกึ่งตัวนำกับเครื่องมือที่มีอยู่ในการวัดมือ - วัดความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก - ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบวัด - ทำการทดลองใช้ระบบที่สร้างขึ้นมาว่าใช้ได้ดีหรือไม่
กุมภาพันธ์ - เมษายน พ.ศ. 2558	- ทำการสอบเทียบและบันทึกผลระบบที่สร้างขึ้นมากับสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า - วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองและสรุปผลการทดลองเพื่อทำการปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

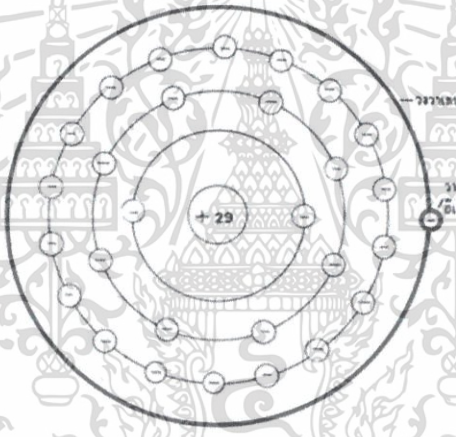
1. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการทำงานของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์และแวนเดอร์พาว
2. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
3. ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการสั่งงานของระบบ
4. สามารถทำการออกแบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากระบบวัดมือเป็นระบบการวัด แบบอัตโนมัติ
5. สามารถนำอุปกรณ์เครื่องมือการวัดไปใช้การทดลองได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำเป็นธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งในธาตุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอม โดยที่ภายในอะตอมของธาตุเหล่านี้จะ ประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ภายในนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมและมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอกคล้ายๆ กับวงโคจรในระบบสุริยะ โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้กับนิวเคลียสจะมีระดับพลังงานต่ำเนื่องจากนิวเคลียสสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ได้ ขณะที่อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสที่อยู่ห่างไกลออกไปจะมีระดับพลังงานสูง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ถ้าได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกอย่างเพียงพอ อิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุดของอะตอมนั้นๆ เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน ดังแสดงในรูป

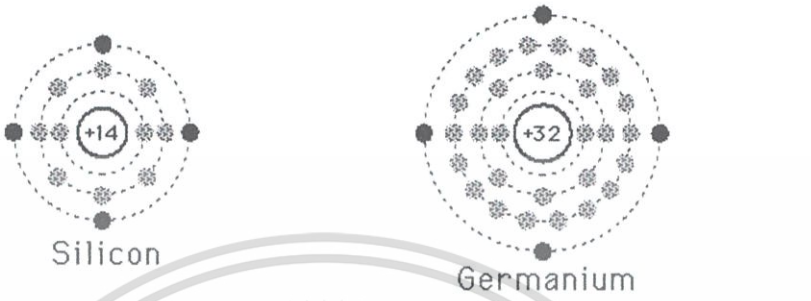


รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอม

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เช่น ซิลิกอน เยอรมันเนียม เทลลูเนียมเป็นต้น สารดังกล่าวเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ คือมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อยจึงไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมาก ฉะนั้นลำพังสารนี้อย่างเดียวแล้วไม่สามารถทำประโยชน์อะไรได้มากนัก ดังนั้น เพื่อที่จะให้ได้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากเราจึงต้องมีการปรุงแต่งโดยการเจือปนอะตอมของธาตุอื่นลงไปในเนื้อสารเนื้อเดียวเหล่านี้ หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นโดยวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสารที่ใช้ทำทรานซิสเตอร์ และไดโอดชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโด๊ปสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะเป็นสารที่มีอยู่ใน ตารางธาตุหมู่ที่ 4 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนวงนอกสุดจำนวน 4 ตัว เช่น ซิลคอน (Si:Silicon) และเยอร์มาเนี่ยม (Ge:Germanium)ที่มีโครงสร้างอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) เมื่ออะตอมของซิลิคอนและเยอร์มาเนี่ยมอยู่รวมกันเป็นผลึกจะยึดกันด้วยพันธะแบบโควาเลนซ์ (Covalent bond) ซึ่งอะตอมจะมีเสถียรภาพถ้าจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนมีจำนวนครบ 8 ตัว ดังนั้นอะตอมของซิลิคอนและเยอร์มาเนี่ยมจึงจับกลุ่มกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)



(ก) ลักษณะวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว

(ข) พันธะโควาเลนซ์

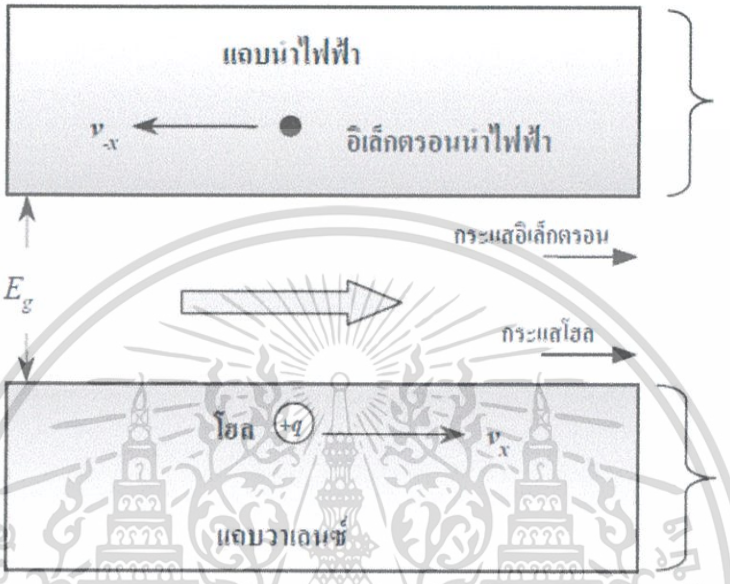
รูปที่ 2.2 วาเลนซ์อิเล็กตรอนและพันธะโควาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

2.1.1 คุณสมบัติของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮล

ในสารกึ่งตัวนำมีประจุนำไฟฟ้า 2 ชนิด คืออิเล็กตรอนนำไฟฟ้า และโฮล อิเล็กตรอนนำไฟฟ้านี้ เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ มีขนาดเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์ เคลื่อนที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้า มวลของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำถูกเรียกว่า “มวลยังผล” (Effective mass: m_n^*) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากมวลของอิเล็กตรอนอิสระในสุญญากาศ ที่เรียกว่า “มวลนิ่ง ” (Rest mass: m_0) ในสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกันมวลยังผลจะมีค่าแตกต่างกัน พลังงาน(E) ของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้านี้ ถูกพิจารณาว่ามีค่าเท่ากับหรือมากกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า(E_c) หรือ ก็คือ $E \geq E_c$ ซึ่งในการวิเคราะห์และคำนวณต่างๆ เราจะประมาณง่ายๆ ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ E_c หรือ $E \approx E_c$ สำหรับอิเล็กตรอนที่อยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

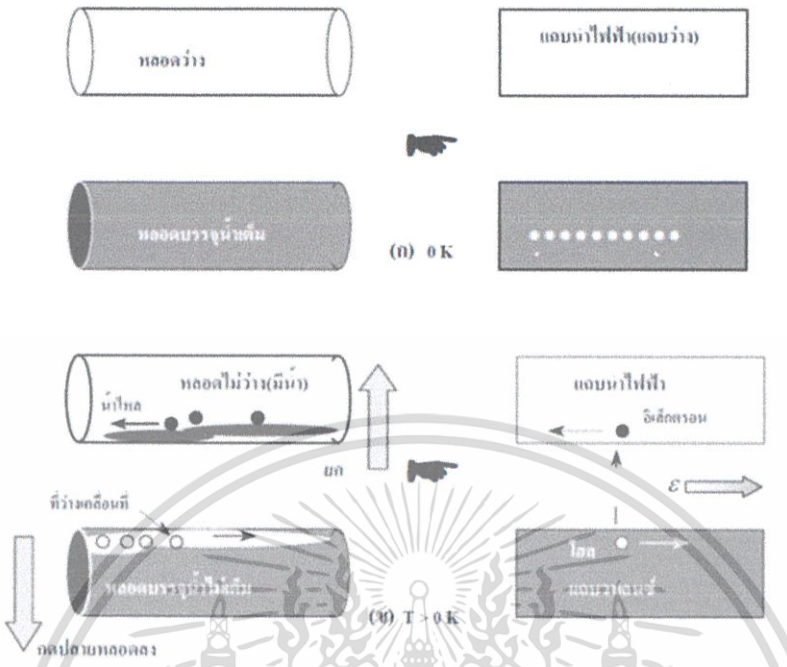
แถบวาเลนซ์คืออิเล็กตรอนที่ถูกยึดไว้กับอะตอม ไม่เป็นอิสระและนำไฟฟ้าไม่ได้ พลังงานของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จึงมีค่าติดลบ หรือ ต่ำกว่าศูนย์ (E < 0) โดยมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (E_v) แต่ในการวิเคราะห์เบื้องต้น เราจะประมาณว่า พลังงานของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์มีค่าเท่ากับ E_v หรือ $E \approx E_v$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าและโฮล ในแถบพลังงานขณะได้รับสนามไฟฟ้า

ความกว้างของ "ช่องว่างพลังงาน" E_g (Energy gap) หมายถึงความแตกต่างของระดับพลัง งานที่ขอบของแถบทั้งสอง หรือก็คือ $E_g = E_c - E_V$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับโฮลเป็นอนุภาคที่มีประจุเท่ากับประจุของอิเล็กตรอน แต่เป็นชนิดบวก ($+q$) มีมวลยังผลคือ m_p* เคลื่อนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ สามารถนำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า โฮลจะเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ซึ่งต่างจากอิเล็กตรอนดังในรูปที่ 2.3 แต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของพาหะทั้งสองจะมีทิศทางเดียวกัน นอกจากนี้แล้ว เพื่อให้เข้าใจการเคลื่อนที่ และการนำไฟฟ้าของโฮลได้ดียิ่งขึ้น เราจะ พิจารณาเปรียบเทียบโฮลกับที่ว่าง หรือฟองอากาศ ที่อยู่ในของเหลวหรือในน้ำ ในหลอดแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยน้ำจะเปรียบเสมือนอิเล็กตรอน ที่อุณหภูมิต่ำๆ หรือ 0 K แถบนำไฟฟ้ามี สภาพว่างเปล่า ไม่มีอิเล็กตรอน จึงเปรียบได้กับหลอดแก้วที่ว่าง (หลอดบน) ซึ่งไม่มีน้ำ และที่แถบวาเลนซ์ มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มทุกสถานะ ไม่มีโฮลเลย จึงเปรียบได้กับหลอดแก้วที่มีน้ำบรรจุอยู่เต็ม (หลอดล่าง) ซึ่งไม่มีที่ว่างเลย ดังในรูปที่ 2.4 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของน้ำและที่ว่างในหลอดแก้วเปรียบเทียบ กับการเกิดและการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอน และโฮล ในสารกึ่งตัวนำ
(ก) ที่อุณหภูมิต่ำๆ หรือ 0 K และ(ข) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ขณะได้รับสนามไฟฟ้า

ในขณะนี้แม้สารกึ่งตัวนำ จะได้รับสนามไฟฟ้า ก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล เพราะไม่มีพาหะนำไฟฟ้า เปรียบได้กับหลอดแก้วทั้งสอง แม้จะถูกรบกวนเช่น เอียงหลอดแก้วอย่างไรก็ตาม จะไม่มีกระแสน้ำไหล ซึ่งการเอียงหลอดแก้วเปรียบได้กับการให้สนามไฟฟ้าแก่สารกึ่งตัวนำ นั่นเอง แต่เมื่อหลอดแก้วด้านบนมีน้ำอยู่แม้เพียงเล็กน้อย หรือหลอดแก้วด้านล่างมีที่ว่าง เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูป(ข) ซึ่งเปรียบได้กับสารกึ่งตัวนำ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 0 K จะเกิดมีอิเล็กตรอนอิสระที่แถบด้านบน และเกิดโฮลที่แถบด้านล่าง ในขณะนี้ ถ้าแก้วน้ำถูกทำ ให้เอียง จะมีกระแสน้ำไหลได้ทั้งสองหลอดแก้ว โดยที่หลอดด้านบนมีกระแสน้ำไหลได้ เนื่องจากมีน้ำเกิดขึ้น แต่ในหลอดแก้วด้านล่าง กระแสน้ำเกิดขึ้นได้เพราะมีที่ว่าง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ กระแสของที่ว่างนั่นเอง ปริมาณของกระแสน้ำจะไม่ขึ้นกับปริมาณของน้ำ แต่จะขึ้นกับปริมาณของที่ว่าง ยิ่งมีที่ว่างมากน้ำจะไหลมาก มีที่ว่างน้อยน้ำจะไหลน้อย หรือถ้าไม่มีที่ว่างเลย ก็จะไม่มีกระแสน้ำเลย

ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่าที่ว่างในหลอดแก้วด้านล่างเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ปริมาณของที่ว่างเป็นตัวกำหนดปริมาณกระแส เราจึงสามารถเรียกกระแสนี้ว่า “กระแสของที่ว่าง” เช่นเดียวกับสารกึ่งตัวนำ “โฮล” ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ คล้ายกับที่ว่างในหลอดแก้วด้านล่าง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากประจุเคลื่อนที่ในแถบวาเลนซ์ จึงเกี่ยวข้องและถูกกำหนดด้วยความหนาแน่นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

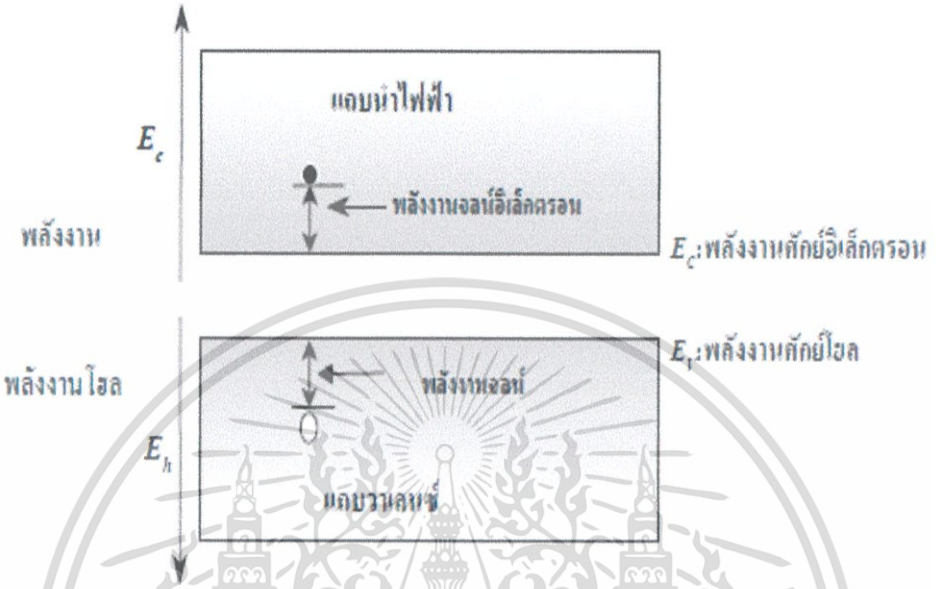
โฮลโดยตรง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำ ไฟฟ้า และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ในการวิเคราะห์ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากเป็นประจุต่างชนิดกัน ดังนั้นอิเล็กตรอน และโฮลจะเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม เช่นเดียวกับน้ำในหลอดแก้วด้านบน และที่ว่างในหลอดแก้วด้านล่างจะเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้าม เมื่อหลอดแก้วทั้งสองถูกเอียงในทิศเดียวกันในกรณีของตัวนำ เช่น โลหะ จะมีพาหะนำ ประจุเพียงชนิดเดียว คือ อิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในโลหะ มีสภาพเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เพราะโคจรอยู่ห่างจากนิวเคลียส ของอะตอมดั้งเดิมมาก จึงเหมือนกับไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างนิวเคลียส และอิเล็กตรอนเหล่านี้เลยนั่นคือ ไม่มีแถบพลังงานต้องห้าม หรือช่องว่างพลังงาน (E_g = 0) ที่อิเล็กตรอนต้องเอาชนะเพื่อกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้นในโลหะจึงไม่มีโฮล เช่นในสารกึ่งตัวนำ แบบจำ ลองของโลหะจึงคล้ายกับว่า ในโลหะ ประกอบด้วยไอออนบวก (Core atom) จำนวนมากมายเรียงรายอยู่ในโลหะท่ามกลาง กลุ่มก๊าซของอิเล็กตรอนอิสระ ดังในรูปที่ 2.5 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ พร้อมที่จะนำ ไฟฟ้าทันทีที่ได้รับสนามไฟฟ้า ประมาณกันว่าในโลหะโดยทั่วไป มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ราว 10^{20} อิเล็กตรอน/ ลบ.ซม. ในขณะที่ในสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอน ที่อุณหภูมิห้อง มีอิเล็กตรอนอิสระเพียง 10^{10} อิเล็กตรอน / ลบ.ซม.เท่านั้น โลหะจึงมีความนำ ไฟฟ้าสูงกว่าสารกึ่งตัวนำมาก สำหรับค่าพลังงาน ที่แสดงในรูปแถบพลังงาน หมายถึงพลังงานของอิเล็กตรอน กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปอยู่ที่ระดับที่สูงขึ้น

รูปที่ 2.5 แสดงแบบจำ ลองการกระจายของอิเล็กตรอนในโลหะซึ่งมีลักษณะเป็นเมฆหมอก อิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ท่ามกลางอะตอมที่มีสภาพคล้ายไอออนบวก

และกฎเกณฑ์ดังกล่าวนี้ สามารถใช้ได้กับอิเล็กตรอนตลอดทุกแถบพลังงาน เช่นอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานมากพอก็จะย้ายขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานในแถบนำไฟฟ้า กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ขอบล่างสุดของแถบนำ ไฟฟ้า (E_c) ถือว่าเป็นอิเล็กตรอนนำ ไฟฟ้าที่มีพลังงานน้อยที่สุด คือ มีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ และมีพลังงานศักย์เท่ากับ E_c กรณีที่อิเล็กตรอนอยู่สูงกว่าระดับ E_c แสดงว่ามีพลังงานจลน์ เกิดขึ้น และในทางกลับกันค่าพลังงานของโฮลมีทิศตรงข้ามกับกรณีอิเล็กตรอน โฮลที่ระดับขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ (E_V) ถือว่าเป็นโฮลที่มีพลังงานน้อยที่สุด คือมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ และมีพลังงานศักย์ เท่ากับ E_V เมื่อโฮลได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น โฮลจะเปลี่ยนไปอยู่ในระดับที่ต่ำลงกว่าเดิมในแถบวาเลนซ์ โฮลที่อยู่ต่ำกว่าระดับ E_V แสดงว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีพลังงานจลน์เกิดขึ้น และค่าของพลังงานจลน์หาได้จาก ค่าที่แตกต่างระหว่างระดับพลังงานที่พาหะอยู่ กับระดับขอบของแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอิเล็กตรอน และโฮลมีทิศตรงกันข้าม

2.1.2 สารกึ่งตัวนำ เอ็กทรินซิค (Extrinsic semiconductor)

ในสารกึ่งตัวนำ ที่บริสุทธิ์ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลมีค่าน้อย เช่นในซิลิคอน ที่ 300 K , $n_i \approx 10^{10}$ อนุภาค/ลบ.ซม. ซึ่งถ้าคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้าแล้ว จะมีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก ดังนั้น สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จะถูกนำ ไปใช้งานน้อยมาก และในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะให้สารกึ่งตัวนำ สามารถถูกนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่นการนำ ไปสร้าง เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ กรณีนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเติมหรือเจือปน ด้วยอะตอมของธาตุบางธาตุลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ อะตอมของธาตุเจือปนนี้ถูกเรียกว่า “อะตอมสารเจือ” (Impurity atoms) เมื่อสารกึ่งตัวนำ บริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุอื่น สารกึ่งตัวนำ จะมีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเราเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำ เอ็กทรินซิค” (Extrinsic semiconductor)

ผลของอะตอมสารเจือที่เติมเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ด้วยสัดส่วนที่น้อยมาก จะทำ ให้สารกึ่งตัวนำ สามารถนำ ไฟฟ้าได้ดีขึ้นอย่างมากมาย และยังสามารถควบคุมค่าความนำไฟฟ้าได้อีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น จากการเลือกชนิดของอะตอมสารเจือ จะทำ ให้สามารถกำหนดชนิดของพาหะที่นำ ไฟฟ้าได้ด้วย เช่น อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (*n*-Type impurity atoms) จะทำ ให้สารกึ่งตัวนำ มีอิเล็กตรอนนำ ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และมีความหนาแน่นมากกว่าโฮลมาก สารกึ่งตัวนำ เช่นนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น” (*n*-Type Semiconductor) หรือ อะตอมสารเจือชนิดพี จะทำ ให้สารกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำ มีโฮล เพิ่มขึ้น และมีความหนาแน่นมากกว่า อิเล็กตรอนมาก บรรท คคสารกึ่งตัวนำ เช่นนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี” (*p*-Type Semiconductor)

2.1.3 สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น (*n* - Type Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น หมายถึง สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยอะตอมฟอสฟอรัส สารกึ่งตัวนำ เช่นนี้ จะเป็นสารกึ่งตัวนำ ที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเรียกว่า “ สารกึ่งตัวนำ เอ็กทรินซิค” (Extrinsic semiconductor) อะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ ที่มี 5 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ เมื่อเข้าไปอยู่ในผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งแต่ละอะตอมมี 4 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ จะเกาะเกี่ยวกับอะตอมสารกึ่งตัวนำ ที่อยู่ข้างเคียง 4 อะตอม ด้วยพันธะโควาเล็นซ์ 4 พันธะ อิเล็กตรอนตัวที่ 5 ไม่มีพันธะโควาเล็นซ์อยู่ จึงโคจรอยู่ห่างๆรอบๆนิวเคลียสของอะตอมผู้ให้ และมีคุณสมบัติคล้ายกับอิเล็กตรอนอิสระ อย่างไรก็ดีที่อุณหภูมิ 0 K ไม่มีพลังงานจากความร้อน อิเล็กตรอนตัวที่ 5 นี้ จึงยังคงถูกยึดเหนี่ยวไว้ที่อะตอมสารเจือ โดยโคจรอยู่รอบๆอะตอม ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งถูกเติมด้วยอะตอมฟอสฟอรัส ซึ่งอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส จะทำ ให้เกิด “ระดับผู้ให้” (E_D: Donor Level) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน โดยอยู่ต่ำกว่า “ระดับนำไฟฟ้า” (E_c: Conduction Level) เพียงเล็กน้อยราว 0.044 eV ระดับพลังงานนี้ก็คือค่าพลังงานของอิเล็กตรอนตัวที่ 5 นั่นเอง และอาจหมายถึงพลังงานที่อิเล็กตรอนถูกยึดเหนี่ยวไว้ในอะตอม โดยปกติค่าพลังงานที่อะตอมสารเจือยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนตัวที่5ไว้ มีค่าน้อยมากเราเรียกพลังงานนี้ว่า “พลังงานยึดเหนี่ยว” (Binding energy) ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวหรือระดับผู้ให้นี้ และรัศมีของวงโคจรของอิเล็กตรอนตัวที่ 5 ที่โคจรรอบๆนิวเคลียสของอะตอมสารเจือได้ โดยแทนอะตอมสารเจือนี้ ด้วยแบบจำ ลองของอะตอมไฮโดรเจนที่บอห์นเสนอไว้ เพราะมีอิเล็กตรอน 1 อิเล็กตรอน โคจรอยู่รอบๆ นิวเคลียสเหมือนกัน

2.1.4 สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี (*p* - Type Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำ ชนิดพี หมายถึง สารกึ่งตัวนำ ที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี ที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่อะตอมโบรอน อะตอมสารเจือผู้รับนี้ แต่ละอะตอมมี 3 อิเล็กตรอนวาเลนซ์ เมื่อเข้าไปอยู่ในผลึกสารกึ่งตัวนำ จะเกาะเกี่ยวกับอะตอมสารกึ่งตัวนำ ที่อยู่ข้างเคียง เกิดเป็นพันธะโควาเล็นซ์ที่สมบูรณ์ได้เพียง 3 พันธะ อีกหนึ่งพันธะจะไม่สมบูรณ์ เพราะขาดอิเล็กตรอนอีก หนึ่งอิเล็กตรอน ที่อุณหภูมิ 0 K แบบจำ ลองพันธะโควาเล็นซ์ และลักษณะแถบพลังงาน ของผลึกสารกึ่งตัวนำ ชนิดพี เขียนได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.16 (ก) และ(ข) ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่า อะตอมสารเจือผู้รับทำ ให้เกิดมีระดับพลังงานที่เรียกว่า “ระดับผู้รับ” (E_A: Acceptor Level) ขึ้นที่ช่องว่างพลังงาน โดย ระดับพลังงานนี้จะอยู่เหนือ “ระดับวาเลนซ์” (E_V: Valence Level) เพียงเล็กน้อย ซึ่งระดับพลังงานค่านี้ก็คือ ค่าพลังงานไอออไนซ์ของอะตอมสารเจือนั่นเอง ซึ่งอะตอมสารเจือที่ต่างชนิดกัน จะมีค่าแตกต่างกัน เช่นอะตอมโบรอนในสารกึ่งตัวนำ ซิลิคอนระดับผู้รับ E_A จะอยู่สูงกว่าระดับวาเลนซ์ E_V เพียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.045 eV นั่นแสดงว่าเมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ได้รับพลังงานจากภายนอก เพียงเล็กน้อย คือ 0.045 eV ก็สามารถที่จะเข้าไปอยู่ที่ระดับ E_A ในอะตอมผู้รับได้

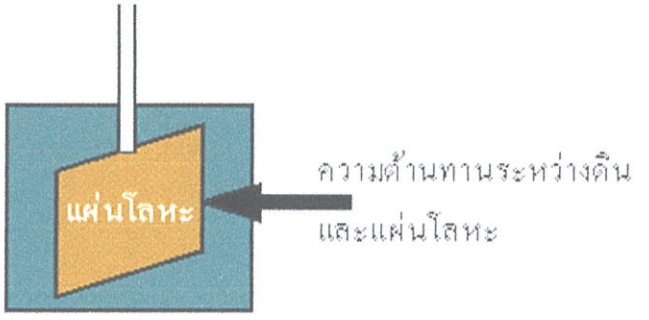
2.2 ความต้านทานไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหล หมายถึง มีการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนในลวดสายไฟ และอิเล็กตรอนจะวิ่งชนกับอะตอมของเส้นลวด เกิดการต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น เรียกว่าความต้านทาน(Resistance) ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) ความต้านทานเกิดขึ้นทุกๆ ที่ที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในสายไฟเท่านั้น ตัวอย่างความต้านทานต่างๆ มีดังนี้

- ความต้านทานของตัวนำ ได้แก่ ความต้านทานของลวดสายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน
- ความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ ความต้านทานของสารละลายกรดเกลือ กรดกำมะถัน น้ำเกลือ เป็นต้น
- ความต้านทานของจุดสัมผัส ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของสวิตช์หรือรอยเชื่อมต่อระหว่างสายไฟ ที่จุด สัมผัสนี้กระแสจะไหลได้ยากเพราะมีความต้านทานสูงความต้านทานของจุดสัมผัสนี้จะเป็นปัญหามากเมื่อให้กระแสไหลผ่าน เป็นจำนวนมากค่าความต้านทานนี้จะลดลงโดยการขัดผิวที่จุดสัมผัสให้เรียนหรือเพิ่มแรงกดที่จุดสัมผัส หรือบัดกรีเชื่อมต่อ ระหว่างสายไฟเสีย

รูปที่ 2.7 ความต้านทานของจุดสัมผัส

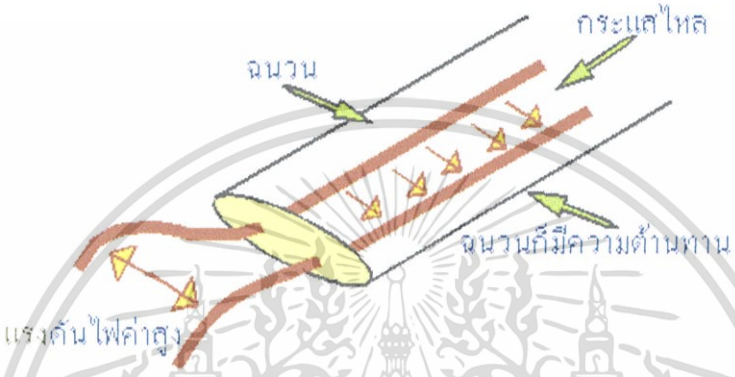
- ความต้านทานของสายดิน ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างดินและแผ่นโลหะผังลงดิน



รูปที่ 2.8 ความต้านทานของสายดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

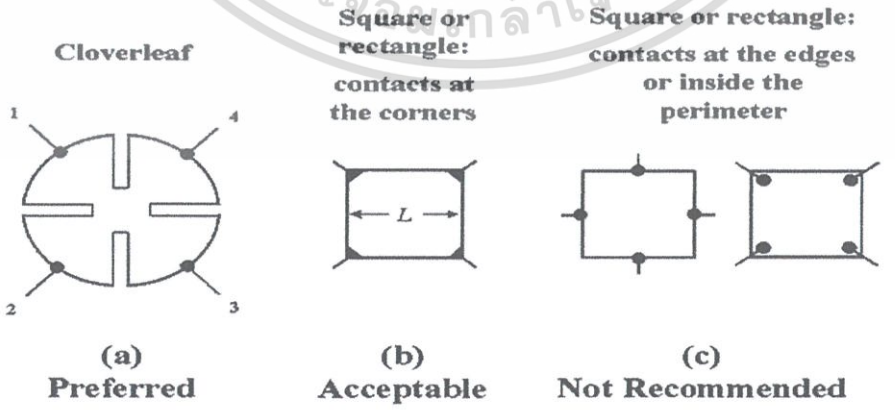
- ความต้านทานของฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วจากสายไฟจะใช้ไวนิลหรือยางซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าความ ต้านทานจำเพาะ สูงหุ้มสายไฟนั้นไว้ เราเรียกการป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วนี้ว่า การฉนวน และวัสดุที่ใช้ในการฉนวนนี้ว่า ฉนวน แต่การฉนวนนั้นมิได้หมายความว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไม่ได้เลย



รูปที่ 2.9 ความต้านฉนวน

2.3 Van der Pauw Method

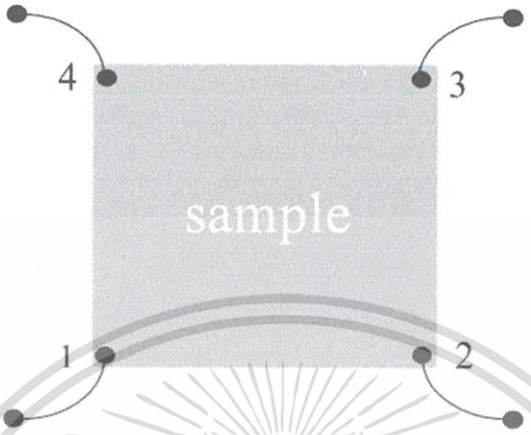
Van der Pauw Method วิธีนี้ได้พัฒนาโดย Van der Pauw มีหลักการคิดดังนี้เมื่อพิจารณาสารตัวอย่างที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการติดคอนแทคส์ของสารตัวอย่างแบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.11 แสดงการติดคอนแทคส์เพื่อวัดความต้านทาน

$$R_a = \frac{1}{4}\left(\frac{V_{43}}{I_{12}} + \frac{V_{12}}{I_{43}} + \frac{V_{34}}{I_{21}} + \frac{V_{21}}{I_{34}}\right) \qquad (2.1)$$

และ

$$R_b = \frac{1}{4}\left(\frac{V_{23}}{I_{14}} + \frac{V_{32}}{I_{41}} + \frac{V_{14}}{I_{23}} + \frac{V_{23}}{I_{14}}\right)$$

จากสมการที่ (2.1) จะได้ค่าสภาพต้านทานตามแบบของ Van der Pauw เป็น

$$\rho = \frac{\pi t}{\ell n(2)}\left(\frac{R_a + R_b}{2}\right)F \qquad (2.2)$$

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

$$\frac{R_r - 1}{R_r + 1} = \frac{F}{\ell n(2)}\cosh^{-1}\left(\frac{e^{\frac{\ell n(2)}{F}}}{2}\right) \qquad (2.3)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{\pi t}{\ell n(2)} R = 4.532tR \qquad (2.4)$$

และ Sheet resistance (ρ_s) มีค่าเป็น

$$R_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ell n(2)} R = 4.532R \qquad (2.5)$$

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดจากการจ่ายกระแสเข้าไปในสารตัวอย่างที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดแรงโลเรนซ์ (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 ตามสมการโลเรนซ์ คือ

$$\overline{F}_E = -e\overline{v} \times \overline{B} \qquad (2.6)$$

ทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปอยู่ด้าน +Z เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ (E_H) ในทิศทาง +Z ทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็น

$$\overline{F}_E = -e\overline{E}_H \qquad (2.7)$$

และเมื่ออยู่ในสภาพสมดุลขนาดของแรงทางแม่เหล็กจะเท่ากับขนาดของแรงทางไฟฟ้า ดังนั้นสมการ (2.6) = (2.7) จะได้

$$eE_H = evB$$

$$E_H = vB \qquad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากความหนาแน่นของกระแส

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

ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{j}{ne} \tag{2.9}$$

แทนสมการ 2.8 ในสมการ 2.9 จะได้

$$E_H = \frac{jB}{ne} = R_H jB \tag{2.10}$$

เมื่อ R_H คือสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall corfficient) 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

$$F_B = e\bar{v} \times \bar{B} \tag{2.11}$$

เมื่อประจุของโฮลเท่ากับประจุของอิเล็กตรอนแต่มีค่าบวก ทำให้โฮลถูกผลักไปอยู่ด้าน +Z เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ E_H ในทิศทาง –Z ทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเป็น

$$F_E = eE_H \tag{2.12}$$

และจากสมการ 2.10 สามารถเขียน R_H ใหม่ได้เป็น

$$R_H = \frac{E_H}{jB} \tag{2.13}$$

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

$$E_H = \frac{V_H}{w} \tag{2.14}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$j = \frac{i}{wt} \tag{2.15}$$

แทนค่าจากสมการ (2.14) และ (2.15) ลงในสมการ 2.13 จะได้

$$R_H = \frac{V_H t}{iB} \tag{2.16}$$

เมื่อเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วย ของ cm^3 / C จะได้

$$R_H(cm^3/C) = \frac{V_H(mV)t(\dot{A})}{i(mA)B(G)} \tag{2.17}$$

เมื่อ R_H คือ สัมประสิทธิ์ฮอลล์ในหน่วย cm^3 / C

V_H คือ ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall voltage) ในหน่วย mV

t คือ ความหนาแน่นของสารในหน่วย $\dot{A}$

B คือ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กในหน่อย Gauss

i คือ กระแสในหน่วย mA

และนอกจากนี้ยังสามารถหาค่าอื่นๆ ได้อีกคือ

$$n = \frac{6.25 \times 10^{18}}{R_H(cm^3/C)} \tag{2.18}$$

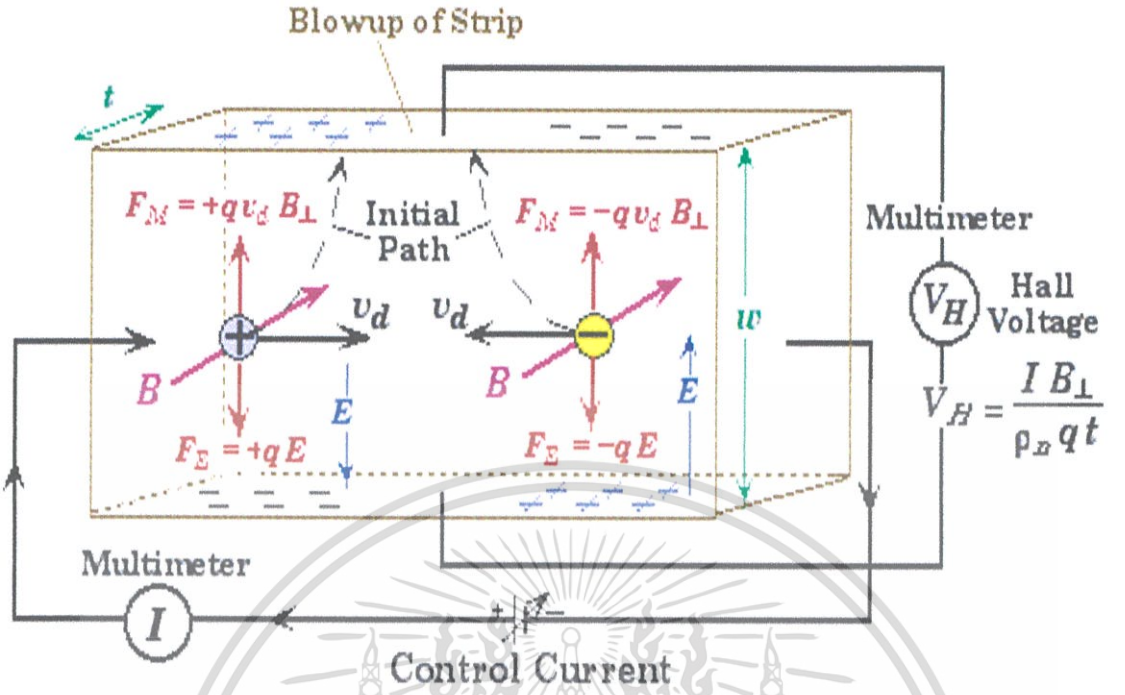
$$\mu_H = \frac{R_H(cm^3/C)}{\rho(\Omega \bullet cm)} \tag{2.19}$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของพาหะ

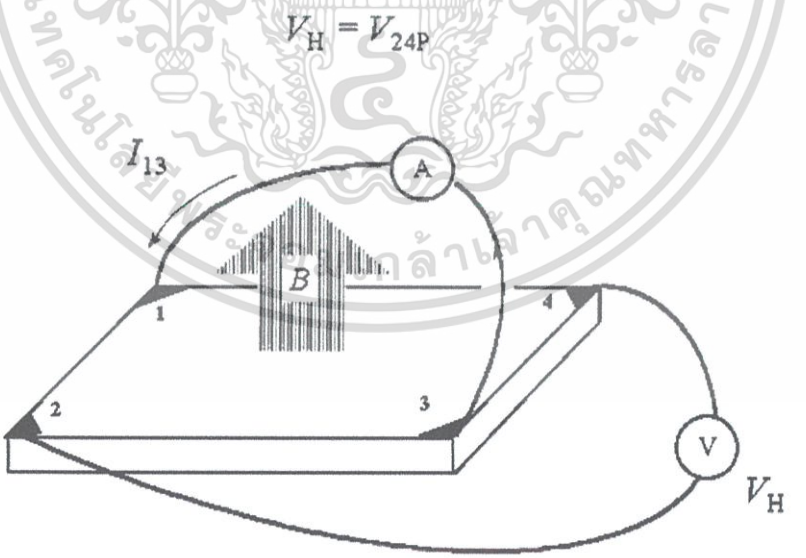
ρ คือ ค่าสภาพต้านทานในหน่วย $\Omega \bullet cm$

μ_H คือ ค่าโมบิลิตี้ในหน่วย $cm^2 / V \bullet s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนพาหะ ที่เป็นอิเล็กตรอนและโฮลล์



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดฮอลล์แบบ van der Pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยวิธีการวัดฮอลล์แบบ van der Pauw ดังรูปที่ 2.13 แสดงสมการดังนี้

$$\bar{E} = \rho\bar{j} + \rho\mu_H\left(\bar{j}\times\bar{B}\right) \tag{2.20}$$

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

$$\left(V_4 - V_2\right)_{B-0} = \int_{r_2}^{r_4}\bar{E}\cdot d\bar{r} = \rho\int_{r_2}^{r_4}\bar{j}\cdot d\bar{r} \tag{2.21}$$

และถ้าใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปจะได้

$$\left(V_4 - V_2\right)_B = \rho\int_{r_2}^{r_4}\bar{j'}\cdot d\bar{r} + \rho\mu_H\int_{r_2}^{r_4}\left(\bar{j'}\times\bar{B}\right)\cdot d\bar{r} \tag{2.22}$$

ถ้าถือว่าความหนาแน่นกระแส (Current density) ไม่เปลี่ยนแปลงในสนมแม่เหล็กดังนั้น $\bar{j'} = j$ สมการ (2.) เขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{H42=}\left(V_4 - V_2\right)_B - \left(V_4 - V_2\right)_{B-0} = \rho\mu_H\int_{r_2}^{r_4}\left(\bar{j'}\times\bar{B}\right)\cdot d\bar{r} \tag{2.23}$$

เนื่องจากสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสารตัวอย่าง ดังนั้นสมการ (2.) เขียนใหม่ได้เป็น

$$V_{H42} = \frac{\rho\mu_H BI}{t} \tag{2.24}$$

และจากสมการ (2.) นำไปหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ได้ดังนี้

$$R_H = \frac{V_{H42}t}{IB} \tag{2.25}$$

จากนั้นหาความหนาแน่นพาหะ และค่าโมบิลิตี้ ตามสมการ (2.18) และ (2.19)

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

$$V_H = \frac{V_1 - V_2 - V_3 - V_4}{4} \tag{2.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการสร้างเครื่องมือวัดแวนเดอร์เพาวร์และวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ จะต้องมีการสร้างส่วนประกอบใหม่ขึ้นมาอีกสองส่วนหลักๆคือ ส่วนของระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก และระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นนำส่วนประกอบเหล่านี้นำมาใช้งานควบคู่กับเครื่องมือวัดสำเร็จรูปอื่นๆ ที่เรามีอยู่โดยรายละเอียดในการสร้างส่วนประกอบต่างๆมีดังนี้

3.1 ระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก

3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

ชุดสนามแม่เหล็กถาวรเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ดังนั้นชุดแม่เหล็กถาวรจะต้องมีความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็กอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ และต้องทราบค่าสนามแม่เหล็กที่แท้จริงที่เราใช้ เราจะต้องทำการสร้างและวัดสนามแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กถาวรนี้ โดยเริ่มต้นต้องออกแบบชุดในการยึดและวางของแผ่นแม่เหล็กโดยใช้โปรแกรม Solid Work จากนั้นทำการสร้างตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

รูปที่ 3.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสร้างชุดแม่เหล็กถาวรเรียบร้อยแล้วสิ่งหนึ่งที่สำคัญเราจะทราบค่าของสนามแม่เหล็ก โดยเครื่องมือที่ใช้วัดคือ Gauss meter ยี่ห้อ F.W. Bell รุ่น 5180 เนื่องจากมีหัววัดขนาดเล็กและสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB ได้ จากนั้นเราจะทำการวัดจุดต่างๆ โดยการใช้มอเตอร์สองแกน “ในระนาบ X, Y” ควบคุมการเคลื่อนที่

3.1.2 ระบบขับเคลื่อน

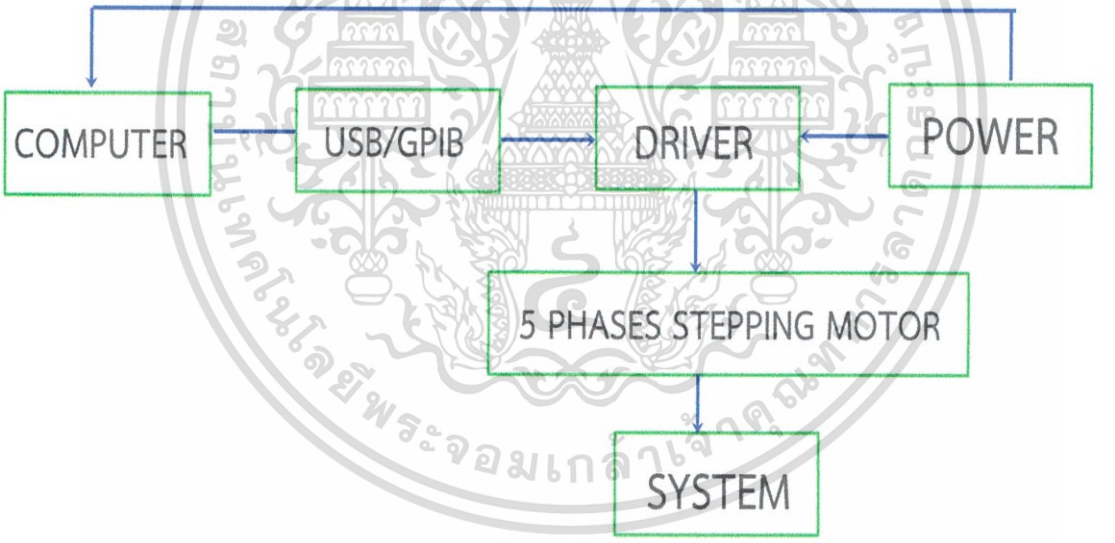
3.1.2.1 ชุดขับสเต็ปปิงมอเตอร์ MMC-2 5 Phase stepping motor driver และ USB/GPIB

MMC-2 5 Phase stepping motor driver ดังรูป 3.2 เป็นชุดขับเสต็ปปิงมอเตอร์ที่สามารถโปรแกรมเพื่อควบคุมการหมุนของเสต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่าน USB/GPIB ดังรูป 3.3

รูปที่ 3.2 MMC-2 5 Phase stepping motor driver

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 USB/GPIB Agilent Technology



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมควมคุมระบบขับเคลื่อนของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 เสต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส

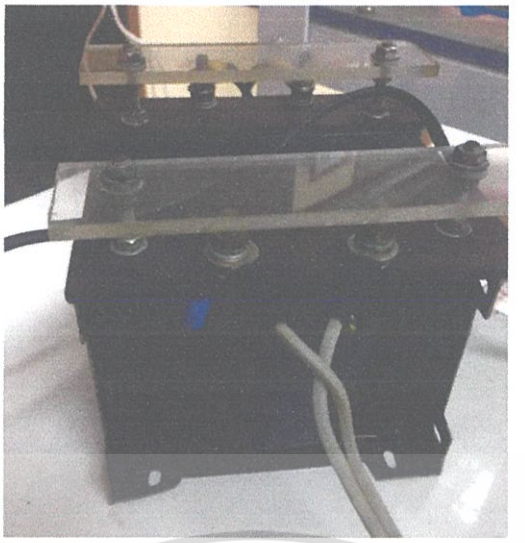
เนื่องจากเราต้องการความแม่นยำในตำแหน่งการวัด ความสะดวก และความรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องใช้สเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส เนื่องจากสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส สามารถหมุนได้ตำแหน่งที่แม่นยำ และละเอียดกว่ามอเตอร์ทั่วไป โดยความละเอียดสูงสุดของสเต็ปปิงมอเตอร์ที่ใช้คือ 0.72 องศาต่อสเต็ป

รูปที่ 3.5 เสต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส

3.1.2.3 ภาคจ่ายไฟ

เนื่องจาก MMC-2 5 Phase stepping motor driver จะต้องใช้ไฟกระแสสลับ 110 V ความถี่ 50 Hz จึงต้องมีหม้อแปลงเพื่อแปลงไฟกระแสสลับจาก 220 V ความถี่ 50 Hz เป็นไฟกระแสสลับ 110 V ความถี่ 50 Hz ดังรูป 3.6 เพื่อนำไปใช้กับ MMC-2 5 Phase stepping motor driver

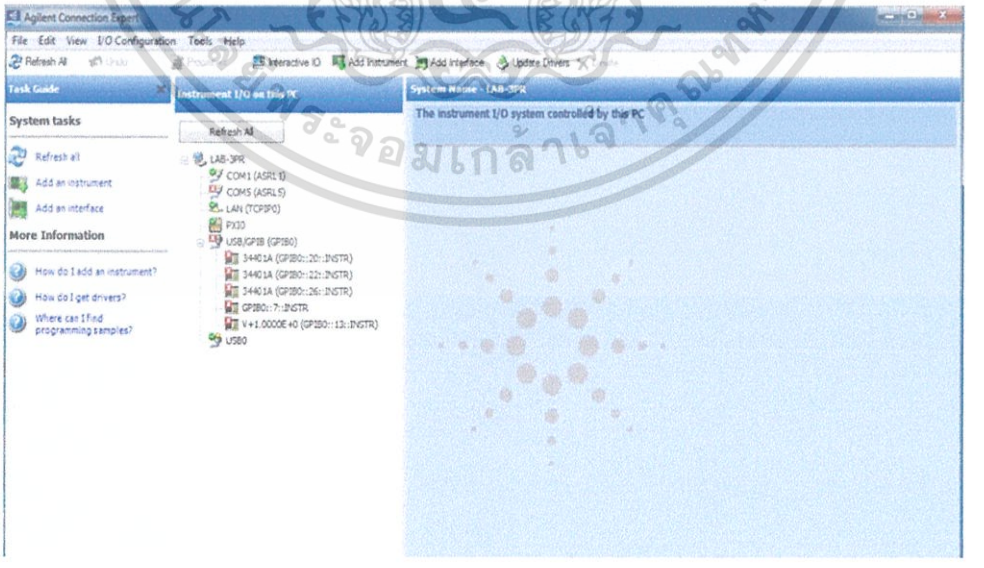
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็น 110 V

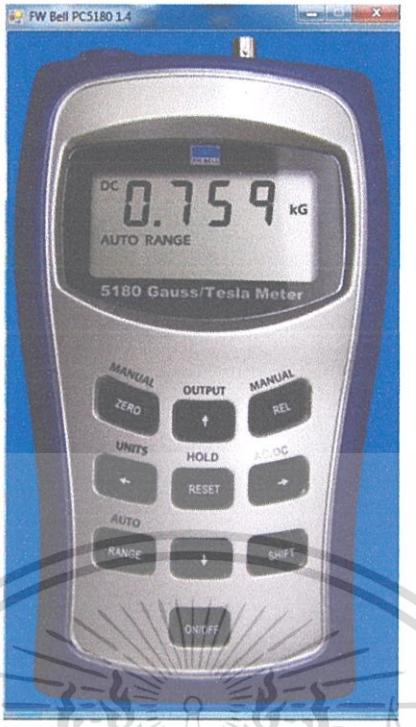
3.1.3 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

เนื่องจากต้องการให้เป็นระบบวัดอัตโนมัติ ดังนั้นจำเป็นต้องมีโปรแกรมมาควบคุม และบันทึกผล คอมพิวเตอร์ปกติถ้าต้องการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกจะต้องติดตั้งโปรแกรมหรือ Driver เพื่อให้คอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ คือโปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 ดังรูป 3.7 เพื่อ USB/GPIB และโปรแกรม PC5180 1.4 เพื่อ FW BELL5180 Gauss meterดังรูป 3.8



รูปที่ 3.7 โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 โปรแกรม PC5180 1.4

จากนั้นลองเสียบสาย USB/GPIB รอประมาณหนึ่งนาทีสังเกต LED ที่สาย USB/GPIB จะติดเป็นสีเขียวอ่อนที่คำว่า “READY” แสดงว่า USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว ดังรูป 3.9 ต่อไปให้เปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ถ้าสามารถเปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ได้ ดังรูป 3.8 แสดงว่าคอมพิวเตอร์เชื่อมกับ Gauss meterได้แล้ว

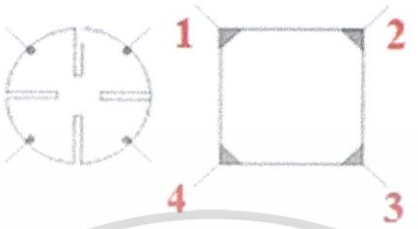
รูปที่ 3.9 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว

ต่อไปต้องเขียน User ให้ผู้ใช้งานด้วย Visual basic โดยที่ User นี้ต้องสามารถควบคุมการทำงานของเสต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสกับ FW BELL5180 Gauss meter ให้ทำงานสัมพันธ์กันและต้องสามารถเก็บข้อมูลไว้ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อสร้างกราฟให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

การวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในที่นี้จะใช้เทคนิคแวนเดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์วิธีวัดก็คือต้องใช้เทคนิคแวนเดอร์พาวเพื่อหาค่า Sheet resistance ก่อน เนื่องจากต้องใช้ในการคำนวณหาค่าอื่นๆการวัดแบบแวนเดอร์พาวจะต้องต่อขั้วแบบแวนเดอร์พาวให้ถูกต้องดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การต่อขั้วแบบแวนเดอร์พาว

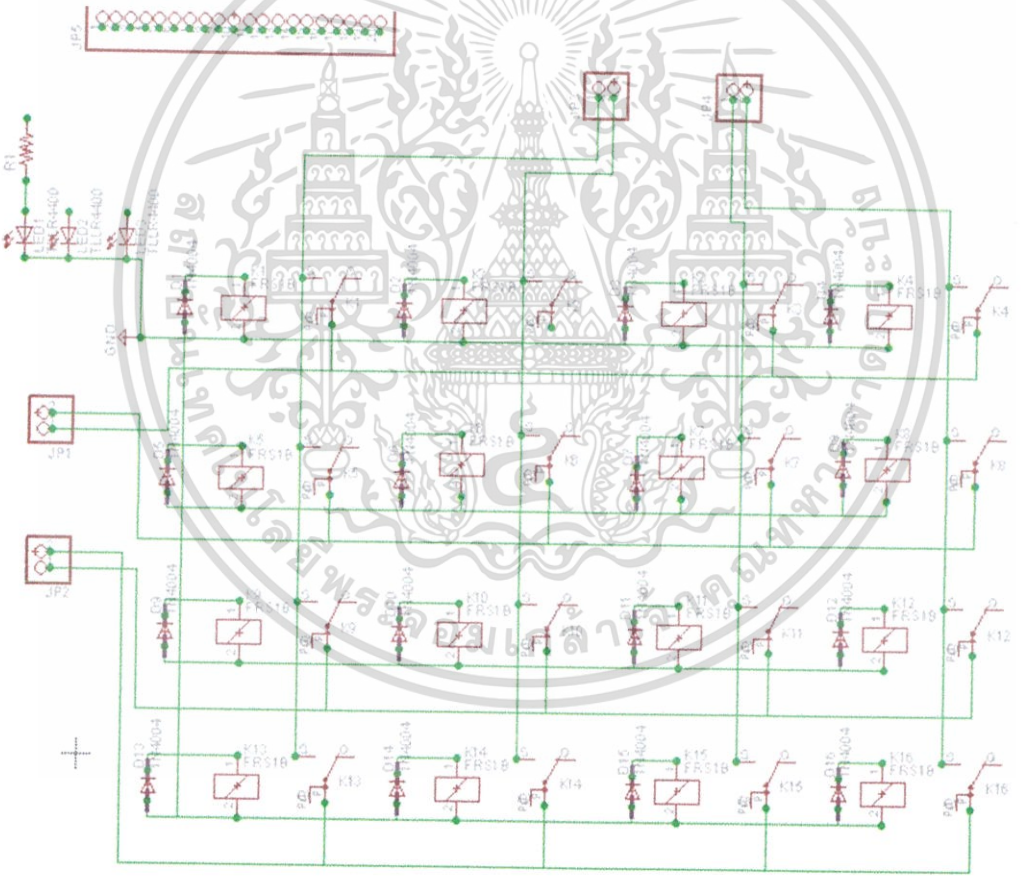
จากนั้นต้องจ่ายกระแสให้ไหลจากขั้วหนึ่งไปยังขั้วหนึ่ง (ตัวอย่างเช่นจ่ายกระแสจากขั้วที่หนึ่งไปยังขั้วที่สอง ; I_{12}) และวัดแรงดันเทียบกันที่ขอบตรงกันข้าม จากตัวอย่างขอบตรงข้ามของขั้วที่หนึ่งและขั้วที่สองก็คือขั้วที่สี่เทียบกับขั้วที่สามจะได้ V_{43} ต่อไปให้นำค่ากระแสและแรงดันไปคำนวณหาค่าความต้านทานจากสมการ $R_{12,43} = V_{43}/I_{12}$ และใช้วิธีเดิมนี้หา $R_{23,14}$, $R_{34,21}$, $R_{41,32}$, $R_{14,23}$, $R_{43,12}$, $R_{32,41}$ และ $R_{21,34}$ จากนั้นนำความต้านทานทั้งแปดค่ามาเฉลี่ย $R_{ave} = [(R_{12,43} + R_{23,14} + R_{34,21} + R_{41,32} + R_{14,23} + R_{43,12} + R_{32,41} + R_{21,34})/8]$ และใช้สมการแวนเดอร์พาวคำนวณหาค่า Sheet resistance ; Rs สมการแวนเดอร์พาว คือ $R_s = \frac{\pi R_{ave}}{\ln 2} f$ จะได้ค่าต่อไปคือค่า Resistivity ; ρ จาก $\rho = R_s(Thickness)$ เสร็จการวัดแบบแวนเดอร์พาวแล้วต่อไปจะวัดแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยต้องนำ Sample ใส่ไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น จ่ายกระแสค่าคงที่ให้จากขั้วที่หนึ่งไปยังขั้วที่สามและวัดแรงดันขั้วที่สองเทียบกับขั้วที่สี่ ; $V_H 1$ และจ่ายกระแสค่าคงที่ให้จากขั้วที่สามไปยังขั้วที่หนึ่งและวัดแรงดันขั้วที่สองเทียบกับขั้วที่สี่; $V_H 2$ จ่ายกระแสค่าคงที่ให้จากขั้วที่สองไปยังขั้วที่สี่และวัดแรงดันขั้วที่หนึ่งเทียบกับขั้วที่สาม ; $V_H 3$ และจ่ายกระแสค่าคงที่ให้จากขั้วที่สี่ไปยังขั้วที่สองและวัดแรงดันขั้วที่หนึ่งเทียบกับขั้วที่สาม ; $V_H 4$ จากนั้นทำการกลับทิศสนามแม่เหล็กเป็นทิศพุ่งลงและทำการวัดเช่นเดิม จะได้ค่า $V_H 5$, $V_H 6$, $V_H 7$ และ $V_H 8$ ตามลำดับ ซึ่งตามทฤษฎี V_{24} ต้องเท่ากับ ($V_H 1 + V_H 2 - V_H 5 - V_H 6)/4$ และ V_{13} ต้องเท่ากับ ($V_H 3 + V_H 4 - V_H 7 - V_H 8)/4$ จะได้ Vhall เท่ากับ $(V_{24} + V_{13})/2$ ต่อไปก็จะได้ค่า Sheet carrier concentration ; ns จาก $ns = \left|4\times10^{-8}(IB)/q(V_{hall})\right|$ Bulk carrier concentration ; Nb จาก $Nb = ns/Thickness$ ค่า Mobility ; μ จาก $\mu = 1/\left[q(ns)(Rs)\right]$ ค่า Conductivity ; σ จาก $\sigma = 1/q$ และชนิดของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งตัวนำดูจากเครื่องหมายของแรงดันฮอลล์ถ้าตรงข้ามกับเครื่องหมายของกระแสแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแต่ถ้าเครื่องหมายเหมือนกับเครื่องหมายของกระแสแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

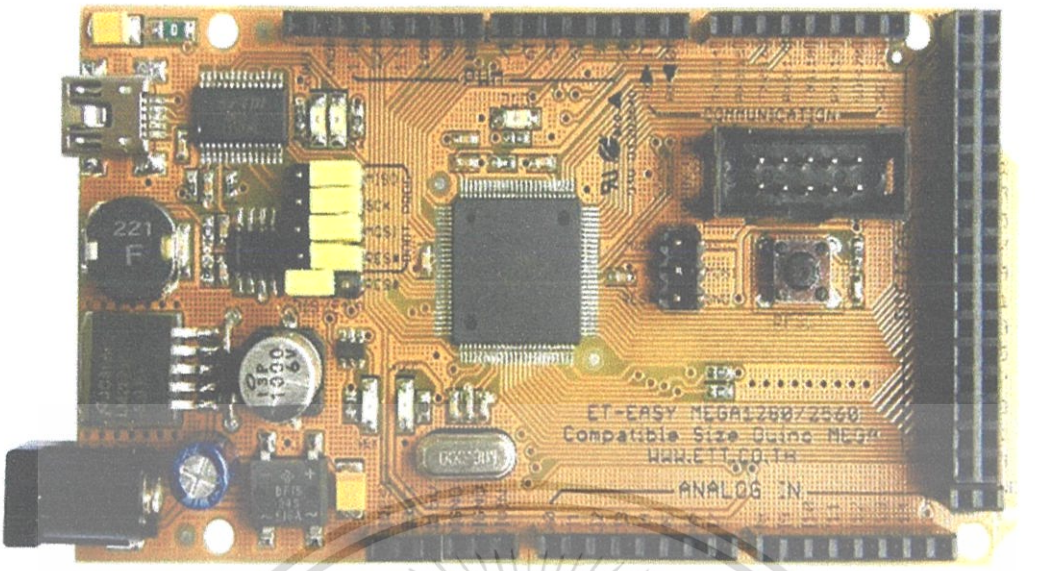
3.2.1 วงจรสวิตช์รีเลย์และตัวควบคุม

การวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในที่นี้จะใช้เทคนิคแวนเดอร์พาว และเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสองวิธีนี้จะต้องมีการสลับขั้วไฟฟ้าในการจ่ายกระแสฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นวงจรสวิตช์รีเลย์ ดังรูป 3.11 และตัวควบคุมจึงสำคัญมากสำหรับการวัดเพราะสามารถควบคุมการสับสวิตช์ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านตัวควบคุมได้ ตัวควบคุมที่ใช้ในโครงงานนี้คือ ET-EASY MEGA1280 ดังรูป 3.12 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ขนาดเล็กที่มีพอร์ตเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และสามารถใช้โปรแกรม Arduino23 สั่งการโดยใช้ภาษาซีแล้วอัพโหลดลงบอร์ด



รูปที่ 3.11 วงจรสวิตช์รีเลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

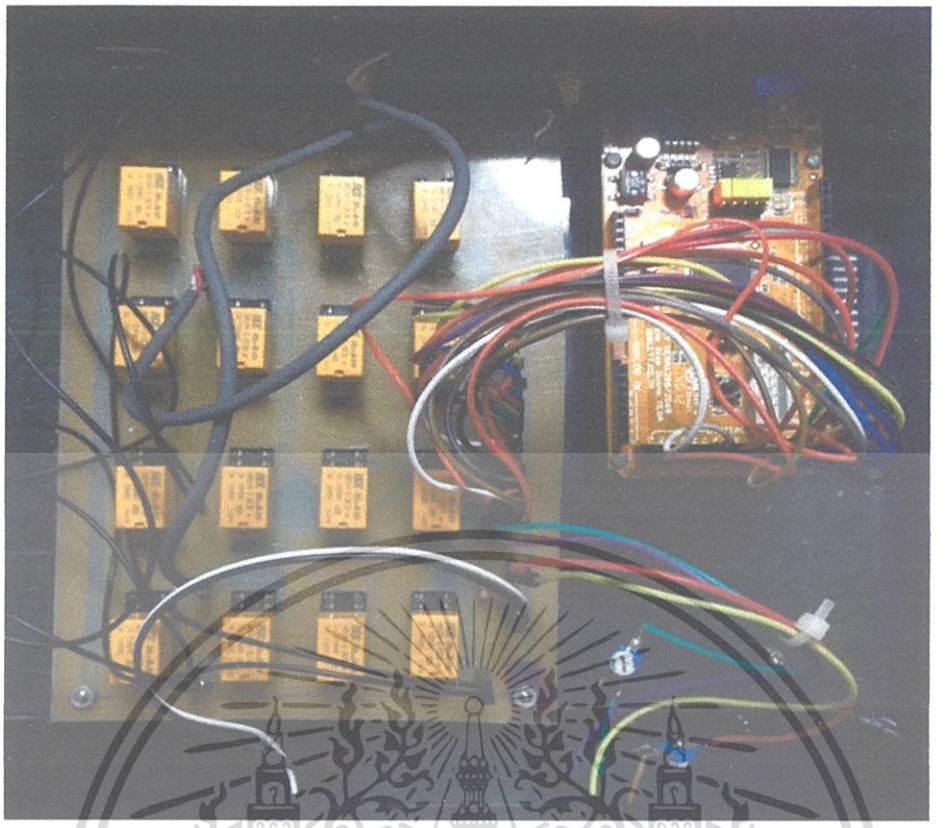


รูปที่ 3.12 ET-EASY MEGA1280

รูปที่ 3.13 โปรแกรม Arduino 23

ตัวควบคุม ET-EASY MEGA1280 นอกจากจะควบคุมวงจรสวิตช์รีเลย์แล้ว ยังควบคุมไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่องอีกด้วย ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานจะติดอยู่ที่หน้าของเครื่องทั้งหมดสี่ดวงดังรูป 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 วงจรสวิตซ์รีเลย์ และ ET-EASY MEGA1280

รูป 3.15 ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 Digital multimeter และ Current source

เนื่องจากการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมี Digital multimeterและ Current source เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้าดังรูป 3.16

รูปที่ 3.16 Digital multimeter(ซ้าย)และ Current source (ขวา)

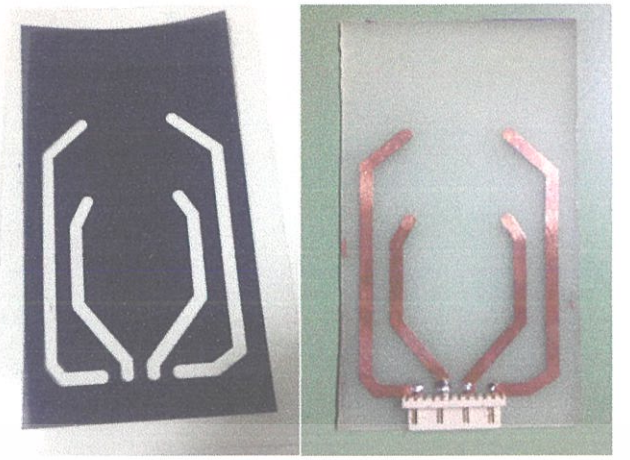
Digital multimeter และ Current source สามารถควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่าน GPIB/USB โดยการ Interface และเราจะใช้สาย 408JE ดังรูป 3.17 เพื่อควบคุมทั้งสองเครื่องพร้อมกัน โดยต่อแบบขนานระหว่างเครื่องทั้งสองเครื่อง

รูปที่ 3.17 สาย 408JE ใช้ต่อขนานระหว่าง Digital multimeterและ Current source

3.2.3 แผ่นวาง Sample

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แผ่นพีซีบีที่นำมากัดเป็นแผ่นสำหรับวาง Sample เสร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 3.19 ลักษณะการต่อขั้วของ Sample เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์

3.2.4 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

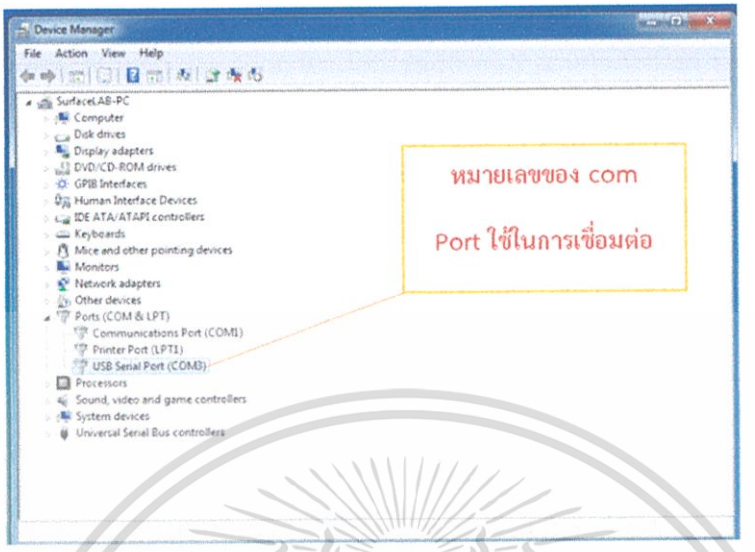
จะต้องมีการติดตั้งโปรแกรม Arduino0023 โดยโปรแกรม Arduino0023 จะรวม Driver ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY MEGA1280 ไว้ในโปรแกรมแล้ว Driver ตัวนี้ชื่อ FTDI USB

จากนั้นต้องเขียน User ให้ผู้ใช้งานด้วยโปรแกรม Visual basic โดยที่ User ต้องสามารถควบคุมการทำงานของ ET-EASY MEGA1280,Digital multimeter และ Current source ให้ทำงานสัมพันธ์กัน โดยเริ่มจากการเขียนโปรแกรม Arduino23 อัพโหลดให้กับ ET-EASY MEGA1280 เพื่อควบคุมวงจรสวิตช์รีเลย์ และพร้อมรับคำสั่งจากโปรแกรม Visual basic เพื่อสั่งงาน ET-EASY MEGA1280,Digital multimeter และ Current source เพื่อที่จะวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ผลจากการวัดนั้นจะต้องเขียนให้ Save ได้ทุกค่าที่วัดได้สำหรับค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ Save เป็นไฟล์ CVS ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เปิดได้หลายโปรแกรม ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า Save เป็นไฟล์ XLS ไว้ไดร์ฟใดไดร์ฟหนึ่งของคอมพิวเตอร์ จะต้องใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

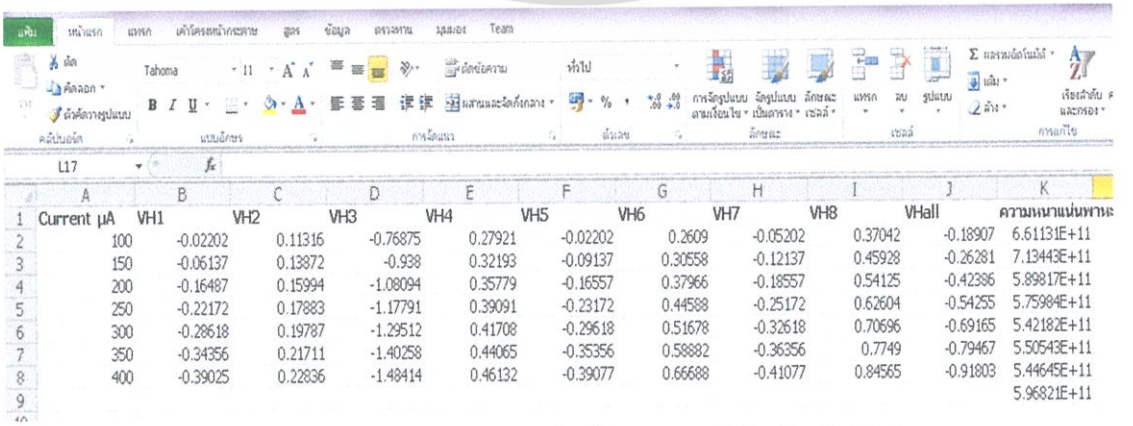
Microsoft Excel เปิดโปรแกรมเท่านั้น ส่วนกราฟ Save เป็นไฟล์ภาพ PNG ไว้ไดร์ฟใดไดร์ฟหนึ่งของคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.20 ET-EASY MEGA1280 สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว

ต่อไปต้องเขียน User ให้ผู้ใช้งานด้วยโปรแกรม Visual basic โดยที่ User นี้ต้องสามารถควบคุมการการทำงานของ ET-EASY168STAMP, Digital multimeter และ Current source ให้ทำงานสัมพันธ์กัน โดยเริ่มจากเขียนโค้ดโปรแกรมจากโปรแกรม Arduino23 อัพโหลดให้กับ ET-EASY168STAMP เพื่อที่จะควบคุมวงจรสวิตช์รีเลย์ และพร้อมรับคำสั่งจากโปรแกรม Visual basic ในคอมพิวเตอร์ จากนั้นเขียนโค๊ดในโปรแกรม Visual basic เพื่อสั่งงาน ET-EASY168STAMP, Digital multimeter และ Current source เพื่อที่จะวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ผลจากการวัดนั้นจะต้องเขียนให้ Save ได้ทุกค่าที่วัดได้สำหรับค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ Save เป็นไฟล์ Excel ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์เปิดได้หลายโปรแกรม ดังรูป



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Current µA	VH1	VH2	VH3	VH4	VH5	VH6	VH7	VH8	VHall	ความหนาแน่นพาหะ
2	100	-0.02202	0.11316	-0.76875	0.27921	-0.02202	0.2609	-0.05202	0.37042	-0.18907	6.61131E+11
3	150	-0.06137	0.13872	-0.938	0.32193	-0.09137	0.30558	-0.12137	0.45928	-0.26281	7.13443E+11
4	200	-0.16487	0.15994	-1.08094	0.35779	-0.16557	0.37966	-0.18557	0.54125	-0.42386	5.89817E+11
5	250	-0.22172	0.17883	-1.17791	0.39091	-0.23172	0.44588	-0.25172	0.62604	-0.54255	5.75984E+11
6	300	-0.28618	0.19787	-1.29512	0.41708	-0.29618	0.51678	-0.32618	0.70696	-0.69165	5.42182E+11
7	350	-0.34356	0.21711	-1.40258	0.44065	-0.35356	0.58882	-0.36356	0.7749	-0.79467	5.50543E+11
8	400	-0.39025	0.22836	-1.48414	0.46132	-0.39077	0.66688	-0.41077	0.84565	-0.91803	5.44645E+11
9											5.96821E+11

รูป 3.21 SAVE ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเป็นไฟล์ XLS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

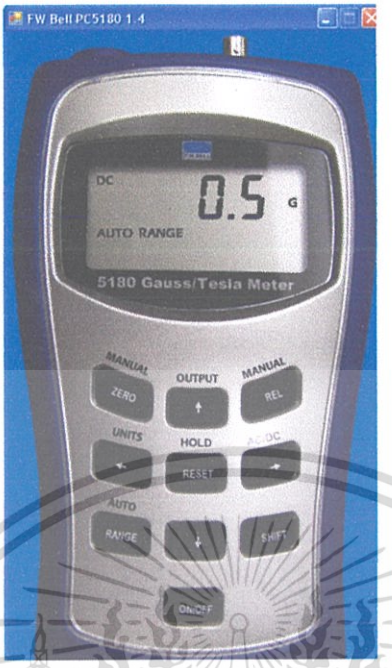
4.1 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก

สำหรับจุดมุ่งหมายในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก เพื่อสนองความต้องการที่อยากทราบว่าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กนั้นมีค่าคงที่หรือไม่ ถ้าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กคงที่ จึงจะนำค่าสนามแม่เหล็กไปใช้ในการคำนวณในระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำต่อไปได้ แต่ถ้าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กมีค่าไม่คงที่จะนำค่าสนามแม่เหล็กไปคำนวณในระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ได้ ดังนั้นต้องทำการจัดยึดแม่เหล็กใหม่หรือเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่เหล็กเพื่อให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กที่คงที่ให้ได้

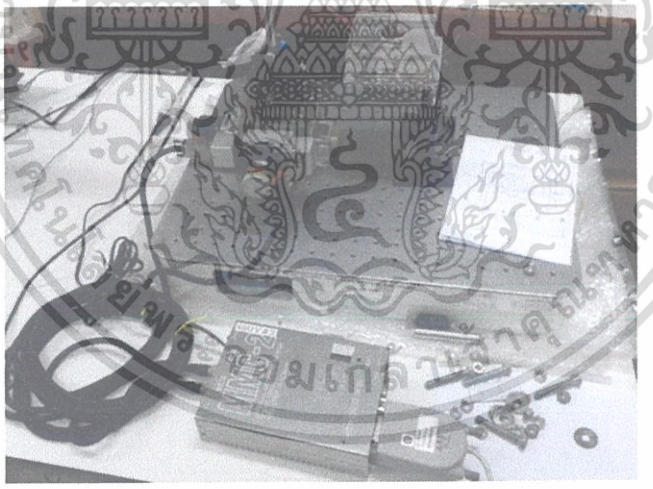
เริ่มจากการติดตั้งโปรแกรม InterfaceGaussmeterandMMC-2 For scan Full V.1, โปรแกรมAgilent connection expert IO Library suite 16 และ โปรแกรม PC5180 1.4 ให้เรียบร้อย จากนั้นจัดวางอุปกรณ์และเชื่อมต่ออุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 4.3 รอประมาณหนึ่งนาทีสังเกต LED ที่สาย USB/GPIB จะติดเป็นสีเขียวอ่อนที่คำว่า “READY” ดังรูปที่ 4.1 แสดงว่า USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้วต่อไปให้เปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ถ้าสามารถเปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ได้ดังรูปที่ 4.2 แสดงว่าคอมพิวเตอร์เชื่อมกับ Gauss meter ได้แล้ว และระบบพร้อมที่จะวัดแล้ว

รูปที่ 4.1 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2คอมพิวเตอร์สามารถเชื่อมกับGauss meterได้ จะสามารถเปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ได้

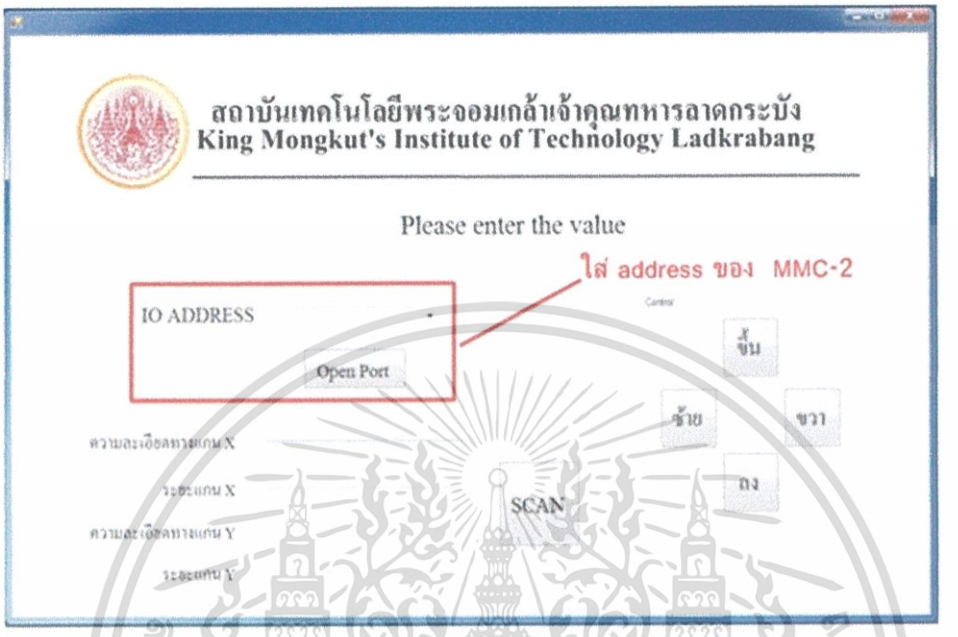


รูปที่ 4.3 การจัดวางอุปกรณ์กับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากนั้นเปิดโปรแกรม InterfaceGaussmeterandMMC-2 For scan Full V.1 และทำตามขั้นตอนดังนี้

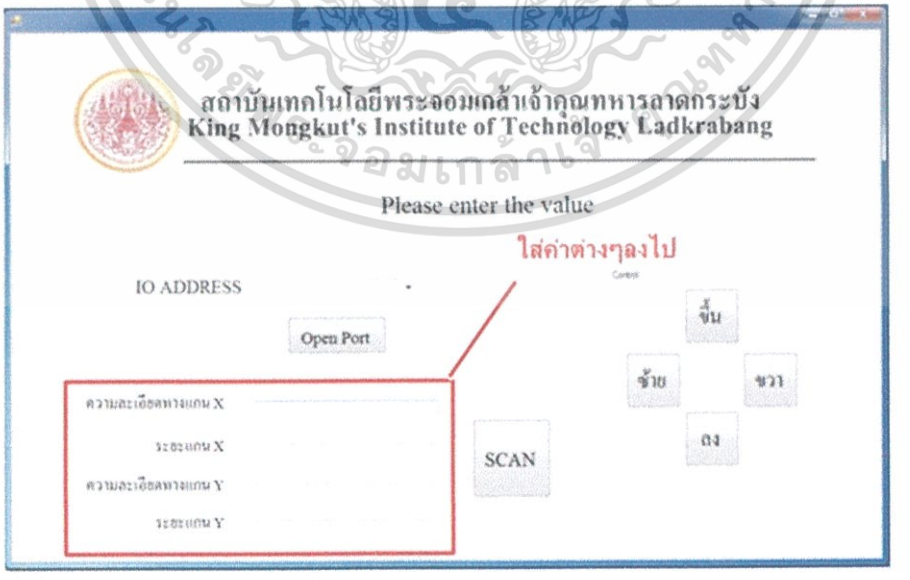
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ป้อนค่า Address ของ MMC-2 ปกติคือเลข 7 ถ้า Address ถูกต้องปุ่มกดจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว กรณีไม่ทราบ Address ให้ใช้โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 ซึ่งสามารถบอก Address ผู้ใช้งานได้



รูปที่ 4.4 ใส่ Address ของ MMC-2

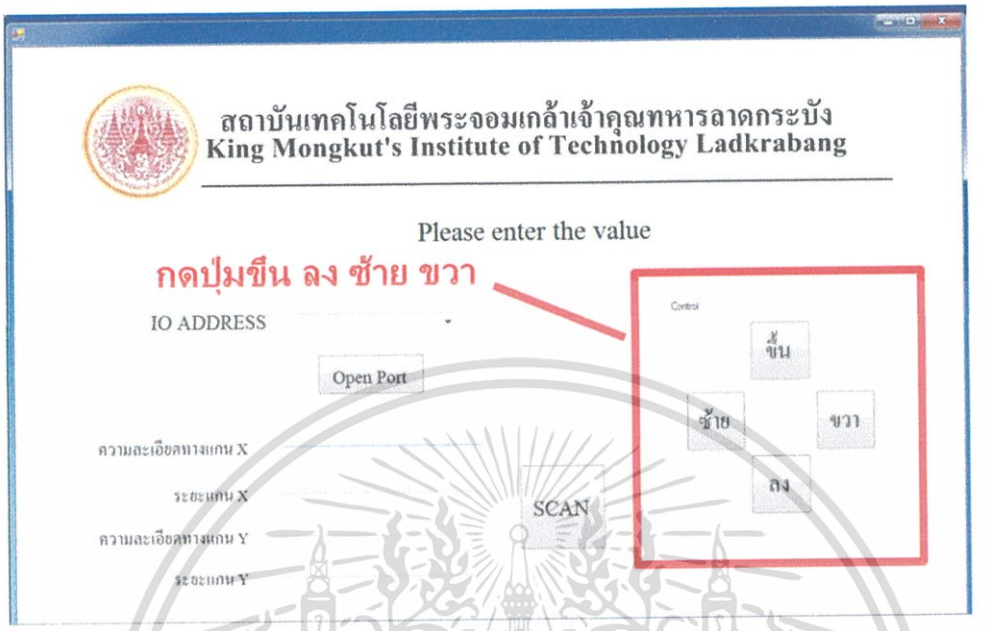
2. ใส่ค่าความละเอียดทางแกน X, ระยะแกน X, ความละเอียดทางแกน Y, ระยะแกน Y, ลงในหน้าต่างของโปรแกรม ตามแสดงดังรูป 4.5



รูปที่4.5 ใส่ค่าต่างๆลงไป

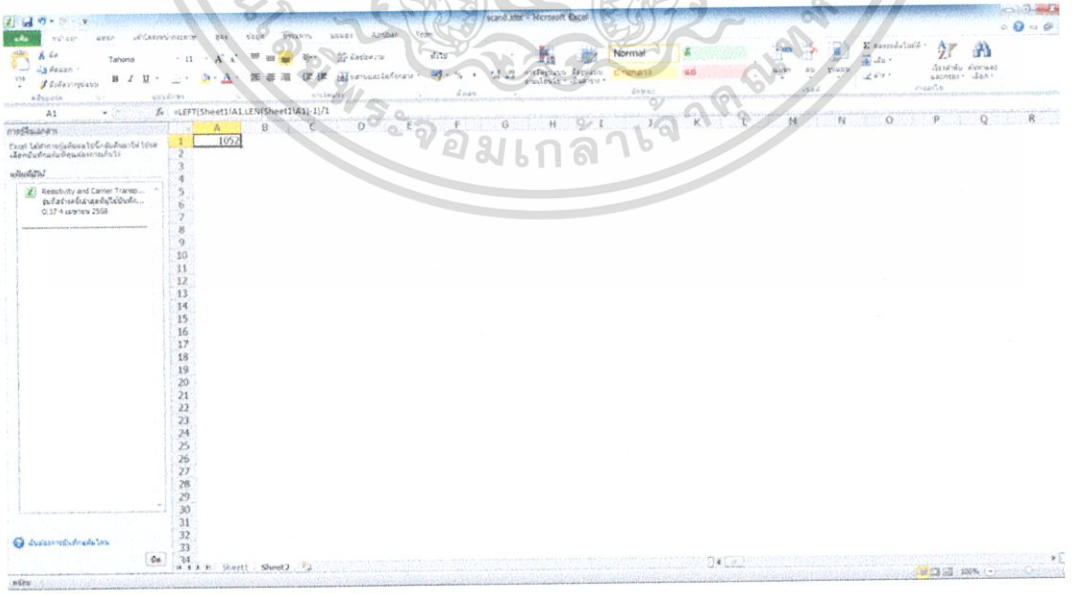
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กดปุ่มขึ้น, ลง, ซ้าย, ขวา จัดให้แกนมอเตอร์อยู่ที่จุด (0, 0) ตามผู้ใช้งาน จากนั้นกดปุ่ม SCAN ดังรูปที่ 4.6



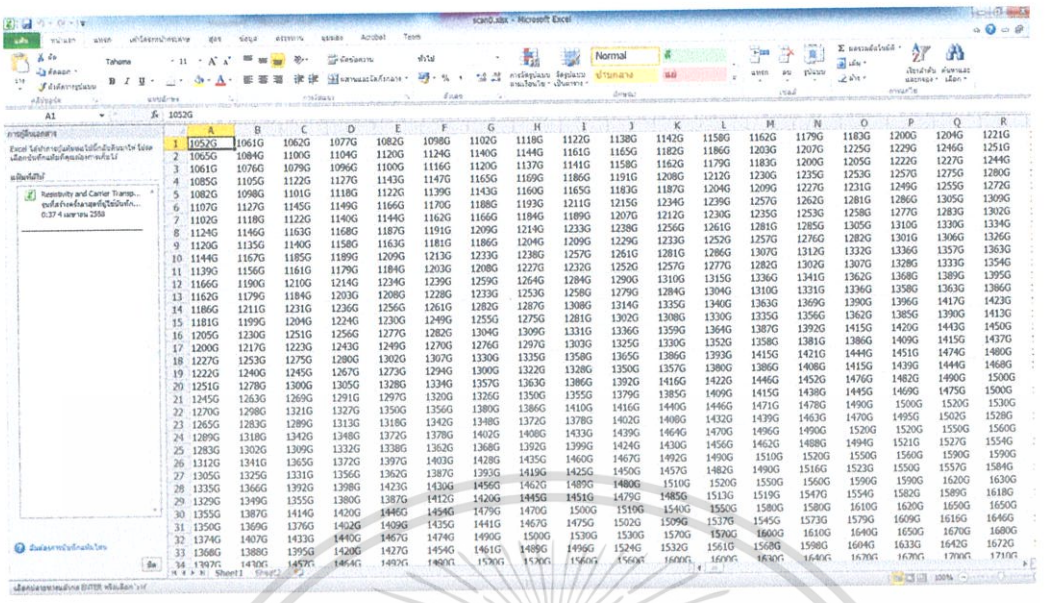
รูปที่ 4.6 กดปุ่ม ขึ้น, ลง, ซ้าย, ขวา

4. ทำการแปลงค่าข้อมูลจากตัวอักษรเป็นตัวเลข เพื่อนำไปสร้างกราฟดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ข้อมูลตัวอักษร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

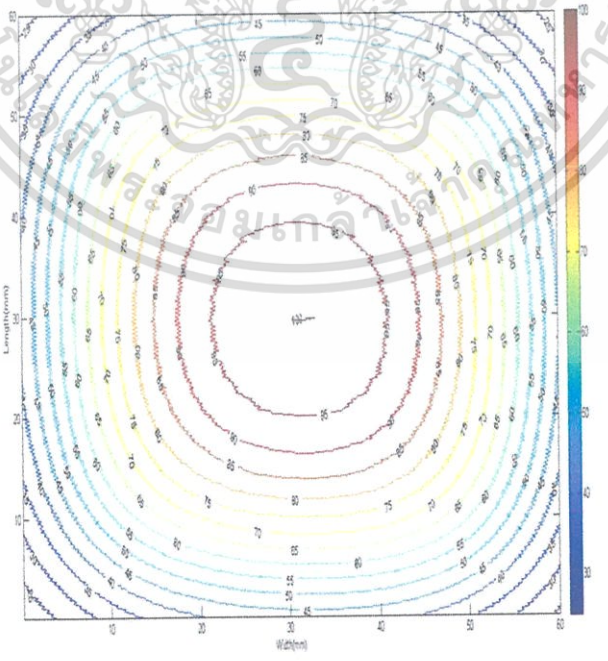


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	1052G	1061G	1062G	1077G	1082G	1098G	1102G	1118G	1122G	1138G	1142G	1158G	1162G	1179G	1183G	1200G	1204G	1221G
2	1065G	1084G	1100G	1104G	1120G	1124G	1140G	1144G	1161G	1165G	1182G	1186G	1203G	1207G	1225G	1229G	1246G	1251G
3	1061G	1076G	1079G	1096G	1100G	1116G	1120G	1137G	1141G	1158G	1162G	1179G	1183G	1200G	1205G	1222G	1227G	1244G
4	1085G	1105G	1122G	1127G	1143G	1147G	1165G	1169G	1186G	1191G	1208G	1212G	1230G	1235G	1253G	1257G	1275G	1280G
5	1082G	1098G	1101G	1118G	1122G	1139G	1143G	1160G	1165G	1183G	1187G	1204G	1209G	1227G	1231G	1249G	1255G	1272G
6	1107G	1127G	1145G	1149G	1166G	1170G	1188G	1193G	1211G	1215G	1234G	1239G	1257G	1262G	1281G	1286G	1305G	1309G
7	1102G	1118G	1122G	1140G	1144G	1162G	1166G	1184G	1189G	1207G	1212G	1230G	1235G	1253G	1258G	1277G	1283G	1302G
8	1124G	1146G	1163G	1168G	1187G	1191G	1209G	1214G	1223G	1228G	1256G	1261G	1281G	1285G	1305G	1310G	1330G	1334G
9	1120G	1135G	1140G	1158G	1163G	1181G	1186G	1204G	1209G	1229G	1233G	1252G	1257G	1276G	1282G	1301G	1306G	1326G
10	1144G	1167G	1185G	1189G	1209G	1213G	1233G	1238G	1257G	1261G	1281G	1286G	1307G	1312G	1332G	1336G	1357G	1363G
11	1139G	1156G	1161G	1179G	1184G	1203G	1208G	1227G	1232G	1252G	1257G	1277G	1282G	1302G	1307G	1328G	1333G	1354G
12	1166G	1190G	1210G	1214G	1234G	1239G	1259G	1264G	1284G	1290G	1310G	1315G	1336G	1341G	1362G	1368G	1389G	1395G
13	1162G	1179G	1184G	1203G	1208G	1228G	1233G	1253G	1258G	1279G	1284G	1304G	1310G	1331G	1336G	1358G	1363G	1386G
14	1186G	1211G	1231G	1236G	1256G	1261G	1282G	1287G	1308G	1314G	1335G	1340G	1363G	1369G	1390G	1396G	1417G	1423G
15	1181G	1199G	1204G	1224G	1230G	1249G	1255G	1275G	1281G	1302G	1308G	1330G	1335G	1356G	1362G	1385G	1390G	1413G
16	1205G	1230G	1251G	1256G	1277G	1282G	1304G	1309G	1331G	1336G	1359G	1364G	1387G	1392G	1415G	1420G	1443G	1450G
17	1200G	1217G	1223G	1243G	1249G	1270G	1276G	1297G	1303G	1325G	1330G	1352G	1358G	1381G	1386G	1409G	1415G	1437G
18	1227G	1253G	1275G	1280G	1302G	1307G	1330G	1335G	1358G	1365G	1386G	1393G	1415G	1421G	1444G	1451G	1474G	1480G
19	1222G	1240G	1245G	1267G	1273G	1294G	1300G	1322G	1328G	1350G	1357G	1380G	1386G	1408G	1415G	1439G	1444G	1468G
20	1251G	1278G	1300G	1305G	1328G	1334G	1357G	1363G	1386G	1392G	1416G	1422G	1446G	1452G	1476G	1482G	1490G	1500G
21	1245G	1263G	1269G	1291G	1297G	1320G	1326G	1350G	1355G	1379G	1385G	1409G	1415G	1438G	1445G	1469G	1475G	1500G
22	1270G	1298G	1321G	1327G	1350G	1356G	1380G	1386G	1410G	1416G	1440G	1446G	1471G	1478G	1490G	1500G	1520G	1530G
23	1265G	1283G	1289G	1313G	1318G	1342G	1348G	1372G	1378G	1402G	1408G	1432G	1439G	1463G	1470G	1495G	1502G	1528G
24	1289G	1318G	1342G	1348G	1372G	1378G	1402G	1408G	1433G	1439G	1464G	1470G	1496G	1490G	1520G	1520G	1550G	1560G
25	1283G	1302G	1309G	1332G	1338G	1362G	1368G	1392G	1399G	1424G	1430G	1456G	1462G	1488G	1494G	1521G	1527G	1554G
26	1312G	1341G	1365G	1372G	1397G	1403G	1428G	1435G	1460G	1467G	1492G	1490G	1510G	1520G	1550G	1560G	1590G	1590G
27	1305G	1325G	1331G	1356G	1362G	1387G	1393G	1419G	1425G	1450G	1457G	1482G	1490G	1516G	1523G	1550G	1557G	1584G
28	1335G	1366G	1392G	1398G	1423G	1430G	1456G	1462G	1489G	1480G	1510G	1520G	1550G	1560G	1590G	1590G	1620G	1630G
29	1329G	1349G	1355G	1380G	1387G	1412G	1420G	1445G	1451G	1479G	1485G	1513G	1519G	1547G	1554G	1582G	1589G	1618G
30	1355G	1387G	1414G	1420G	1446G	1454G	1479G	1470G	1500G	1519G	1540G	1550G	1580G	1580G	1610G	1620G	1650G	1650G
31	1350G	1369G	1376G	1402G	1409G	1435G	1441G	1467G	1475G	1502G	1509G	1537G	1545G	1573G	1579G	1609G	1616G	1646G
32	1374G	1407G	1433G	1440G	1467G	1474G	1490G	1500G	1530G	1530G	1570G	1570G	1600G	1610G	1640G	1650G	1670G	1680G
33	1368G	1388G	1395G	1420G	1427G	1454G	1461G	1489G	1496G	1524G	1532G	1561G	1568G	1598G	1604G	1633G	1642G	1672G
34	1397G	1430G	1457G	1464G	1492G	1490G	1520G	1530G	1560G	1560G	1600G	1600G	1630G	1640G	1670G	1670G	1700G	1710G

รูปที่ 4.8 ข้อมูลตัวเลข

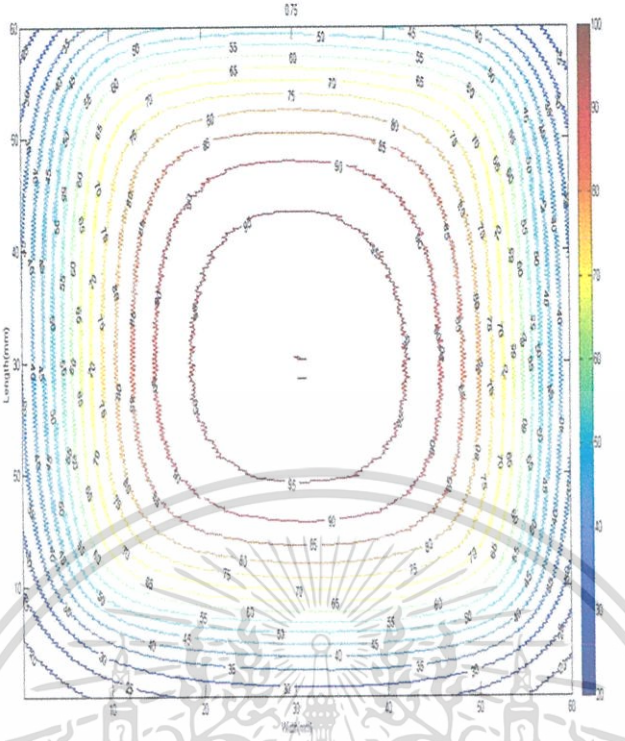
4.1.1 ผลการทดลอง

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก เพื่อต้องการที่จะทราบว่าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กนั้นมีค่าคงที่หรือไม่ ถ้าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กคงที่ จึงจะนำค่าสนามแม่เหล็กไปใช้ในการคำนวณในระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำต่อไปได้

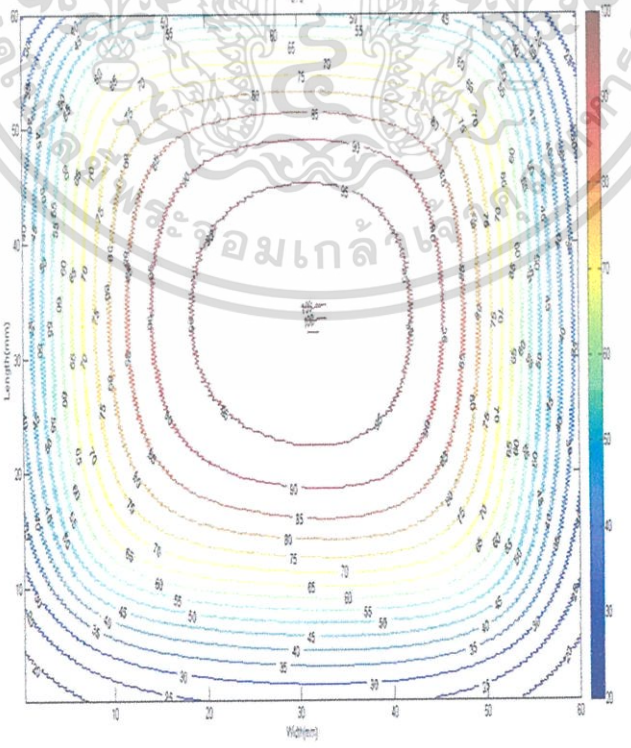


รูปที่ 4.9 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับจุดกึ่งกลางระหว่างแม่เหล็ก 2 อัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับบนระหว่างแม่เหล็ก 2 อัน



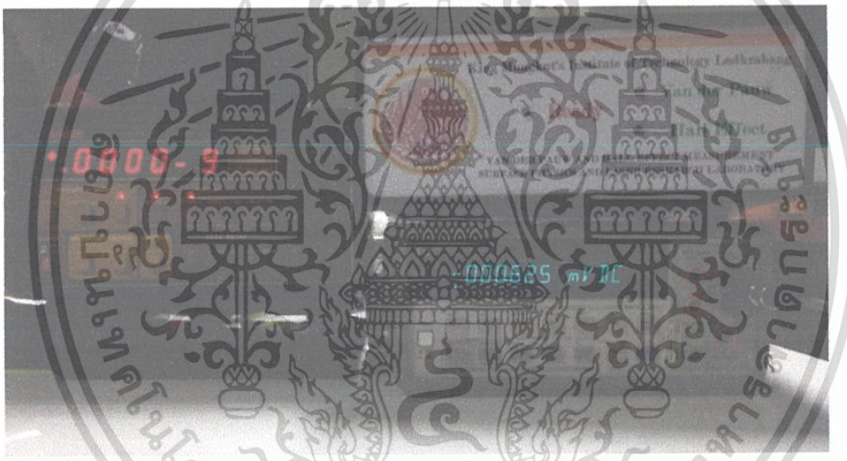
รูปที่ 4.11 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระดับล่างระหว่างแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ชิ้นงานที่ใช้ทดลองคือ Si wafer สองชิ้นที่ทราบค่าความหนาและค่า Resistivity ซึ่งข้อมูลมาจากบริษัทที่น่าเชื่อถือที่ทำการขายชิ้นงานสองชิ้นนี้ ส่วนค่า Bulk carrier concentration ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ซึ่งเป็นค่าที่น่าเชื่อถือ ดังนั้นเราจึงทำการกับเครื่องมือของเราเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดว่าได้ผลการวัดใกล้เคียงหรือไม่

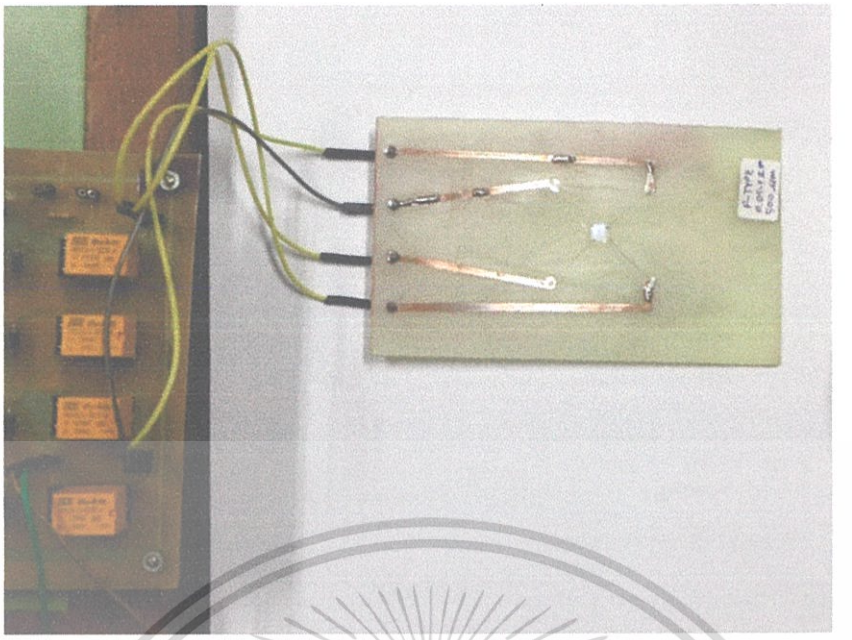
เริ่มจากการติดตั้งโปรแกรม Hall Effect Measurement, โปรแกรมAgilent connection expert IO Library suite 16 และ โปรแกรม Arduino0023 ให้เรียบร้อย จากนั้นจัดวางอุปกรณ์และเชื่อมต่ออุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ให้เรียบร้อยรอประมาณหนึ่งนาทีสังเกต LED ที่สาย USB/GPIB จะติดเป็นสีเขียวอ่อนที่คำว่า “READY” แสดงว่า USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้วต่อไปให้เช็คว่า ET-EASY168STAMP สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้เรียบร้อย ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 รูปการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

การเชื่อมต่อเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเข้ากับแผ่นวาง Sample นั้นต้องต่อให้ถูกขั้วด้วยโดยให้ใช้สายต่อจากเครื่องไปยังแผ่นวาง Sample ที่ได้จัดทำไว้ให้ดังรูปที่ 4.13 และให้ใช้สายสีแดงต่อที่ขั้วที่หนึ่ง แล้วสายถัดไปก็คือขั้วที่สอง ขั้วที่สาม ขั้วที่สี่ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 ถ้าต่อไม่ถูกขั้วจะทำให้ไม่สามารถเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ถูกต้อง จากนั้นให้เปิดโปรแกรม Hall Effect Measurement จะอยู่ในหน้า Setting และทำตามขั้นตอนการวัด

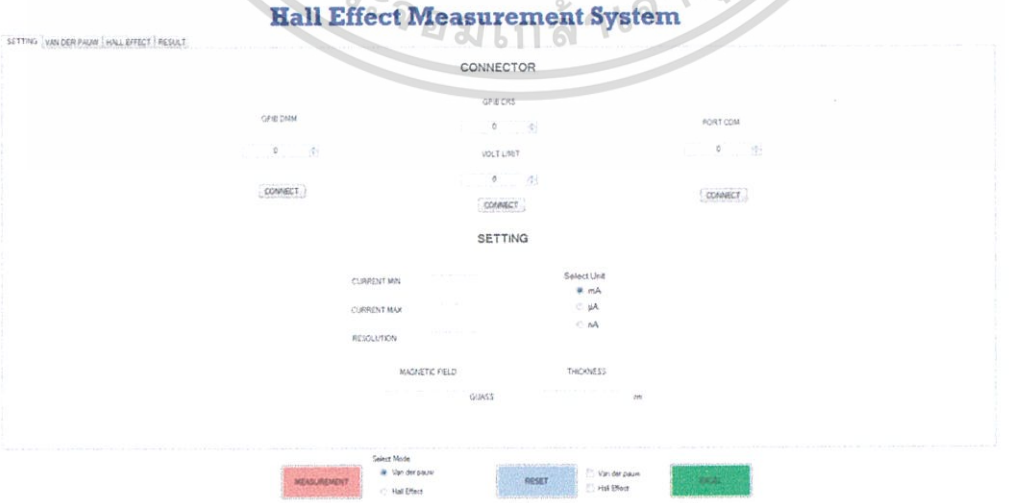
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สายต่อจากเครื่องเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปยังแผ่นวาง Sample

ขั้นตอนการวัดมีดังต่อไปนี้

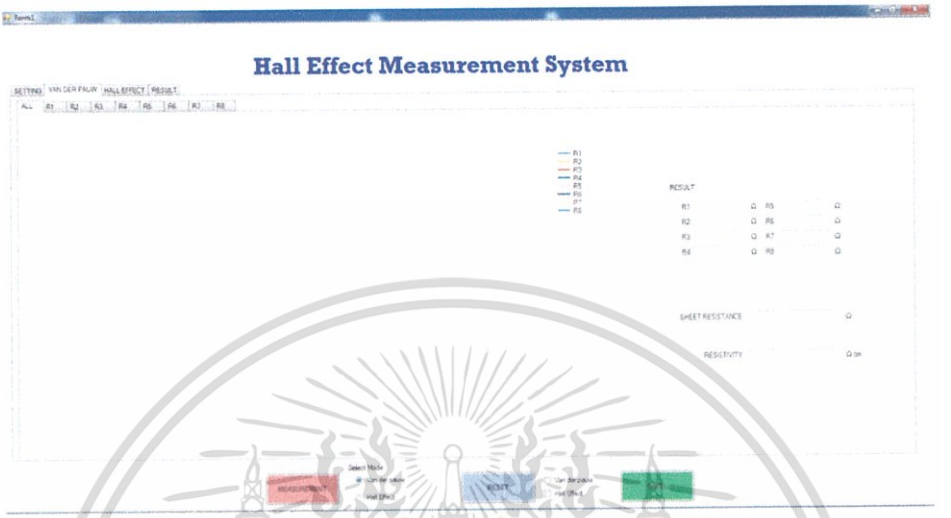
1. เลือก GPIB ADDRESS ของ Digital millimeter และ Current source โดย Current source จะต้องเลือก โวลต์ลิมิต โดยให้ใส่ค่าสูงสุดของเครื่อง คือ 100 โวลต์ จากนั้นให้เลือกตำแหน่งของ Serial port เมื่อใส่ค่าครบทุกตัวแล้ว ให้กดปุ่ม connect และใส่ช่วงของการจ่ายกระแส คือ กระแสสูงสุด, กระแสต่ำสุด และ ความละเอียดในการเพิ่มกระแสสำหรับชิ้นงาน เมื่อใส่ค่าครบทุกตัวให้เลือกโหมด van der pauw และกดปุ่ม measurement



รูปที่ 4.15 หน้าต่างการตั้งค่าของพารามิเตอร์

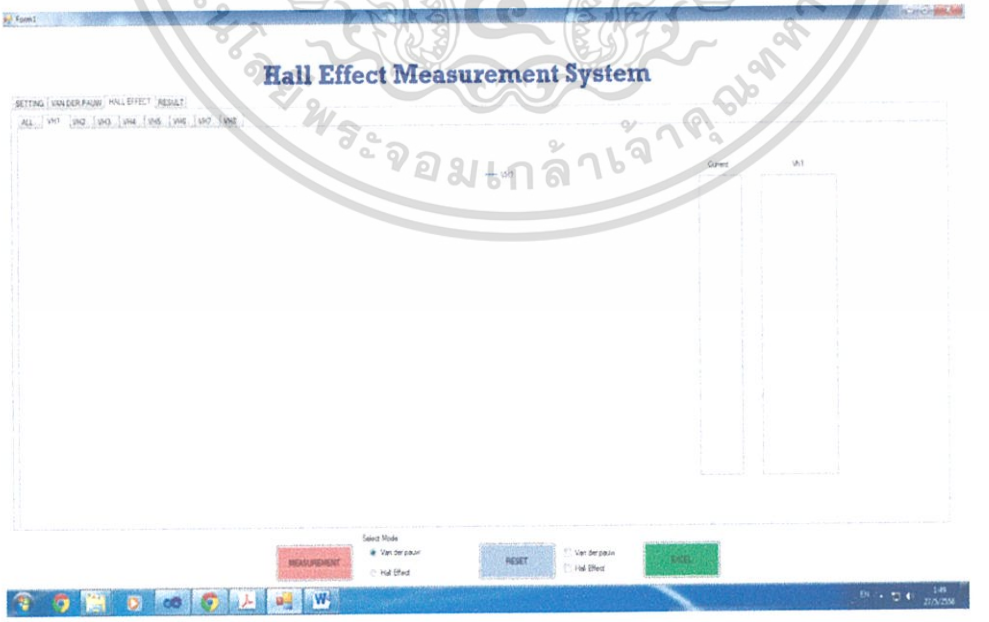
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมจะทำการวัดในโหมดของ van der pauw เราสามารถที่จะดูผลของการวัดรวมของทุกค่าความต้านทานจาก Tab control all หากต้องการดูผลการวัดแต่ละความต้านทานให้กดที่ Tab control R1 R8 เมื่อผลการวัดเสร็จแล้วจะแสดงค่า Resistivity, Sheet Resistance ที่ Text box ใน Tab control all และ Tab control result



รูปที่ 4.16 หน้าต่างแสดงค่าการวัดแบบ van der pauw

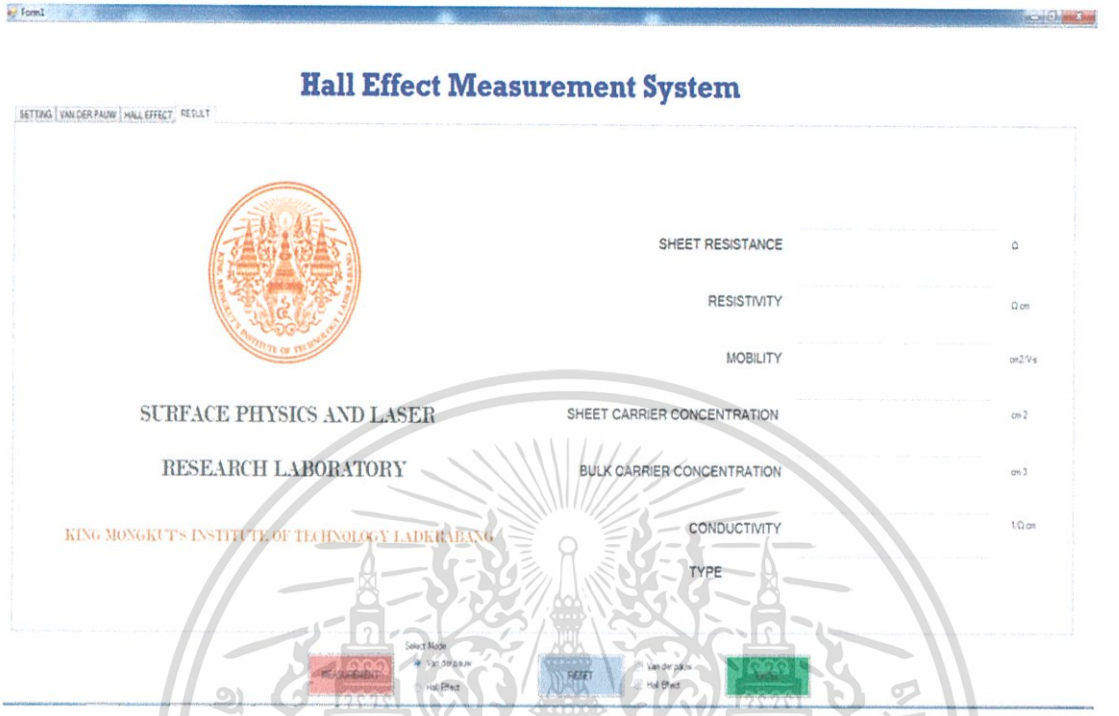
3. ให้เปลี่ยนโหมดการวัดเป็นแบบ Hall effect นำชิ้นงานใส่ในสนามแม่เหล็กและกดปุ่ม measurement โดยสามารถดูผลจากการวัดรวมได้ที่ Tab control all ในโหมดของ Hall effect และดูผลจากการวัดแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่างๆ ได้ที่ Tab control VH1,Vh2-VH8 เมื่อมี message box ขึ้นมาให้ทำการกลับชิ้นงาน และกดปุ่ม OK



รูปที่ 4.17 หน้าต่างการวัดในโหมดของ hall effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อทำการวัดเสร็จแล้วจะมีค่า Sheet carrier concentration, mobility, Bulk carrier concentration, Conductivity, Type ใน Tab control all และ Tab control result



รูปที่ 4.18 หน้าต่างผลลัพธ์จากการคำนวณทั้งหมด

4.2.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชิ้นที่ทราบค่าแล้ว

Si wafer	Doping	Type	Resistivity (Ω.cm)	ความหนา (μm)	Bulk carrier concentration (cm^{-3})
ชิ้นที่ 1	Boron(B)	P	30-50	700	$1.33x10^{14}$ -$1.35x10^{15}$
ชิ้นที่ 2	Antimony(Sb)	N	300-700	500	$4.20x10^{12}$ -$4.27x10^{13}$

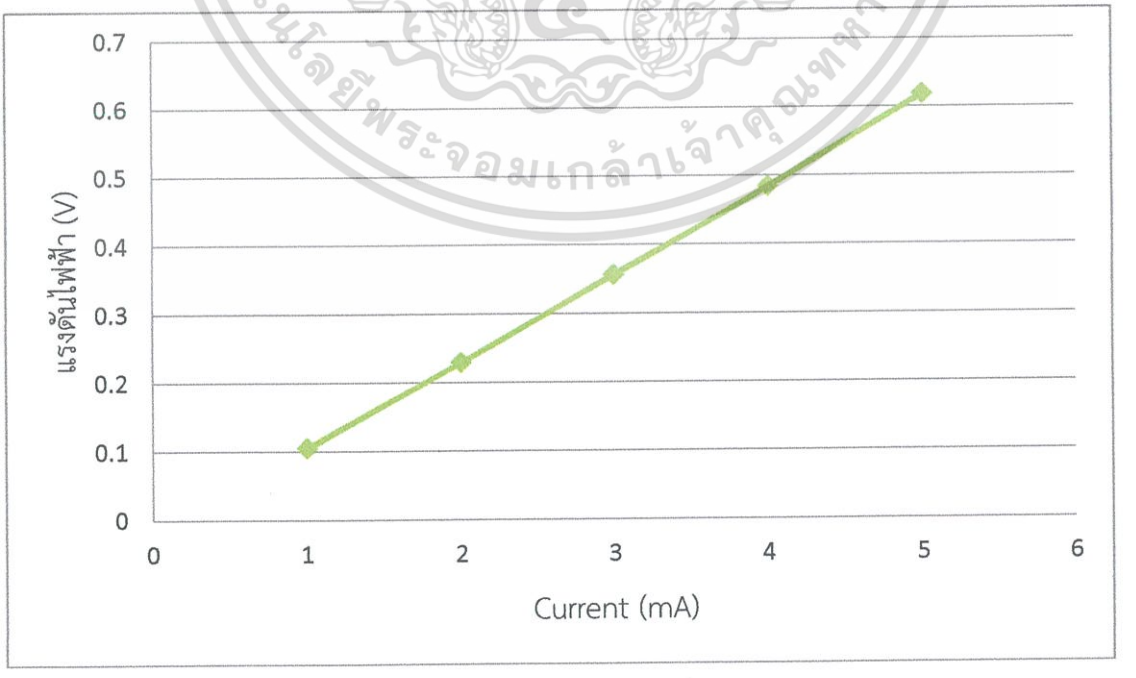
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชนิดที่ 1

Current (mA)	V43/I12	V14/I23	V21/I34	V32/I41
1	0.10509	0.01318	0.12762	0.19027
2	0.22956	0.16653	0.26169	0.39313
3	0.35709	0.32867	0.39896	0.58089
4	0.48451	0.49334	0.5395	0.77142
5	0.61831	0.66907	0.68305	0.94873

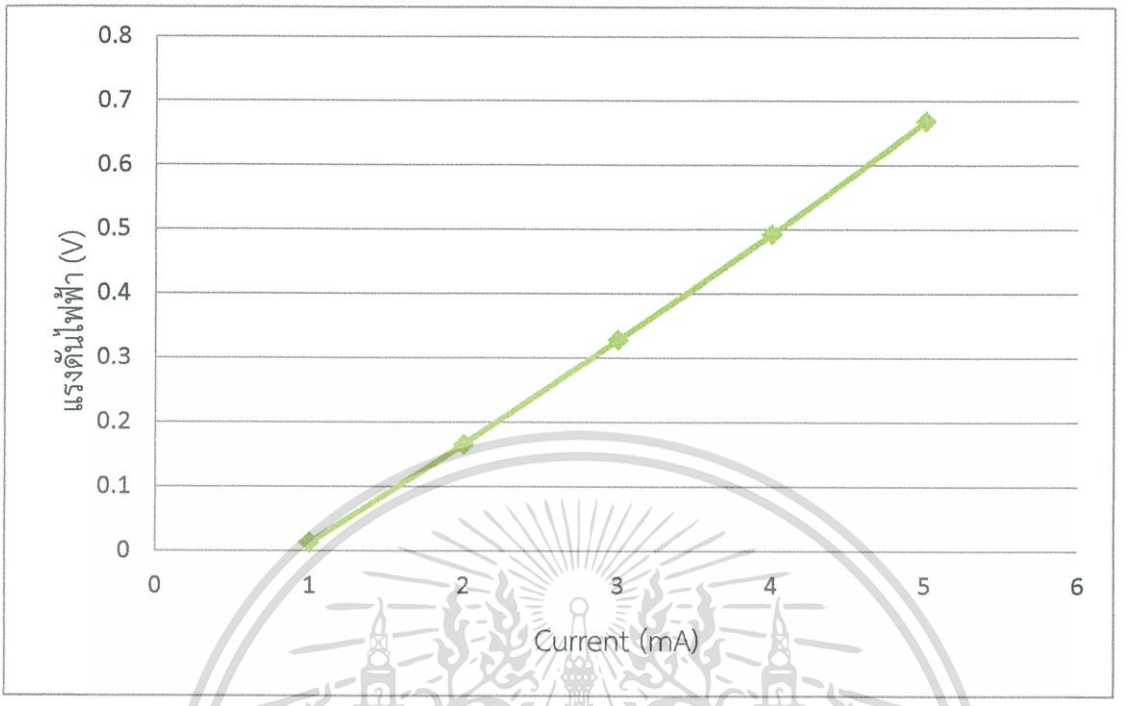
ตารางที่ 4.2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชนิดที่ 1 (ต่อ)

Current (mA)	V23/I14	V12/I43	V41/I32	V34/I21
1	0.31155	0.07667	0.13211	0.02511
2	0.46627	0.23419	0.29499	0.18641
3	0.57099	0.37779	0.45331	0.31728
4	0.68494	0.52549	0.6067	0.44675
5	0.82143	0.67884	0.75314	0.57776

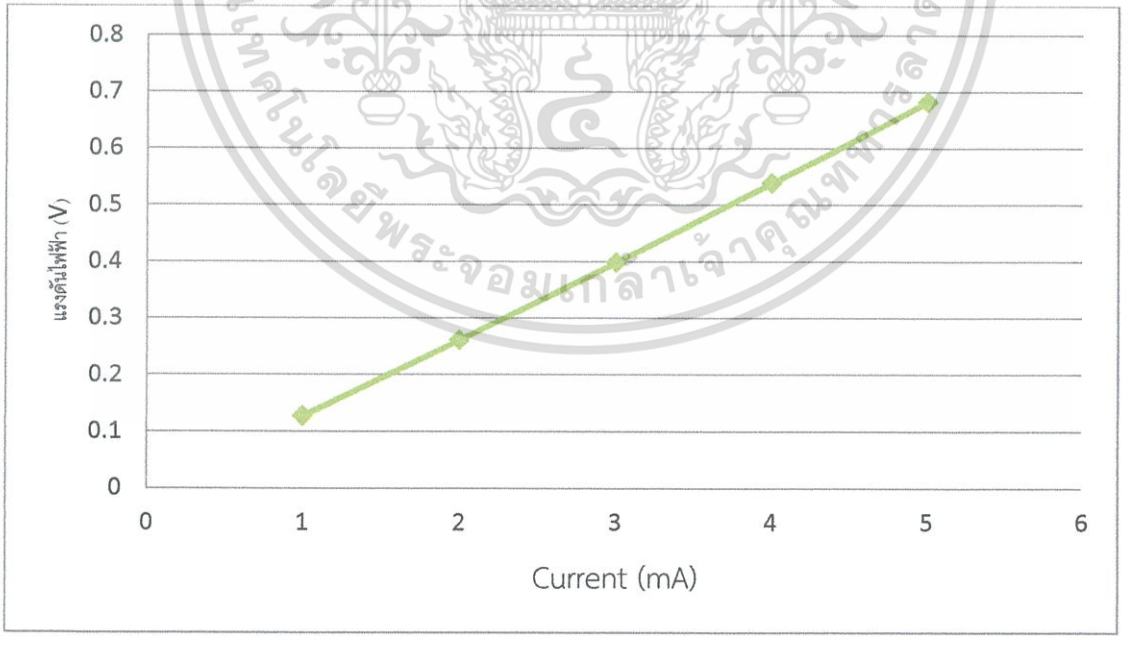


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

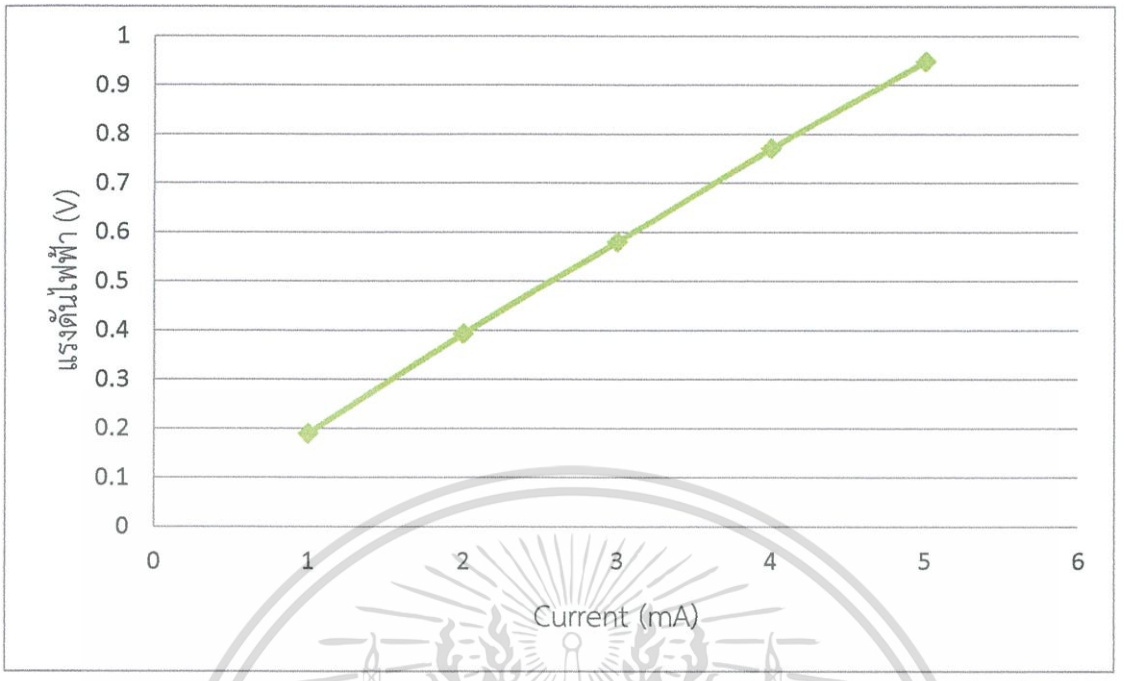


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,4

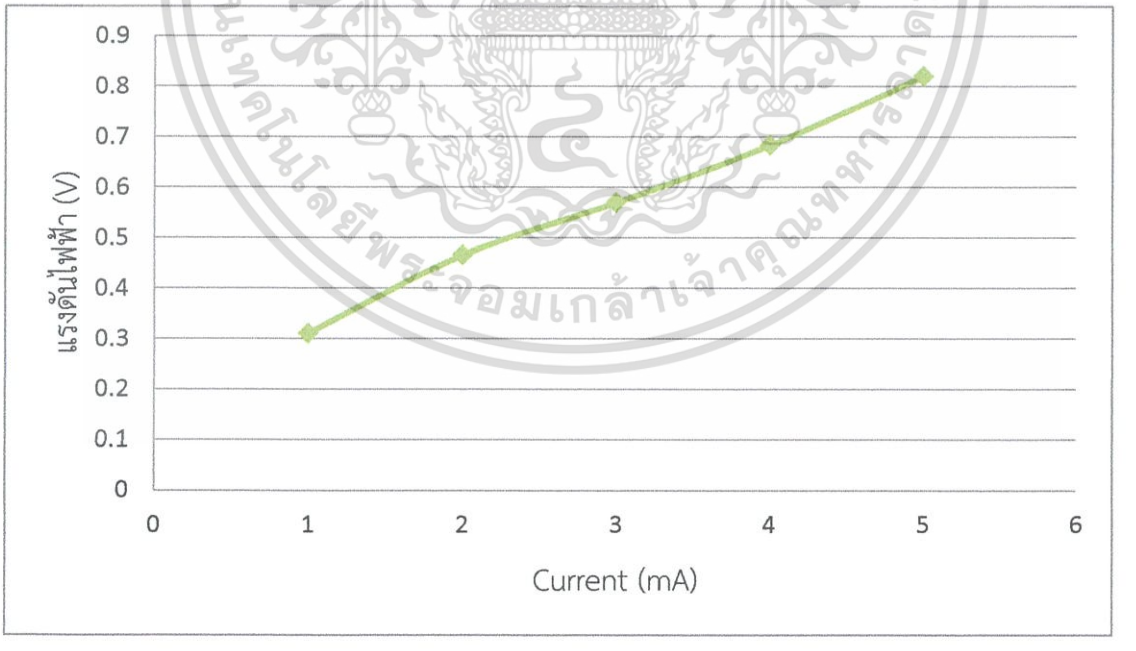


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

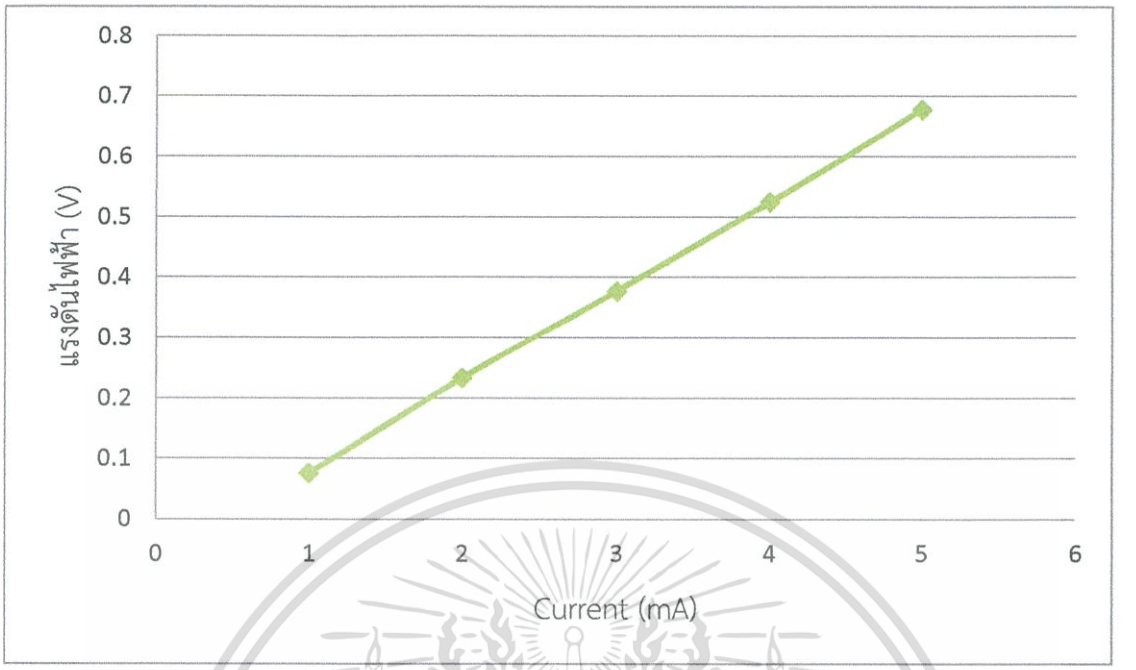


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,2

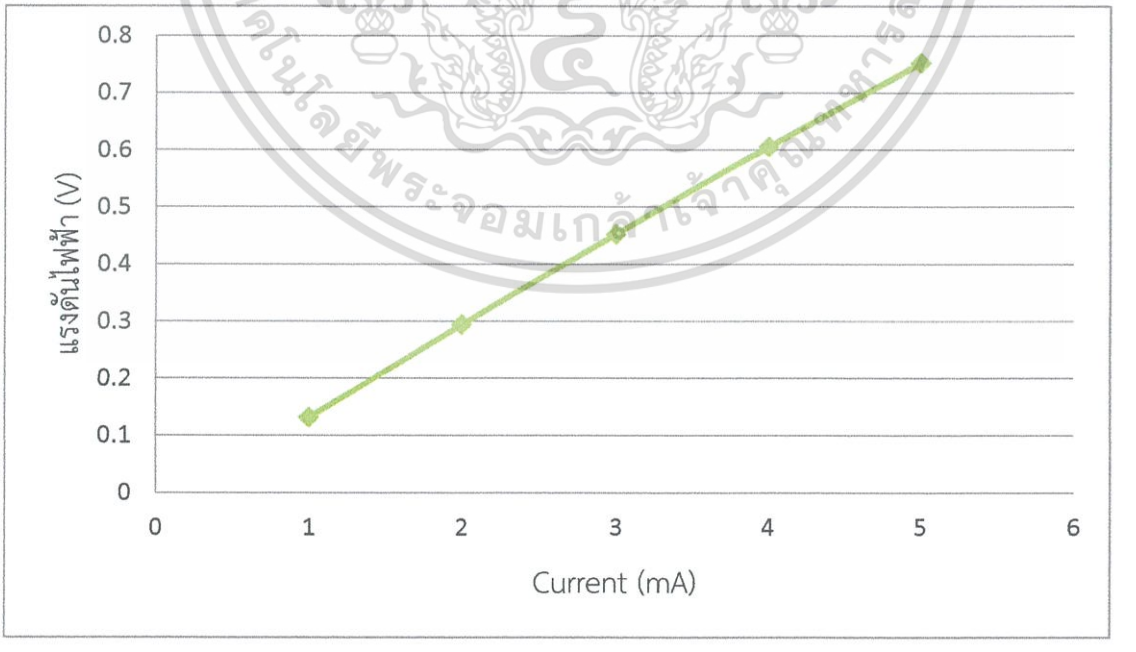


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2,3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

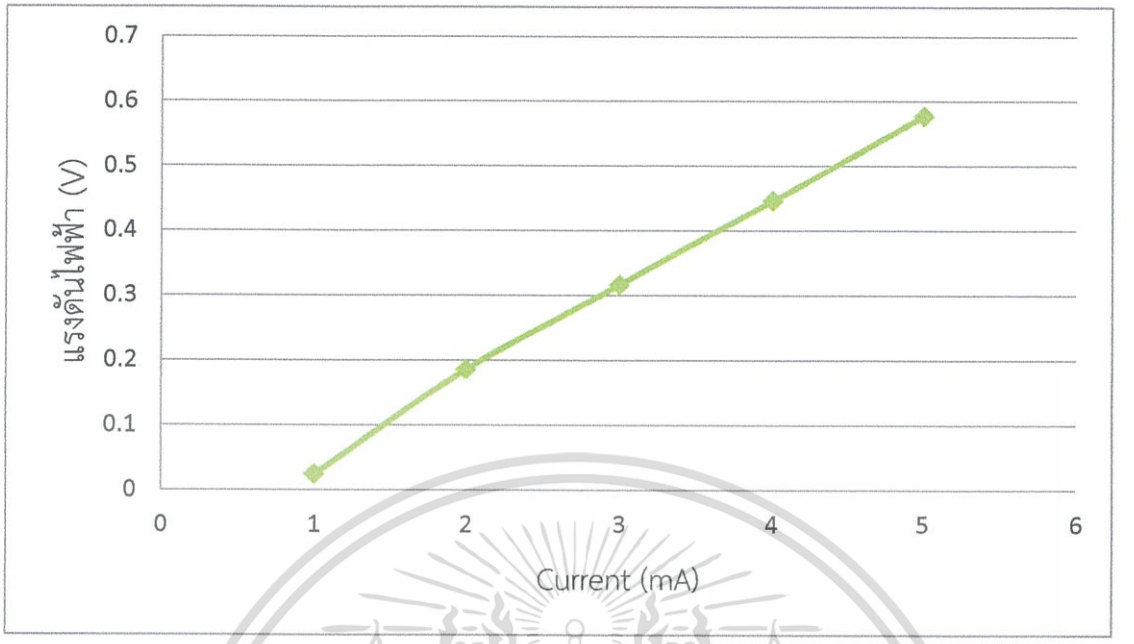


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,2



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,4

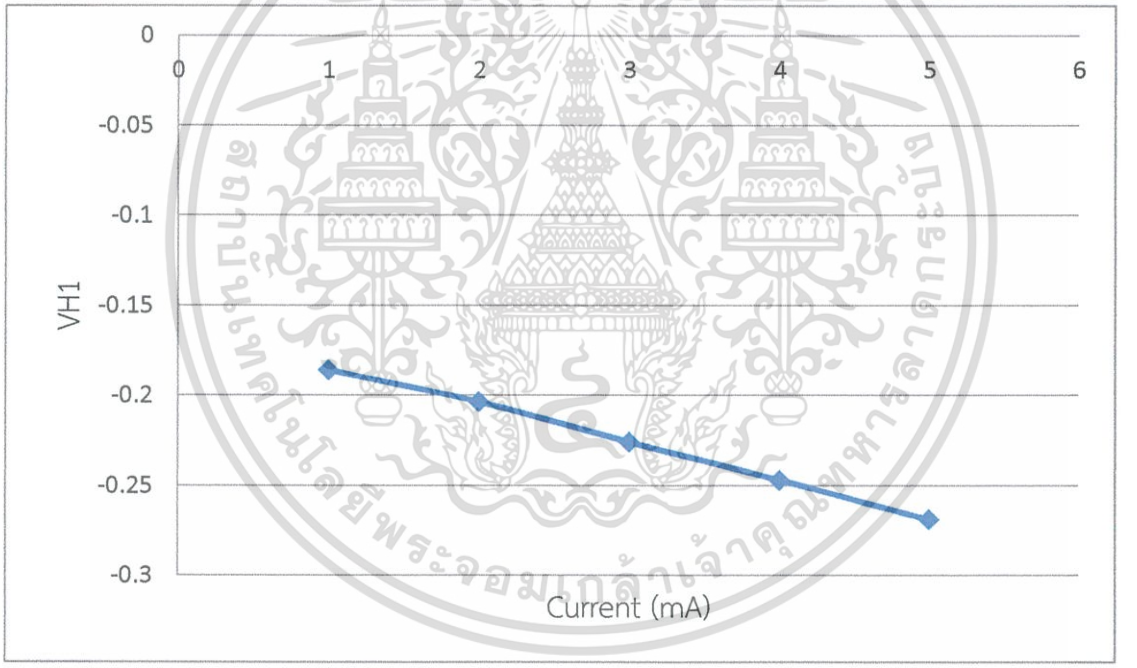
ตารางที่ 4.3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด 1 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น

Current (mA)	VH1(I31/V24)	VH2(I13/V24)	VH3(I24/V13)	VH4(I42/V13)
1	-0.18571	0.18623	-0.12615	0.07668
2	-0.20344	0.23682	-0.12878	0.17888
3	-0.22568	0.27645	-0.13119	0.26281
4	-0.24678	0.32547	-0.13472	0.32612
5	-0.26873	0.38135	-0.13876	0.38154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

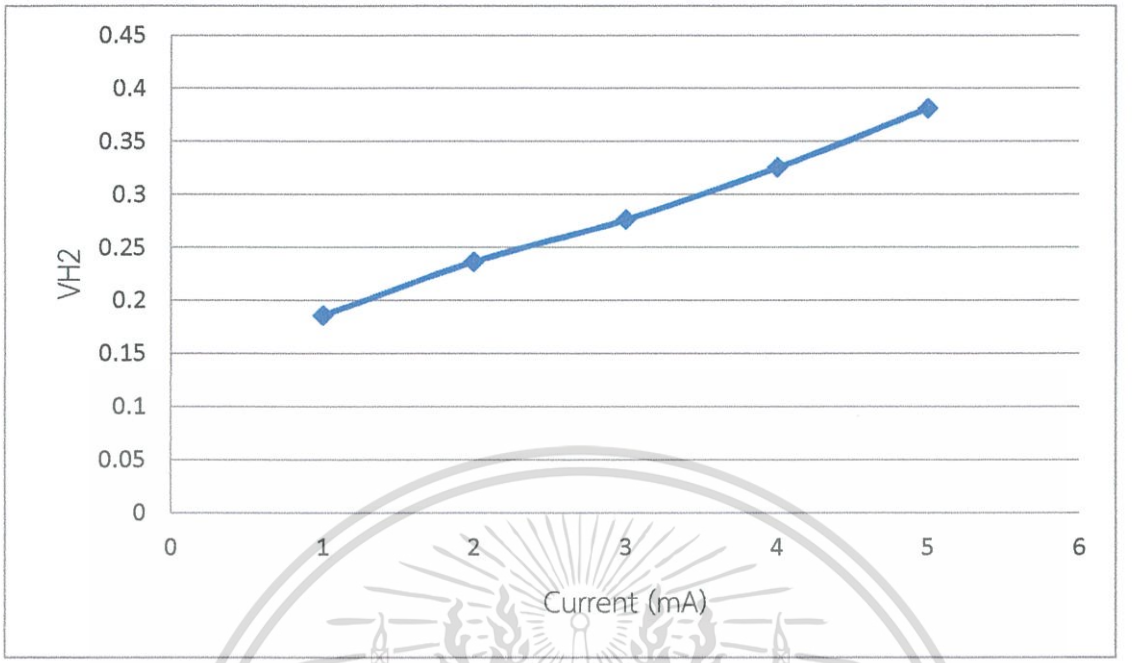
ตารางที่ 4.4 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด ที่ 1 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง

Current (mA)	VH5(I31/V24)	VH6(I13/V24)	VH7(I24/V13)	VH8(I42/V13)
1	-0.20578	-0.00183	-0.15853	0.04368
2	-0.22631	0.00753	-0.18922	0.11228
3	-0.24904	0.0144	-0.21765	0.17287
4	-0.26871	0.021345	-0.24567	0.21847
5	-0.28103	0.02594	-0.27502	0.24898

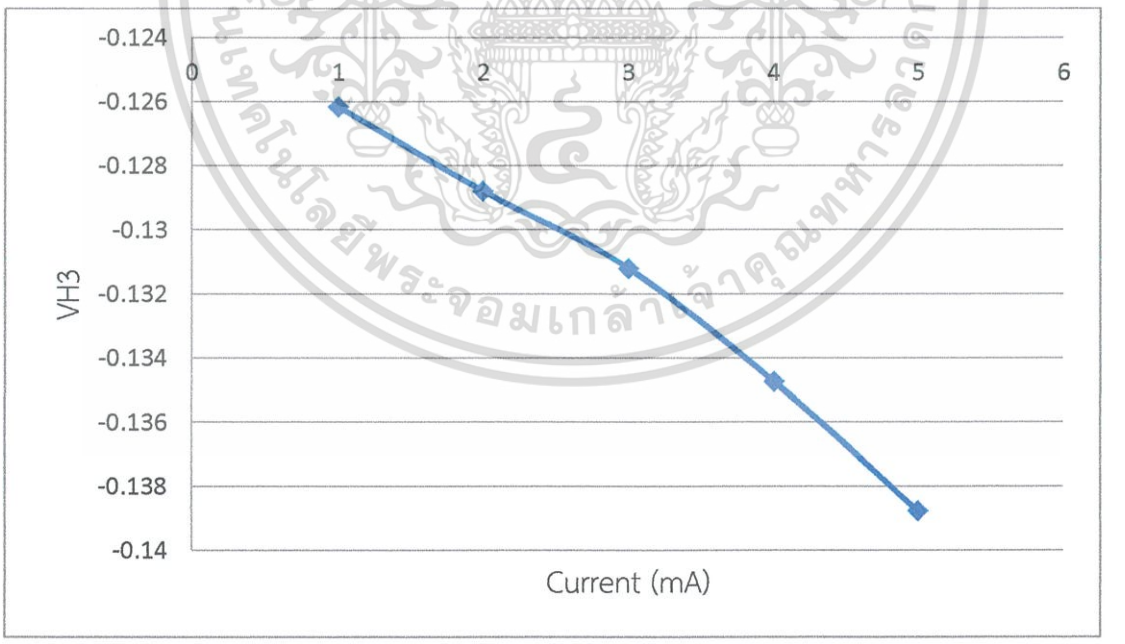


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1 กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

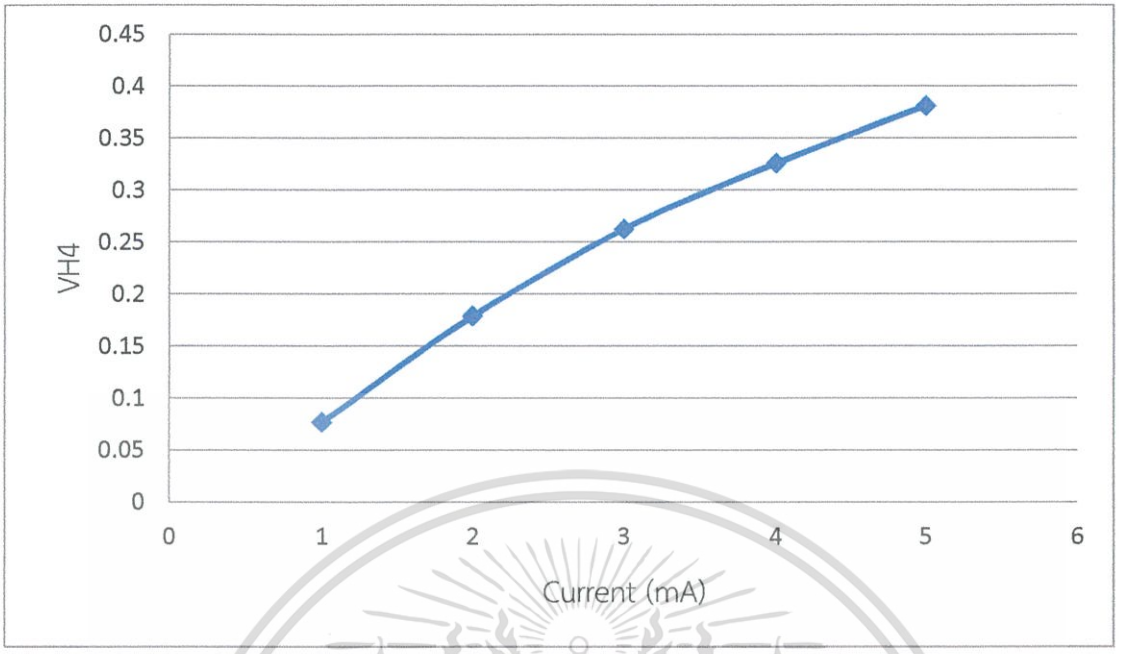


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

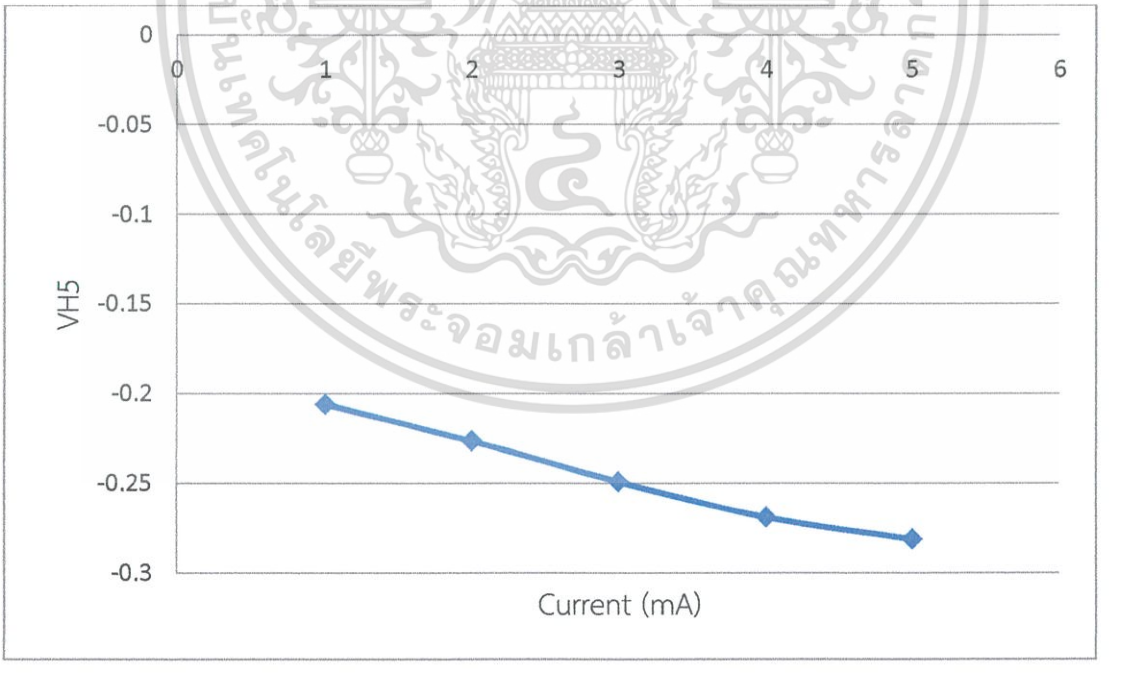


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

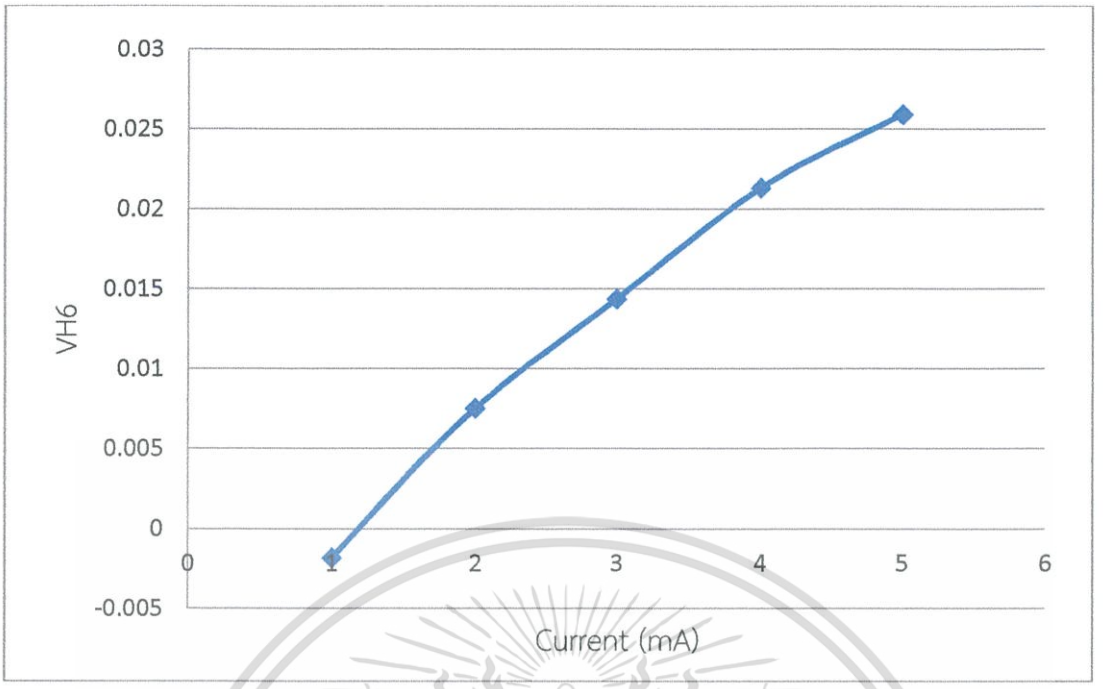


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

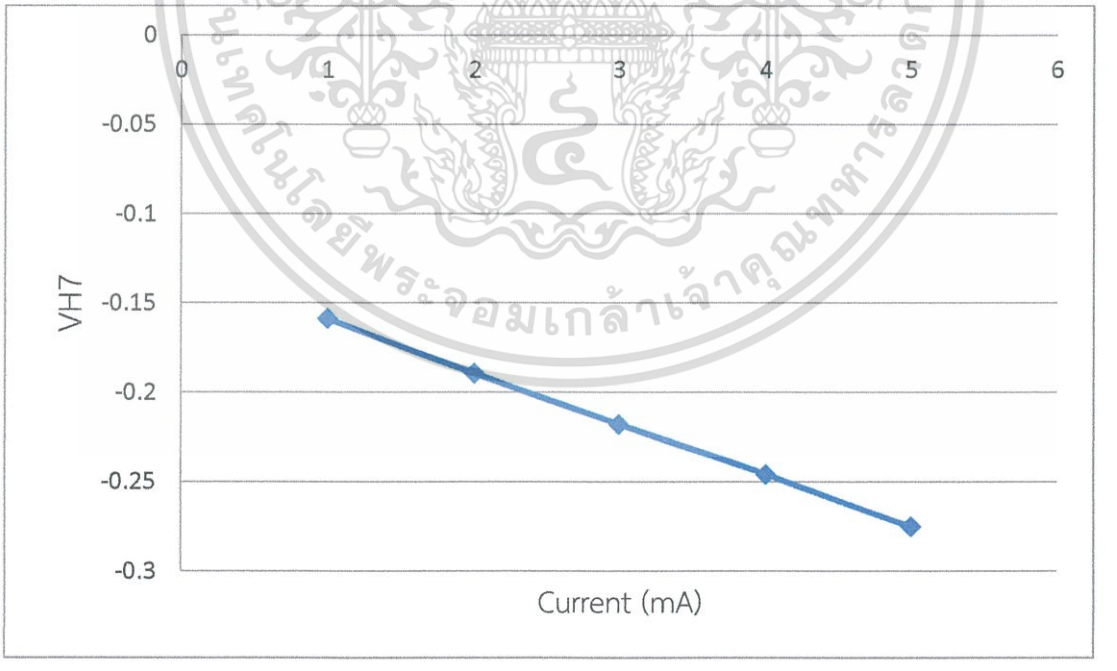


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

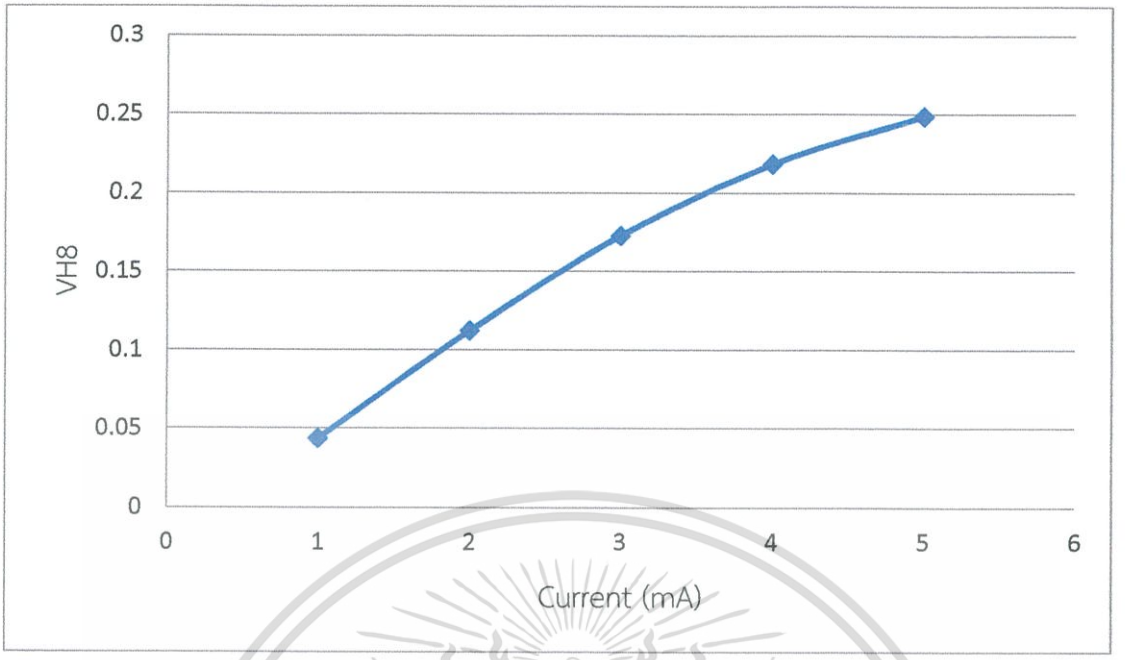


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

ตารางที่ 4.5 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชนิดที่ 1

Sheet resistance	618.489 Ω
Resistivity	43.294 Ω.cm
Sheet carrier concentration	$1.099\times10^{13}\ cm^{-2}$
Majority mobility	426.005 $cm^2/V\cdot s$
Bulk carrier concentration	$4.428\times10^{14}\ cm^{-3}$
Conductivity	0.023 $1/\Omega\bullet cm$
Type	P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

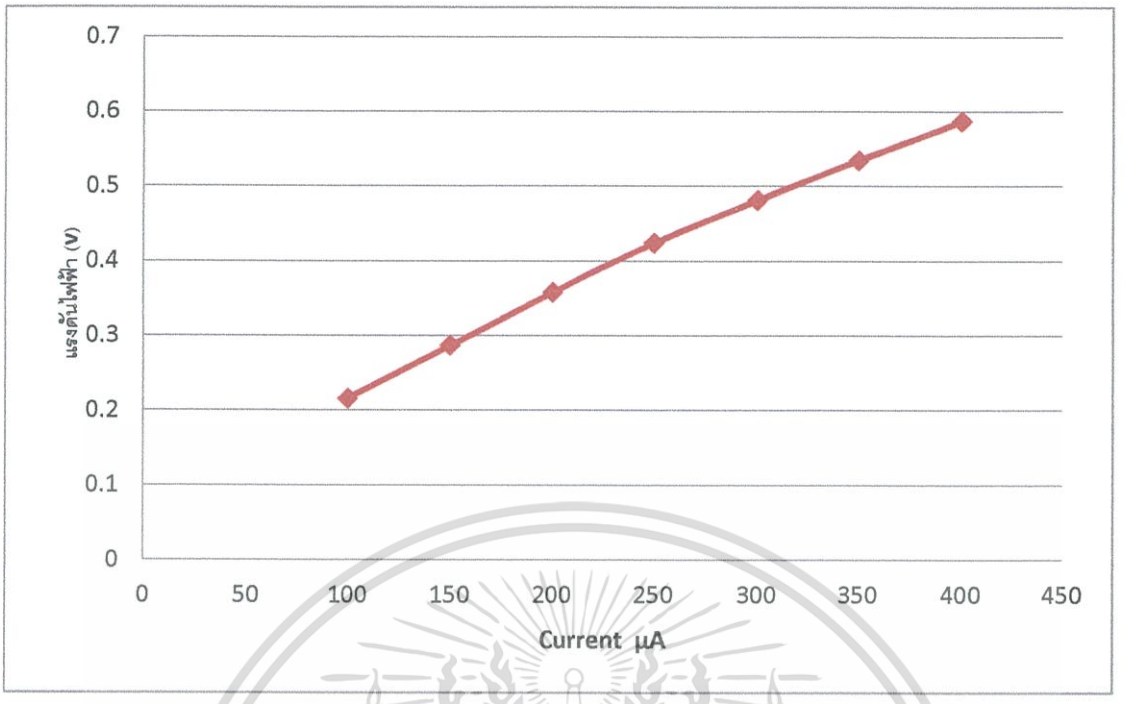
ตารางที่ 4.6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชนิด 2

Current (μA)	V43/I12	V14/I23	V21/I34	V32/I41
100	0.21653	0.11980	0.25588	0.31229
150	0.28716	0.20106	0.29855	0.40688
200	0.35836	0.28336	0.33388	0.51700
250	0.42444	0.35791	0.36809	0.61566
300	0.48187	0.43510	0.39796	0.69043
350	0.53517	0.50581	0.43061	0.77232
400	0.58740	0.57570	0.45691	0.86870

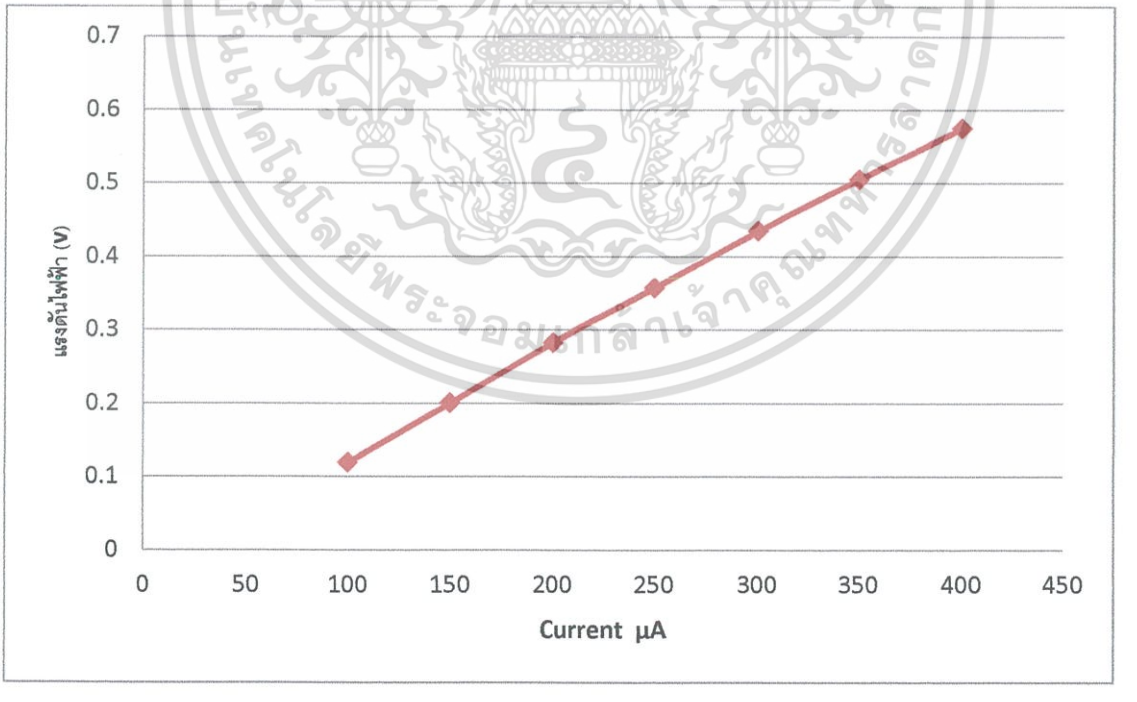
ตารางที่ 4.6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si waferชนิด 2 (ต่อ)

Current (μA)	V23/I14	V12/I43	V41/I32	V34/I21
100	0.34511	0.01435	0.55146	0.01994
150	0.43384	0.12890	0.66049	0.06617
200	0.52072	0.18039	0.71759	0.11041
250	0.60989	0.22999	0.71667	0.15301
300	0.68863	0.27874	0.75371	0.18903
350	0.76876	0.32881	0.78541	0.22565
400	0.83035	0.37544	0.83280	0.26188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

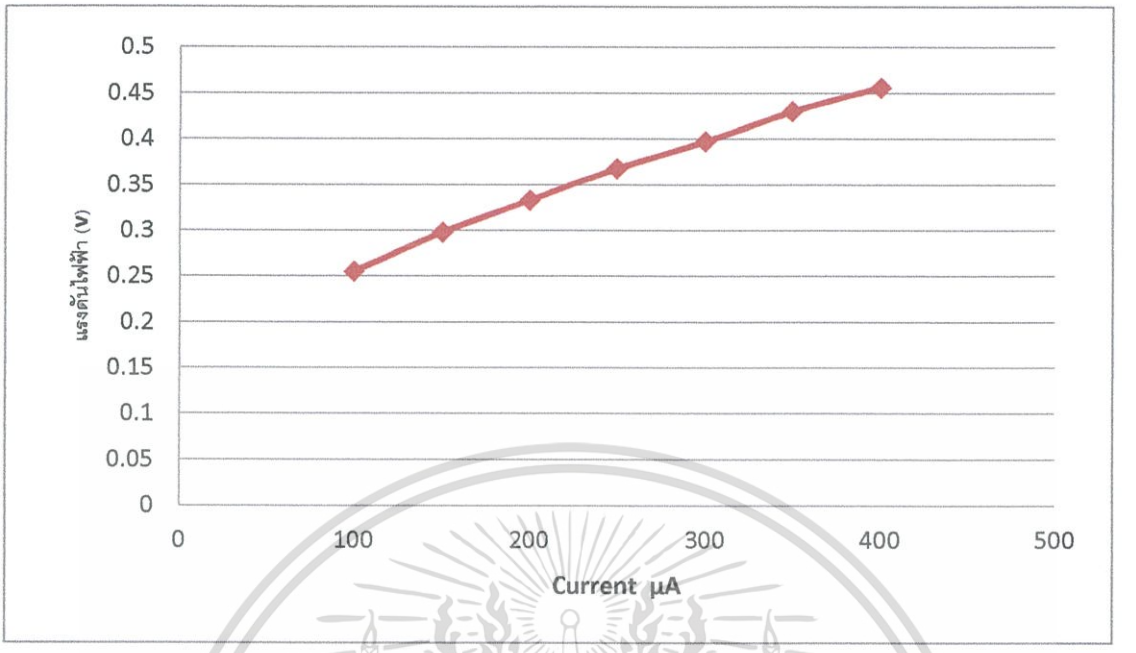


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,3

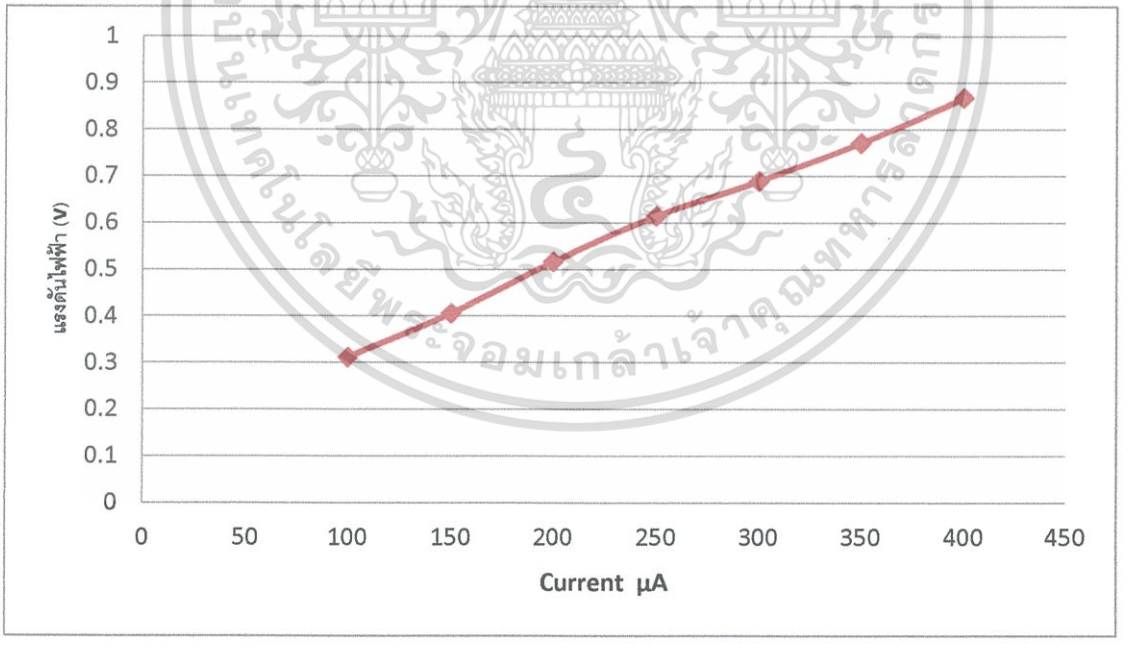


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

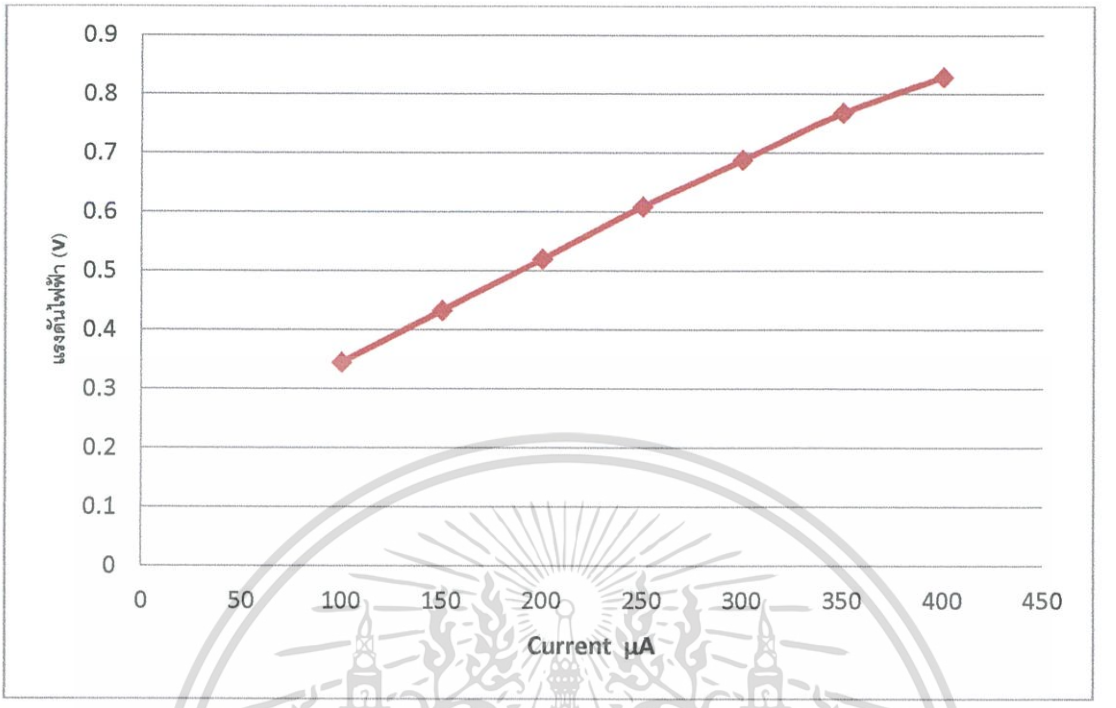


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2, 1

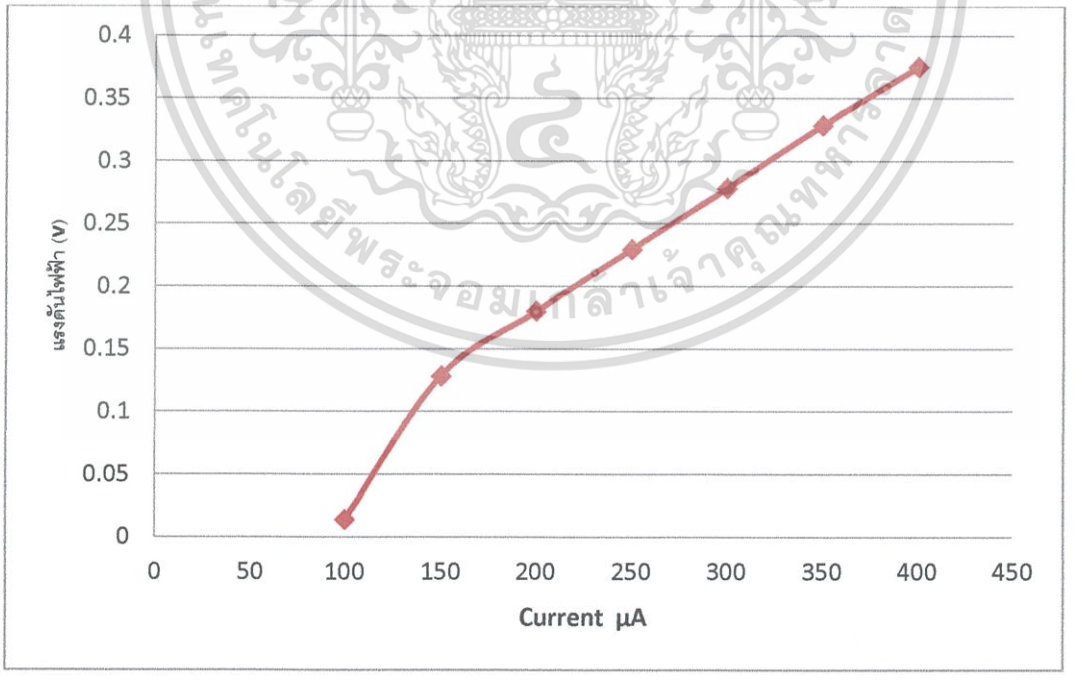


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

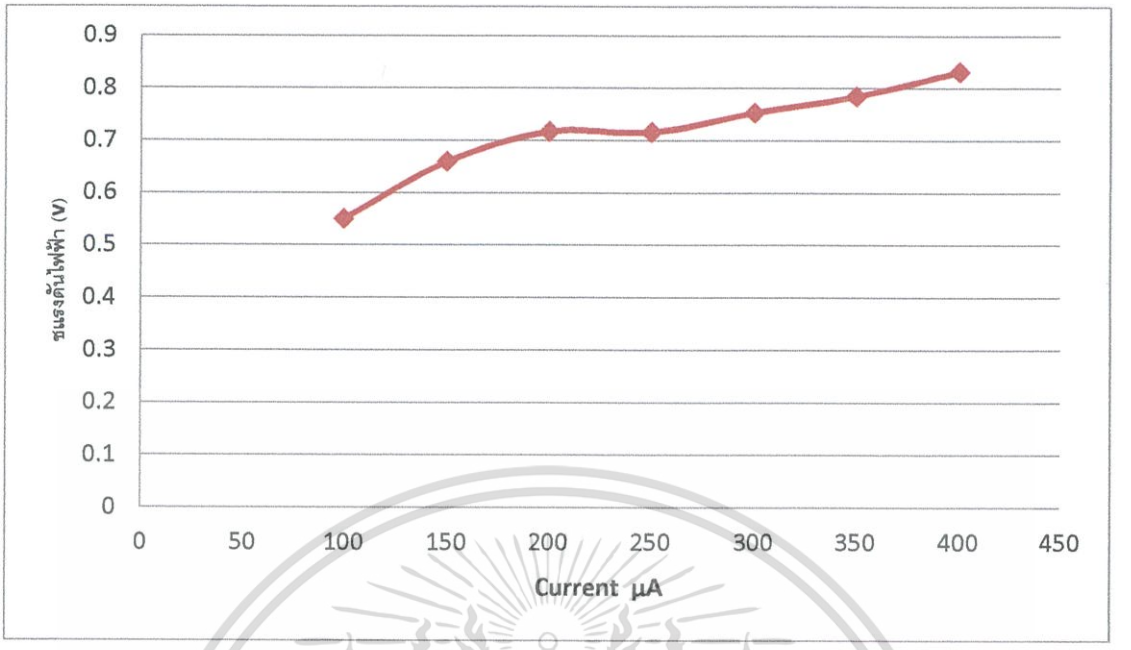


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 1,4 กับแรงดันไฟฟ้า 2,3

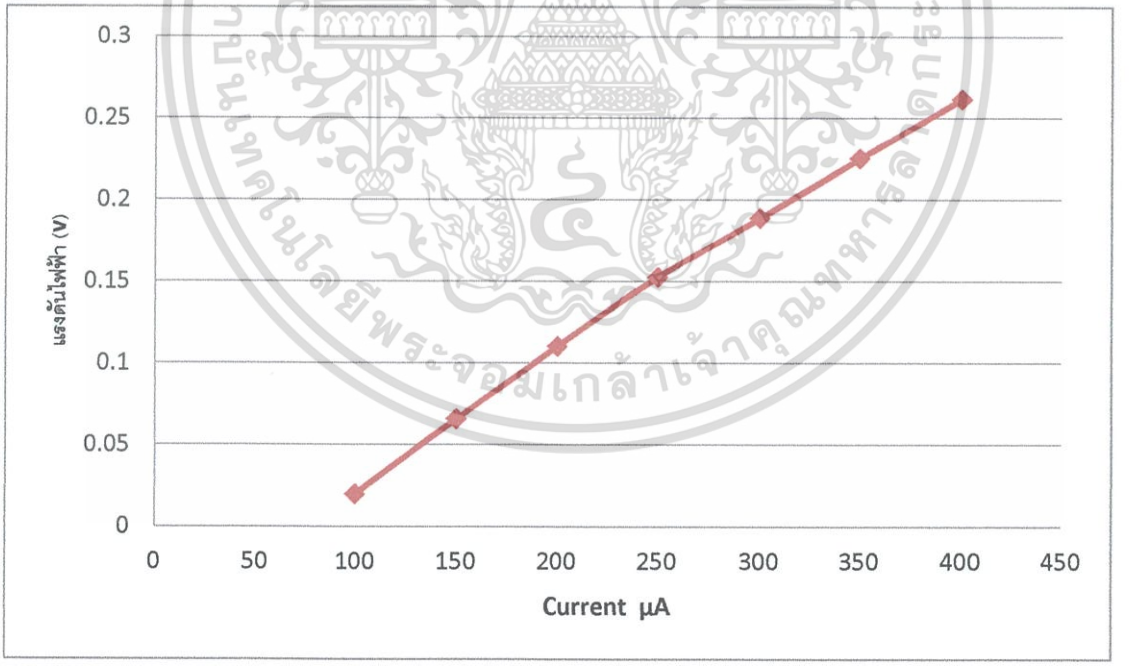


รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 4,3 กับแรงดันไฟฟ้า 1,2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 3,2 กับแรงดันไฟฟ้า 4,1



รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขั้วที่ 2,1 กับแรงดันไฟฟ้า 3,4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

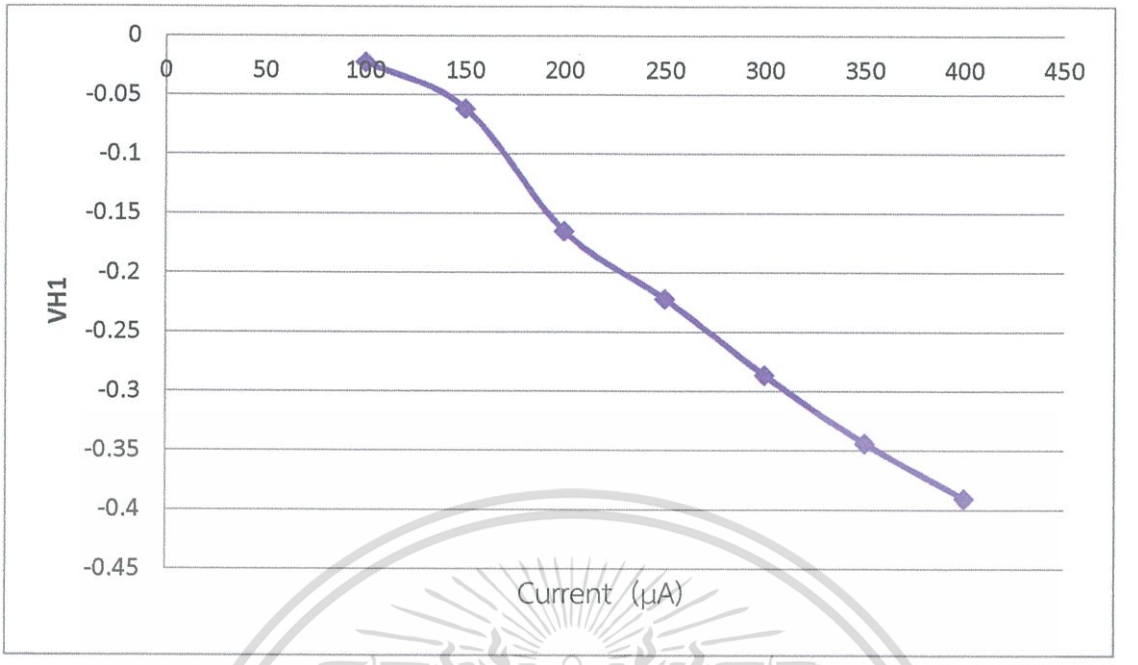
ตารางที่ 4.7 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด 2 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น

Current μA	VH1(I31/V24)	VH2(I13/V24)	VH3(I24/V13)	VH4(I42/V13)
100	-0.02202	0.11316	-0.76875	0.27921
150	-0.06137	0.13272	-0.93800	0.32193
200	-0.16487	0.15994	-1.08094	0.35779
250	-0.22172	0.17383	-1.17791	0.39091
300	-0.28618	0.18247	-1.29512	0.41708
350	-0.34356	0.21711	-1.40258	0.44065
400	-0.39025	0.22836	-1.48414	0.46132

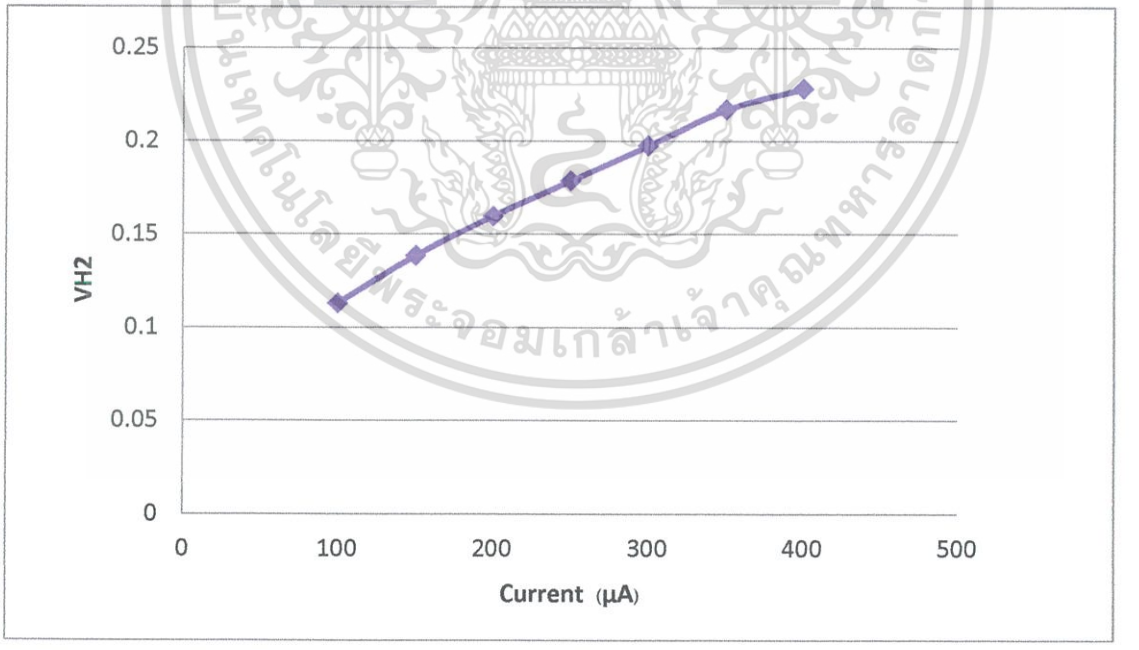
ตารางที่ 4.8 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชนิด 2 ในลักษณะสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งลง

Current μA	VH5(I31/V24)	VH6(I13/V24)	VH7(I24/V13)	VH8(I42/V13)
100	-0.02202	0.2609	-0.05202	0.37042
150	-0.09137	0.30558	-0.12137	0.45928
200	-0.16557	0.37966	-0.18557	0.54125
250	-0.23172	0.44588	-0.25172	0.62604
300	-0.29618	0.51678	-0.32618	0.70696
350	-0.35356	0.58882	-0.36356	0.7749
400	-0.39077	0.66688	-0.41077	0.84565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

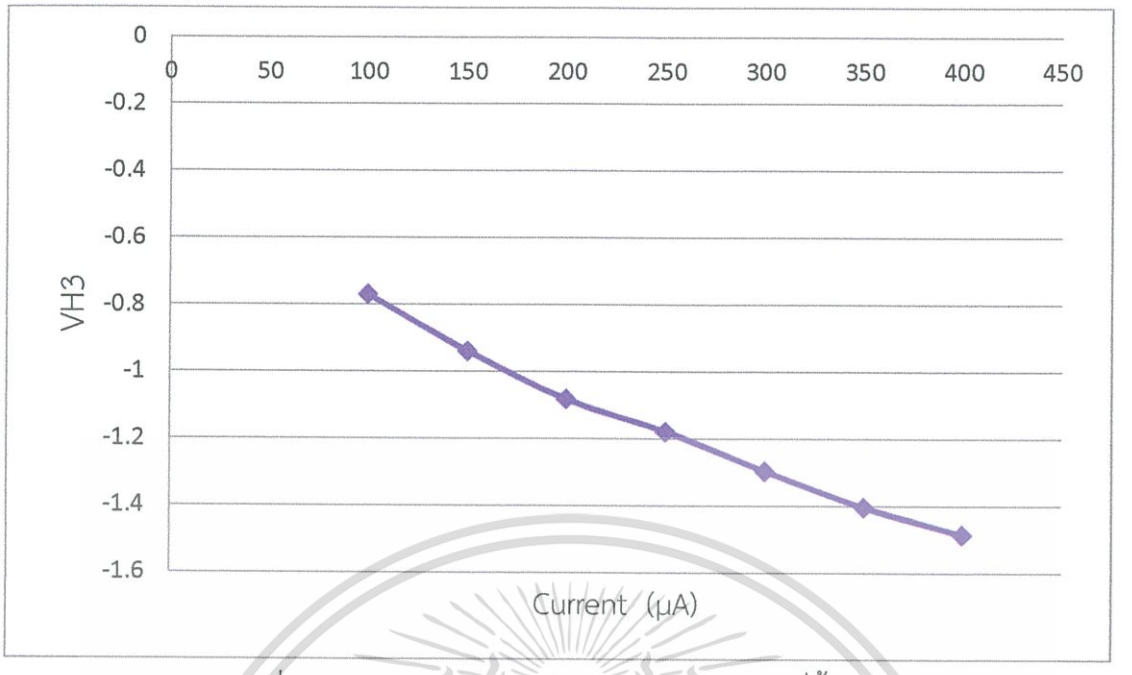


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

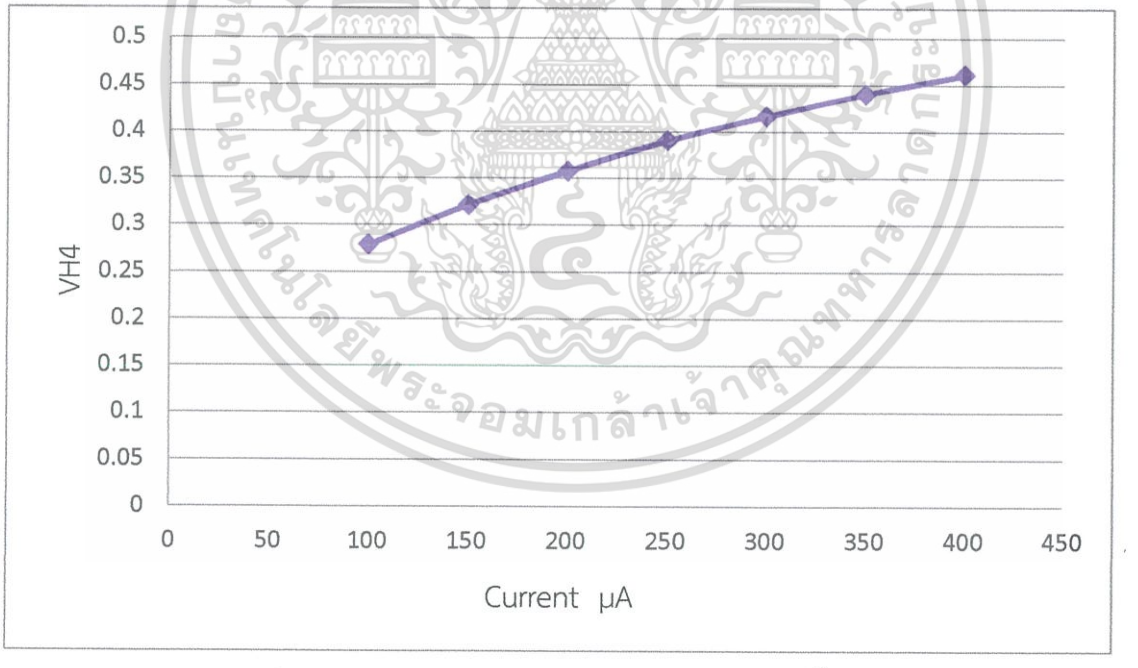


รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

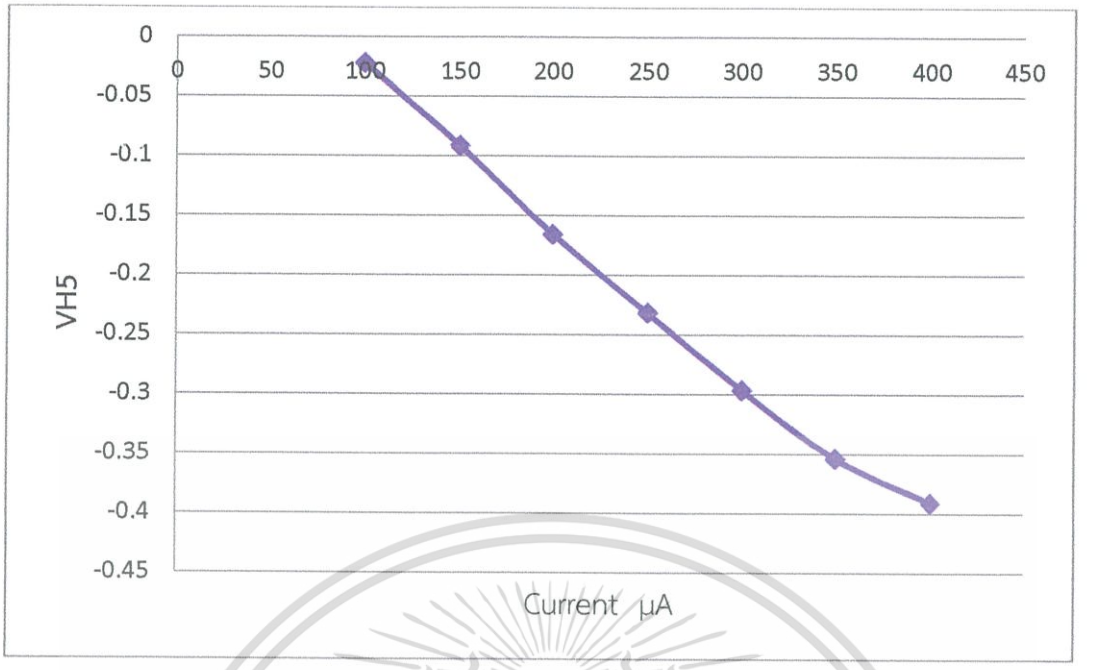


รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

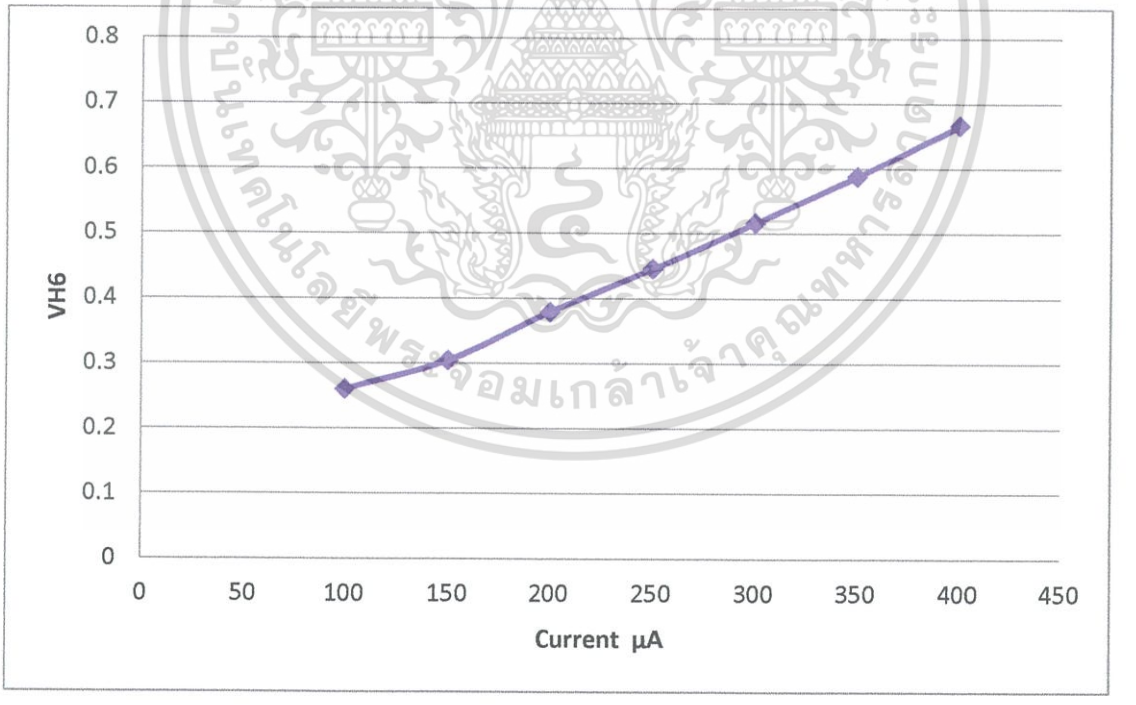


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

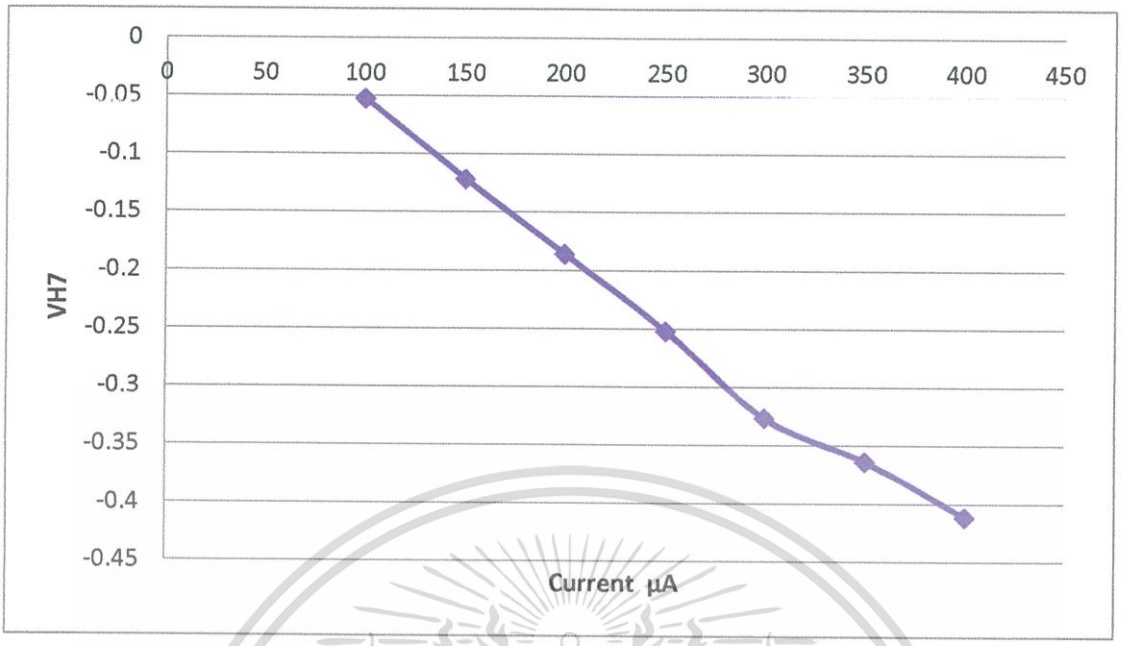


รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 3,1
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

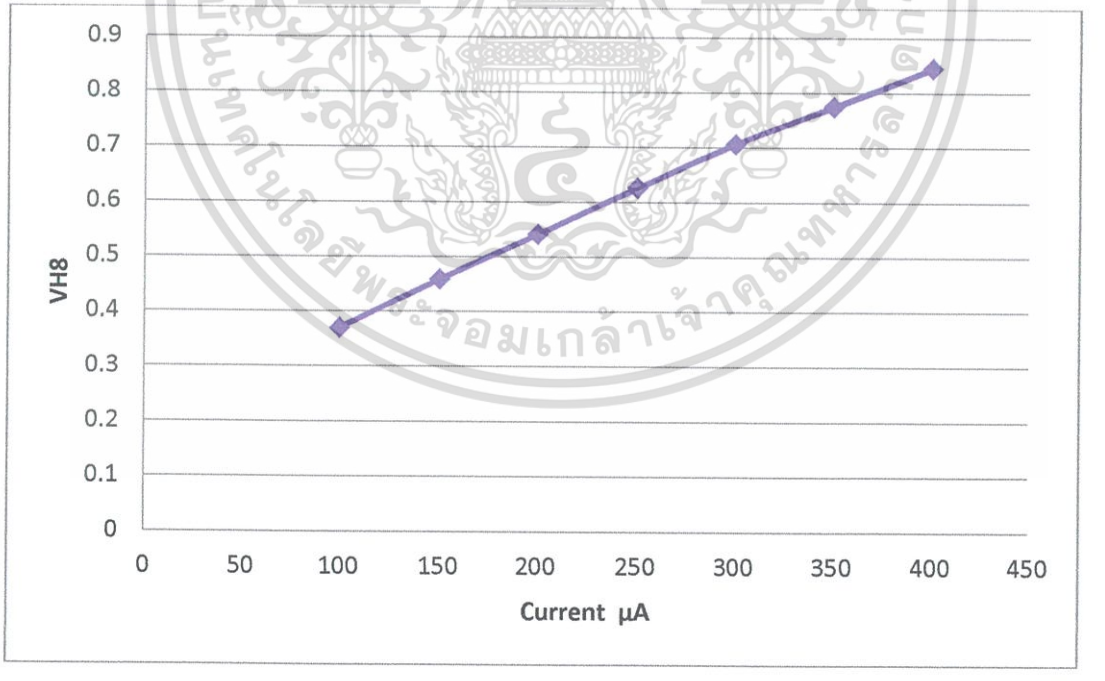


รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 1,3
กับแรงดันที่ขั้ว 2,4 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 2,4
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ขั้ว 4,2
กับแรงดันที่ขั้ว 1,3 ในสนามแม่เหล็กทิศพุ่งลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชนิดที่ 2

Sheet resistance	7855.998 Ω
Resistivity	392.799 Ω.cm
Sheet carrier concentration	$5.9682\times10^{11}\ cm^{-2}$
Majority mobility	1333.014 $cm^2/V\cdot s$
Bulk carrier concentration	$1.194\times10^{13}\ cm^{-3}$
Conductivity	0.003 $1/\Omega\cdot cm$
Type	N

4.3 สอบเทียบเครื่องมือ

ในการสอบเทียบเครื่องมือวัตถุประสงค์เพื่อต้องการความแม่นยำ ความคลาดเคลื่อนในการวัด โดยจะทำการสอบเทียบกับ Silicon wafer ซึ่งค่าถูกวัดมาแล้วจากระบบที่น่าเชื่อถือที่ American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ว่ามีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่วัดจากระบบที่เราสร้างขึ้นและมีความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ ก่อนอื่นต้องนำ Silicon wafer มาวางบนแผ่นวาง Sample และลวดเงินเชื่อมขั้วไฟฟ้าโดยใช้กาวเงินทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ให้กาวเงินแห้งสนิท จากนั้นค่อยนำไปวัด ซึ่งค่าที่เราทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service มีค่าตามตารางที่ 8 ซึ่งบางค่าที่ไม่ทราบก็สามารถอ้างอิงจากค่าที่ทราบได้ทั้งนั้น เนื่องจากค่าที่ไม่ทราบนั้นได้มาจากการคำนวณจากค่าที่เราทราบโดยไม่มีค่าอื่นมาเกี่ยวข้องทั้งนั้น

ตารางที่ 4.10 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service

Si wafer	Doping	Type	Resistivity (Ω.cm)	ความหนา (μm)	Bulk carrier concentration (cm^{-3})
ชิ้นที่ 1	Boron(B)	P	30-50	700	$1.33\text{x}10^{14}$ -$1.35\text{x}10^{15}$
ชิ้นที่ 2	Antimony(Sb)	N	300-700	500	$4.20\text{x}10^{12}$ -$4.27\text{x}10^{13}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 1

สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	ค่าจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้น	ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service
Sheet resistance (Ω)	618.48784	-
Resistivity (Ω.cm)	43.29415	30-50
Sheet carrier concentration cm^{-2}	1.099×10^{13}	-
Majority mobility $cm^2/V\cdot s$	426.00454	-
Bulk carrier concentration cm^{-3}	4.428×10^{14}	$1.33\times10^{14}-1.35\times10^{15}$
Conductivity (1 / Ω.cm)	0.0231	-
Type	P	P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 2

สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	ค่าจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้น	ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service
Sheet resistance (Ω)	7855.998	-
Resistivity (Ω.cm)	392.799	300-700
Sheet carrier concentration (cm^{-2})	5.968×10^{11}	-
Majority mobility ($cm^2/V\cdot s$)	1333.014	-
Bulk carrier concentration (cm^{-3})	1.194×10^{13}	4.20×10^{12} -4.27×10^{13}
Conductivity (1 / Ω.cm)	0.003	-
Type	N	N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการทดลอง

จากการทดลองเรื่องการพัฒนาระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นการทดลองเพื่อสร้างเครื่องมือขึ้นมาเพื่อสามารถใช้งานวัดได้จริง มีขั้นตอนการทดสอบระบบเครื่องมือที่สร้างขึ้น โดยทำการวัดแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ด้วยชิ้นงาน Si wafer สองชิ้นที่มีค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกัน ได้ผลการทดลองดังนี้

ค่า Sheet resistance ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 7855.998 โอห์ม และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Sheet resistance ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 618.488 โอห์ม และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Resistivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 392.799โอห์ม.ซม. และ 300-700 โอห์ม.ซม.

ค่า Resistivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 43.294 โอห์ม.ซม. และ 30 - 50 โอห์ม.ซม.

ค่า Sheet carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 5.968×10^{11} cm^{-2} และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

ค่า Sheet carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 1.099×10^{13} cm^{-2} และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Majority mobility ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 1333.014 cm^{-2} / โวลต์.วินาที และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Sheet resistance และค่า Sheet carrier concentration

ค่า Majority mobility ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 426.00 cm^{-2} / โวลต์.วินาที และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Sheet resistance และค่า Sheet carrier concentration

ค่า Bulk carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 1.193 x 10^{13} cm^{-3} และ 4.20x10^{126} - 4.27x10^{13} cm^{-3}

ค่า Bulk carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 2.428x 10^{14} cm^{-3} และ 1.33x10^{14} - 134x10^{14} cm^{-3}

ค่า Conductivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น และจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 0.00255 1 / โอห์ม.ซม. และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Conductivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 0.0231 1 / โอห์ม.ซม. และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ชนิดของสารกึ่งตัวนำของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ ชนิดเอ็น และชนิดเอ็น

ชนิดของสารกึ่งตัวนำของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ ชนิดพี และชนิดพี

จะเห็นได้ว่าจากการทดลองระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่เราสร้างขึ้นสามารถวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่น่าเชื่อถือจาก American

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

5.2 ข้อเสนอแนะ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน, ณัฐภัทร เร่งรัด, เสาวณีย์ท ไชยสลี. 2556 **"การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์."** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรม Visual studio 2010 สำหรับออกแบบ windows application ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบสนามแม่เหล็กและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

```
Imports System.Windows.Forms.TabPage
Imports System.IO
Imports System.IO.Ports
Imports System.Threading
Imports System.Math
Imports System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting
Imports Microsoft.Office.Core
Imports Microsoft.Office.Interop
Public Class Form1
    Private dmm As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488
    Private cur As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488
    Dim Rsheet As Double
    Dim Unit As String
    Dim R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, Ra, Rb, f As Double
    Dim VH1(), VH2(), VH3(), VH4(), VH5(), VH6(), VH7(), VH8(), VHa, VHb, VHc As Double
    Dim Rave As Double
    Dim Resistivity As Double
    Dim mobility As Double
    Dim n As Double
    Dim q As Double = 1.6 * 10 ^ (-19)
    Dim ln2 As Double = 0.6931471806
    Dim Vhall() As Double
    Dim Nave, NB As Double
    Dim d As Double
    Dim conductivity As Double
    Dim B As Double
    Dim min, max As Double
    Dim i, j As Integer
    Dim z As Double
    Dim a As Double
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Dim current() As Double
    Dim unit2 As Double
    Dim U As String
    Dim Va, Vb, Vc, V1(), V2(), V3(), V4(), V5(), V6(), V7(), V8() As Double
    Dim N1() As Double
    Dim l As Double
    Dim currenth() As Integer
    Dim t As Integer = 0
    Dim oXL As Excel.Application
    Dim oWB As Excel.Workbook
    Dim oSheet As Excel.Worksheet
    Dim oRng As Excel.Range
    Dim Vxcl(,), VHxcl(,), VHallxcl(,), nxcl(,), Ixcl(,), IHxcl(,), Rxcl(,) As String
    Dim Vhall2() As Double

    Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button2.Click
        Dim IODMM As String
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        Try
            IODMM = "GPIB::" & NumericUpDown1.Value.ToString()
            mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
            dmm = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
            dmm.IO() = mgr.Open(IODMM)
            dmm.IO.Timeout = 7000
            Button2.Enabled = False
            Delay(1)
            NumericUpDown1.Enabled = False
            Button2.BackColor = Color.PaleGreen

            Delay(0.5)
            Button2.Enabled = True


        Catch ex As Exception
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "DMM", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error)
        End Try
    End Sub

    Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button3.Click
        Dim IOCS As String
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        Try
            IOCS = "GPIB::" & NumericUpDown2.Value.ToString()
            mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
            cur = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
            cur.IO() = mgr.Open(IOCS)
            cur.IO.Timeout = 7000
            cur.WriteString("REN X")
            Delay(0.05)
            cur.WriteString("D1 X")
            Delay(0.05)
            cur.WriteString("V" + NumericUpDown3.Value.ToString() + ".00E+00 X")
            Delay(1)
            cur.WriteString("D0 X")
            Delay(0.05)
            Button3.BackColor = Color.PaleGreen

            NumericUpDown2.Enabled = False
            NumericUpDown3.Enabled = False
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "Current source",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        End Try
    End Sub

    Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button4.Click
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Try
            SerialPort1.PortName = "COM" & NumericUpDown4.Value.ToString
            Delay(0.5)
            Button4.Enabled = True
            SerialPort1.Open()
            SerialPort1.Write(0)
            SerialPort1.Close()

            Button4.BackColor = Color.PaleGreen
            NumericUpDown4.Enabled = False
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "Serial Port", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error)
        End Try
    End Sub



    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
        Button1.BackColor = Color.PaleGreen
        RadioButton1.Enabled = False
        RadioButton2.Enabled = False
        Dim s As Double
        Double.TryParse(txtCmin.Text, min)
        Double.TryParse(txtcMax.Text, max)
        Double.TryParse(resolution.Text, a)
        Dim k As Integer
        Double.TryParse(txtCmin.Text, min)
        Double.TryParse(txtcMax.Text, max)
        Double.TryParse(resolution.Text, a)
        Double.TryParse(TextBox3.Text, B)
        Double.TryParse(TextBox4.Text, d)
        z = ((max - min) / a)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Dim R() As Double
        ReDim Ixcl(z + 1, 1)
        ReDim Vxcl(z + 1, 1)
        ReDim Rxcl(z + 1, 1)
        'หน่วย ความหนา
        If RadioButton7.Checked Then
        ElseIf RadioButton8.Checked Then
            d = d * 10 ^ -4
        ElseIf RadioButton9.Checked Then
            d = d * 10 ^ -7
        End If
        '********************************************************** Van dar pauw
**********************************************************************'
        If RadioButton1.Checked = True Then
            oSheet = oWB.ActiveSheet
            oSheet.Name = ("Van Der Pauw")
            oSheet.Cells(1, 1).Value = "Current" & U
            oSheet.Cells(1, 2).Value = "V1"
            oSheet.Cells(1, 3).Value = "R1"
            oSheet.Cells(1, 4).Value = "V2"
            oSheet.Cells(1, 5).Value = "R2"
            oSheet.Cells(1, 6).Value = "V3"
            oSheet.Cells(1, 7).Value = "R3"
            oSheet.Cells(1, 8).Value = "V4"
            oSheet.Cells(1, 9).Value = "R4"
            oSheet.Cells(1, 10).Value = "V5"
            oSheet.Cells(1, 11).Value = "R5"
            oSheet.Cells(1, 12).Value = "V6"
            oSheet.Cells(1, 13).Value = "R6"
            oSheet.Cells(1, 14).Value = "V7"
            oSheet.Cells(1, 15).Value = "R7"
            oSheet.Cells(1, 16).Value = "V8"
            oSheet.Cells(1, 17).Value = "R8"
            With oSheet.Range("A1", "Q1")
                .Font.Bold = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            .ColumnWidth = "13"
            .VerticalAlignment = Excel.XlVAlign.xlVAlignCenter
        End With

        TabControl1.SelectTab(1)
        TabControl2.SelectTab(0)
        '************************************************************ 1
************************************************************'
        i = 1
        j = 0
        R1 = 0
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write(i)
        SerialPort1.Close()

        If max - min >= max Then
            ReDim V1(z - 1)
            ReDim R(z - 1)
            ReDim current(z - 1)
            For s = min To max Step a    "s คือกระแสที่ป้อน
                If s = 0 Then
                Else
                    s.ToString()
                    cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                    Delay(1)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    Va = dmm.ReadNumber
                    Delay(0.5)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    Vb = dmm.ReadNumber
                    Delay(0.5)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    Vc = dmm.ReadNumber
                    V1(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
                    R(j) = Format(V1(j) / (s * unit2), "#0.00000")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                current(j) = s
                ListBox2.Items.Add(V1(j) & "  V")
                ListBox1.Items.Add(current(j) & U)

                Ixcl(j, t) = current(j)
                oRng = oSheet.Range("A2", Reflection.Missing.Value)
                oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                oRng.Value = Ixcl

                Vxcl(j, t) = Format(V1(j), "#0.00000")
                oRng = oSheet.Range("B2", Reflection.Missing.Value)
                oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                oRng.Value = Vxcl

                Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
                oRng = oSheet.Range("C2", Reflection.Missing.Value)
                oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                oRng.Value = Rxcl.ToString

                Chart3.Series(0).Points.AddXY(s, V1(j))
                Chart3.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
                Chart3.Series(0).IsVisibleInLegend = True
                Chart1.Series(0).Points.AddXY(s, V1(j))
                Chart1.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
                Chart1.Series(0).IsVisibleInLegend = True
                R1 = R1 + R(j)
                j = j + 1

            End If
        Next
        R1 = Format(R1 / (z), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 2, 3).value = "ave" & R1
        TextBox21.Text = R1
        TextBox5.Text = R1
    Else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
ReDim V1(z)
ReDim R(z)
ReDim current(z)
For s = min To max Step a
    s.ToString()
    cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
    Delay(1)
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
    Va = dmm.ReadNumber
    Delay(0.5)
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
    Vb = dmm.ReadNumber
    Delay(0.5)
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
    Vc = dmm.ReadNumber
    V1(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
    R(j) = Format(V1(j) / (s * unit2), "#0.00000")
    current(j) = s
    ListBox2.Items.Add(V1(j) & " V")
    ListBox1.Items.Add(current(j) & U)

    Ixcl(j, t) = current(j)
    oRng = oSheet.Range("A2", Reflection.Missing.Value)
    oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
    oRng.Value = Ixcl

    Vxcl(j, t) = Format(V1(j), "#0.00000")
    oRng = oSheet.Range("B2", Reflection.Missing.Value)
    oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
    oRng.Value = Vxcl

    Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
    oRng = oSheet.Range("C2", Reflection.Missing.Value)
    oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
    oRng.Value = Rxcl
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart3.Series(0).Points.AddXY(s, V1(j))
            Chart3.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart3.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(0).Points.AddXY(s, V1(j))
            Chart1.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            R1 = R1 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R1 = Format(R1 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 3).value = "ave" & R1
        TextBox21.Text = R1
        TextBox5.Text = R1
    End If
    '********************************************************** 2
**********************************************************'

    i = 2
    j = 0
    R2 = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(i)
    SerialPort1.Close()

    If max - min >= max Then
        ReDim V2(z - 1)
        ReDim R(z - 1)
        For s = min To max Step a
            If s = 0 Then
            Else
                s.ToString()
                cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                Delay(1)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Va = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vc = dmm.ReadNumber
            V2(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V2(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox3.Items.Add(V2(j) & "  V")
            ListBox4.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V2(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("D2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("E2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart4.Series(0).Points.AddXY(s, V2(j))
            Chart4.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart4.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(1).Points.AddXY(s, V2(j))
            Chart1.Series(1).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(1).IsVisibleInLegend = True
            R2 = R2 + R(j)
            j = j + 1
        End If
    Next
    R2 = Format(R2 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 5).value = "ave" & R2
    TextBox6.Text = R2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    TextBox22.Text = R2
Else
    ReDim V2(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
        R(j) = Format(V2(j) / (s * unit2), "#0.00000")
        ListBox3.Items.Add(V2(j) & " V")
        ListBox4.Items.Add(s & U)

        Vxcl(j, t) = Format(V2(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("D2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = Vxcl

        Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("E2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = Rxcl

        Chart4.Series(0).Points.AddXY(s, V2(j))
        Chart4.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart4.Series(0).IsVisibleInLegend = True
        Chart1.Series(1).Points.AddXY(s, V2(j))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart1.Series(1).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(1).IsVisibleInLegend = True
            R2 = R2 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R2 = Format(R2 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 5).value = "ave" & R2
        TextBox22.Text = R2
        TextBox6.Text = R2
    End If
    '********************************************************** 3
**************************************************************'

    i = 3
    j = 0
    R3 = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(i)
    SerialPort1.Close()

    If max - min >= max Then
        ReDim V3(z - 1)
        ReDim R(z - 1)
        For s = min To max Step a
            If s = 0 Then
            Else
                s.ToString()
                cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                Delay(1)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                Va = dmm.ReadNumber
                Delay(0.5)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                Vb = dmm.ReadNumber
                Delay(0.5)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vc = dmm.ReadNumber
            V3(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V3(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox5.Items.Add(V3(j) & "  V")
            ListBox6.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V3(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("F2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("G2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart5.Series(0).Points.AddXY(s, V3(j))
            Chart5.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart5.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(2).Points.AddXY(s, V3(j))
            Chart1.Series(2).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(2).IsVisibleInLegend = True
            R3 = R3 + R(j)
            j = j + 1
        End If
    Next
    R3 = Format(R3 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 7).value = "ave" & R3
    TextBox23.Text = R3
    TextBox7.Text = R3
Else
    ReDim V3(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V3(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
        R(j) = Format(V3(j) / (s * unit2), "#0.00000")
        ListBox5.Items.Add(V3(j) & " V")
        ListBox6.Items.Add(s & U)

        Vxcl(j, t) = Format(V3(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("F2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = Vxcl

        Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("G2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = Rxcl

        Chart5.Series(0).Points.AddXY(s, V3(j))
        Chart5.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart5.Series(0).IsVisibleInLegend = True
        Chart1.Series(2).Points.AddXY(s, V3(j))
        Chart1.Series(2).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart1.Series(2).IsVisibleInLegend = True
        R3 = R3 + R(j)
        j = j + 1
    Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            R3 = Format(R3 / ((z + 1)), "#0.00000")
            oSheet.Cells(z + 3, 7).value = "ave" & R3
            TextBox23.Text = R3
            TextBox7.Text = R3
        End If
        '********************************************************** 4
**************************************************************'

        i = 4
        j = 0
        R4 = 0
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write(i)
        SerialPort1.Close()

        If max - min >= max Then
            ReDim V4(z - 1)
            ReDim R(z - 1)
            For s = min To max Step a
                If s = 0 Then
                Else
                    s.ToString()
                    cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                    Delay(1)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    Va = dmm.ReadNumber
                    Delay(0.5)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    Vb = dmm.ReadNumber
                    Delay(0.5)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    Vc = dmm.ReadNumber
                    V4(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
                    R(j) = Format(V4(j) / (s * unit2), "#0.00000")
                    ListBox7.Items.Add(V4(j) & "  V")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ListBox8.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V4(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("H2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("I2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart6.Series(0).Points.AddXY(s, V4(j))
            Chart6.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart6.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(3).Points.AddXY(s, V4(j))
            Chart1.Series(3).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(3).IsVisibleInLegend = True
            R4 = R4 + R(j)
            j = j + 1
        End If
    Next
    R4 = Format(R4 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 9).value = "ave" & R4
    TextBox24.Text = R4
    TextBox8.Text = R4
Else
    ReDim V4(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vc = dmm.ReadNumber
            V4(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V4(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox7.Items.Add(V4(j) & "  V")
            ListBox8.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V4(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("H2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("I2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart6.Series(0).Points.AddXY(s, V4(j))
            Chart6.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart6.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(3).Points.AddXY(s, V4(j))
            Chart1.Series(3).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(3).IsVisibleInLegend = True
            R4 = R4 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R4 = Format(R4 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 9).value = "ave" & R4
        TextBox24.Text = R4
        TextBox8.Text = R4
    End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
'********************************************************** 5
*****************************************************************'

i = 5
j = 0
R5 = 0
SerialPort1.Open()
SerialPort1.Write(i)
SerialPort1.Close()

If max - min >= max Then
    ReDim V5(z - 1)
    ReDim R(z - 1)
    For s = min To max Step a
        If s = 0 Then
        Else
            s.ToString()
            cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
            Delay(1)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Va = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vc = dmm.ReadNumber
            V5(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V5(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox9.Items.Add(V5(j) & "  V")
            ListBox10.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V5(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("J2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("K2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart7.Series(0).Points.AddXY(s, V5(j))
            Chart7.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart7.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(4).Points.AddXY(s, V5(j))
            Chart1.Series(4).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(4).IsVisibleInLegend = True
            R5 = R5 + R(j)
            j = j + 1
        End If
    Next
    R5 = Format(R5 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 11).value = "ave" & R5
    TextBox25.Text = R5
    TextBox9.Text = R5
Else
    ReDim V5(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Vc = dmm.ReadNumber
            V5(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V5(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox9.Items.Add(V5(j) & "  V")
            ListBox10.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V5(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("J2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("K2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart7.Series(0).Points.AddXY(s, V5(j))
            Chart7.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart7.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(4).Points.AddXY(s, V5(j))
            Chart1.Series(4).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(4).IsVisibleInLegend = True
            R5 = R5 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R5 = Format(R5 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 11).value = "ave" & R5
        TextBox25.Text = R5
        TextBox9.Text = R5
    End If
    '************************************************************ 6
************************************************************'

    i = 6
    j = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
R6 = 0
SerialPort1.Open()
SerialPort1.Write(i)
SerialPort1.Close()

If max - min >= max Then
    ReDim V6(z - 1)
    ReDim R(z - 1)
    For s = min To max Step a
        If s = 0 Then
        Else
            s.ToString()
            cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
            Delay(1)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Va = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vc = dmm.ReadNumber
            V6(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V6(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox11.Items.Add(V6(j) & "  V")
            ListBox12.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V6(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("L2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("M2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            oRng.Value = Rxcl

            Chart8.Series(0).Points.AddXY(s, V6(j))
            Chart8.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart8.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(5).Points.AddXY(s, V6(j))
            Chart1.Series(5).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(5).IsVisibleInLegend = True
            R6 = R6 + R(j)
            j = j + 1
        End If
    Next
    R6 = Format(R6 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 13).value = "ave" & R6
    TextBox26.Text = R6
    TextBox10.Text = R6
Else
    ReDim V6(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V6(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
        R(j) = Format(V6(j) / (s * unit2), "#0.00000")
        ListBox11.Items.Add(V6(j) & "  V")
        ListBox12.Items.Add(s & U)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Vxcl(j, t) = Format(V6(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("L2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("M2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart8.Series(0).Points.AddXY(s, V6(j))
            Chart8.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart8.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(5).Points.AddXY(s, V6(j))
            Chart1.Series(5).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(5).IsVisibleInLegend = True
            R6 = R6 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R6 = Format(R6 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 13).value = "ave" & R6
        TextBox26.Text = R6
        TextBox10.Text = R6
    End If
    '************************************************************ 7
************************************************************'

    i = 7
    j = 0
    R7 = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(i)
    SerialPort1.Close()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If max - min >= max Then
    ReDim V7(z - 1)
    ReDim R(z - 1)
    For s = min To max Step a
        If s = 0 Then
        Else
            s.ToString()
            cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
            Delay(1)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Va = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            Vc = dmm.ReadNumber
            V7(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
            R(j) = Format(V7(j) / (s * unit2), "#0.00000")
            ListBox13.Items.Add(V7(j) & " V")
            ListBox14.Items.Add(s & U)

            Vxcl(j, t) = Format(V7(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("N2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Vxcl

            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("O2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart9.Series(0).Points.AddXY(s, V7(j))
            Chart9.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart9.Series(0).IsVisibleInLegend = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart1.Series(6).Points.AddXY(s, V7(j))
            Chart1.Series(6).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(6).IsVisibleInLegend = True
            R7 = R7 + R(j)
            j = j + 1
        End If
    Next
    R7 = Format(R7 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 15).value = "ave" & R7
    TextBox27.Text = R7
    TextBox11.Text = R7
Else
    ReDim V7(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V7(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
        R(j) = Format(V7(j) / (s * unit2), "#0.00000")
        ListBox13.Items.Add(V7(j) & "  V")
        ListBox14.Items.Add(s & U)

        Vxcl(j, t) = Format(V7(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("N2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = Vxcl
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("O2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = Rxcl

            Chart9.Series(0).Points.AddXY(s, V7(j))
            Chart9.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart9.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(6).Points.AddXY(s, V7(j))
            Chart1.Series(6).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(6).IsVisibleInLegend = True
            R7 = R7 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R7 = Format(R7 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 15).value = "ave" & R7
        TextBox27.Text = R7
        TextBox11.Text = R7
    End If
    '************************************************************ 8
************************************************************'

    i = 8
    j = 0
    R8 = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(i)
    SerialPort1.Close()

    If max - min >= max Then
        ReDim V8(z - 1)
        ReDim R(z - 1)
        For s = min To max Step a
            If s = 0 Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Else
    s.ToString()
    cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
    Delay(1)
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
    Va = dmm.ReadNumber
    Delay(0.5)
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
    Vb = dmm.ReadNumber
    Delay(0.5)
    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
    Vc = dmm.ReadNumber
    V8(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
    R(j) = Format(V8(j) / (s * unit2), "#0.00000")
    ListBox15.Items.Add(V8(j) & " V")
    ListBox16.Items.Add(s & U)

    Vxcl(j, t) = Format(V8(j), "#0.00000")
    oRng = oSheet.Range("P2", Reflection.Missing.Value)
    oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
    oRng.Value = Vxcl

    Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
    oRng = oSheet.Range("Q2", Reflection.Missing.Value)
    oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
    oRng.Value = Rxcl

    Chart10.Series(0).Points.AddXY(s, V8(j))
    Chart10.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
    Chart10.Series(0).IsVisibleInLegend = True
    Chart1.Series(7).Points.AddXY(s, V8(j))
    Chart1.Series(7).ChartType = SeriesChartType.FastLine
    Chart1.Series(7).IsVisibleInLegend = True
    R8 = R8 + R(j)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            j = j + 1
        End If
    Next
    R8 = Format(R8 / (z), "#0.00000")
    oSheet.Cells(z + 2, 17).value = "ave" & R8
    TextBox28.Text = R8
    TextBox12.Text = R8
Else
    ReDim V8(z)
    ReDim R(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V8(j) = Format(((Va + Vb + Vc) / 3), "#0.00000")
        R(j) = Format(V8(j) / (s * unit2), "#0.00000")
        ListBox15.Items.Add(V8(j) & "  V")
        ListBox16.Items.Add(s & U)

        Vxcl(j, t) = Format(V8(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("P2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = Vxcl

        Rxcl(j, t) = Format(R(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("Q2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            oRng.Value = Rxcl

            Chart10.Series(0).Points.AddXY(s, V8(j))
            Chart10.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart10.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart1.Series(7).Points.AddXY(s, V8(j))
            Chart1.Series(7).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart1.Series(7).IsVisibleInLegend = True
            R8 = R8 + R(j)
            j = j + 1
        Next
        R8 = Format(R8 / ((z + 1)), "#0.00000")
        oSheet.Cells(z + 3, 17).value = "ave" & R8
        TextBox28.Text = R8
        TextBox12.Text = R8
    End If
    cur.WriteString("I+0.0000E-00 X")
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(0)
    SerialPort1.Close()
    Button1.BackColor = Color.LightCoral
    RadioButton1.Enabled = True
    RadioButton2.Enabled = True
    "คำนวน vanderpauw
    Ra = (R1 + R8 + R3 + R6) / 4
    Rb = (R2 + R7 + R4 + R5) / 4
    Rave = (Ra + Rb) / 2
    f = (1 - (ln2 / 2) * ((Ra - Rb) / (Ra + Rb)) ^ 2)
    Rsheet = Format(((Math.PI * Rave) / ln2) * f, "#0.00000")
    Resistivity = Format(Rsheet * d, "#0.00000")
    TextBox1.Text = Rsheet
    TextBox2.Text = Resistivity
    TextBox29.Text = Rsheet
    TextBox30.Text = Resistivity
Else
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        ReDim IHxcl(z + 1, 1)
        ReDim VHxcl(z + 1, 1)
        RadioButton1.Enabled = False
        RadioButton2.Enabled = False
        Button1.BackColor = Color.PaleGreen
        '********************************************************** Hall Effect
**************************************************************'
        If RadioButton2.Checked = True Then
            oSheet = oWB.Worksheets(2)
            oSheet.Name = ("Hall")
            oSheet.Cells(1, 1).Value = "Current" & U
            oSheet.Cells(1, 2).Value = "VH1"
            oSheet.Cells(1, 3).Value = "VH2"
            oSheet.Cells(1, 4).Value = "VH3"
            oSheet.Cells(1, 5).Value = "VH4"
            oSheet.Cells(1, 6).Value = "VH5"
            oSheet.Cells(1, 7).Value = "VH6"
            oSheet.Cells(1, 8).Value = "VH7"
            oSheet.Cells(1, 9).Value = "VH8"
            oSheet.Cells(1, 10).Value = "VHall"
            oSheet.Cells(1, 11).Value = "ความหนาแน่นพาหะ"

            With oSheet.Range("A1", "K1")
                .Font.Bold = True
                .ColumnWidth = "13"
                .VerticalAlignment = Excel.XlVAlign.xlVAlignCenter
            End With

            '********************************************************** A
**************************************************************'

        TabControl1.SelectTab(2)
        TabControl3.SelectTab(0)
        j = 0
        SerialPort1.Open()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
SerialPort1.Write("A")
SerialPort1.Close()


If max - min >= max Then
    ReDim currenth(z - 1)
    ReDim VH1(z - 1)
    For s = min To max Step a
        If s = 0 Then
        Else
            s.ToString()
            cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
            Delay(1)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHa = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHc = dmm.ReadNumber
            VH1(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")

            VHxcl(j, t) = Format(VH1(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("B2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            ListBox18.Items.Add(s & U)
            ListBox34.Items.Add(s & U)
            ListBox17.Items.Add(VH1(j) & "  V")
            currenth(j) = s

            IHxcl(j, t) = currenth(j)
            oRng = oSheet.Range("A2", Reflection.Missing.Value)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = IHxcl



            Chart11.Series(0).Points.AddXY(s, VH1(j))
            Chart11.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart11.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(0).Points.AddXY(s, VH1(j))
            Chart2.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(0).IsVisibleInLegend = True

            j = j + 1
        End If
    Next

Else
    ReDim currenth(z)
    ReDim VH1(z)

    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH1(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            VHxcl(j, t) = Format(VH1(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("B2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            ListBox18.Items.Add(s & U)
            ListBox17.Items.Add(VH1(j) & "  V")
            ListBox34.Items.Add(s & U)
            currenth(j) = s

            IHxcl(j, t) = currenth(j)
            oRng = oSheet.Range("A2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = IHxcl


            Chart11.Series(0).Points.AddXY(s, VH1(j))
            Chart11.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart11.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(0).Points.AddXY(s, VH1(j))
            Chart2.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(0).IsVisibleInLegend = True

            j = j + 1
        Next

    End If
    '************************************************************ B
**********************************************************************'


    j = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write("B")
    SerialPort1.Close()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If max - min >= max Then
    ReDim VH2(z - 1)
    For s = min To max Step a
        If s = 0 Then
        Else
            s.ToString()
            cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
            Delay(1)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHa = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHc = dmm.ReadNumber
            VH2(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
            ListBox20.Items.Add(s & U)
            ListBox19.Items.Add(VH2(j) & " V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH2(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("C2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart12.Series(0).Points.AddXY(s, VH2(j))
            Chart12.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart12.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(1).Points.AddXY(s, VH2(j))
            Chart2.Series(1).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(1).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Next


Else
    ReDim VH2(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")

        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH2(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
        ListBox20.Items.Add(s & U)
        ListBox19.Items.Add(VH2(j) & "  V")

        VHxcl(j, t) = Format(VH2(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("C2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = VHxcl

        Chart12.Series(0).Points.AddXY(s, VH2(j))
        Chart12.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart12.Series(0).IsVisibleInLegend = True
        Chart2.Series(1).Points.AddXY(s, VH2(j))
        Chart2.Series(1).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart2.Series(1).IsVisibleInLegend = True
        j = j + 1
    Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            End If
            '************************************************************ C
**********************************************************************'

            j = 0
            SerialPort1.Open()
            SerialPort1.Write("C")
            SerialPort1.Close()


            If max - min >= max Then
                ReDim VH3(z - 1)
                For s = min To max Step a
                    If s = 0 Then
                    Else
                        s.ToString()
                        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                        Delay(1)
                        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                        VHa = dmm.ReadNumber
                        Delay(0.5)
                        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                        VHb = dmm.ReadNumber
                        Delay(0.5)
                        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                        VHc = dmm.ReadNumber
                        VH3(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
                        ListBox22.Items.Add(s & U)
                        ListBox21.Items.Add(VH3(j) & "  V")

                        VHxcl(j, t) = Format(VH3(j), "#0.00000")
                        oRng = oSheet.Range("D2", Reflection.Missing.Value)
                        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                        oRng.Value = VHxcl
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart13.Series(0).Points.AddXY(s, VH3(j))
            Chart13.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart13.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(2).Points.AddXY(s, VH3(j))
            Chart2.Series(2).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(2).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
    Next


Else
    ReDim VH3(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH3(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
        ListBox22.Items.Add(s & U)
        ListBox21.Items.Add(VH3(j) & "  V")

        VHxcl(j, t) = Format(VH3(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("D2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = VHxcl
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart13.Series(0).Points.AddXY(s, VH3(j))
            Chart13.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart13.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(2).Points.AddXY(s, VH3(j))
            Chart2.Series(2).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(2).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        Next

    End If
    '********************************************************** D
**************************************************************'

    j = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write("D")
    SerialPort1.Close()


    If max - min >= max Then
        ReDim VH4(z - 1)
        For s = min To max Step a
            If s = 0 Then
            Else
                s.ToString()
                cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                Delay(1)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                VHa = dmm.ReadNumber
                Delay(0.5)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                VHb = dmm.ReadNumber
                Delay(0.5)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                VHc = dmm.ReadNumber
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            VH4(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
            ListBox24.Items.Add(s & U)
            ListBox23.Items.Add(VH4(j) & "  V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH4(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("E2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart14.Series(0).Points.AddXY(s, VH4(j))
            Chart14.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart14.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(3).Points.AddXY(s, VH4(j))
            Chart2.Series(3).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(3).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
    Next

Else
    ReDim VH4(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH4(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ListBox24.Items.Add(s & U)
            ListBox23.Items.Add(VH4(j) & "  V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH4(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("E2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart14.Series(0).Points.AddXY(s, VH4(j))
            Chart14.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart14.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(3).Points.AddXY(s, VH4(j))
            Chart2.Series(3).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(3).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        Next
    End If
    cur.WriteString("I+0.0000E-00 X")
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(9)
    SerialPort1.Close()
    Button1.BackColor = Color.Khaki
    MsgBox("กลับชิ้นงาน เสร็จแล้วคลิ๊ก OK", MsgBoxStyle.OkOnly)

    '********************************************************** กลับทิศสนามแม่เหล็ก
**********************************************************'

    '********************************************************** A
**********************************************************'
    Button1.BackColor = Color.PaleGreen
    j = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write("A")
    SerialPort1.Close()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If max - min >= max Then
    ReDim VH5(z - 1)
    For s = min To max Step a
        If s = 0 Then
        Else
            s.ToString()
            cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
            Delay(1)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHa = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHc = dmm.ReadNumber
            VH5(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
            ListBox26.Items.Add(s & U)
            ListBox25.Items.Add(VH5(j) & " V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH5(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("F2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart15.Series(0).Points.AddXY(s, VH5(j))
            Chart15.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart15.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(4).Points.AddXY(s, VH5(j))
            Chart2.Series(4).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(4).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Next


Else
    ReDim VH5(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH5(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
        ListBox26.Items.Add(s & U)
        ListBox25.Items.Add(VH5(j) & " V")

        VHxcl(j, t) = Format(VH5(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("F2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = VHxcl

        Chart15.Series(0).Points.AddXY(s, VH5(j))
        Chart15.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart15.Series(0).IsVisibleInLegend = True
        Chart2.Series(4).Points.AddXY(s, VH5(j))
        Chart2.Series(4).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart2.Series(4).IsVisibleInLegend = True
        j = j + 1
    Next
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        End If
        '************************************************************ B
**************************************************************'

        j = 0
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("B")
        SerialPort1.Close()


        If max - min >= max Then
            ReDim VH6(z - 1)
            For s = min To max Step a
                If s = 0 Then
                Else
                    s.ToString()
                    cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                    Delay(1)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    VHa = dmm.ReadNumber
                    Delay(0.5)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    VHb = dmm.ReadNumber
                    Delay(0.5)
                    dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                    VHc = dmm.ReadNumber
                    VH6(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
                    ListBox28.Items.Add(s & U)
                    ListBox27.Items.Add(VH6(j) & "  V")

                    VHxcl(j, t) = Format(VH6(j), "#0.00000")
                    oRng = oSheet.Range("G2", Reflection.Missing.Value)
                    oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                    oRng.Value = VHxcl
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart16.Series(0).Points.AddXY(s, VH6(j))
            Chart16.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart16.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(5).Points.AddXY(s, VH6(j))
            Chart2.Series(5).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(5).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
    Next


Else
    ReDim VH6(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH6(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
        ListBox28.Items.Add(s & U)
        ListBox27.Items.Add(VH6(j) & "  V")

        VHxcl(j, t) = Format(VH6(j), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("G2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = VHxcl

        Chart16.Series(0).Points.AddXY(s, VH6(j))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            Chart16.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart16.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(5).Points.AddXY(s, VH6(j))
            Chart2.Series(5).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(5).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        Next

    End If
    '********************************************************** C
**************************************************************'

    j = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write("C")
    SerialPort1.Close()


    If max - min >= max Then
        ReDim VH7(z - 1)
        For s = min To max Step a
            If s = 0 Then
            Else
                s.ToString()
                cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                Delay(1)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                VHa = dmm.ReadNumber
                Delay(0.5)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                VHb = dmm.ReadNumber
                Delay(0.5)
                dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
                VHc = dmm.ReadNumber
                VH7(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ListBox30.Items.Add(s & U)
            ListBox29.Items.Add(VH7(j) & "  V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH7(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("H2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart17.Series(0).Points.AddXY(s, VH7(j))
            Chart17.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart17.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(6).Points.AddXY(s, VH7(j))
            Chart2.Series(6).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(6).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
    Next

Else
    ReDim VH7(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHa = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.5)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
        VHc = dmm.ReadNumber
        VH7(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
        ListBox30.Items.Add(s & U)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ListBox29.Items.Add(VH7(j) & "  V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH7(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("H2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart17.Series(0).Points.AddXY(s, VH7(j))
            Chart17.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart17.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(6).Points.AddXY(s, VH7(j))
            Chart2.Series(6).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(6).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1

        Next
    End If
    '********************************************************* D
**************************************************************'

    j = 0
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write("D")
    SerialPort1.Close()


    If max - min >= max Then
        ReDim VH8(z - 1)
        For s = min To max Step a
            If s = 0 Then
            Else
                s.ToString()
                cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
                Delay(1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHa = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHc = dmm.ReadNumber
            VH8(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
            ListBox32.Items.Add(s & U)
            ListBox31.Items.Add(VH8(j) & "  V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH8(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("I2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart18.Series(0).Points.AddXY(s, VH8(j))
            Chart18.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart18.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(7).Points.AddXY(s, VH8(j))
            Chart2.Series(7).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(7).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1
        End If
    Next


Else
    ReDim VH8(z)
    For s = min To max Step a
        s.ToString()
        cur.WriteString("I" & s & "E" & Unit & "X")
        Delay(1)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            VHa = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHb = dmm.ReadNumber
            Delay(0.5)
            dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? DEF,DEF")
            VHc = dmm.ReadNumber
            VH8(j) = Format(((VHa + VHb + VHc) / 3), "#0.00000")
            ListBox32.Items.Add(s & U)
            ListBox31.Items.Add(VH8(j) & "  V")

            VHxcl(j, t) = Format(VH8(j), "#0.00000")
            oRng = oSheet.Range("I2", Reflection.Missing.Value)
            oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
            oRng.Value = VHxcl

            Chart18.Series(0).Points.AddXY(s, VH8(j))
            Chart18.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart18.Series(0).IsVisibleInLegend = True
            Chart2.Series(7).Points.AddXY(s, VH8(j))
            Chart2.Series(7).ChartType = SeriesChartType.FastLine
            Chart2.Series(7).IsVisibleInLegend = True
            j = j + 1

        Next

    End If
    cur.WriteString("I+0.0000E-00 X")
    SerialPort1.Open()
    SerialPort1.Write(0)
    SerialPort1.Close()
    Button1.BackColor = Color.LightCoral
    RadioButton1.Enabled = True
    RadioButton2.Enabled = True
End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
"คำนวน Vhall

If max - min >= max Then
    ReDim Vhall(z - 1)
    ReDim N1(z - 1)
    ReDim VHallxcl(z, 1)
    ReDim nxcl(z, 1)
    ReDim Vhall2(z - 1)
    For k = 0 To z - 1

        Vhall(k) = Format(((VH1(k) + VH2(k) - VH5(k) - VH6(k)) + (VH3(k) + VH4(k) -
VH7(k) - VH8(k)) / 8), "#0.00000")
        ListBox33.Items.Add(Vhall(k) & "  V")

        N1(k) = (((Math.Abs((currenth(k) * B * 4 * 10 ^ -8) / (q * (Vhall(k))))) * unit2))

        ListBox35.Items.Add(N1(k) & "  cm-2")

        VHallxcl(k, t) = Format(Vhall(k), "#0.00000")
        oRng = oSheet.Range("J2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = VHallxcl

        nxcl(k, t) = Format(N1(k), "#0.00000000")
        oRng = oSheet.Range("K2", Reflection.Missing.Value)
        oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
        oRng.Value = nxcl

        Nave = Nave + N1(k)

    Next
    Nave = Format((Nave / z), "#0.00000000")
    NB = Nave / d
    oSheet.Cells(z + 3, 11).value = Nave
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            TextBox31.Text = Nave
            TextBox35.Text = NB
        Else
            ReDim Vhall(z)
            ReDim N1(z)
            ReDim VHallxcl(z + 1, 1)
            ReDim nxcl(z, 1)
            ReDim Vhall2(z)
            For k = 0 To z

                Vhall(k) = Format(((VH1(k) + VH2(k) - VH5(k) - VH6(k)) + (VH3(k) + VH4(k) -
VH7(k) - VH8(k)) / 8), "#0.00000")
                ListBox33.Items.Add(Vhall(k) & "  V")

                N1(k) = (((Math.Abs((currenth(k) * B * 4 * 10 ^ -8) / (q * (Vhall(k))))) * unit2))
                ListBox35.Items.Add(N1(k) & "  cm-2")

                VHallxcl(k, t) = Format(Vhall(k), "#0.00000")
                oRng = oSheet.Range("J2", Reflection.Missing.Value)
                oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                oRng.Value = VHallxcl

                nxcl(k, t) = Format(N1(k), "#0.00000000")
                oRng = oSheet.Range("K2", Reflection.Missing.Value)
                oRng = oRng.Resize(z + 1, 1)
                oRng.Value = nxcl

                Nave = Nave + N1(k)
            Next
            Nave = Format((Nave / (z + 1)), "#0.00000000")
            NB = Nave / d
            oSheet.Cells(z + 3, 11).value = Nave
            TextBox31.Text = Nave.ToString
            TextBox35.Text = NB.ToString
        End If
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    If Vhall(0) > 0 Then
        TextBox13.Text = "P"
    ElseIf Vhall(0) < 0 Then
        TextBox13.Text = "N"
    End If
    mobility = Format(1 / (q * Nave * Rsheet), "#0.00000")
    conductivity = Format(1 / Resistivity, "#0.00000")
    TextBox32.Text = mobility.ToString
    TextBox33.Text = Nave.ToString
    TextBox34.Text = conductivity.ToString

End If

oSheet = oWB.Worksheets(3)
oSheet.Name = ("Result")
oSheet.Cells(1, 1).Value = "SHEET RESISTANCE (ohm)"
oSheet.Cells(1, 2).Value = "RESISTIVITY (ohm*cm)"
oSheet.Cells(1, 3).Value = "MOBILITY (cm2/V-s)"
oSheet.Cells(1, 4).Value = "SHEET CARRIER CONCENTRATION (cm^-2)"
oSheet.Cells(1, 5).Value = "BULK CARRIER CONCENTRATION (cm^-3)"
oSheet.Cells(1, 6).Value = "CONDUCTIVITY (cm-3)"
oSheet.Cells(1, 7).Value = "TYPE"
With oSheet.Range("A1", "G1")
    .Font.Bold = True
    .Font.Color = Color.Blue

    .ColumnWidth = "15"
    .VerticalAlignment = Excel.XlVAlign.xlVAlignCenter

End With
oSheet.Cells(2, 1).Value = Rsheet.ToString
oSheet.Cells(2, 2).Value = Resistivity.ToString
oSheet.Cells(2, 3).Value = mobility.ToString
oSheet.Cells(2, 4).Value = Nave.ToString
oSheet.Cells(2, 5).Value = NB.ToString
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        oSheet.Cells(2, 6).Value = conductivity.ToString
        oSheet.Cells(2, 7).Value = TextBox13.Text

    End Sub
    Private Sub RadioButton3_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles RadioButton3.CheckedChanged
        Unit = "-03"
        unit2 = 10 ^ (Unit)
        U = "  mA"
    End Sub

    Private Sub RadioButton4_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles RadioButton4.CheckedChanged
        Unit = "-06"
        unit2 = 10 ^ (Unit)
        U = "  µA"
    End Sub


    Private Sub RadioButton5_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles RadioButton5.CheckedChanged
        Unit = "-09"
        unit2 = 10 ^ (Unit)
        U = "  nA"
    End Sub
    Private Sub RadioButton6_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles RadioButton6.CheckedChanged
        Unit = "-12"
        unit2 = 10 ^ (Unit)
        U = "  pA"
    End Sub
    Private Sub Form1_Load(ByVal sender As Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles Me.Load
        oXL = CreateObject("Excel.Application")
        oWB = oXL.Workbooks.Add
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write(0)
        SerialPort1.Close()
    End Sub

    Private Sub Button5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button5.Click
        cur.WriteString("I+0.0000E-00 X")
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write(0)
        SerialPort1.Close()
        If CheckBox1.Checked Then
            "****หน้า vanderpauw รวม*****
            Chart1.Series(0).Points.Clear()
            Chart1.Series(1).Points.Clear()
            Chart1.Series(2).Points.Clear()
            Chart1.Series(3).Points.Clear()
            Chart1.Series(4).Points.Clear()
            Chart1.Series(5).Points.Clear()
            Chart1.Series(6).Points.Clear()
            Chart1.Series(7).Points.Clear()

            TextBox21.Clear()
            TextBox22.Clear()
            TextBox23.Clear()
            TextBox24.Clear()
            TextBox25.Clear()
            TextBox26.Clear()
            TextBox27.Clear()
            TextBox28.Clear()

            TextBox29.Clear()
            TextBox30.Clear()

            "***หน้า vanderpauw 1-8*****
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Chart3.Series(0).Points.Clear()
Chart4.Series(0).Points.Clear()
Chart5.Series(0).Points.Clear()
Chart6.Series(0).Points.Clear()
Chart7.Series(0).Points.Clear()
Chart8.Series(0).Points.Clear()
Chart9.Series(0).Points.Clear()
Chart10.Series(0).Points.Clear()
''R1-8
TextBox5.Clear()
TextBox6.Clear()
TextBox7.Clear()
TextBox8.Clear()
TextBox9.Clear()
TextBox10.Clear()
TextBox11.Clear()
TextBox12.Clear()
''current&v1-8
ListBox1.Items.Clear()
ListBox2.Items.Clear()
ListBox3.Items.Clear()
ListBox4.Items.Clear()
ListBox5.Items.Clear()
ListBox6.Items.Clear()
ListBox7.Items.Clear()
ListBox8.Items.Clear()
ListBox9.Items.Clear()
ListBox10.Items.Clear()
ListBox11.Items.Clear()
ListBox12.Items.Clear()
ListBox13.Items.Clear()
ListBox14.Items.Clear()
ListBox15.Items.Clear()
ListBox16.Items.Clear()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    'หน้า result
    TextBox1.Clear()
    TextBox2.Clear()
End If

If CheckBox2.Checked Then

    '****หน้า hall รวม*****
    Chart2.Series(0).Points.Clear()
    Chart2.Series(1).Points.Clear()
    Chart2.Series(2).Points.Clear()
    Chart2.Series(3).Points.Clear()
    Chart2.Series(4).Points.Clear()
    Chart2.Series(5).Points.Clear()
    Chart2.Series(6).Points.Clear()
    Chart2.Series(7).Points.Clear()

    ListBox33.Items.Clear()
    ListBox34.Items.Clear()
    ListBox35.Items.Clear()
    TextBox31.Clear()

    'หน้า hall 1-8*****
    Chart11.Series(0).Points.Clear()
    Chart12.Series(0).Points.Clear()
    Chart13.Series(0).Points.Clear()
    Chart14.Series(0).Points.Clear()
    Chart15.Series(0).Points.Clear()
    Chart16.Series(0).Points.Clear()
    Chart17.Series(0).Points.Clear()
    Chart18.Series(0).Points.Clear()
    'current&Vh1-8
    ListBox17.Items.Clear()
    ListBox18.Items.Clear()
    ListBox19.Items.Clear()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            ListBox20.Items.Clear()
            ListBox21.Items.Clear()
            ListBox22.Items.Clear()
            ListBox23.Items.Clear()
            ListBox24.Items.Clear()
            ListBox25.Items.Clear()
            ListBox26.Items.Clear()
            ListBox27.Items.Clear()
            ListBox28.Items.Clear()
            ListBox29.Items.Clear()
            ListBox30.Items.Clear()
            ListBox31.Items.Clear()
            ListBox32.Items.Clear()



            "result
            TextBox32.Clear()
            TextBox33.Clear()
            TextBox34.Clear()
            TextBox35.Clear()

        End If

    End Sub

    Private Sub Button6_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button6.Click

        With SaveFileDialog1
            .Filter = "Excel File(*.xlsx)|*.xlsx"
            .Title = "บันทึกไฟล์"
            .AddExtension = True
            .DefaultExt = ".lxsx"
            .FileName = "*.xlsx"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            .ValidateNames = True
            .OverwritePrompt = True

        End With
        If SaveFileDialog1.ShowDialog = Windows.Forms.DialogResult.OK Then
            Dim filename As String = SaveFileDialog1.FileName

        End If

        oWB.SaveAs(SaveFileDialog1.FileName())

    End Sub

    Private Sub Form1_FormClosing(ByVal sender As Object, ByVal aaa As
FormClosingEventArgs) Handles Me.FormClosing
        Dim xlp() As Process = Process.GetProcessesByName("EXCEL")
        Dim msgResult As DialogResult
        msgResult = MessageBox.Show("Do you want exit program ", "Exit",
MessageBoxButtons.OKCancel, MessageBoxIcon.Question)
        If msgResult = DialogResult.OK Then
            aaa.Cancel = False
            For Each Process As Process In xlp
                Process.Kill()
                If Process.GetProcessesByName("EXCEL").Count = 0 Then
                    Exit For
                End If
            Next
        Else
            aaa.Cancel = True
        End If
    End Sub


End Class
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Arduino 1.6.4 สำหรับควบคุมการทำงานของไมโครคอนเทลเลอ

```
int f;


void setup()

{

  Serial.begin(115200);

    pinMode(22,OUTPUT);

    pinMode(23,OUTPUT);

    pinMode(24,OUTPUT);

    pinMode(25,OUTPUT);

    pinMode(26,OUTPUT);

    pinMode(27,OUTPUT);

    pinMode(28,OUTPUT);

    pinMode(29,OUTPUT);

    pinMode(30,OUTPUT);

    pinMode(31,OUTPUT);

    pinMode(32,OUTPUT);

    pinMode(38,OUTPUT);

    pinMode(34,OUTPUT);

    pinMode(35,OUTPUT);

    pinMode(36,OUTPUT);

    pinMode(37,OUTPUT);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  pinMode(40,OUTPUT);
  pinMode(41,OUTPUT);
  pinMode(42,OUTPUT);
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,LOW);
  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);
  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,LOW);
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,LOW);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void loop(){
 start:
  if (Serial.available()>0){
    f=Serial.read();
    if (f==48) // 0
    {
      digitalWrite(22,LOW);
      digitalWrite(23,LOW);
      digitalWrite(24,LOW);
      digitalWrite(25,LOW);
      digitalWrite(26,LOW);
      digitalWrite(27,LOW);
      digitalWrite(28,LOW);
      digitalWrite(29,LOW);
      digitalWrite(30,LOW);
      digitalWrite(31,LOW);
      digitalWrite(32,LOW);
      digitalWrite(38,LOW);
      digitalWrite(34,LOW);
      digitalWrite(35,LOW);
      digitalWrite(36,LOW);
      digitalWrite(37,LOW);
      digitalWrite(40,HIGH);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,LOW);
  Serial.flush();
}

 if (f==49) // 1
{
  digitalWrite(22,HIGH);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,HIGH);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,LOW);
  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,HIGH);
  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,HIGH);
  digitalWrite(37,LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,HIGH);
  Serial.flush();
}

 if (f==50) //2
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,HIGH);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,HIGH);
  digitalWrite(29,LOW);
  digitalWrite(30,HIGH);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);
  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(37,HIGH);
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,HIGH);
  Serial.flush();
}

 if (f==51)//3
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,HIGH);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,HIGH);
  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,HIGH);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);
  digitalWrite(34,HIGH);
  digitalWrite(35,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    digitalWrite(36,LOW);
    digitalWrite(37,LOW);
    digitalWrite(40,LOW);
    digitalWrite(41,LOW);
    digitalWrite(42,HIGH);
    Serial.flush();
  }

if (f==52) //4
  {
    digitalWrite(22,LOW);
    digitalWrite(23,LOW);
    digitalWrite(24,LOW);
    digitalWrite(25,HIGH);
    digitalWrite(26,HIGH);
    digitalWrite(27,LOW);
    digitalWrite(28,LOW);
    digitalWrite(29,LOW);
    digitalWrite(30,LOW);
    digitalWrite(31,LOW);
    digitalWrite(32,HIGH);
    digitalWrite(38,LOW);
    digitalWrite(34,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(35,HIGH);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,LOW);
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,HIGH);
  Serial.flush();
}

if (f==53) //5
{
  digitalWrite(22,HIGH);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,HIGH);
  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,HIGH);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,HIGH);
  digitalWrite(37,LOW);
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,HIGH);
  Serial.flush();
}

if (f==54) //6
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,HIGH);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,HIGH);
  digitalWrite(29,LOW);
  digitalWrite(30,HIGH);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    digitalWrite(38,LOW);
    digitalWrite(34,LOW);
    digitalWrite(35,HIGH);
    digitalWrite(36,LOW);
    digitalWrite(37,LOW);
    digitalWrite(40,LOW);
    digitalWrite(41,LOW);
    digitalWrite(42,HIGH);
    Serial.flush();
  }
  if (f==55) //7
  {
    digitalWrite(22,LOW);
    digitalWrite(23,LOW);
    digitalWrite(24,HIGH);
    digitalWrite(25,LOW);
    digitalWrite(26,LOW);
    digitalWrite(27,HIGH);
    digitalWrite(28,LOW);
    digitalWrite(29,LOW);
    digitalWrite(30,LOW);
    digitalWrite(31,LOW);
    digitalWrite(32,LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(38,HIGH);
  digitalWrite(34,HIGH);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,LOW);
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,HIGH);
  Serial.flush();
}
if (f==56) //8
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,HIGH);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,HIGH);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,LOW);
  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,HIGH);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(38,LOW);
  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,HIGH);
  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,LOW);
  digitalWrite(42,HIGH);
  Serial.flush();
}
if (f==65) //A V24 I31
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,HIGH);
  digitalWrite(25,LOW);

  digitalWrite(26,HIGH);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,LOW);

  digitalWrite(30,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(31,HIGH);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);

  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,HIGH);

  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,HIGH);
  digitalWrite(42,LOW);
  Serial.flush();
}
if (f==66) //B V24 I13
{
  digitalWrite(22,HIGH);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);

  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(28,HIGH);
  digitalWrite(29,LOW);

  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,HIGH);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);

  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,HIGH);

  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,HIGH);
  digitalWrite(42,LOW);
  Serial.flush();
}
if (f==67) //C V13 I24
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,HIGH);
  digitalWrite(24,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(25,LOW);


  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,HIGH);


  digitalWrite(30,HIGH);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);


  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,HIGH);
  digitalWrite(37,LOW);


  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,HIGH);
  digitalWrite(42,LOW);
  Serial.flush();
}
  if (f==68) //D V13 I42
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,HIGH);

  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,HIGH);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,LOW);

  digitalWrite(30,HIGH);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);

  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,HIGH);
  digitalWrite(37,LOW);

  digitalWrite(40,LOW);
  digitalWrite(41,HIGH);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  digitalWrite(42,LOW);
  Serial.flush();
}
if (f==57) //  9 Blink
{
  digitalWrite(22,LOW);
  digitalWrite(23,LOW);
  digitalWrite(24,LOW);
  digitalWrite(25,LOW);
  digitalWrite(26,LOW);
  digitalWrite(27,LOW);
  digitalWrite(28,LOW);
  digitalWrite(29,LOW);
  digitalWrite(30,LOW);
  digitalWrite(31,LOW);
  digitalWrite(32,LOW);
  digitalWrite(38,LOW);
  digitalWrite(34,LOW);
  digitalWrite(35,LOW);
  digitalWrite(36,LOW);
  digitalWrite(37,LOW);

  digitalWrite(41,LOW);
```

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        digitalWrite(42,LOW);
        Blink:
        digitalWrite(40,HIGH);
        delay(250);
        digitalWrite(40,LOW);
        delay(250);
        Serial.flush();
          if(Serial.available()>0)
          {
            goto start;
          }
        goto Blink;
    }
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Visual studio 2010 สำหรับแสกนแม่เหล็ก

```
Imports System.Data
Imports System.Data.SqlClient
Imports Microsoft.Office.Interop
Public Class Form1
    Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
    Dim mmc As Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
    Dim ioadderss As String
    Dim connector As PC5180Lib.PC5180Connector = Nothing
    Dim rangeY As Integer = 0
    Dim Dgauss(,) As Object
    Dim gauss() As String



    Private Sub btnOpenPort_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnOpenPort.Click
        ioadderss = "GPIB0::" & cbxNumPort.SelectedItem.ToString
        mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        mmc = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
        mmc.IO() = mgr.Open(ioadderss)
        mmc.IO.Timeout = 7000
        MsgBox("IO Address Ture", MsgBoxStyle.OkOnly)
    End Sub

    Private Sub btnscan_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnscan.Click
        Try
            connector = New PC5180Lib.PC5180Connector
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect to PC5180: (" & ex.Message & ")")
            MsgBox("Auto exit program ", MsgBoxStyle.Exclamation)
            Environment.Exit(0)
        End Try
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Dim StpX As Double                                  '--ความละเอียดแกน X
Dim StpY As Double                                  '--ความละเอียดแกน Y
Double.TryParse(txtAxisX.Text, StpX)
Double.TryParse(txtAxisY.Text, StpY)
Dim goX As Double = (-500) * StpX
Dim backX As Double = -goX
Dim goy As Double = StpY * (500)
Dim z As Integer
Dim x As Double
Dim y As Double
Dim i As Integer
Integer.TryParse(txtDX.Text, x)
Integer.TryParse(txtDY.Text, y)
Dim y2 As Integer
Dim objApp As Excel.Application
Dim objBook As Excel._Workbook
Dim objBooks As Excel.Workbooks
Dim objSheets As Excel.Sheets
Dim objSheet As Excel._Worksheet
Dim range As Excel.Range
objApp = New Excel.Application()
objBooks = objApp.Workbooks
objBook = objBooks.Add
objSheets = objBook.Worksheets
objSheet = objSheets(1)
range = objSheet.Range("A1", Reflection.Missing.Value)

    x = x / StpX                                    '--จำนวนครั้งการแสกน axis-
X
    y = y / StpY                                    '--จำนวนครั้งการแสกน axis-
Y
    range = range.Resize(x, y)
    ReDim Dgauss(0 To y - 1, 0 To x - 1)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
If (y Mod 2 = 0) Then

    y2 = (y - 2) / 2
    For z = 1 To y2 Step 1
        For i = 0 To x - 1 Step 1
            ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
            gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
            Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
            mmc.WriteString("A:WP" & goX.ToString & "P0")
            System.Threading.Thread.Sleep(500)
            If i >= x - 1 Then
                gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
                mmc.WriteString("P:14P0")
                mmc.WriteString("P:15P0")
                mmc.WriteString("A:WP0P" & goy.ToString)
                System.Threading.Thread.Sleep(500)
                rangeY = rangeY + 1
            End If
        Next
        For i = x - 1 To 0 Step -1
            ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
            gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
            Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
            mmc.WriteString("A:WP" & backX.ToString & "P0")
            System.Threading.Thread.Sleep(500)
            If i <= 0 Then
                gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
                mmc.WriteString("P:14P0")
                mmc.WriteString("P:15P0")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            mmc.WriteString("A:WP0P" & goy.ToString)
            System.Threading.Thread.Sleep(500)
            rangeY = rangeY + 1
        End If
    Next
Next
ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
For i = 0 To x - 1 Step 1
    gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
    Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
    mmc.WriteString("P:14P0")
    mmc.WriteString("P:15P0")
    mmc.WriteString("A:WP" & goX.ToString & "P0")
    System.Threading.Thread.Sleep(500)
    If i >= x - 1 Then
        gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
        Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP0P" & goy.ToString)
        System.Threading.Thread.Sleep(500)
        rangeY = rangeY + 1
    End If
Next
For i = x - 1 To 0 Step -1
    ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
    gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
    Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
    mmc.WriteString("P:14P0")
    mmc.WriteString("P:15P0")
    mmc.WriteString("A:WP" & backX.ToString & "P0")
    System.Threading.Thread.Sleep(500)
    If i = 0 Then
        gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
        Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        End If
    Next
Else
    y2 = (y - 2) / 2
    For z = 1 To y2 Step 1
        For i = 0 To x - 1 Step 1
            ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
            gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
            Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
            mmc.WriteString("A:WP" & goX.ToString & "P0")
            System.Threading.Thread.Sleep(500)
            If i >= x - 1 Then
                gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
                mmc.WriteString("P:14P0")
                mmc.WriteString("P:15P0")
                mmc.WriteString("A:WP0P" & goy.ToString)
                System.Threading.Thread.Sleep(500)
                rangeY = rangeY + 1
            End If
        Next
        For i = x - 1 To 0 Step -1
            ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
            gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
            Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
            mmc.WriteString("A:WP" & backX.ToString & "P0")
            System.Threading.Thread.Sleep(500)
            If i <= 0 Then
                gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
                mmc.WriteString("P:14P0")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
                mmc.WriteString("P:15P0")
                mmc.WriteString("A:WP0P" & goy.ToString)
                System.Threading.Thread.Sleep(500)
                rangeY = rangeY + 1
            End If
        Next
    Next
    For i = 0 To x - 1 Step 1
        ReDim Preserve gauss(0 To x - 1)
        gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
        Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP" & goX.ToString & "P0")
        System.Threading.Thread.Sleep(500)
        If i = x - 1 Then
            gauss(i) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
            Dgauss(rangeY, i) = gauss(i)
        End If
    Next

End If
range.Value = Dgauss
objApp.Visible = True
End Sub

Private Sub btnRWXY_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnRWXY.Click
    mmc.WriteString("P:14P0")
    mmc.WriteString("P:15P0")
    mmc.WriteString("A:WP30000P0")
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP-30000P0")
    End Sub

    Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button2.Click
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP0P30000")
    End Sub

    Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button3.Click
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP0P-30000")

    End Sub


    Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs)
        killxcl()

    End Sub
    Private Sub killxcl() 'ไว้ลบ process ของ computer
        Dim xlp() As Process = Process.GetProcessesByName("EXCEL")

        For Each Process As Process In xlp
            Process.Kill()
            If Process.GetProcessesByName("EXCEL").Count = 0 Then
                Exit For
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
            End If
        Next
    End Sub

    Private Sub Form1_FormClosing(ByVal sender As Object, ByVal aaa As
FormClosingEventArgs) Handles Me.FormClosing
        Dim xlp() As Process = Process.GetProcessesByName("EXCEL")
        Dim msgResult As DialogResult
        msgResult = MessageBox.Show("Do you want exit program ", "Exit",
MessageBoxButtons.OKCancel, MessageBoxIcon.Question)
        If msgResult = DialogResult.OK Then
            aaa.Cancel = False
            For Each Process As Process In xlp
                Process.Kill()
                If Process.GetProcessesByName("EXCEL").Count = 0 Then
                    Exit For
                End If
            Next
        Else
            aaa.Cancel = True
        End If
    End Sub
End Class
```

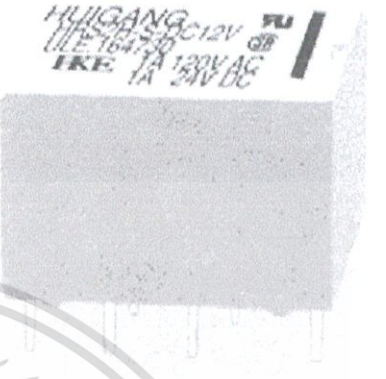
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

HRS2(H) Relay

1.COIL DATA

1-1.Nominal Voltage	3 VDC to 24 VDC
1-2.Coil Resistance	Refer to Table 1
1-3.Operate Voltage	Refer to Table 1
1-4.Release Voltage	Refer to Table 1
1-5.Nominal Power Consumption	150 to 360 mW



HRS2(H) Relay

2.CONTACT DATA

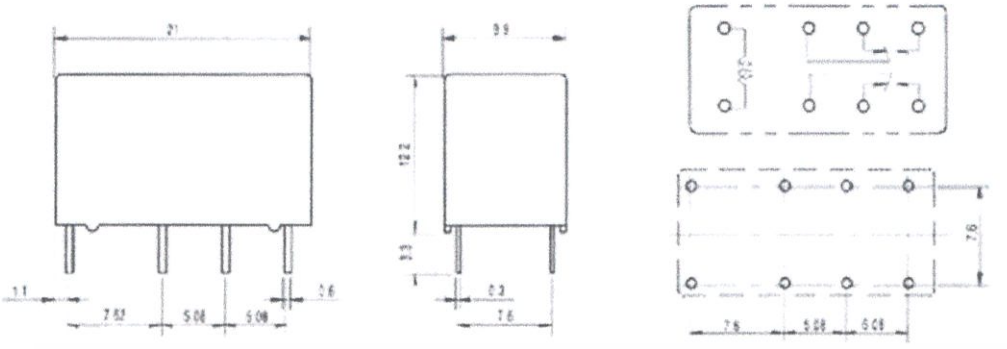
2-1.Contact Arrangement	2 Form C
2-2.Contact Material	AuAg
2-3.Contact Rating	1A 24 VDC / 120VAC
2-4.Max. Switching Voltage	60 VDC / 120 VAC
2-5.Max. Switching Current	2A
2-6.Max. Switching Power	60 VA , 24W
2-7.Contact Resistance (Initial)	100 mΩ at 6 VDC 1A
2-8.Life Expectancy Electrical	100,000 operations at nominal load
2-8.Life Expectancy Mechanical	10,000,000 operations

3.GENERAL DATA

3-1.Insulation Resistance	Min.100MΩ at 500 VDC
3-2.Dielectric Strength	1,000VAC , 1min between open contact 1,500VAC , 1min between contact and coil
3-3.Surge Strength	2,000 VAC (20 μs)
3-4.Operate Time	Max. 6ms
3-5.Release Time	Max. 4ms
3-6.Temperature Range	-30 to +60 ๐
3-7.Shock Resistance	15G
3-8.Vibration Resistance	10 - 55 Hz , Amplitude 1.5mm
3-9.Weight	5 gr.
3-10.Safety Standard	UL NO. E164730 CSA NO. LR109368

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.DIMENSIONS (in mm)



5.ORDERING CODE

HRS2 H- S DC 3V ∩∩∩∩

∩∩ NOMINAL VOLTAGE:
DC3V , DC5V , DC6V , DC9V , DC12V , DC24V

∩∩ ENCLOSURE
S --- WASHABLE

∩∩ COIL
NIL ---- STANDARD TYPE
H ------ HIGH SENSITIVE TYPE (150 mW , 200 mW)

∩∩ TYPE

6.COIL DATA CHART

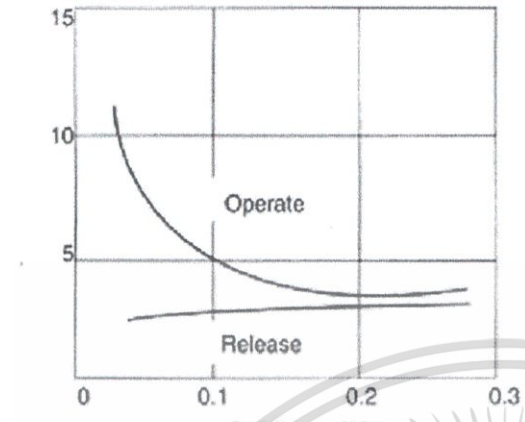
ORDERING CODE	COIL NOMINAL VDC	COIL RESISTANCE Ω +/- 10%	OPERATE VOLTAGE VDC	RELEASE VOLTAGE VDC	COIL NOMINAL mW
HRS2-S DC3V	3	25	2.25	0.30	360
HRS2-S DC5V	5	70	3.75	0.50	
HRS2-S DC6V	6	100	4.50	0.60	
HRS2-S DC9V	9	220	6.75	0.90	
HRS2-S DC12V	12	400	9.00	1.20	
HRS2-S DC24V	24	1600	18.00	2.40	
HRS2H-S DC3V	3	45	2.25	0.30	200
HRS2H-S DC5V	5	120	3.75	0.50	
HRS2H-S DC6V	6	180	4.50	0.60	
HRS2H-S DC9V	9	400	6.75	0.90	
HRS2H-S DC12V	12	700	9.00	1.20	
HRS2H-S DC24V	24	2800	18.00	2.40	

Table 1

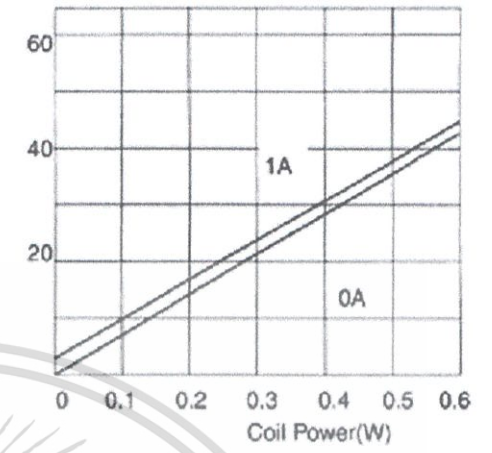
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.HRS2(H) CHARACTERISTIC DATA

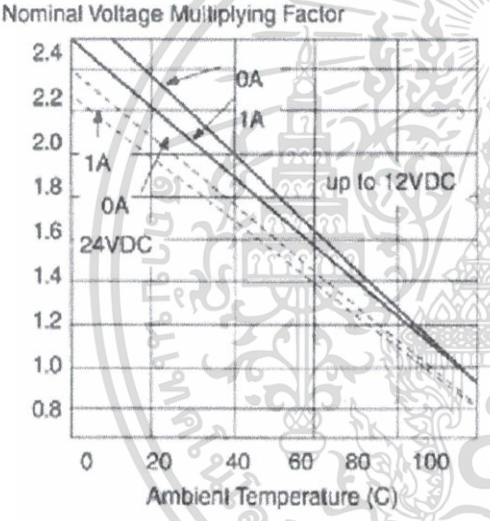
Timing



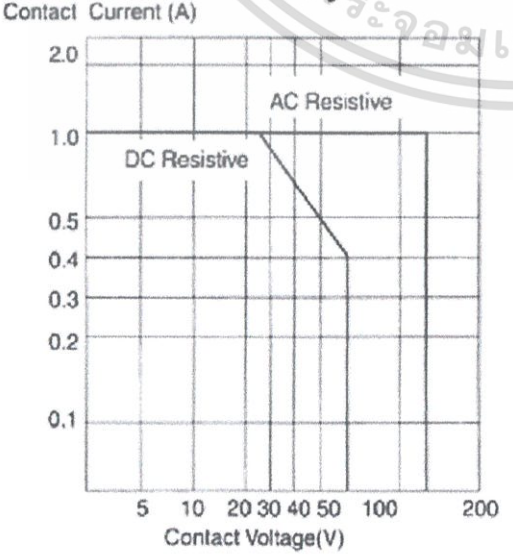
Coil Temperature Rise



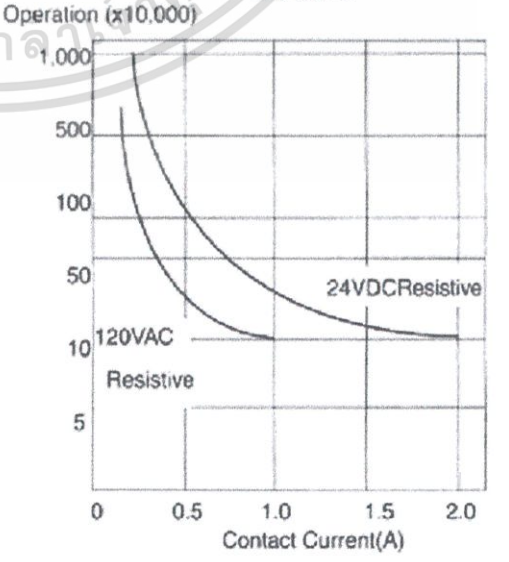
Operating Range



Maximum Switching Power

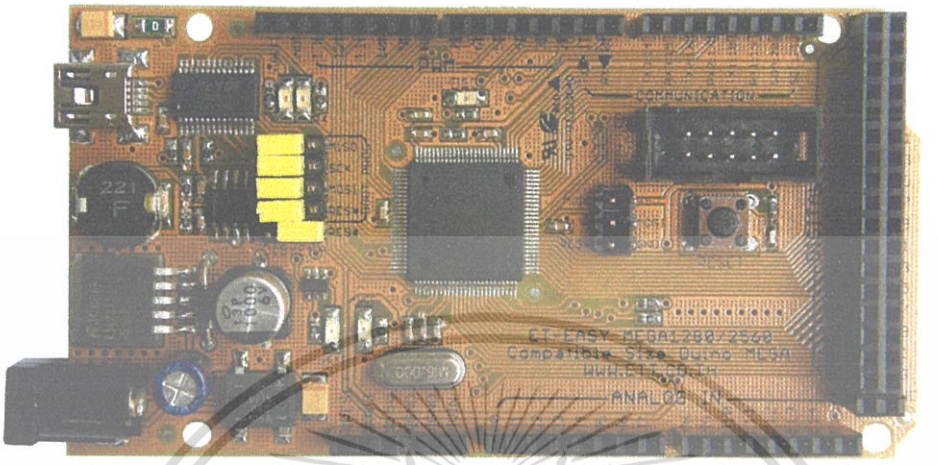


Life Curve



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ET-EASY MEGA1280 (Duino Mega)



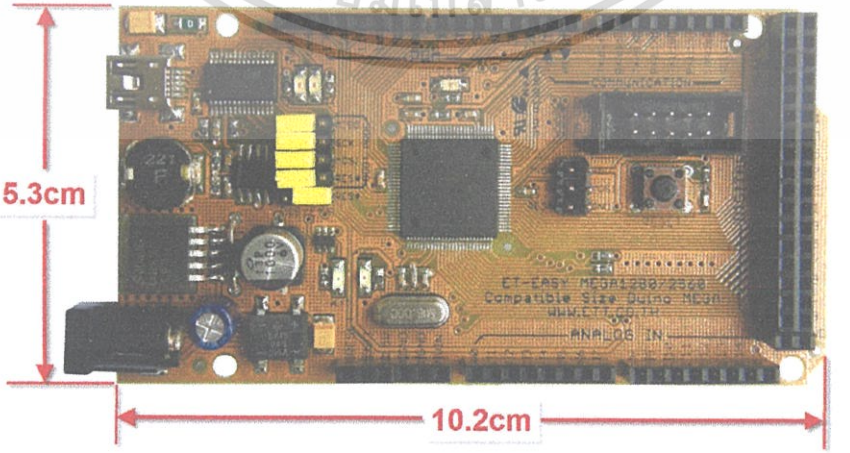
จากการที่ Arduino ที่เป็นโครงการพัฒนาระบบ MCU ของ AVR แบบ Open Source ได้รับการแนะนำเผยแพร่ออกมาสู่สาธารณะ ซึ่งได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายจากผู้คนทั่วโลก ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว ทางด้านของ Software ก็มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในขณะนี้ (สิงหาคม 2552) โปรแกรมของ Arduino ได้รับการปรับปรุงเป็น Version "arduino-0016" แล้ว โดยทางด้าน Hardware เองก็ได้มีการพัฒนาปรับปรุงอย่างต่อเนื่องควบคู่กันไปด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งจากเดิมที่มีการพัฒนาโปรแกรมให้รองรับกับการใช้งานได้กับชิพ MCU รุ่นเล็ก 28 ขา อย่าง ATMEGA8,ATMEGA88/ATMEGA168/ATMEGA328 สำหรับเป็นจุดเริ่มต้นให้ผู้สนใจได้ใช้เป็นเครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษาทดลองเรียนรู้ ตลอดจนถึงนำไปประยุกต์ใช้งานกันนั้น มาถึงวันนี้ ขนาดของทรัพยากรต่างๆ รวมทั้งขนาดของหน่วยความจำ สำหรับเขียนโปรแกรม ที่มีอยู่ในชิพ AVR รุ่นเล็กที่มีอยู่เริ่มไม่เพียงพอกับการประยุกต์ใช้งานในงานบางประเภทแล้ว ทาง Arduino เอง จึงได้ทำการพัฒนาให้ Arduino สามารถรองรับการใช้งานขนาดใหญ่ขึ้นอีก โดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้กับชิพ AVR รุ่นใหญ่ขึ้น เพื่อให้มีจำนวน I/O ทั้ง Digital, Analog, PWM, UART และ ขนาดหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม แต่ก็ยังคงใช้แนวทางในการพัฒนาโปรแกรม แบบเดียวกันกับรุ่นเล็กทุกประการ โดยได้เลือกใช้ชิพ AVR เบอร์ ATMEGA1280 และออกแบบพัฒนา Hardware บอร์ดขึ้นมารองรับ โดยใช้รหัสชื่อรุ่นว่า "Arduino Mega" ออกวางจำหน่าย และได้มีการเผยแพร่รายละเอียดทาง Hardware ต่างๆให้ผู้สนใจนำไปพัฒนาต่อยอดกันได้เอง แต่เนื่องจากชิพดังกล่าวมีโครงสร้างตัวถังเป็นแบบ SMD จึงทำให้เป็นอุปสรรคสำหรับผู้ใช้งานจำนวนไม่น้อยในการที่จะผลิตหรือสร้างบอร์ดขึ้นใช้งานเอง

ทาง อีทีที จึงได้นำ ATMEGA1280 มาพัฒนาเป็นบอร์ด โดยให้มีโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกันกับ Arduino Mega ขึ้นมา โดยใช้ชื่อว่า "ET-EASY MEGA1280" โดยได้ออกแบบให้มีการจัดสรร Pin I/O ต่างๆ รวมทั้งขนาดให้ตรงตามมาตรฐานของบอร์ด "Arduino Mega" เพียงแต่ได้มีการปรับปรุงข้อจำกัดบางอย่างให้ดีขึ้นกว่า Arduino Mega รุ่นมาตรฐาน เพื่อเพิ่มความสะดวกกับผู้ใช้งานมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

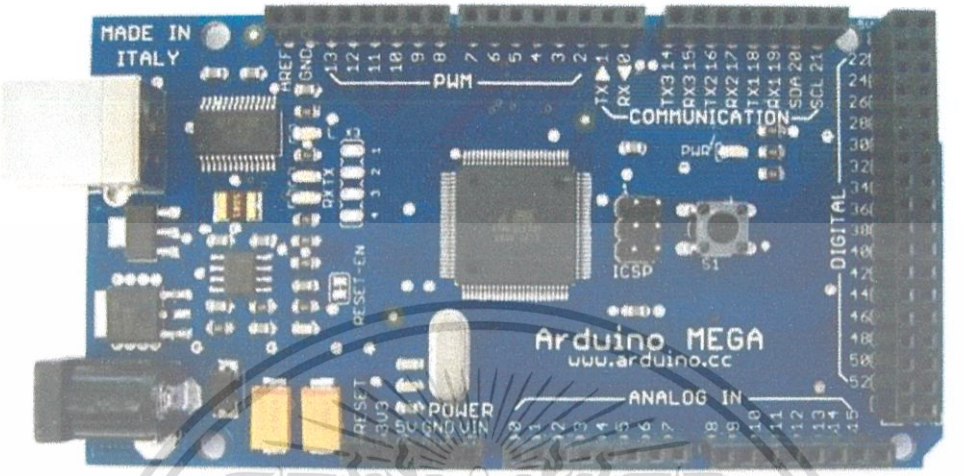
คุณสมบัติของบอร์ด

- ใช้ ATMEGA1280 เป็น MCU ประจำบอร์ด Run ความถี่ 16MHz จาก Crystal Oscillator
- 128KByte Flash(สงวนไว้ 4KByte สำหรับ Bootloader) / 8KByte SRAM / 4KByte EEPROM
- รองรับการพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C++ ของ Arduino ตามแบบ Arduino Mega ได้ 100%
- ใช้ USB Bridge ของ FTDI เบอร์ FT232RL พร้อม Over Current Protection สำหรับติดต่อสื่อสารและ Download Code จากคอมพิวเตอร์ให้บอร์ด พร้อม Jumper สำหรับปรับใช้งานบอร์ดเป็นการ Program Bootloader ให้กับ MCU จากพอร์ต USB ในบอร์ดได้เอง โดยไม่ต้องใช้เครื่องโปรแกรม AVRISP จากภายนอก
- 54 Pin Digital I/O โดยมี 14Pin สามารถโปรแกรมหน้าที่เป็น PWM ได้
- 16 Pin Analog Input (ADC ขนาด 10 บิต 16 ช่อง)
- 4 UART(Hardware Serial Port) แบบ TTL Logic
- ขนาดของ PCB บอร์ด และ ตำแหน่ง Pin Connector ต่างๆ ตรงกันกับ Arduino Mega ทั้งหมด ทำให้สามารถนำไปติดตั้งใช้งานร่วมกับบอร์ด Shield แบบต่างๆที่มีการผลิตขึ้นมาใช้งานร่วมกันกับบอร์ด Arduino Mega ได้ทั้งหมด โดยบอร์ดมีขนาด PCB Size 5.3cm x 10.2cm
- มีขั้ว Header 10Pin IDE ของ 8 บิต Digital I/O(D22...D29) สำหรับเชื่อมต่อกับ LCD หรือ บอร์ด I/O แบบต่างๆ ของ อีทีที เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน
- รองรับการใช้งานกับ External Supply ทั้งแบบ AC และ DC ขนาด 7-20V โดยเลือกใช้ Regulate แบบ Switching ขนาด 1A (LM2575-5V) ลดปัญหาเรื่องความร้อนเมื่อมีการใช้กระแสสูงๆ สามารถใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB ได้ในกรณีใช้กระแสไม่เกิน 500mA โดยมีวงจรเลือกแหล่งจ่ายอัตโนมัติ โดยจะตัดการใช้ไฟเลี้ยงจาก USB โดยอัตโนมัติ เมื่อมีการต่อแหล่งจ่ายจากภายนอกให้บอร์ด

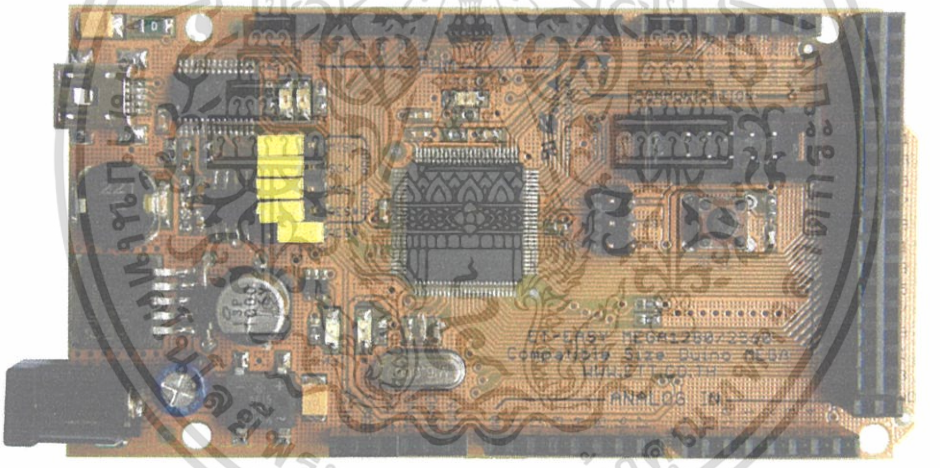


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแตกต่างระหว่าง Arduino Mega กับ ET-EASY MEAG1280(Duino Mega)



รูปแสดง ลักษณะของบอร์ด Arduino Mega

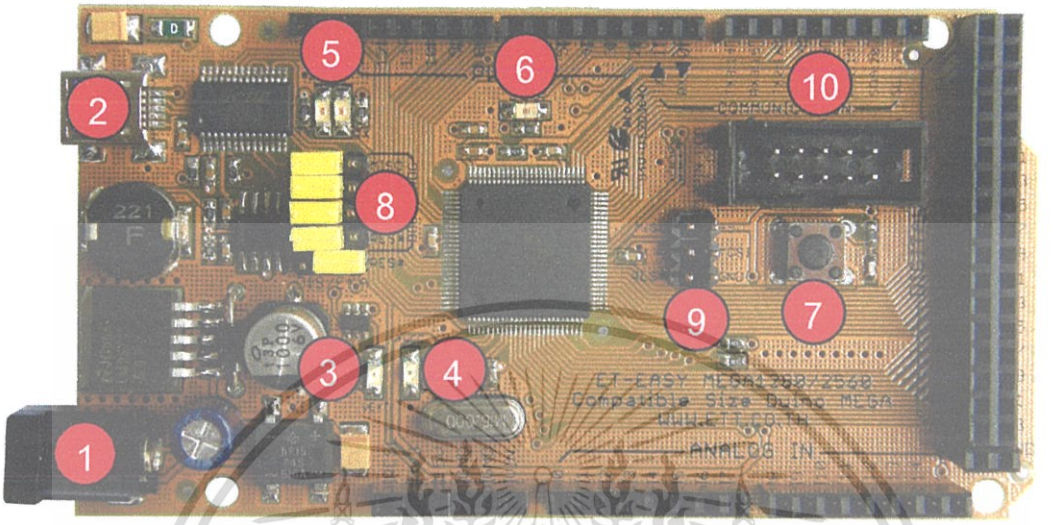


รูปแสดง ลักษณะของบอร์ด ET-EASY MEGA1280

1. วงจรภาค Supply ของบอร์ด ET-EASY MEGA1280 ปรับปรุงให้ใช้วงจร Bridge Rectifier และ ใช้ Switching Regulate ทำให้สามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายทั้งแบบ AC และ DC โดยไม่จำกัดขั้วไฟฟ้า และ ช่วยลดความร้อนที่เกิดจากไอซี Regulate ได้เป็นอย่างมาก ในขณะที่วงจร Arduino Mega ใช้ Half wave Rectifier ซึ่งต้องใช้กับ DC Adapter แบบ แกนใน เป็น ขั้วบวกเท่านั้น และใช้ไอซี Regulate ธรรมดา ซึ่งจะเกิดความร้อนสูงกว่าเมื่อต้องจ่ายกระแสมากๆ
2. บอร์ด ET-EASY MEGA1280 ออกแบบให้มีระบบ Jumper สำหรับใช้ทำหน้าที่เป็นตัวเลือกการทำ Auto Reset และการ Program Bootloader ด้วย FTDI BitBang ไว้ให้ด้วยทำให้มีความสะดวกมากขึ้นในการใช้งาน ในขณะที่ Arduino Mega ต้องใช้การต่อสาย Jump เอง

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างบอร์ด ET-EASY MEGA1280 (Duino Mega)

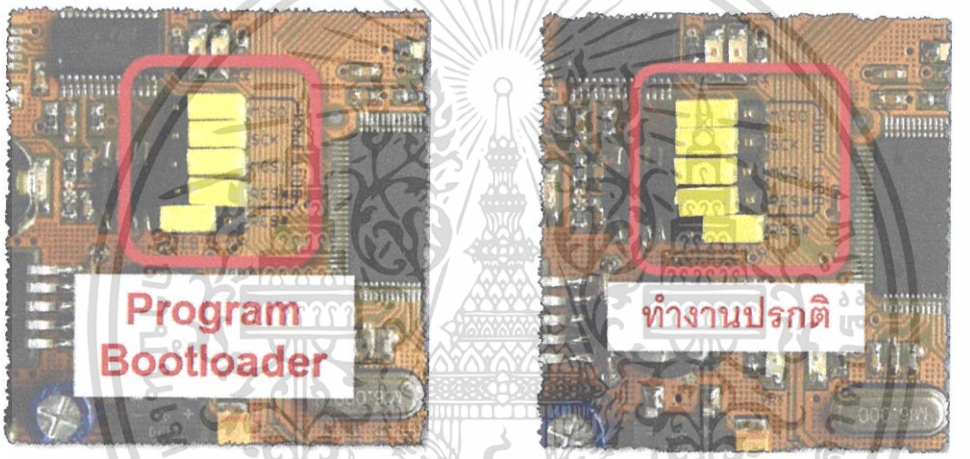


รูปแสดง โครงสร้างของบอร์ด ET-EASY MEGA1280 (Duino MeGA)

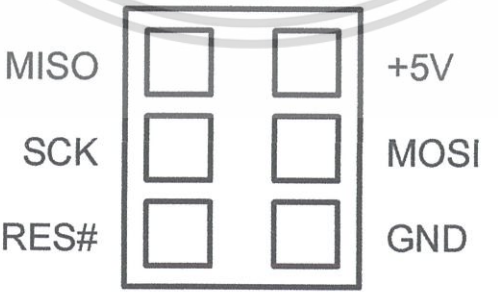
- **หมายเลข** 1 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงจากภายนอก สามารถใช้ได้กับแหล่งจ่ายทั้งแบบ AC และ DC พร้อมวงจร Bridge Rectifier และ Regulate แบบ Switching ช่วยลดความร้อนของ IC Regulate เมื่อมีการดึงกระแสมากๆได้เป็นอย่างดี สามารถใช้กับแรงดัน Input 7-20V
- **หมายเลข** 2 เป็นขั้วต่อ USB สำหรับติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC โดยใช้ FT232RL เป็น USB Bridge ในการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ PC และ MCU ในบอร์ด และยังสามารถใช้ไฟจาก พอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายให้กับบอร์ดได้ด้วย โดยจะมี Poly Fuse ขนาด 500mA สำหรับป้องกันการดึงกระแสเกินจากพอร์ต USB ด้วย และที่พิเศษคือมีวงจรสำหรับตรวจสอบแหล่งจ่ายเพื่อสลับการใช้งานแหล่งจ่ายจาก USB ไปเป็น External Supply ได้เอง โดยอัตโนมัติ โดยเมื่อไม่ได้ต่อ External Supply บอร์ดจะใช้ไฟจากพอร์ต USB เป็นแหล่งจ่ายในการทำงาน แต่เมื่อมีการต่อ External Supply วงจรจะสลับไปใช้แหล่งจ่ายจาก External Supply เองโดยอัตโนมัติ
  - LED +VCC ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟให้กับบอร์ด
  - LED VEXT ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟจาก External Supply
- **หมายเลข** 3 เป็น LED VEXT ใช้แสดงสถานะเมื่อมีการจ่ายไฟเลี้ยงจาก External Supply
- **หมายเลข** 4 เป็น LED +VCC ใช้แสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง (+VCC) ของบอร์ด โดยเมื่อบอร์ดใช้แหล่งจ่ายจาก External Supply จะแสดงสถานะโดยการให้ LED VEXT และ LED +VCC ติดสว่างพร้อมกันทั้งคู่ แต่ถ้าบอร์ดใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB จะแสดงสถานะโดยการให้ LED +VCC ติดสว่างเพียงดวงเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **หมายเลข** 5 เป็น LED แสดงสถานะของ RX และ TX ใช้สำหรับแสดงการรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ด ET-EASY MEGA1280 กับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB
- **หมายเลข** 6 เป็น LED D13 ใช้สำหรับทดแสดงการทำงานของ Bootloader และ ใช้ทดสอบการทำงานของบอร์ดจากการควบคุมของ Pin Digital-13 ทำงานด้วย Logic "1" และ หยุดทำงานด้วย Logic "0"
- **หมายเลข** 7 เป็นสวิตช์ Reset ใช้สำหรับสั่ง Reset การทำงานของบอร์ด
- **หมายเลข** 8 เป็นชุด Jumper สำหรับเลือก การ Program Bootloader ผ่าน USB Port และ การใช้งานตามปรกติ

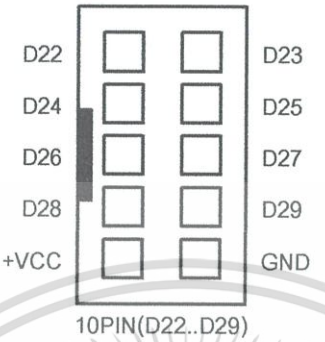


- **หมายเลข** 9 เป็นขั้วต่อ AVRISP ใช้สำหรับ Download Code ให้กับ MCU โดยขั้วต่อ AVRISP นี้จะสามารถใช้งานได้กับเครื่องโปรแกรมทุกรุ่นที่รองรับการใช้งานกับ ATMEGA1280 และใช้ขั้วต่อตรงตามมาตรฐาน AVRISP ดังรูป

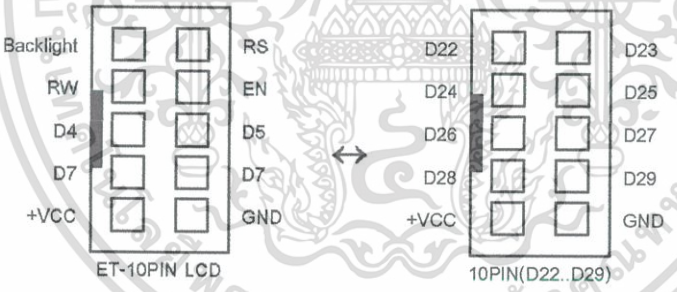


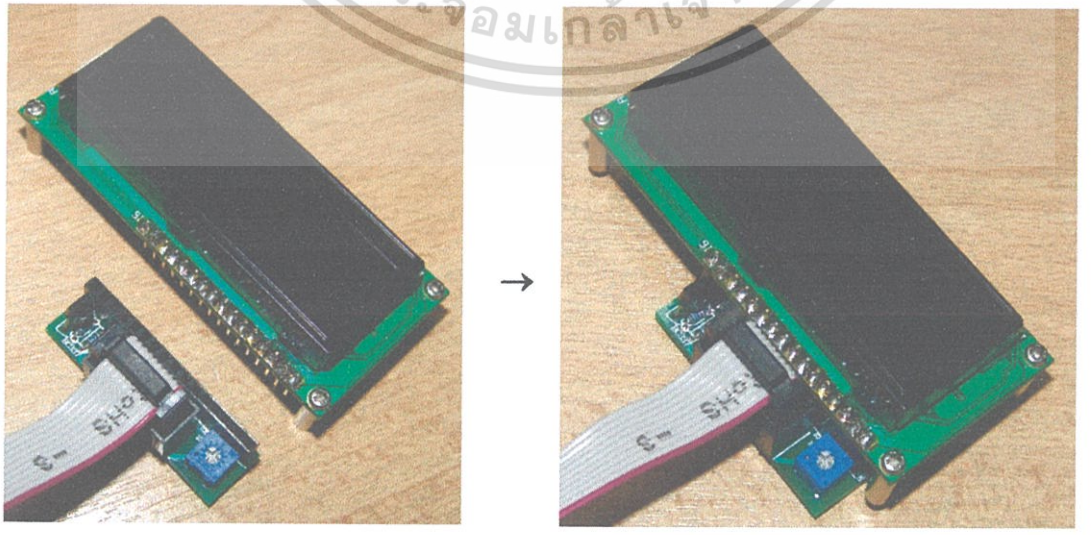
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **หมายเลข** 10 เป็นขั้วต่อสัญญาณจาก D[22..29] สำหรับเชื่อมต่อกับบอร์ด I/O ของ อีทีที รวมทั้งจอแสดงผล LCD โดยใช้ร่วมกับ 10PIN LCD หรือ ET-CONV SPI TO LCD

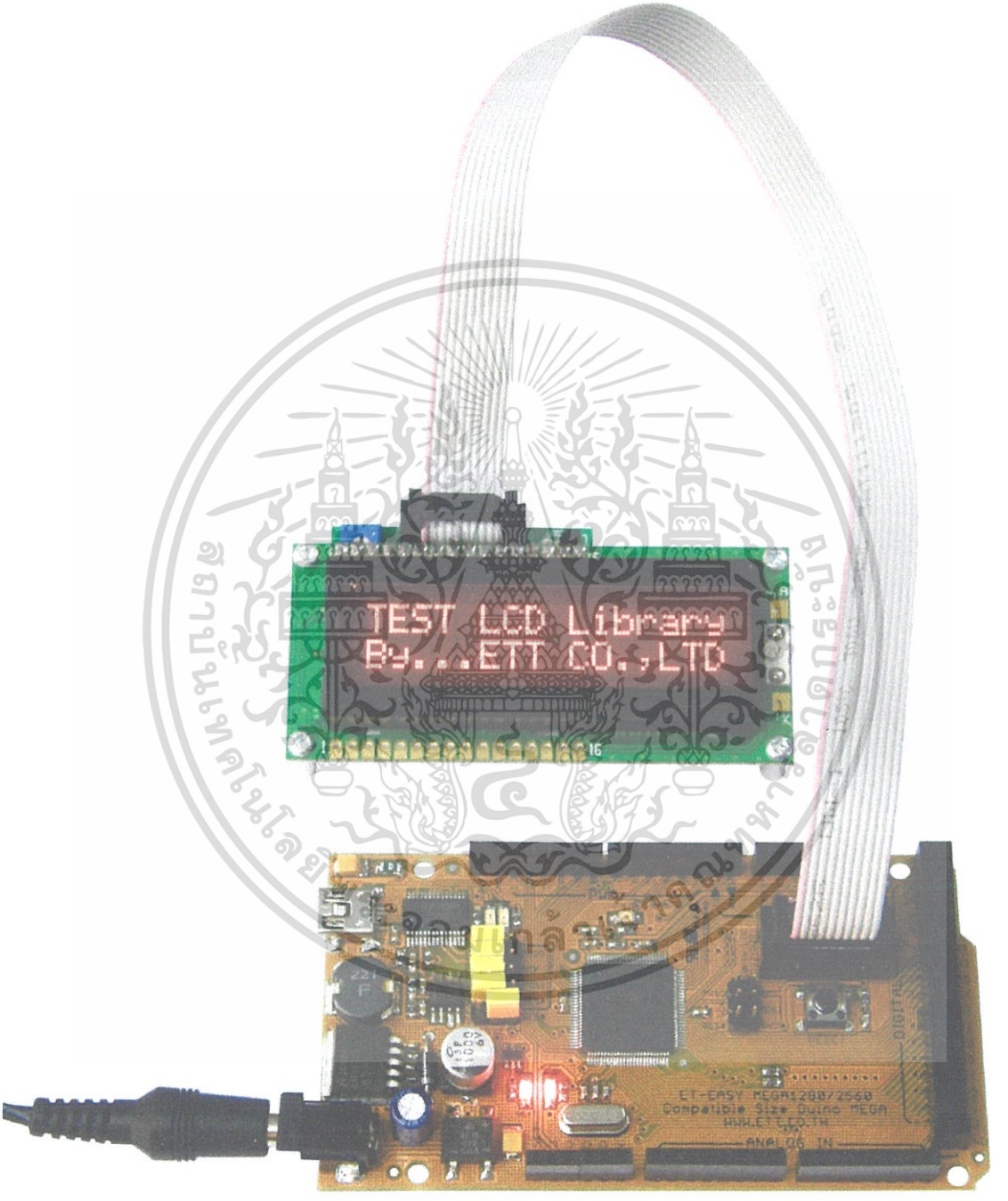


โดยในกรณีที่ต้องการนำขั้วต่อ 10PIN ไปเชื่อมต่อเพื่อใช้ควบคุมการแสดงผลของ LCD นั้น เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ขอแนะนำให้จัดหาชุด ET-10PIN CLCD (ET-CONV 10 TO LCD) มาเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระหว่าง ขั้ว IDE 10PIN ของบอร์ด ET-EASY MEGA1280 ดังตัวอย่างโดยเมื่อนำ LCD มาติดตั้งเข้ากับชุด ET-10PIN CLCD เรียบร้อยแล้วจะทำให้สามารถเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างขั้ว ET-10PIN CLCD กับ 10PIN ได้โดยง่าย โดยใช้การเชื่อมต่อผ่านทางสายแพร่ 10PIN ได้ทันทีดังตัวอย่าง



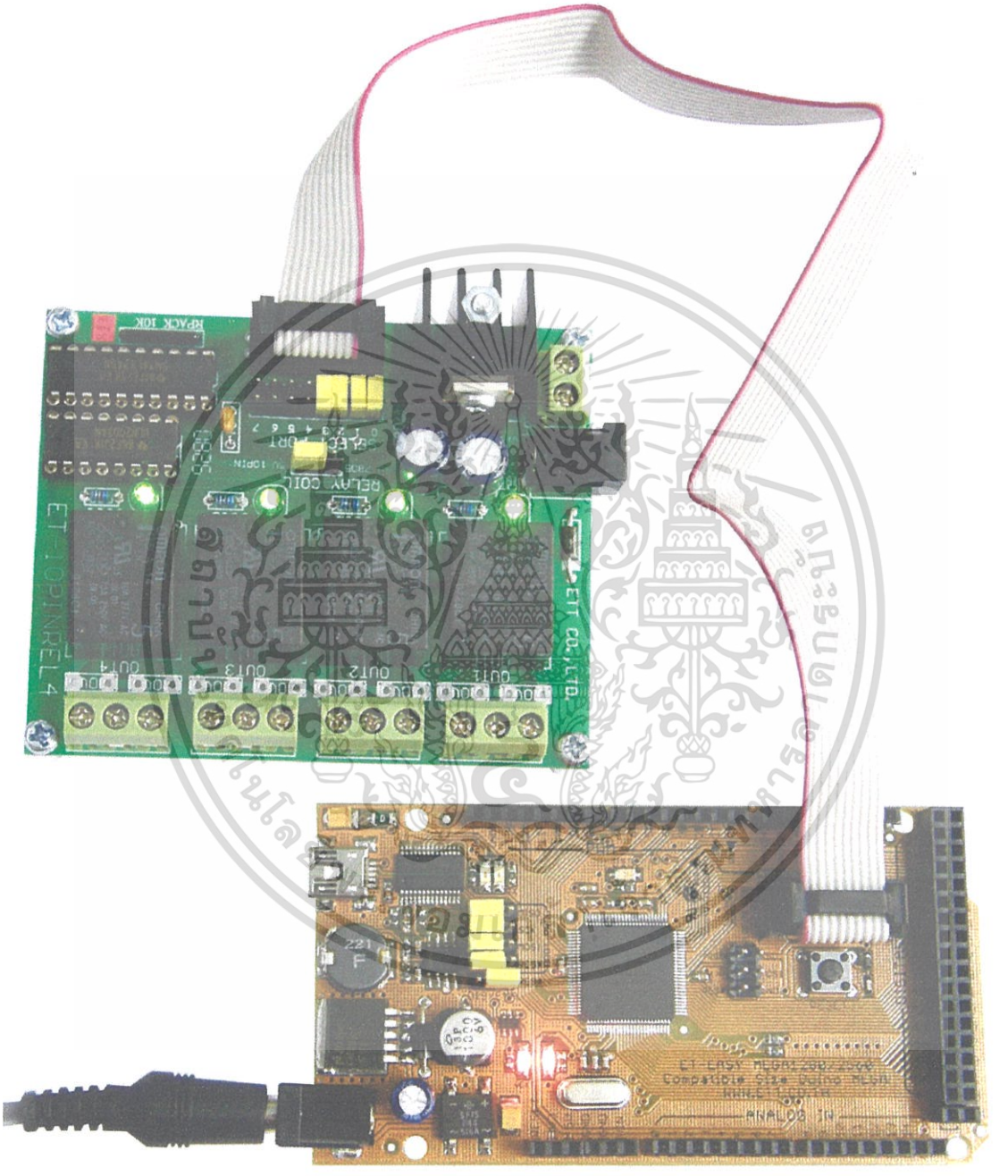


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดง ตัวอย่างการต่อ LCD ด้วยขั้ว 10Pin กับ ET-CONV 10 TO LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

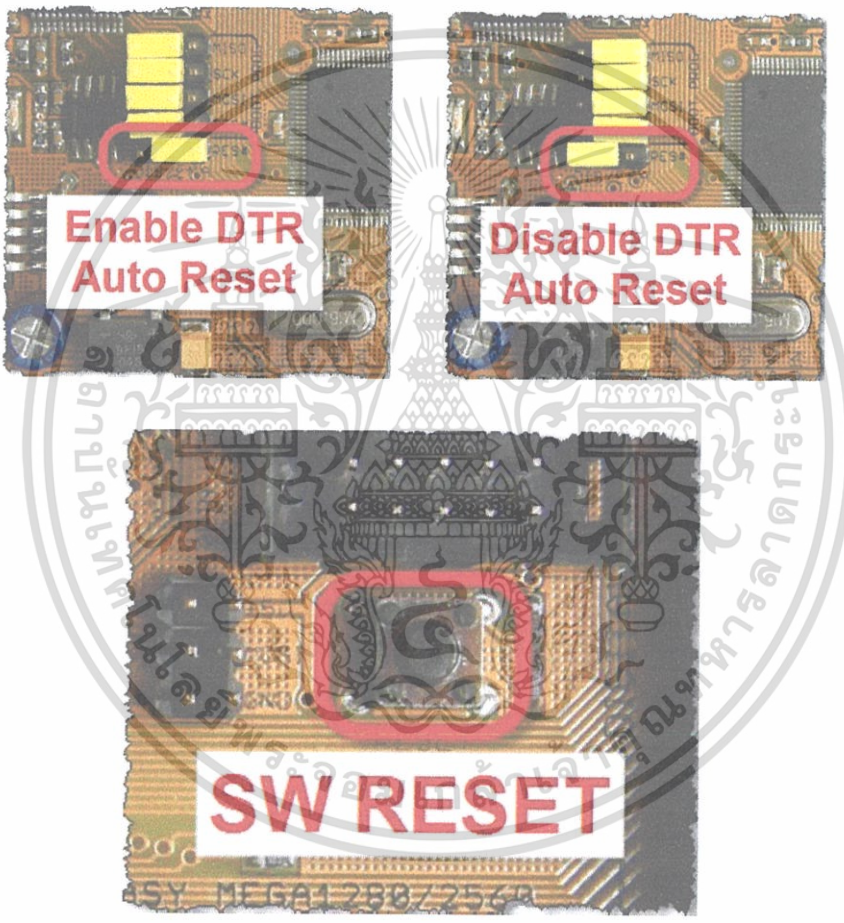


รูปแสดง ตัวอย่างการต่อ บอร์ด I/O ของ อีทีที ด้วยขั้ว 10Pin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของสัญญาณต่าง ๆของบอร์ด ET-EASY MEGA1280

- RESET# เป็นสัญญาณ Input Logic Reset ของ MCU เมื่อเป็น Logic Low จะทำให้ MCU อยู่ในสภาวะรีเซ็ต เมื่อเป็น Logic High จะทำให้ MCU อยู่ในสภาวะทำงานตามปรกติ โดยสัญญาณ RESET# นี้จะถูกควบคุมจาก 2 แหล่ง คือ จาก สวิตช์ RESET ภายในบอร์ด และ จากสัญญาณ DTR ของ FT232RL ถ้ามีการเลือก Enable Jumper ของ Auto Reset จาก DTR ไว้



- +3V3 เป็นแหล่งจ่ายไฟขนาด +3.3V ที่ได้จากวงจร Regulate ภายในของ FT232RL สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 50mA ซึ่งเมื่อต้องการนำแหล่งจ่าย +3.3V นี้ไปใช้งานเป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ต้องระมัดระวังเรื่องการดึงกระแสของโหลดด้วย ถ้าโหลดมีการดึงกระแสมากกว่า 50mA อาจทำให้ FT232RL เกิดความเสียหายได้
- +VIN เป็นไฟ DC ที่รับมาจาก Jack VIN(Extemal Supply) แต่ผ่านการ Rectifier และ Filter เป็น DC แล้ว มีขนาดแรงดันเฉลี่ยตามขนาดแรงดันที่ป้อนให้กับบอร์ดทางJack VIN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- +5V เป็นจุดต่อแหล่งจ่ายไฟของบอร์ดออกไปใช้งาน ซึ่งมาจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือ จากพอร์ต USB และจาก External Supply ซึ่งถ้าต่อแหล่งจ่ายให้บอร์ดจาก External Supply ผ่านทาง Jack VIN แหล่งจ่าย +5V นี้จะมาจาก Switching Regulate (LM2575-5V) สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 1A แต่ถ้าใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB แหล่งจ่าย +5V นี้จะมาจากพอร์ต USB โดยตรงโดยจะมีฟิวส์ แบบ Poly ขนาด 500mA ต่อป้องกันการดึงกระแสเกินเพื่อป้องกันความเสียหายของพอร์ต USB โดยจะจ่ายกระแสได้สูงสุดไม่เกิน 500mA ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการจ่ายกระแสของพอร์ต USB และการ Configure ค่าให้กับ FT232RL ด้วย
- A0-A15 เป็นขาสัญญาณ Analog Input แบบ ADC มีขนาดความละเอียด 10บิต มี 16 Pin สามารถรับแรงดัน Analog Input ได้ 0-5VDC
- D0-D53 เป็นขาสัญญาณ Digital Input/Output แบบ TTL มีทั้งหมด 54 Pin สามารถใช้ทำหน้าที่เป็น Input หรือ Output ตามการกำหนดจากโปรแกรม โดยมีบาง Pin สามารถกำหนดหน้าที่ใช้งานเป็นฟังก์ชั่นพิเศษต่างๆเพิ่มเติมได้อีก
    - D0-D1 ถูกสงวนไว้ใช้ทำหน้าที่เป็นพอร์ตสื่อสารอนุกรม RS232 (UART0) โดยได้ทำการเชื่อมต่อกับ USB Bridge ของ FT232RL เพื่อใช้ Upload Code ให้กับบอร์ด และยังสามารถใช้ทดลองติดต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดกับคอมพิวเตอร์ PC ได้ด้วย
    - D2-D13 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น PWM ขนาด 8 บิต มี 14 Pin ได้
    - D14 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น TX3 สำหรับ ส่งข้อมูลของ UART3 ได้ด้วย
    - D15 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น RX3 สำหรับ รับข้อมูลให้กับ UART3 ได้ด้วย
    - D16 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น TX2 สำหรับ ส่งข้อมูลของ UART2 ได้ด้วย
    - D17 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น RX2 สำหรับ รับข้อมูลให้กับ UART2 ได้ด้วย
    - D18 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น TX1 สำหรับ ส่งข้อมูลของ UART1 ได้ด้วย
    - D19 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น RX1 สำหรับ รับข้อมูลให้กับ UART1 ได้ด้วย
    - D20 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น SDA ของ I2C Bus สำหรับใช้สื่อสารกับ I2C ได้ด้วย
    - D21 สามารถ โปรแกรมหน้าที่เป็น SCL ของ I2C Bus สำหรับใช้สื่อสารกับ I2C ได้ด้วย
- AREF เป็นสัญญาณ Analog Reference จากภายนอกที่ต้องการป้อนให้กับ MCU ซึ่งตามปรกติแล้ว ATMEGA1280 สามารถโปรแกรมให้เลือกใช้แรงดันอ้างอิงจากภายในได้อยู่แล้วโดยสามารถเลือกเป็น 1.1V หรือ 2.56V หรือ AVCC(+5V) โดยไม่จำเป็นต้องป้อนแรงดันอ้างอิงจากภายนอกให้กับบอร์ดอีก แต่ถ้าต้องการแรงดันอ้างอิงที่มีความแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้วก็สามารถป้อนเป็นแรงดันอ้างอิงจากภายนอกผ่านทางขา AREF นี้เข้าไปเองได้ระหว่าง 0-5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายกรณิศ นาคศิษฏ์คุณงาม
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 1 กรกฎาคม 2536
ที่อยู่	42 หมู่ 4 ต.เชียงทอง อ.วังเจ้า จ.ตาก
ประวัติการศึกษา	2553 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนแจงร้อนวิทยา 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ – นามสกุล	นายกิตติทัต บุญธรรมหนัก
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 30 เมษายน 2536
ที่อยู่	59/2 หมู่ 18 ต.บึงคำพร้อย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150
ประวัติการศึกษา	2553 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนเซนต์ดอมินิก 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวปวีณา เมฆสุกใส
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 6 กันยายน 2535
ที่อยู่	74/3 หมู่ 5 ต.อ้อมใหญ่ อ.สามพราน จ.นครปฐม 73160
ประวัติการศึกษา	2553 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนมารีย์อุปถัมภ์ 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้