

การออกแบบและสร้างระบบวัดที่ง่ายในที่สุดใช้วัดสมบัติของไฟฟ้า  
ของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีของบราวน์และปรากฏการณ์ฮอลล์

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SEMIAUTOMATIC  
MEASUREMENT SYSTEM FOR ELECTRICAL PROPERTIES OF  
SEMICONDUCTOR MATERIAL BY VAN DER PAUW AND HALL  
EFFECT METHODS



โดยรายงานพิเศษ เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาความหลังที่ศูนย์วิจัยสหศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

สหระวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและสร้างระบบวัดกึ่งอัตโนมัติเพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้า

ของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีแวนเดอร์พาว์และปรากฏการณ์ฮอลล์

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SEMI-AUTOMATION  
MEASUREMENT SYSTEM FOR ELECTRICAL PROPERTIES OF  
SEMICONDUCTOR MATERIAL BY VAN DER PAUW AND HALL  
EFFECT METHODS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF SEMI-AUTOMATION  
MEASUREMENT SYSTEM FOR ELECTRICAL PROPERTIES OF  
SEMICONDUCTOR MATERIAL BY VAN DER PAUW AND HALL  
EFFECT METHODS**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

**IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ACADEMIC YEAR 2014**

<b>Title</b>	Design and construction of semi-automation measurement system for electrical properties of semiconductor material by van der Pauw and Hall effect methods.
<b>Student</b>	Miss Ladawadee Marumdee Miss Wimonwan Ponuam
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Applied physics
<b>Academic Year</b>	2014
<b>Advisor</b>	Dr. Aparporn Sakulkalavek
<b>Co-Advisor</b>	Dr. Rachsak Sakdanuphab

### ABSTRACT

In this project, we design, construct, and program a semi-automatic system for electrical properties measurement such as resistivity, carrier concentration, mobility and carrier type by van der Pauw and Hall effect methods. All the apparatus were controlled by LabVIEW program to acquire the measurement data. Furthermore, the programming software of the semi-automatic system can show a real-time graphical measurement and converse to the resistivity, carrier concentration and mobility. The system was calibrate by using standard samples that have electrical parameters by certificate measurements from Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wolczyńska 133. Standard samples are GaSb:Te (n-type) (certificate measurements temperature 300 K) and GaSb:Si (p-type) (certificate measurements temperature 77 K). In addition, the system was used to measure and calculate electrical properties of  $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ . It was found that the semi-automatic system has high the precision and acceptable accuracy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords :** Semiconductor, Van der Pauw, Hall system, LabVIEW

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.1.1 การเกิดสนามแม่เหล็ก	4
2.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก	8
2.1.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก	9
2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	9
2.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	10
2.2.2 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	11
2.2.3 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น	12
2.2.4 การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าโดยด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	14
2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์	17
2.3.1 แรงแลอรেনซ์	18
2.3.2 สัมประสิทธิ์ฮอลล์, ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการโรงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 โปรแกรม LabVIEW	21
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง</b>	
3.1 อุปกรณ์ และฟังก์ชันการใช้งาน	28
3.1.1 Gauss/Tesla Meter	28
3.1.2 Regulated DC Power Supply	29
3.1.3 Keithley 2410 Current source	30
3.1.4 Keithley 2100 Digital Multimeter	31
3.1.5 Magnetic Core	32
3.1.6 Chiller	32
3.1.7 Relays	34
3.1.8 National instruments 9472 (NI 9472)	40
3.1.9 Change over switch	41
3.1.10 Sample holder	43
3.1.11 Sample board	44
3.2 การเตรียมอุปกรณ์	45
3.3 วิธีการทดลอง	46
3.3.1 การวัด Van der Pauw	46
3.3.2 การวัด Hall	48
3.4 โปรแกรม LabVIEW	50
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>	
4.1 การสอบเทียบสนามแม่เหล็ก	56
4.2 การสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw	58
4.2.1 ขั้นตอนการวัด $R_A$ และ $R_B$ ด้วยวิธีของ Van der Pauw	58
4.3 โปรแกรม LabVIEW	61
4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล	67
4.5 สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐาน GaSb:Te และ GaSb:Si	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องสงวนลิขสิทธิ์ด้วยของเอกสารทดลองที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 ทดสอบสารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$	77
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	
<b>ข้อเสนอแนะ</b>	80
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	81
<b>ภาคผนวก</b>	83
ก การติดตั้งโปรแกรม LabVIEW	
ข ฟังก์ชันที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม	
ค Keithley Model 2400 Series Source Meter User's Manual	
ง Keithley Model 2100 6 1/2-Digit Resolution Digital Multimeter User's Manual	
จ Block diagram การเขียนโปรแกรม LabVIEW	
ฉ วิธีการเตรียมสารมาตรฐานที่นำมาใช้ในการสอบเทียบระบบวัด	
ช ตารางการสอบเทียบ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
3.1 ความละเอียดของการจ่ายกระแส	30
3.2 Specifications DC characteristics: accuracy $\pm$ (% of reading + % of range)	31
4.1 ผลการวัด GaSb:Te (n-type) ด้วยระบบการวัดอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K	71
4.2 Certificate measurements temperature 300 K ของ GaSb:Te (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133	72
4.3 ผลการวัด GaSb:Si (p-type) ด้วยระบบการวัดอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K	76
4.4 Certificate measurements temperature 77 K ของ GaSb:Si (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	4
2.2	5
ก. กระแสไฟฟ้าและทิศของสนามแม่เหล็ก	
ข. ใช้กฎมือขวาหาทิศทางของสนามแม่เหล็ก	
2.3	6
2.4	6
ก. ขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์	
ข. การหาขั้วแม่เหล็กโดยใช้กฎมือขวา	
2.5	7
2.6	7
2.7	9
2.8	11
2.9	12
2.10	14
2.11	15
2.12	16
2.13	17
2.14	17
2.15	19
2.16	20
ทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุทั้งสอง	
2.17	20
2.18	21
2.19	22
2.20	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์นี้เป็นลิขสิทธิ์ของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel	24
2.22 Block Diagram ของเครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW	24
2.23 ตัวอย่างหน้า Block Diagram	25
2.24 เครื่องมือสำหรับ Dam – Data Acquisition	26
2.25 เครื่องมือ Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Block Diagram	26
3.1 5180 Gauss/Tesla Meter	28
3.2 Regulated DC Power Supply	29
3.3 Current source Keithley Model 2410	30
3.4 $6\frac{1}{2}$ digital multimeter Keithley model 2100	31
3.5 Magnetic Core	32
3.6 Chiller	33
3.7 Relays	34
3.8 การต่อรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw	35
3.9 NI 9472	40
3.10 การกำหนดขาของ NI 9472	41
3.11 การต่อ National instruments กับรีเลย์	41
3.12 Change over switch	41
3.13 คู่มือการต่อสับสวิทช์ของ Change over switch	42
3.14 การต่อขั้วของ Change over switch เข้ากับ Regulated DC Power Supply	42
และขดลวด	
3.15 Sample holder	43
3.16 Sample board	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ก. ภายวงจรถ่ายและองค์ประกอบของ Sample board ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ข. Sample board ที่เสร็จสมบูรณ์ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ระบบการวัดแวนเคอร์เพาว์	45
3.18 ระบบการวัดฮอลล์	46
3.19 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_A$	47
3.20 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_B$	47
3.21 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{BD, CA}$	48
3.22 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ $R_{AC, BD}$	49
3.23 โปรแกรม LabVIEW สำหรับการวัด Van der Pauw และ Hall measurement	51
3.24 การเทียบขั้วที่ถ่วงรีเลย์ 1, 2, 3 และ 4 สำหรับวัด Van der Pauw	52
3.25 เียบขั้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว A ออกขั้ว C	52
3.26 วัดความต่างศักย์ขั้ว B และขั้ว D	53
3.27 หมุน Change over switch ไปที่เลข 1	53
3.28 เียบขั้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว B ออกขั้ว D	54
3.29 วัดความต่างศักย์ขั้ว C และขั้ว A	54
3.30 หมุน Change over switch ไปที่เลข 2	55
4.1 การใช้เกาส์มิเตอร์ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (T) กับ กระแสไฟฟ้า (A)	57
4.3 การวัดตัวต้านทานขนาด $1\text{ M}\Omega$ ที่ต่อเป็นวงจรบริดจ์ ด้วยวิธีของ Van der Pauw	58
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อม (V) กับ $1/4$ ของกระแส ( $\mu\text{A}$ ) จากการวัด $R_A$	59
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อม (V) กับ $1/4$ ของกระแส ( $\mu\text{A}$ ) จากการวัด $R_B$	60
4.6 พารามิเตอร์ในหน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW	62
4.7 ส่วนการวัด Van der Pauw	62
4.8 ส่วนการวัด Hall measurement	63
4.9 หน้า Block Diagram ของระบบการวัด Van der Pauw	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์เป็นของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 หน้า Block Diagram ของระบบการวัด Hall	64
4.11 ส่วนของการเก็บข้อมูลในหน้า Block Diagram	65
4.12 การเขียนรีเลย์ในหน้า Block Diagram	65
4.13 การเขียนคำสั่งเครื่อง Current source (Keithley 2410)	66
4.14 การเขียนคำสั่งเครื่อง DMM (Keithley 2100)	66
4.15 ขั้นตอนการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล	67
4.16 สารตัวอย่าง GaSb:Te ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact	68
4.17 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	68
4.18 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	69
4.19 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	69
4.20 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	70
4.21 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	70
4.22 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	71
4.23 สารตัวอย่าง GaSb:Si ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact	72
4.24 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	73
4.25 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	73
4.26 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	74
4.27 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	74
4.28 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	75
4.29 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	75
4.30 สารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$ ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact	77
4.31 ค่า $R_A$ , $R_B$ และ Resistivity จากการวัด Van der Pauw ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	77
4.32 ค่า $R_H$ , $n$ และ $\mu$ จากการวัด Hall measurement ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเนื้อหาบางส่วนอาจมีข้อผิดพลาดได้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
B	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก
$\mu_0$	สภาพซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ
I	กระแสไฟฟ้า
$\Phi$	ฟลักซ์แม่เหล็ก
A	พื้นที่หน้าตัด
$\rho$	สภาพต้านทานทางไฟฟ้า
f	แฟกเตอร์ค่าแก๊สของแวนเดอร์เพาว์
d	ความหนาของสารตัวอย่าง
q	ค่าประจุของอิเล็กตรอน
$E_H$	สนามไฟฟ้าฮอลล์
$F_{Lorentz}$	แรงลอเรนซ์
$R_H$	สัมประสิทธิ์ฮอลล์
$\mu$	สภาพคล่องของพาหะ
n	ความหนาแน่นของพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน โลกเรามีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว มนุษย์ต้องการความสะดวกสบายมากขึ้น สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจึงเป็นที่นิยมและรู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในการที่จะพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำหรือสร้างสารกึ่งตัวนำใหม่ๆ ขึ้นมานั้น การตรวจสอบคุณสมบัติของสารเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะจะทำให้ทราบถึงชนิด ลักษณะ และคุณสมบัติต่างๆ ของสารนั้น รวมไปถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานว่าเป็นไปตามที่เราต้องการหรือไม่ เพื่อให้เกิดการใช้งานที่เหมาะสมและยาวนานขึ้น

วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ คือ วิธีของแวนเดอร์เพาว์ เนื่องจากสามารถตรวจสอบสารที่มีรูปร่างใดๆ ได้ และค่อนข้างมีความแม่นยำ หากเป็นไปตามเงื่อนไขของการตรวจสอบ ซึ่งสิ่งที่สามารถตรวจสอบได้จากวิธีของแวนเดอร์เพาว์ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนั้น เนื่องจากต้องการทราบคุณสมบัติของสารมากขึ้น ดังนั้นจึงนำวิธีการวัดฮอลล์มาใช้ในการทดสอบด้วยซึ่งผลที่ได้จากการวัดฮอลล์สามารถนำไปคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ซึ่งค่าเหล่านั้นจะบอกถึงคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ อาทิ เช่น สัมประสิทธิ์ฮอลล์ ( $R_H$  : Hall coefficient) ความหนาแน่นของพาหะ ( $n$  : Carrier concentration) สภาพคล่องของฮอลล์ ( $\mu$  : Hall mobility) และชนิดของพาหะ ในการวัดส่วนใหญ่เป็นการวัดแบบไม่อัดโนมิตี การบันทึกผลและคำนวณค่าจึงใช้เวลาค่อนข้างมาก โครงการพิเศษนี้จึงมีแนวคิดในการสร้างระบบการวัดกึ่งอัดโนมิตีขึ้นมาเพื่อประหยัดเวลา และสามารถให้ค่าจากการวัดที่ถูกต้อง ระบบถูกออกแบบมาสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์ ค่าต่างๆ นั้นจะถูกคำนวณอัดโนมิตีผ่านทางโปรแกรมที่ออกแบบขึ้นมาแล้วแสดงผลผ่านทางจอคอมพิวเตอร์

ระบบการวัดกึ่งอัดโนมิตีนี้ถูกนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อความสะดวกในการทำารวัด และลดปัญหาความผิดพลาดจากการคำนวณ โดยการต่อเครื่องมือวัดเข้ากับคอมพิวเตอร์และควบคุมระบบการวัดโดยการเขียน โปรแกรมควบคุมพร้อมระบบประมวลผลแสดงค่าต่างๆ ของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์
2. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
3. เพื่อออกแบบและสร้างระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติสำหรับวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และวิธีวัดฮอลล์
4. เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการและการเรียนการสอน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาหลักการวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์
2. ออกแบบและสร้างระบบวัดสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และระบบวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบของการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์
3. เปรียบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า

## 1.4 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน

ระยะเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน – กรกฎาคม 2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก</li> <li>- ศึกษาทฤษฎีของปรากฏการณ์ฮอลล์และวิธีการวัดฮอลล์</li> <li>- ศึกษาวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้า โดยเน้นวิธีของแวนเดอร์เพาว์</li> </ul>
สิงหาคม – กันยายน 2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาเครื่องมือและจัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย</li> <li>- สอบเทียบสนามแม่เหล็ก</li> <li>- สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างที่ทราบค่าด้วยการวัดแบบไม่อัตโนมัติ</li> </ul>
ตุลาคม – พฤศจิกายน 2557	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ศึกษาโปรแกรม LabVIEW</li> <li>- ออกแบบและเขียน โปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการวัด</li> </ul>

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ)

ระยะเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
	- ทดลองระบบวัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
ธันวาคม – มกราคม 2557-2558	- ทดลองวัดสารตัวอย่างมาตรฐานด้วยการวัดแบบไม่ อัต โนมติ และแบบกึ่งอัติ โนมติ - วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง เพื่อทำการปรับปรุง ระบบการวัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
กุมภาพันธ์ – เมษายน 2558	- จัดทำรูปเล่ม

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจทฤษฎีและหลักการของการวัดค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์
2. เข้าใจฟังก์ชันและการใช้งานของเครื่องมือวัดในระบบ
3. สามารถใช้เครื่องมือวัดได้อย่างถูกต้องทั้งการวัดแบบ ไม่อัติ โนมติและการวัดแบบกึ่งอัติ โนมติ
4. สามารถออกแบบและเขียน โปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

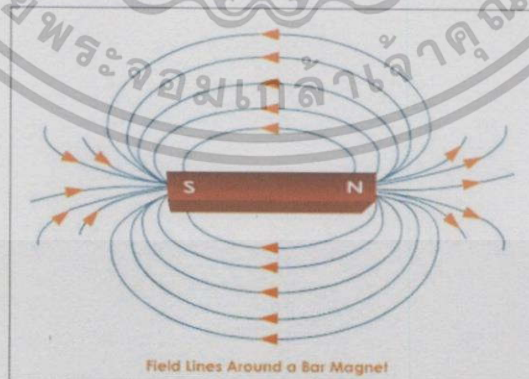
## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้วิธีของแวนเดอร์เพาว์ และปรากฏการณ์ฮอลล์ เพื่อศึกษาถึงลักษณะคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ อาทิ เช่น การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่น สภาพคล่อง และชนิดของพาหะ ซึ่งวิธีของแวนเดอร์เพาว์ เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้มากวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง สารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการวัดฮอลล์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบชนิดของสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิด  $n$  หรือ  $p$  ซึ่งถ้าสารกึ่งตัวนำมีพาหะข้างมากเป็นบวก แสดงว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิด  $p$  ในทางตรงกันข้ามถ้าสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นมีพาหะข้างมากเป็นลบ แสดงว่าสารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิด  $n$  ซึ่งรายละเอียดต่างๆจะอธิบายต่อไป นอกจากนี้ยังได้มีการนำโปรแกรม LabVIEW มาใช้ในการออกแบบสำหรับวัดและคำนวณผล เพื่อให้เกิดความสะดวกต่อการใช้งานด้วย

### 2.1 ทฤษฎีและหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์มีทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่ง ณ ตำแหน่งใดๆ มีทิศตามทิศของขั้วเหนือของเข็มทิศ เส้นสนามแม่เหล็กจะเป็นเครื่องบอกทิศของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือ ไปยังขั้วใต้ เส้นสนามแม่เหล็กจะวนเป็นวง ไม่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด ดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 2.1 เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

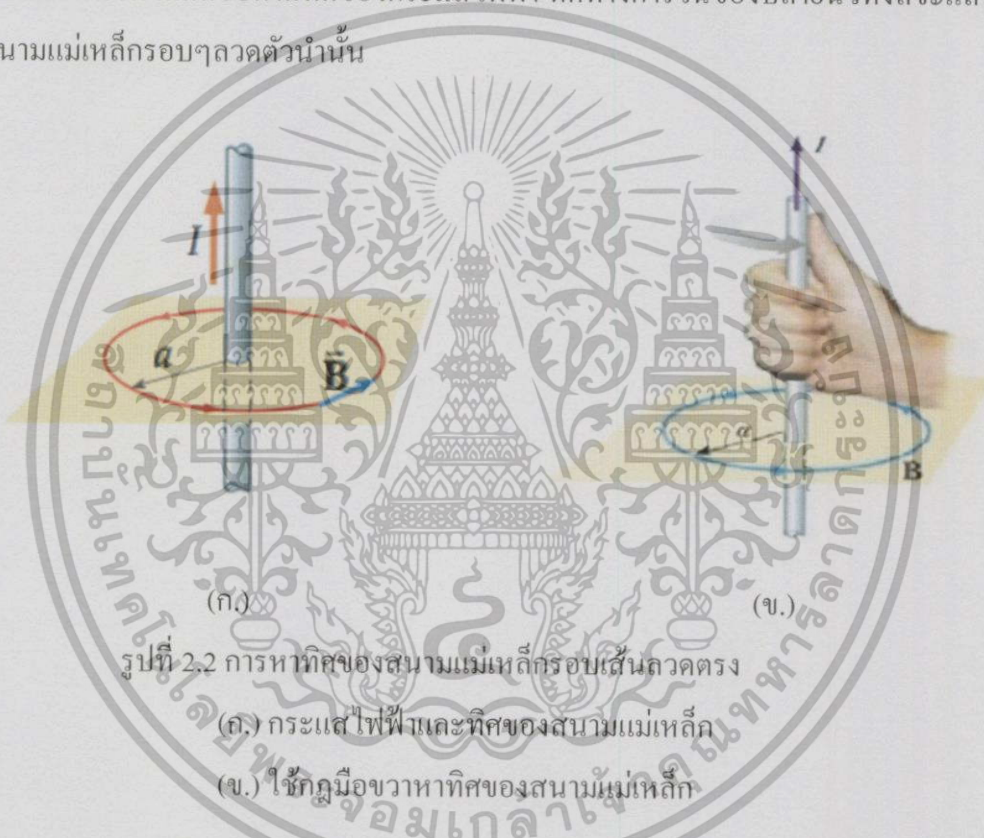
#### 2.1.1 การเกิดสนามแม่เหล็ก

ในปี ค.ศ. 1820 Hans Christian Oersted นักฟิสิกส์ชาวเดนมาร์ก พบว่าเมื่อมี

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านในลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆลวดตัวนำนั้น สามารถแยกพิจารณาตามลักษณะของลวดตัวนำได้ดังนี้

1. สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าไหลในเส้นลวดตรง

เมื่อนำเข็มทิศไปวางใกล้เส้นลวดตรงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน พบว่าแนวของเข็มทิศมีการเปลี่ยนแปลงไปจากแนวเหนือ-ใต้เดิม แสดงว่ารอบๆเส้นลวดมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้า การหาทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตรง สามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวา ซึ่งทำได้โดยใช้มือขวากำรอบเส้นลวดตัวนำ ดังรูปที่ 2.2 ในลักษณะให้นิ้วหัวแม่มือชี้ตามทิศของกระแสไฟฟ้า ทิศทางการวนของปลายนิ้วทั้งสองชี้จะแสดงทิศของสนามแม่เหล็กรอบๆลวดตัวนำนั้น



รูปที่ 2.2 การหาทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตรง

- (ก.) กระแสไฟฟ้าและทิศของสนามแม่เหล็ก
- (ข.) ใช้กฎมือขวหาทิศของสนามแม่เหล็ก

สามารถคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้จากสูตร

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \tag{2.1}$$

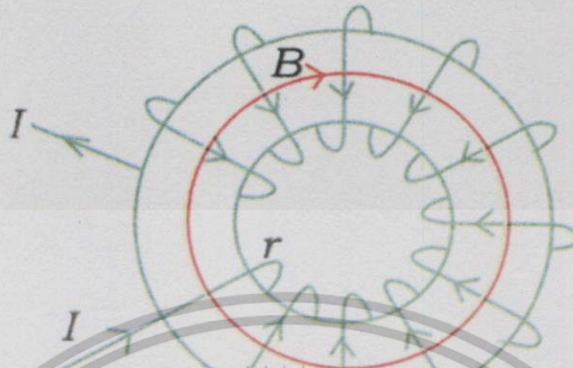
เมื่อ  $\mu_0$  คือ สภาพซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ มีค่า  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$

2. สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดวงกลม

เมื่อนำลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลายๆรอบเรียงกันเป็นรูปทรงกระบอกแล้วขดเป็นวงกลม ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่า ทอรอยด์ (Toroid) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่าน จะเกิดสนามแม่เหล็กภายในทอรอยด์ หาทิศของสนามแม่เหล็กได้โดยการกำมือขวารอบแกนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

ทอรรอยด์ ให้นิวตันทั้งสี่ตามทิศของกระแสไฟฟ้า นิวหัวแม่มือจะชี้ทิศของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์

สนามแม่เหล็กภายในทอรรอยด์มีค่าไม่สม่ำเสมอ สนามแม่เหล็กที่ขอบด้านในจะมีค่าสูงกว่า สนามแม่เหล็กที่ขอบด้านนอก ขนาดของสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของขดลวดแปรผกผันกับรัศมีของขดลวด แต่จะแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวดและปริมาณกระแสไฟฟ้า ขนาดของสนามแม่เหล็ก ณ จุดศูนย์กลางของขดลวด มีขนาด

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2a} \quad (2.2)$$

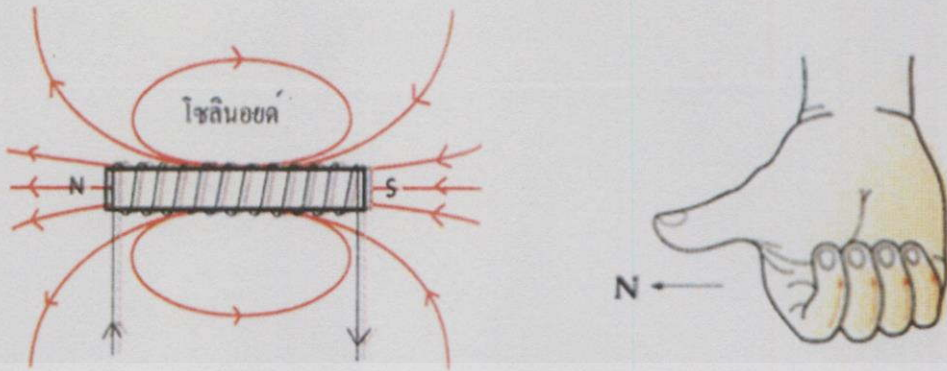
เมื่อ  $\mu_0$  คือ สภาพซึมซับได้ของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ มีค่า  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$

$n$  คือ จำนวนรอบของขดลวด

### 3.สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดโซลินอยด์

เมื่อนำลวดตัวนำที่มีฉนวนหุ้มมาขดเป็นวงกลมหลายๆวง ให้เป็นเกลียวคล้ายขดสปริง ขดลวดที่ได้นี้เรียกว่า โซลินอยด์ (Solenoid) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านโซลินอยด์จะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น การหาทิศของสนามแม่เหล็กใช้วิธีการกำมือขวาแบบเดียวกับการหาทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม ปลายขดลวดด้านที่สนามแม่เหล็กพุ่งออกจะเป็นขั้วเหนือ และอีกปลายหนึ่งซึ่งสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าจะเป็นขั้วใต้ ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 2.4 การหาขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์

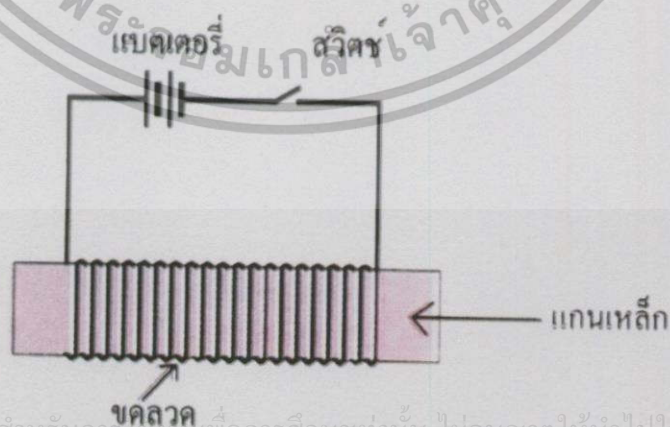
(ก.) ขั้วแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์

(ข.) การหาขั้วแม่เหล็กโดยใช้กฎมือขวา

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากโซลินอยด์มีค่าสูงสุดที่บริเวณแกนกลางของโซลินอยด์และขนาดของสนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หรือเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด ดังสมการ

$$B = \mu_0 n I \tag{2.3}$$

ถ้าใส่แท่งเหล็กอ่อนไว้ที่แกนกลางของโซลินอยด์ เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านโซลินอยด์ แท่งเหล็กอ่อนจะมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก แม่เหล็กที่เกิดจากรีนี้เรียกว่า แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnet) ดังรูปที่ 2.5

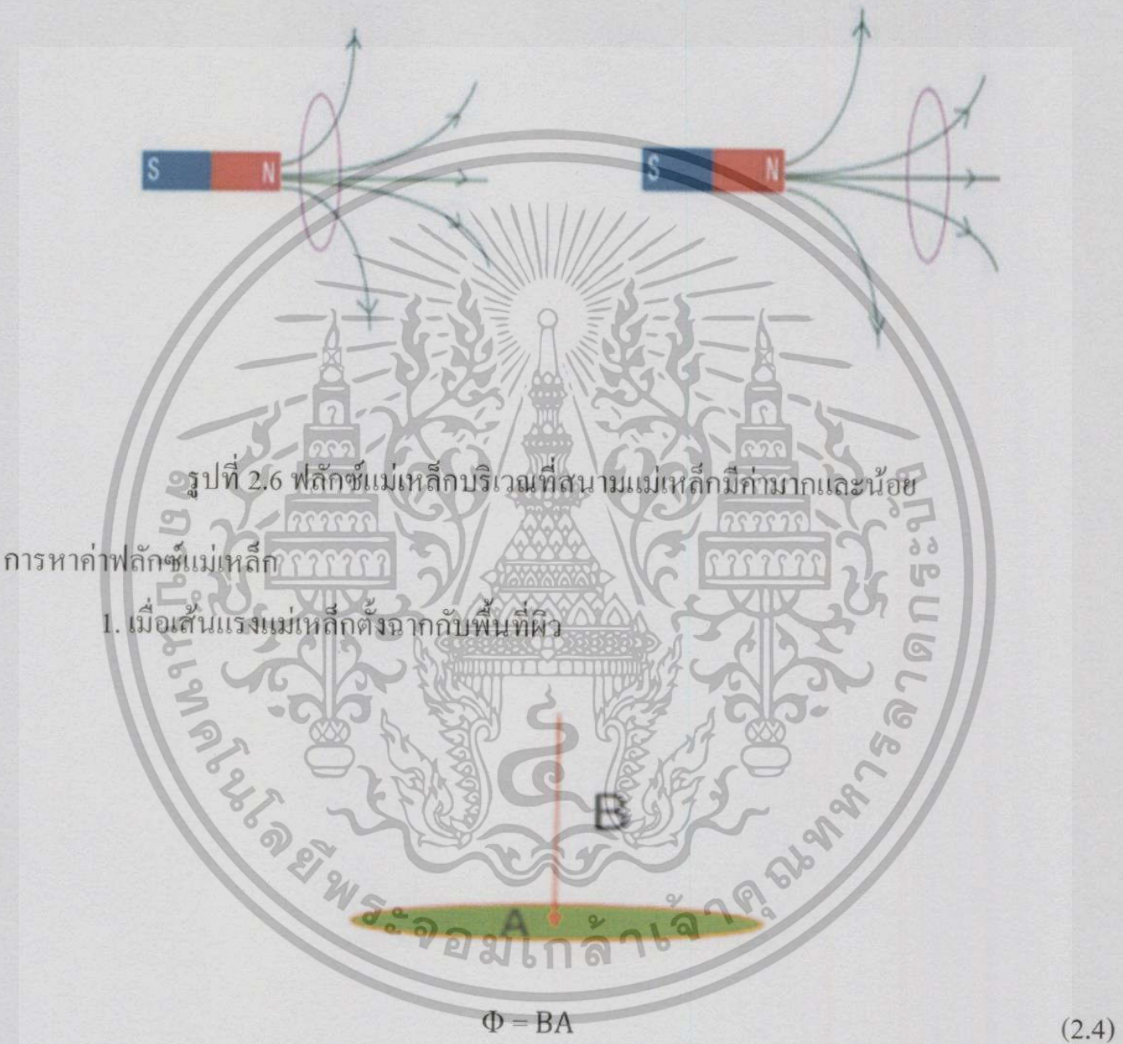


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็กที่ใส่แท่งเหล็กอ่อนไว้ที่แกนกลางของโซลินอยด์

## 2.1.2 ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux, $\Phi$ )

ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux,  $\Phi$ ) คือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งของแท่งแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เวเบอร์ (Weber, Wb) ในบริเวณที่มีฟลักซ์แม่เหล็กหนาแน่นมากจะเป็นบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีค่ามาก แสดงดังรูปที่ 2.6



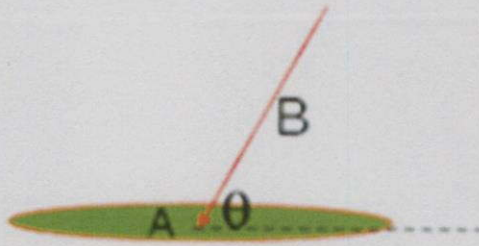
2. เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กทำมุมกับแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Phi = BA \cos \theta$$

(2.5)

### 3. เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กทำมุมกับแนวระนาบของพื้นที่ผิว



$$\Phi = BA \sin \theta \quad (2.6)$$

เมื่อ  $B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก หน่วย เวเบอร์ต่อตารางเมตร ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ ) หรือ เทสลา (T)

$\Phi$  คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก หรือ เรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก หน่วย เวเบอร์ (Wb)

$A$  คือ พื้นที่ หน่วย ตารางเมตร ( $\text{m}^2$ )

#### 2.1.3 ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B)

ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (B) คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งตั้งฉากกับพื้นที่หนึ่ง ตารางหน่วย ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ การพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำมากจะเกิดสนามแม่เหล็กมาก ในทางกลับกันถ้าพันจำนวนรอบน้อยการเกิดสนามแม่เหล็กก็น้อย

2. ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ หากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก สนามแม่เหล็กก็จะเกิดขึ้นมาก และในทางกลับกันหากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านน้อยสนามแม่เหล็กก็จะเกิดขึ้นน้อย

3. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน เช่น แกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแกนที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) หรือ สารที่สามารรถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้ เช่น เหล็กเฟอร์ไรท์ เป็นต้น สารเหล่านี้จะช่วยเสริมอำนาจแม่เหล็กในขดลวดทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น

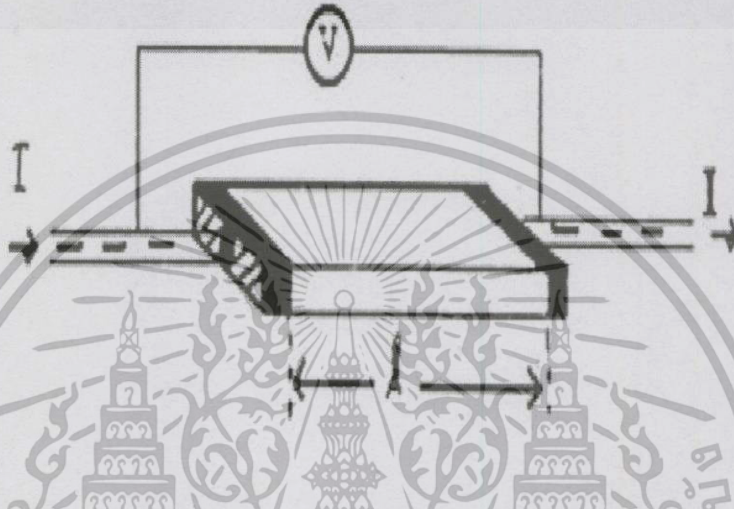
4. ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า แกนที่มีขนาดใหญ่จะให้สนามแม่เหล็กมาก ส่วนแกนที่มีขนาดเล็กจะให้สนามแม่เหล็กน้อยด้วย

## 2.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถวัดได้หลายวิธี ในบทนี้จะอธิบายถึงการวัดสภาพการต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีวัดโดยตรง วิธีสองขั้ว วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น และวิธีแวนเดอร์เพาว์ ซึ่งแต่ละวิธีนั้นมีข้อจำกัดในการวัดแตกต่างกันไป ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (Direct resistivity method) [1,2,4]

การวัดด้วยวิธีนี้จะต้องทำให้สารตัวอย่างที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อวัดพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้ค่าที่แน่นอน เช่น แท่งกลม ทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไฟฟ้าไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

เมื่อทราบค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าแล้ว สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนดให้  $R$  เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ  $\rho$  คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไป และ  $l$  คือ ระยะระหว่างขั้วของศักย์ไฟฟ้าที่วัด

จะได้

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.7)$$

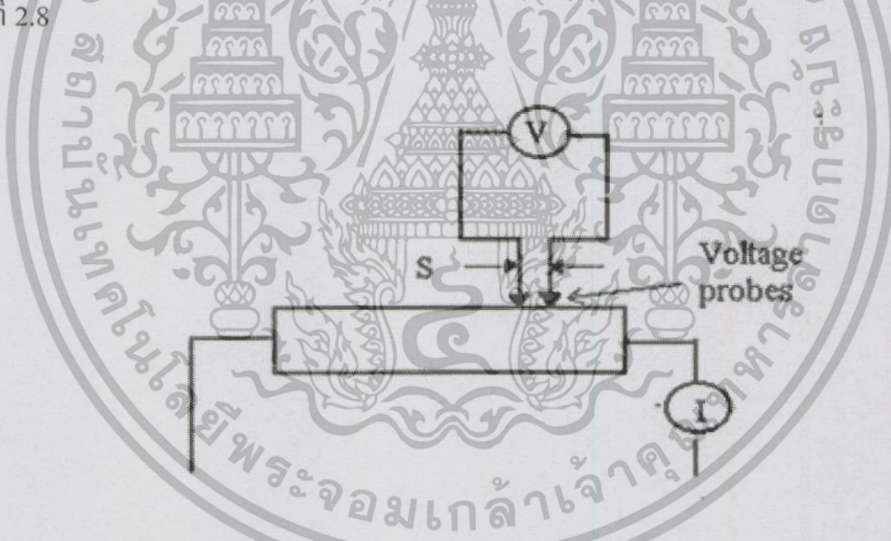
$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I}\right) \left(\frac{A}{l}\right) \quad (2.8)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ความถูกต้องในการวัดด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกนั้น มีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดี แสดงว่าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีความต้านทานเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน แม้ว่ากรณีความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (Impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความ

ต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆเท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

### 2.2.2 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว (Two point probes) [4]

การวัดด้วยวิธีนี้จะกำจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อออกไปได้และกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วยการวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีการวัดโดยตรงแต่แตกต่างกันที่การวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง วิธีการวัดทำได้โดยวางขั้วสัมผัสของโวลต์มิเตอร์ไปบนสารตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ โดยห่างจากรอยต่อของโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าพอสมควรเพื่อหลีกเลี่ยงจากการบิดเบี้ยวของเส้นสมศักย์ (Equipotential Line) บริเวณปลายทั้งสองข้างของสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ

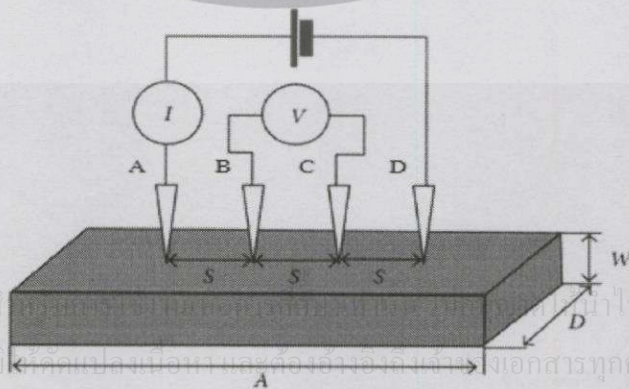
1. จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ
2. สารตัวอย่างต้องมีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
3. ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนขึ้นภายในสารตัวอย่างเพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง
4. การวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง
5. จุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออกพอสมควร

เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันบริเวณที่วัด ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (Minority Carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง

ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้ คือ สามารถกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ นอกจากนี้ยังสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.2.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น (Linear four point probe method) [3-6]

เป็นวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะที่นิยมมากที่สุดในการอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ดี ไม่ยุ่งยาก ทำการวัดได้ง่ายสะดวก สามารถวัดสารได้ทุกขนาด ไม่ว่าจะมียังขนาดรูปร่างอย่างไรและที่สำคัญคือไม่ทำลายชิ้นงานที่นำมาวัด อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการวัดประกอบด้วยขั้วปลายแหลมจำนวน 4 ขั้ว อาจมีสปริงช่วยทำให้ปลายของขั้วถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าของสารตัวอย่างได้เป็นอย่างดี โดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วในแนวเส้นตรงนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในการให้กระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือจะใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยขั้วจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่าง เป็นโลหะแข็งโดยทั่วไปจะใช้เส้นลวดโลหะทั้งสแตนมีลักษณะเส้นเล็กและแหลมเป็นแนวเส้นตรงในระนาบเดียวกัน วางด้วยระยะห่างเท่ากันทั้งหมด ในบางกรณีอาจจะวางห่างไม่เท่ากันแต่ต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน จากรูปที่ 2.9 ถ้าให้ขั้วทั้ง 4 คือ A, B, C และ D การวัดเริ่มจากป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่เข้าที่ขั้วด้านนอกสุด ซึ่งก็คือขั้ว A และ D ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อของสารตัวอย่างไปยังขั้ว D จึงเกิดแรงดันตกคร่อมเนื้อสารตัวอย่างและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสไฟฟ้าคงที่  $I$  และแรงดันตกคร่อม  $V$  ที่วัดได้มาคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 2.9 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสี่ขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดในการวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น คือ

1. ขั้วทั้ง 4 ต้องมีลักษณะแหลม มีพื้นที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่ากันทั้งหมด ลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานทางไฟฟ้าน้อย

2. สารตัวอย่างตรงบริเวณที่ขั้วทั้ง 4 วางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณไม่เกิดรูกลวงด้านใน และจะคิดว่าการกระจายของกระแสไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม (Hemisphere) โดยอาศัยหลักไฟฟ้าสถิต

ข้อเสีย ในการวัดด้วยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น คือ อาจทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างมีริ้วรอย และเสียหายได้ เพราะถูกปลายแหลมของเข็มจี้ทับ

ข้อผิดพลาดที่ควรระวัง ในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของวิธีวัดแบบสี่ขั้วเชิงเส้น คือ

#### 1. ขนาดของสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับขนาดของสารตัวอย่างนี้จะรวมถึงรูปร่างของสารตัวอย่างด้วย ควรจะวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่พอที่จะวางหัววัดได้ และสารตัวอย่างควรมีรูปทรงทางเรขาคณิต เพราะความยาวและพื้นที่หน้าตัดมักจะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า

#### 2. การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า

การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณขอบและบริเวณฐานอันเกิดจากมีสิ่งสกปรกที่มีความต้านทานน้อยกว่าสารตัวอย่างมาเกาะติด ทำให้เกิดการลัดวงจร ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริงจึงได้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าน้อยกว่าความเป็นจริงไปด้วย นอกจากนี้การเกิดกระแสรั่วไหลอาจเกิดจากความผิดปกติของผลึกภายในอีกด้วย

#### 3. อุณหภูมิ

สารตัวอย่างแทบทุกชนิด ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันต่ออุณหภูมิทั้งสิ้น อาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่าง ดังนั้นในการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าทุกครั้ง ควรจะมีการบันทึกอุณหภูมิขณะทำการวัดไว้ด้วยเสมอ หากนำมาวัดซ้ำหรือตรวจสอบอีกครั้งควรจะทำการวัดที่อุณหภูมิเดียวกัน

#### 4. แสง

ขณะทำการวัดควรจะมีส่วนป้องกันแสงตกกระทบสารตัวอย่าง เพราะแสงเป็นพลังงาน

สามารถกระตุ้นทำให้เกิดพาหะอิสระขึ้นได้ ส่งผลให้เกิดแรงดันทางแสงร่วมกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสารตัวอย่าง ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าที่วัดได้เกิดความผิดพลาด

#### 5. ปรากฏการณ์ความร้อนทางไฟฟ้า

ปรากฏการณ์หลีกเลี่ยงได้น้อยมาก สำหรับการวัดความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าด้วย กระแสตรง การเกิดแรงดันขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิในสารตัวอย่างจะมีค่าน้อย สำหรับสารตัวอย่างจำพวกโลหะ แต่จะมีค่ามากสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวน ดังนั้นควรวัดใน สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

6. ผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารตัวอย่าง

ข้อผิดพลาดชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นกับสารตัวอย่างที่เป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำมักจะมีแรงดันตกคร่อมเกิดขึ้นบริเวณขั้วสัมผัส แรงดันนี้มักจะต้านการไหลของกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นควรจะมีการทดสอบหรือเลือกชนิดของโลหะที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วสัมผัสเสียก่อน

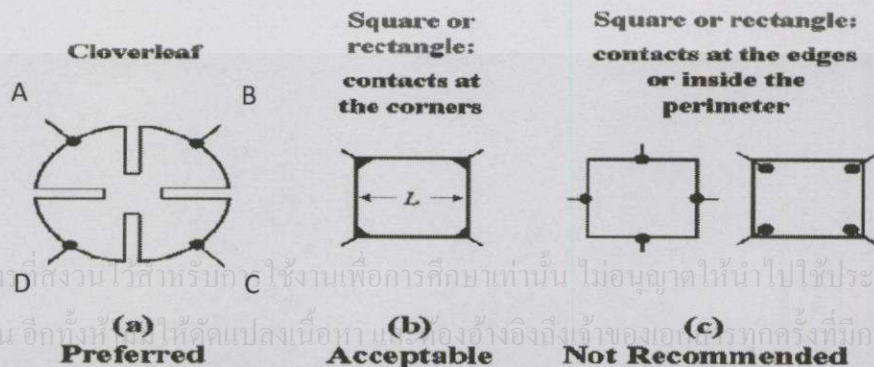
2.2.4 วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Van der Pauw method)

[7-10]

วิธีของแวนเดอร์เพาว์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นและสภาพคล่องของพาหะ วิธีนี้ไม่จำกัดรูปร่างลักษณะของสารตัวอย่าง สารที่ต้องการวัดจะมีรูปร่างลักษณะใดก็ได้ เพียงแค่สามารถติดขั้วไฟฟ้าได้ก็จะสามารถวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ การวัดจะได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

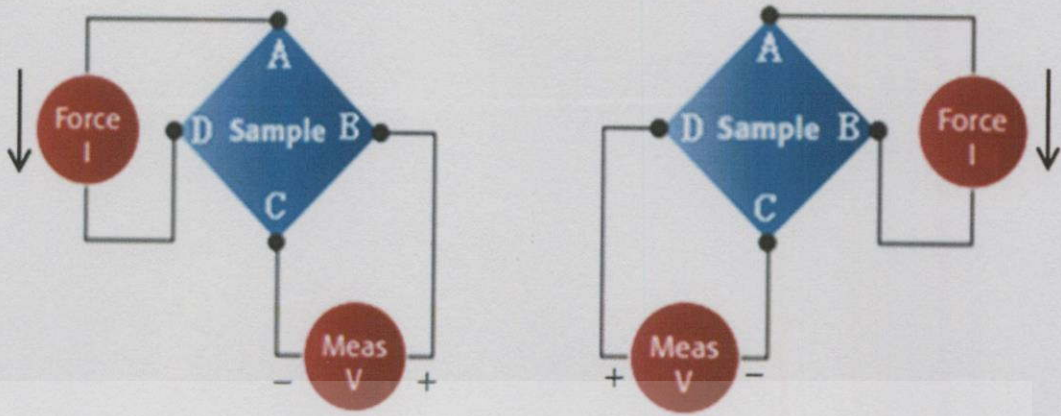
1. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.10
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง
3. สารตัวอย่างจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
4. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

วิธีของแวนเดอร์เพาว์เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้สำหรับตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง ซึ่งการวิเคราะห์สภาพคล่องตัวของสารใหม่นั้นมีความจำเป็นสำหรับเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังให้คัดแปลงเนื้อหาและอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วสัมผัสเพื่อวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์

(ก.) การวัดค่า  $R_A$

(ข.) การวัดค่า  $R_B$

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A-D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B-C ดังรูปที่ 2.11 (ก.) จะได้ค่า  $R_A$  ดังสมการ

$$R_A = \frac{V_{BC}}{I_{AD}} \tag{2.9}$$

หลังจากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A-B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D-C ดังรูปที่ 2.11 (ข.) จะได้ค่า  $R_B$  ดังสมการ

$$R_B = \frac{V_{DC}}{I_{AB}} \tag{2.10}$$

เมื่อได้ค่า  $R_A$  และ  $R_B$  แล้ว สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น ( $R_S$ ) ได้ดังนี้

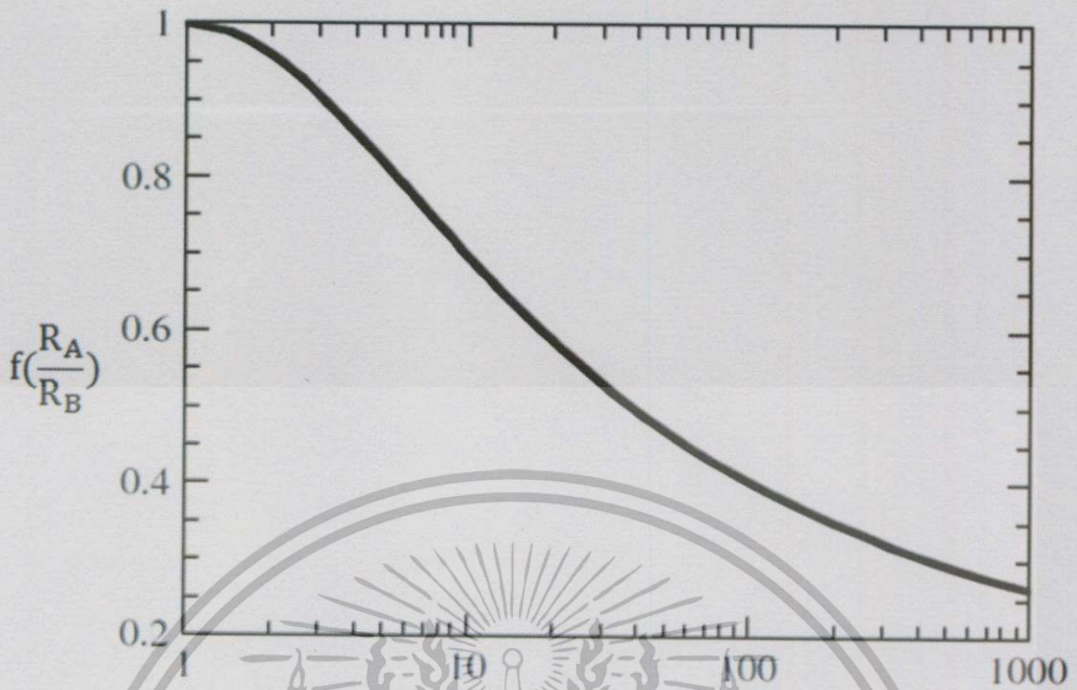
$$R_S = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{R_A + R_B}{2}\right) f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \tag{2.11}$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแวนเดอร์เพาว์ โดย

$$f\left(\frac{R_A}{R_B}\right) = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2}\right) \left(\frac{R_A - R_B}{R_A + R_B}\right)^2 \tag{2.12}$$

หรือ สามารถหาได้จากกราฟแสดงดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กราฟเฟกเตอร์ค่าแก่ของแวนเดอร์เพาฟ  $f\left(\frac{R_A}{R_B}\right)$

ดังนั้นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_s \times d \quad (2.13)$$

เมื่อ  $d$  คือความหนาของสารตัวอย่าง

ข้อจำกัดวิธีของแวนเดอร์เพาฟ

1. ขั้วสัมผัสต้องมีคุณสมบัติที่ดี มิฉะนั้นจะทำให้เส้นความสม่ำเสมอของศักย์ไฟฟ้าบิดเบี้ยวไป
2. ขั้วสัมผัสจะต้องอยู่ที่ขอบของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า จากสมมติฐานที่ว่า สารตัวอย่างเป็นแผ่นใหญ่และบางมาก คิดว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหล ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้บนชิ้นสารตัวอย่างจะเสมือนอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน
3. จุดสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเหตุผลตามข้อ 1. และข้อ 2.
4. สารตัวอย่างต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
5. เนื้อของสารตัวอย่างจะต้องเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีรูหรือรอยแตกใดๆ
6. ต้องไม่ออกแรงกดที่ขั้วสัมผัสมากเกินไป เพราะอาจจะทำให้ผิวหน้าของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้กั้ทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียหาย เช่น แฉกร้าว เป็นต้น

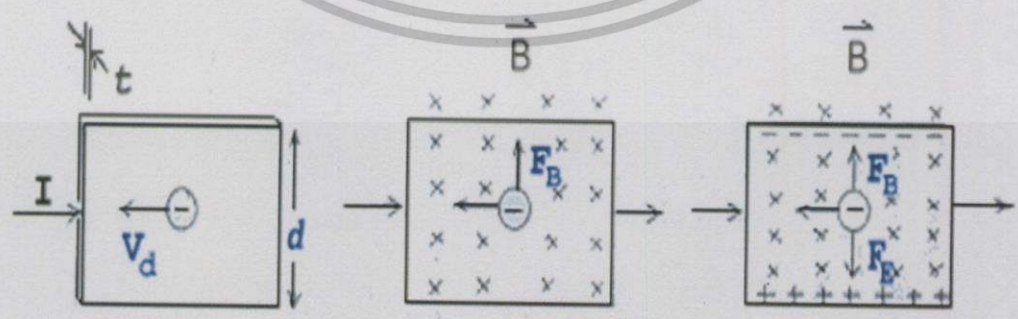
7. ไม่ควรป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่าสูงเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้อารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าผิดไป นอกจากนี้โวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูงด้วย
8. รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำควรเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี
9. การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูปของสารกึ่งตัวนำ จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเพิ่มความยาวของเส้นรอบรูป เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด

### 2.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) [11-14]

ปรากฏการณ์ฮอลล์ คือ ปรากฏการณ์ที่ประจุเคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก ประจุจะเคลื่อนที่ไปออกันอยู่ที่ฝั่งใดฝั่งหนึ่งของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วของสารกึ่งตัวนำทั้งสอง เรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Voltage)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายได้ดังรูป 2.14 ก ถึง 2.16 ค ดังนี้

รูปที่ 2.14 ก แสดงสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้าง  $d$  หนา  $t$  และมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในทิศทางจากด้านซ้ายไปด้านขวา มีพาหะประจุ คือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน  $v_d$  ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า  $I$  คือ เคลื่อนที่จากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูป 2.14 ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก  $B$  ในทิศพุ่งเข้าและตั้งฉากกับระนาบของสารกึ่งตัวนำจะเกิดแรงแม่เหล็ก  $F_B$  กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนบนของสารกึ่งตัวนำ

รูป 2.14 ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน

การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสองด้านทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (Hall Field,  $E_H$ ) ในสารกึ่งตัวนำมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า  $F_E$  กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ  $V$  ดังนี้

$$E_H = \frac{V}{d} \quad (2.14)$$

ความต่างศักย์หรือโวลเตจที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Potential Difference หรือ Hall Voltage,  $V_H$ ) หากสารกึ่งตัวนำที่วัดได้เป็นชนิด  $p$  แสดงว่ามีพาหะข้างมากคือ โฮล ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟก็จะผลักให้ โฮล (Hole) เคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นไปด้านบน คือ เคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กตรอน และในทางตรงกันข้ามหากสารกึ่งตัวนำที่วัดได้เป็นชนิด  $n$  แสดงว่ามีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน ขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟก็จะผลักให้อิเล็กตรอน (Electron) เคลื่อนที่จากด้านบนลงด้านล่าง คือ เคลื่อนที่เข้าหาโฮล

### 2.3.1 แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)

แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากประจุไฟฟ้าผ่านสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีสมการดังนี้

$$F_{\text{Lorentz}} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.15)$$

จะเห็นได้ว่าแรงที่เกิดขึ้นบนประจุ  $q$  วิ่งด้วยความเร็ว  $v$  ผ่านสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $B$  พบว่าทิศทางของแรงนี้กระทำบนประจุ  $q$  จะเป็นไปตามกฎมือขวา เนื่องจากปรากฏการณ์ของฮอลล์จะสามารถพิจารณาได้ง่ายขึ้นโดยพยายามจัดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $B$  ให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของประจุ  $q$  ดังนั้นค่าของแรงลอเรนซ์นี้จึงคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F &= qvB\sin 90 \\
 &= qvB
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

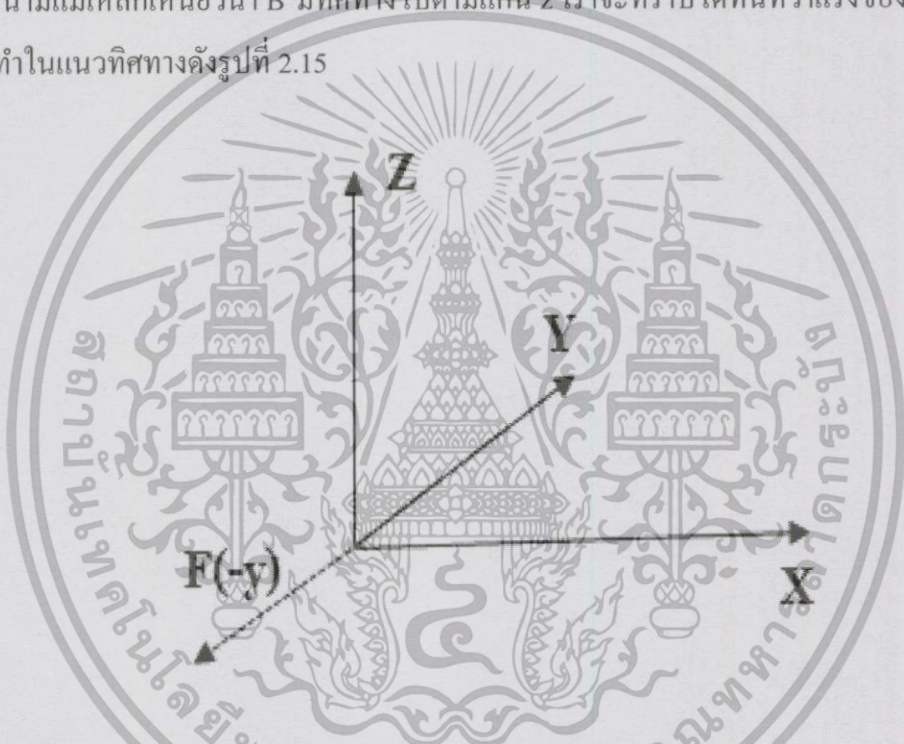
เมื่อ  $q$  คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน

$v$  คือ ทิศทางของประจุ

$B$  คือ ทิศทางของสนามแม่เหล็ก

$\theta$  คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับทิศทางของประจุ (โดยทั่วไปจะพิจารณาที่มุมตั้งฉาก)

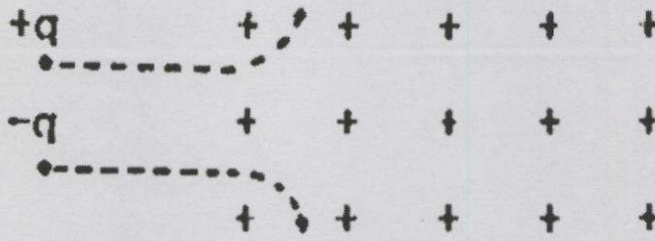
แต่สำหรับทิศทางนั้นให้ถือหลักกฎมือขวาไว้เป็นสำคัญ เช่น ถ้าประจุ  $+q$  วิ่งไปทางแกน  $x$  และมีสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ  $B$  มีทิศทางไปตามแกน  $z$  เราจะทราบได้ทันทีว่าแรงของลอเรนซ์นี้จะกระทำในแนวทิศทางดังรูปที่ 2.15



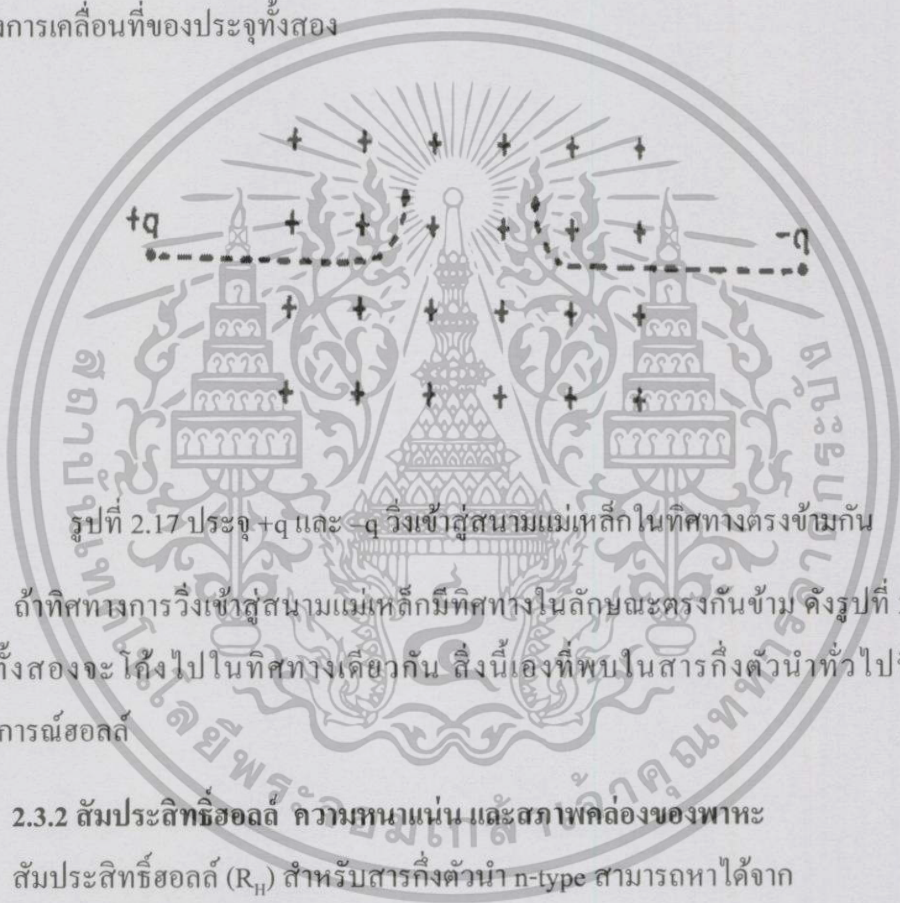
รูปที่ 2.15 แรงลอเรนซ์มีทิศทางในแกน  $-y$  มีขนาด  $qvB$

ในทำนองเดียวกันถ้าประจุ  $-q$  วิ่งเหมือนเดิมในทิศทางแกน  $x$  และมีสนามแม่เหล็ก  $B$  เหมือนเดิมคือไปในทิศทางแกน  $z$  ดังนั้นแรงลอเรนซ์ที่กระทำบนประจุ  $-q$  จะมีทิศทาง  $+y$  และมีขนาดเท่ากันคือ  $qvB$  เพียงแค่ทิศทางตรงข้ามกับประจุ  $+q$  ข้อสังเกต คือ ถ้าวิ่งไปในทิศทางเดียวกันผ่านสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการวิ่งของประจุลบและประจุบวกจะเห็นได้ว่าแรงลอเรนซ์ซึ่งกระทำบนประจุทั้งสองนี้จะทำให้ประจุทั้งสองเบี่ยงเบนไปในทิศทางที่ตรงกันข้ามกันดังแสดง

ให้เห็นดังรูปที่ 2.16 ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ประจุต่างชนิดกันเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันผ่านสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุทั้งสอง



รูปที่ 2.17 ประจุ +q และ -q วิ่งเข้าสู่สนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน

ถ้าทิศทางการวิ่งเข้าสู่สนามแม่เหล็กมีทิศทางในลักษณะตรงกันข้าม ดังรูปที่ 2.17 พบว่าประจุทั้งสองจะโค้งไปในทิศทางเดียวกัน สิ่งนี้เองที่พบในสารกึ่งตัวนำทั่วไปที่นำมาวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

2.3.2 สัมประสิทธิ์ฮอลล์ ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะ

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ ( $R_H$ ) สำหรับสารกึ่งตัวนำ n-type สามารถหาได้จาก

$$R_H = \frac{-1}{qn} \tag{2.17}$$

เช่นเดียวกันสำหรับสารกึ่งตัวนำ p-type สามารถหาสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ( $R_H$ ) ได้จาก

$$R_H = \frac{1}{qp} \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 คำนึงถึงสภาพคล่องของพาหะหาได้จาก

$$\mu = \frac{|R_H|}{\rho} \tag{2.19}$$

สภาพคล่องและความหนาแน่นของพาหะแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

- สารกึ่งตัวนำชนิด n

$$\mu_n = \frac{1}{qn\tau} \tag{2.20}$$

- สารกึ่งตัวนำชนิด p

$$\mu_p = \frac{1}{qp\tau} \tag{2.21}$$

เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอน

p คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

n หรือ p คือ ปริมาณของพาหะต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

### 2.4 โปรแกรม LabVIEW [15-16]



รูปที่ 2.18 ไอคอนโปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench หมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LABVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือจะเรียกย่อๆ ว่า VI ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้อีกคือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ โปรแกรมนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ สิ่งที่ LabVIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นคือ LabVIEW เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) คือไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆทั้งสิ้นและภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้นี้เรียกว่า ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical Language) หากต้องการที่จะนำข้อมูลจากภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาในเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล ประมวลผลค่า แสดงผล หรือใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ก็สามารถทำได้ กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าโปรแกรม LabVIEW คือการพยายามทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ของเราเมื่อรวมกับ LabVIEW และอุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Card) แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของเราให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Oscilloscope, Multi-meter, Function Generator, Strain meter Thermometer หรือ เครื่องมือวัดอื่นๆตามที่เรากำลังต้องการ จึงเป็นที่มาของชื่อเครื่องมือวัดเสมือนจริง (Virtual Instrument) โดยการเชื่อมต่อโปรแกรม LabVIEW เข้ากับกับฮาร์ดแวร์ภายนอกทำได้โดยผ่านทางการ์ด DAQ (data acquisition) การเชื่อมต่อสามารถเชื่อมต่อกับพอร์ต (port) ได้หลายชนิด เช่น พอร์ตขนาน (parallel port) พอร์ตอนุกรม (Serial port) GPIB และ HPIB เป็นต้น

โปรแกรม LabVIEW ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. Front Panel หรือหน้าจอแสดงผล จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าจอแสดงผลของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัด โดยจะประกอบด้วย สวิตช์ปิดเปิด ปุ่มบิด ปุ่มกดจอแสดงผลหรือค่าคงที่ ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้ หน้า Front Panel แสดงดังรูปที่ 2.19

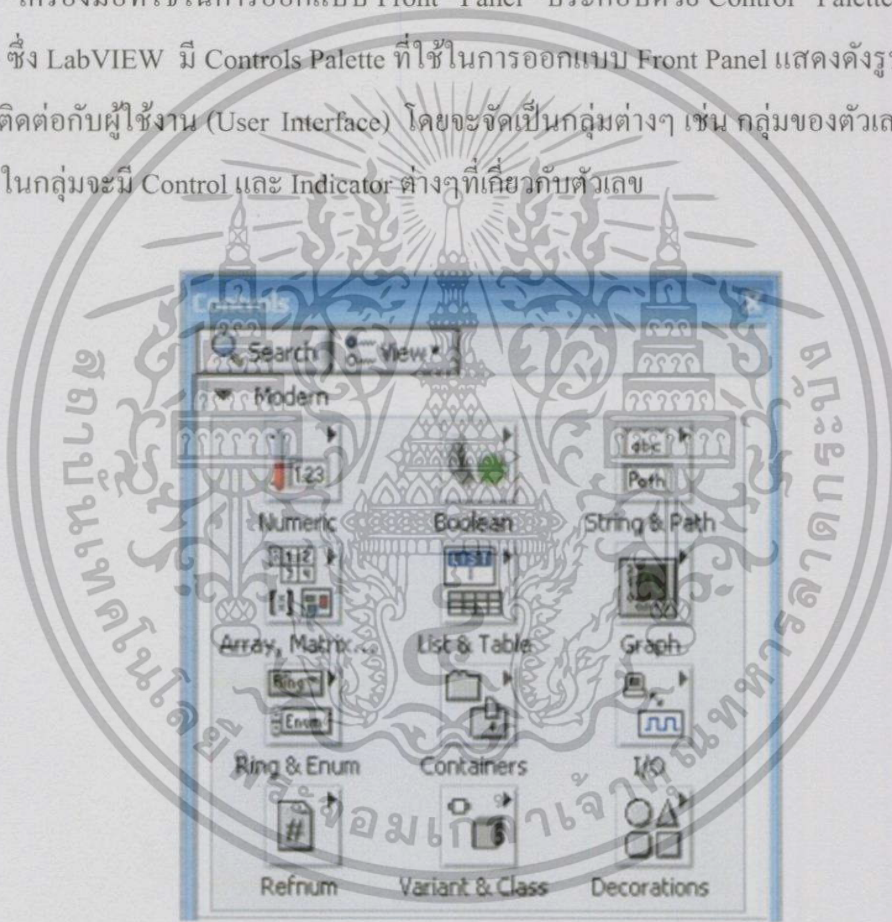


รูปที่ 2.19 หน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

Object ที่อยู่บน Front Panel มีอยู่สามประเภท คือ

1. Control คือ ประเภทที่รับค่าจากผู้ใช้ (Input) ซึ่งผู้ใช้สามารถพิมพ์ค่าลงไป หรือใช้เมาส์คลิกเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าได้ เช่น ปุ่มหมุน ปุ่มเลื่อน สวิตช์ เป็นต้น
2. Indicators คือ ประเภทที่ใช้แสดงค่าต่างๆเท่านั้น (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ LED
3. Decorations เป็น Object ที่ไม่เกี่ยวข้องกับโปรแกรม และ Code บน Block Diagram เลยแต่มีไว้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบของ Front Panel เท่านั้น

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel ประกอบด้วย Control Palette และ Tools Palette ซึ่ง LabVIEW มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel แสดงดังรูปที่ 2.20 เป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่างๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆที่เกี่ยวกับตัวเลข



รูปที่ 2.20 Control Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

Tools Palette คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งจะใช้ทั้งการออกแบบ Front Panel และ Block Diagram ในส่วนนี้จะกล่าวถึง Tools Palette สำหรับออกแบบ Front Panel แสดงดังรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



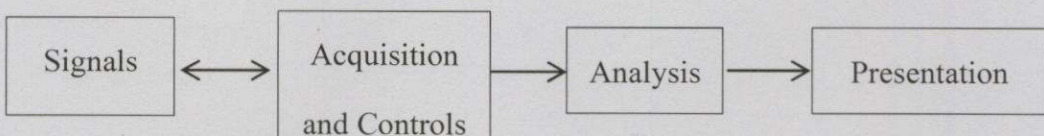
รูปที่ 2.21 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

2. Block Diagram: เปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัด ซึ่งจะเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปภาพ LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุมทำให้สามารถออกแบบตามที่คุณต้องการได้ หลักการดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.22 แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบในที่นี้ คือ คอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้มาจากการ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า)

2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วอาจจะผ่านฟังก์ชันในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนที่วัดได้และใช้งานได้

3. Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานโดยอาจแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลเฉพาะที่วัดได้โดยไม่ต้องรู้ความสำคัญกับเวลา หรือ Spectrum Analysis จะแสดงสัญญาณในรูปแบบความถี่หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 Block Diagram ของเครื่องมือวัดที่สร้างจาก LabVIEW

หรือ อาจมอง Block Diagram นี้เป็นเสมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษา G (Graphical Language) ซึ่ง Block Diagram นี้ถือว่าเป็น Executable Program คือ สามารถที่จะทำงานได้ทันที และข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ LabVIEW จะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้น โดยสามารถที่จะดูรายละเอียดของความผิดพลาดแสดงให้เห็นได้ ส่วนประกอบภายใน Block Diagram จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงาน หรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block แต่ละ Block จะถูกต่อสาย (Wire) เข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านี้ ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ ตัวอย่างหน้า Block Diagram แสดงดังรูปที่ 2.23

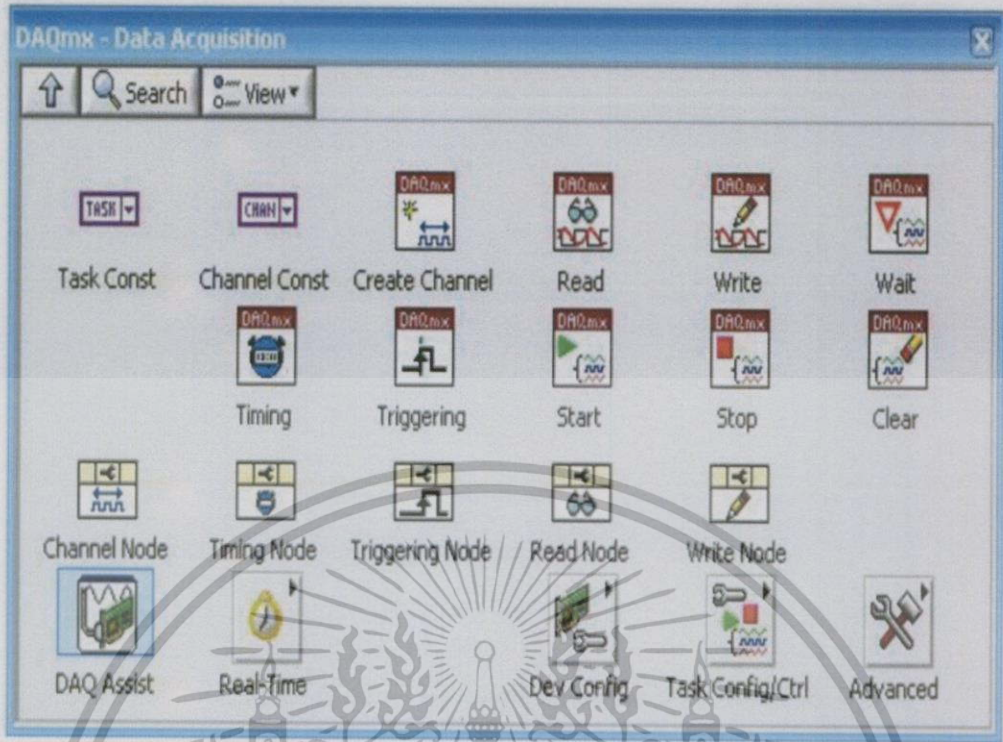


รูปที่ 2.23 ตัวอย่างหน้า Block Diagram

Functions Palette เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมบน Block Diagram ซึ่งจะมี

Function และ SubVI ต่างๆ ให้ผู้ใช้เลือกใช้โดย Function และ SubVI จัดเป็นกลุ่มๆ เช่น Numeric

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีสงวนไว้สำหรับครู ไร้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
Function จะมี Function ต่างๆเกี่ยวกับตัวเลข เช่น บวก ลบ คูณ และหาร เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.24  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณาไปใช้



รูปที่ 2.24 เครื่องมือสำหรับ Dam - Data Acquisition

Tools Palette สำหรับ Block diagram เปิด Tools Palette โดยการ Click ที่ Window >> Show Tools Palette หรือ กด Shift Right Click แล้ว Click เลือก Tool ที่ต้องการใช้ (ถ้า Automatic Tools Selection เปิดอยู่แล้ว (LED) เป็นสีเขียวให้ Click เพื่อปิด Automatic Tool Selection ซึ่งมีเฉพาะใน Version 6.1 ขึ้นไป) เครื่องมือ Tools Palette แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 เครื่องมือ Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเบื้องต้นเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Tools Palette ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

1. Operation Tool ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าหรือเลือกค่าคงที่ใน Block Diagram
2. Position/Size/Select ใช้ในการเลือก/เคลื่อนย้าย/จัดขนาด ของสิ่งที่สร้างขึ้นบน Block Diagram
3. Edit Text Tool ใช้ในการแก้ไขข้อความที่เป็นตัวอักษร หรือเพิ่มข้อความลงบน Front Panel
4. Wiring Tool ใช้ในการโยงสาย (Wiring) ระหว่าง Terminal หรือ Node ซึ่งสายที่ โยงนี้ จะเป็นเส้นทางเดินของข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของอุปกรณ์ และฟังก์ชันการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในโครงงานพิเศษ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสำหรับระบบการวัดฮอลล์ อาทิ เช่น Gauss/Tesla Meter, Regulated DC Power Supply, Current source, DMM, Magnetic Core และ Chiller เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นส่วนของการจัดเตรียมอุปกรณ์และวิธีการวัดแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์ และในส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของโปรแกรมควบคุมระบบการวัดฮอลล์ ถูกออกแบบและเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อความสะดวกในการทำการวัดและศึกษาความผิดพลาดจากการคำนวณ ซึ่งจะประมวลผลการวัดและคำนวณคุณสมบัติต่างๆของสารตัวอย่างผ่านทางจอคอมพิวเตอร์

#### 3.1 อุปกรณ์ และฟังก์ชันการใช้งาน

##### 3.1.1 Gauss/Tesla Meter

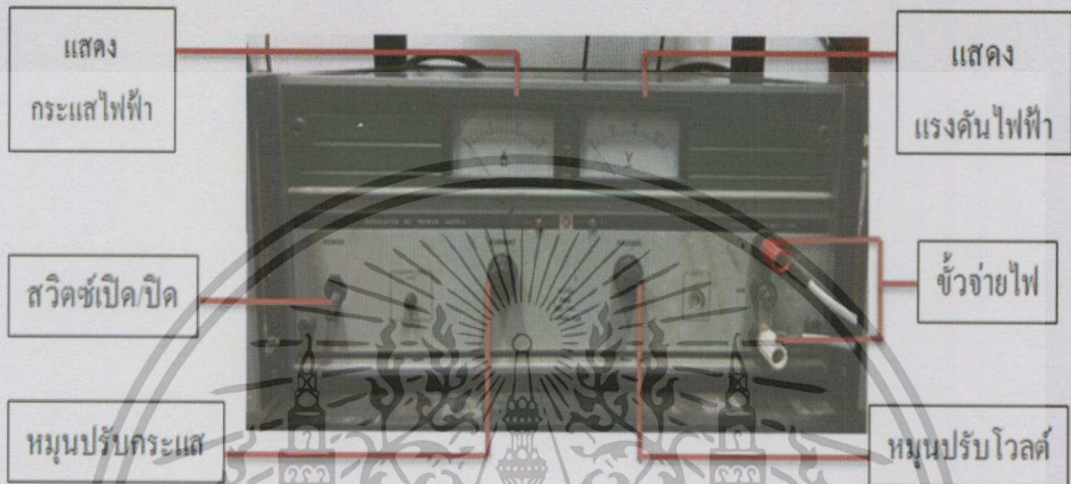


รูปที่ 3.1 5180 Gauss/Tesla Meter

เกาส์มิเตอร์ หรือเทสลามิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux Density) หรือใช้วัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) ประกอบด้วย โพรบวัด และตัวเครื่องวัด แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะต่อเข้าด้วยกันที่บริเวณด้านบนของตัวเครื่องวัด เนื่องจากโพรบวัดมีขนาดเล็กจึงสามารถนำไปวัดในจุดที่ทึบหรือในซอกมุมต่างๆ

ได้ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จะอยู่ในหน่วย Gauss หรือ Tesla แสดงผลการวัดด้วยจอ LCD ซึ่ง 5180 Gauss/Tesla Meter ถูกเลือกมาใช้ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กเนื่องจากมี ช่วงของการวัดตั้งแต่ 1 kG ถึง 30 kG มีความละเอียด 1 mG

### 3.1.2 Regulated DC Power Supply



รูปที่ 3.2 Regulated DC Power Supply

Regulated DC Power Supply คือ เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแบบควบคุมได้ สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าที่แน่นอนได้ มีโวลุ่มสำหรับหมุนปรับค่า สามารถปรับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-15 A และปรับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-70 V แสดงผลแบบอนาล็อก มีส่วนแสดงผล 2 ส่วน คือ ส่วนของกระแสไฟฟ้า และส่วนของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แสดงในหน่วย แอมแปร์ (A) และโวลต์ (V) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 การปรับกระแสไฟฟ้าหรือปรับแรงดันไฟฟ้าต้องคอยๆปรับหากปรับเกินขีดจำกัดอาจทำให้เข็มหักเกิดความเสียหายได้ ในส่วนของการหมุน โวลุ่มเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะมีไฟสีแดงสว่างขึ้นเมื่อปรับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหากไฟสีเขียวในส่วนของแรงดันไฟฟ้าสว่างขึ้นให้หยุดหมุนโวลุ่มทันที เนื่องจากแรงดันถึงขีดจำกัดแล้ว และการหมุน โวลุ่มเพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะมีไฟสีเขียวสว่างขึ้นเมื่อปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นหากไฟสีแดงทางด้านของกระแสไฟฟ้าสว่างขึ้นให้หยุดปรับทันทีเนื่องจากกระแสไฟฟ้าถึงขีดจำกัดแล้ว เครื่อง Regulated DC Power Supply นี้มีความละเอียด

ของกระแสไฟฟ้า 1 A และความละเอียดของแรงดันไฟฟ้า 1 V ซึ่งเครื่องนี้ถูกนำมาใช้งานในการวัดค่าไม่ว่าจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเพื่อปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 Keithley 2410 Current source



รูปที่ 3.3 Current source Keithley Model 2410

แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (Current source, Keithley 2410) นำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง เครื่อง Keithley 2410 แสดงดังรูปที่ 3.3 ความละเอียดของการจ่ายกระแสไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งมีขอบเขตของการจ่ายกระแสไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $\pm 1 \mu\text{A}$  ถึง  $\pm 1\text{A}$  สามารถเลือกช่วงของการวัดได้โดยการปรับที่ด้านหน้าของเครื่องหรือควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่อง Current source นั้นจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยใช้ General Purpose Interface Bus (GPIB)

ตารางที่ 3.1 ความละเอียดของการจ่ายกระแส

Model 2410 Source range	Model 2410 output Current setting	Output current limits (1 year, 18°C-28°C)
1 $\mu\text{A}$	1.00000 $\mu\text{A}$	0.99905 to 1.00095 $\mu\text{A}$
10 $\mu\text{A}$	10.0000 $\mu\text{A}$	9.9947 to 10.0053 $\mu\text{A}$
100 $\mu\text{A}$	100.000 $\mu\text{A}$	99.949 to 100.051 $\mu\text{A}$
1 mA	1.00000 mA	0.99946 to 1.00054 mA
20 mA	20.0000 mA	19.9870 to 20.0130 mA
100 mA	100.00 mA	99.914 to 100.086 mA
1 A	1.00000 A	0.99640 to 1.00360 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆ ของเอกสารนี้อาจถึงแก่โทษจำคุกหรือปรับได้

### 3.1.4 Keithley 2100 Digital Multimeter



รูปที่ 3.4  $6\frac{1}{2}$  digital multimeter Keithley model 2100

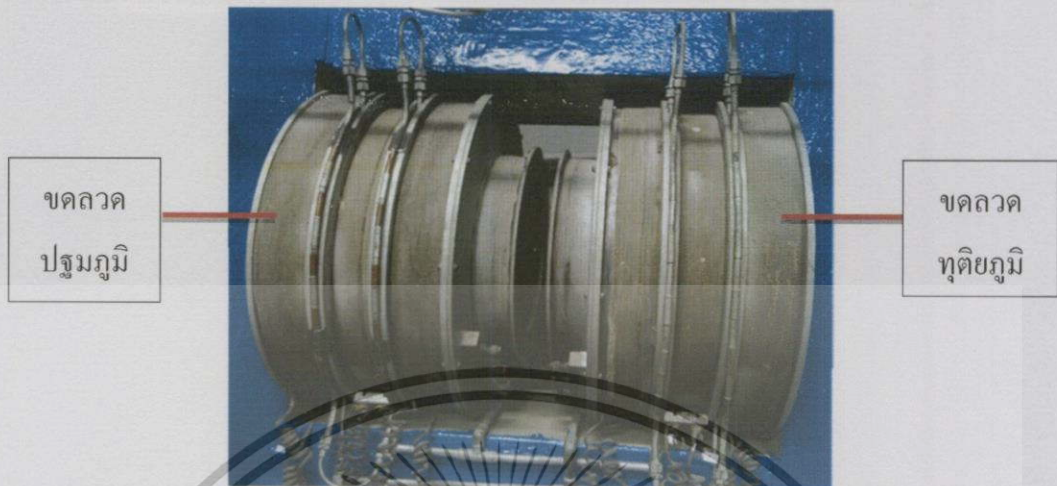
Digital Multimeter (DMM) นำมาใช้ในการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ผิวของชิ้นงาน เครื่อง Keithley 2100 Digital Multimeter แสดงดังรูปที่ 3.4 มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $\pm 100$  mV ถึง  $\pm 1$  kV มีความละเอียดสูงสุดถึง  $0.1$   $\mu$ V สามารถเลือกช่วงของการวัดได้โดยปรับที่ ด้านหน้าของเครื่องหรือควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่อง DMM นี้จะเชื่อมต่อกับ คอมพิวเตอร์โดยใช้ USB

ตารางที่ 3.2 Specifications DC characteristics: accuracy  $\pm$ (% of reading + % of range)

Function	Range	Resolution	Input Resistance	1 Year, 23°C $\pm$ 5°C
DC Voltage	100.0000 mV	0.1 $\mu$ V	>10 G $\Omega$	0.0055 + 0.0040
	1.000000 V	1.0 $\mu$ V	>10 G $\Omega$	0.0045 + 0.0008
	10.00000 V	10 $\mu$ V	>10 G $\Omega$	0.0038 + 0.0006
	100.0000 V	100 $\mu$ V	10 M $\Omega$	0.0050 + 0.0007
	1000.000 V	1 mV	10 M $\Omega$	0.0055 + 0.0010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 Magnetic Core



รูปที่ 3.5 Magnetic Core

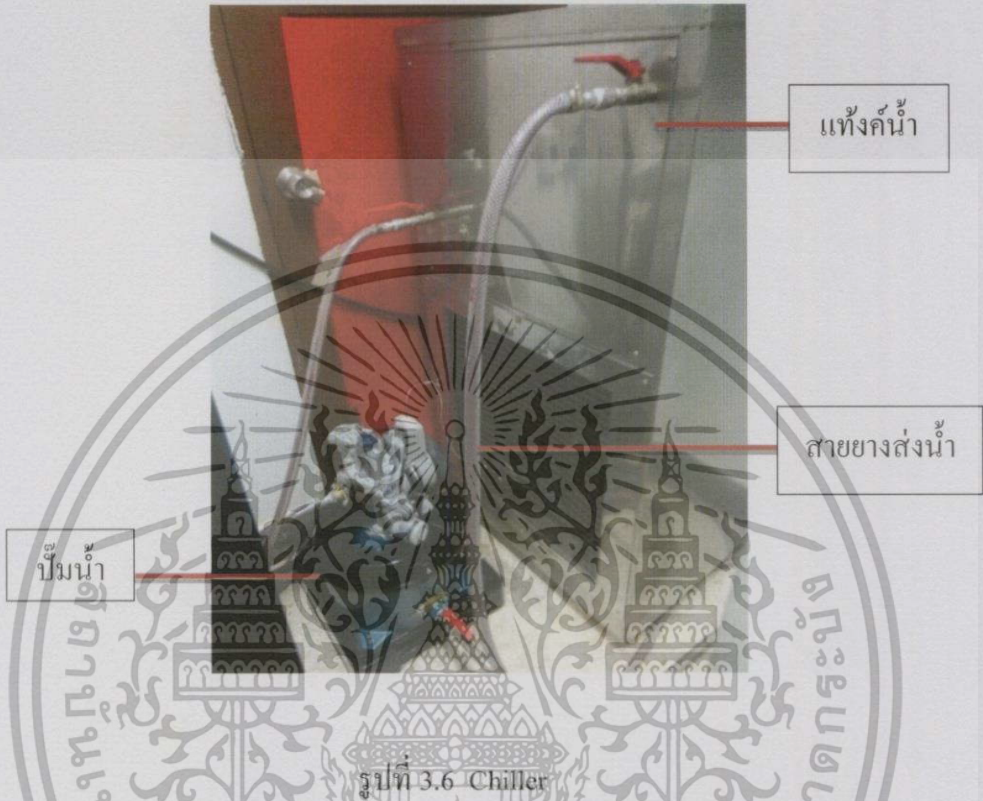
Magnetic Core คือ แกนแม่เหล็ก หรือวงแหวนแม่เหล็กมีลักษณะเป็นรูปวงแหวนทำด้วยเหล็กออกไซด์หรือเฟอร์ไรต์ มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นมีความจำเป็นต้องการแกนแม่เหล็ก ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ในการทดลองนี้มีขดลวดทั้งหมด 6 ขด โดยแบ่งขดลวดออกเป็นปฐมภูมิ 3 ขด และทุติยภูมิ 3 ขด ขดลวดแต่ละขดนั้นมีความต้านทานขดละ 12 โอห์ม นำขดลวดทั้ง 3 ขดต่อขนานกัน แล้วจึงนำขดลวดทั้งปฐมภูมิและทุติยภูมิมาต่ออนุกรมกัน ขดลวดแต่ละขดที่ต่อขนานกันมีความต้านทานขดละ 4 โอห์ม ดังนั้นขดลวดทั้ง 6 ขด มีความต้านทานรวม 8 โอห์ม ดังรูปที่ 3.5 สามารถเปลี่ยนทิศของสนามแม่เหล็กได้โดยการเปลี่ยนขั้วของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ความเข้มของสนามแม่เหล็กเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปสามารถวัดได้โดยใช้ Gauss/Tesla Meter ในตำแหน่งที่วัดสารตัวอย่างเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่อง Regulated DC Power Supply สามารถปรับกระแสสูงสุดได้ 8 A และพบว่าสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ทิศ มีความเข้มเท่ากัน คือ 0.53 T ซึ่งค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กนั้นนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ ความหนาแน่น และสภาพคล่องของพาหะต่อไป

### 3.1.6 Chiller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการผลิตซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

Chiller คือ เครื่องทำความเย็น มีหน้าที่ในการผลิตน้ำเย็นเพื่อส่งไปยังขดลวด เนื่องจากเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเป็นเวลานานจะทำให้ขดลวดเกิดความร้อนขึ้น มีผลให้ความต้านทานของขดลวดเพิ่มขึ้น จึงสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดได้ลดลง ซึ่งการ

จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดนั้นก็มีผลโดยตรงต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ขดลวดเกิดความร้อนมากเกินไป จึงจำเป็นต้องมีการระบายความร้อนเพื่อปรับอุณหภูมิของขดลวดให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ภาพของ Chiller แสดงดังรูปที่ 3.6

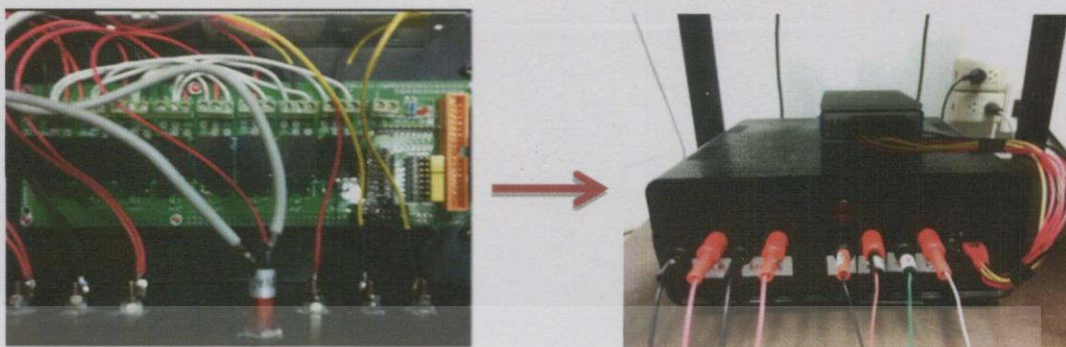


รูปที่ 3.6 Chiller

หลักการทำงานของ Chiller คือ จะนำสารทำความเย็น (ก๊าซเย็นความดันต่ำ) โดยอยู่ในสถานะไออิ่มตัวมาอัดที่ Compressor จากนั้นสารทำความเย็นจะถูกอัดโดยเครื่องอัด จนมีสถานะเป็นไอร้อน (Superheated Vapor) มีความดันสูงและอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นสารทำความเย็นจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเครื่องควบแน่น (Condenser) เพื่อถ่ายเทความร้อนออกทำให้สารทำความเย็นเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวที่มีความดันสูง จากนั้นของเหลวอิ่มตัวความดันสูงจะเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ขยายตัว (อุปกรณ์ลดแรงดัน) สารทำความเย็นจะมี 2 สถานะ คือ ของเหลวและก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำและความดันต่ำ หลังจากนั้นจะผ่านเข้าไปในเครื่องระเหย (Evaporator) ทำให้สารทำความเย็นรับความร้อนจากการไหลคั้นๆ และกลายสภาพเป็นไออิ่มตัว ซึ่งวัฏจักรการทำความเย็นจะดำเนินเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ หมุนเวียนเป็นวงจรเช่นนี้ตลอดเวลา จึงทำให้ Chiller สามารถผลิตน้ำเย็นได้อย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.7 Relays



รูปที่ 3.7 Relays

รีเลย์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัด-ต่อวงจร โดยใช้หลักการทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าและการที่จะให้รีเลย์ทำงานต้องป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับรีเลย์ตามที่กำหนด เพราะเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับรีเลย์จะทำให้หน้าสัมผัสติดกัน กลายเป็นวงจรปิด และตรงกันข้ามหากไม่มีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับรีเลย์จะกลายเป็นวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าที่เราใช้ป้อนให้กับรีเลย์เป็นกระแสไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายไฟ 220 V เป็น 12 V ในการทดลองนี้ใช้รีเลย์ในการสลับ Configure ในการวัดสารตัวอย่างซึ่งจะถูกควบคุมผ่าน National Instruments 9472 (NI 9472) ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่สั่งการและประมวลผล การเชื่อมต่อรีเลย์เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกนั้นจะมีจุดเชื่อมต่อที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 จุด คือ Normally Closed (NC), Normally Open (NO) และ Common (C) ในการใช้งานจะต้องขาค้านหนึ่งขาคือขา C เสมอ ส่วนอีกขาหนึ่งจะต่อเข้ากับ NO หรือ NC นั้นขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้อุปกรณ์อยู่ในสถานะที่ทำงานหรือไม่ ในการทริกรีเลย์นั้นจะใช้ความต่างศักย์ในการทริค ซึ่งในการทดลองนี้ใช้รีเลย์ 8 ตัว ทำหน้าที่ในการสลับ Configure 8 แบบ แสดงดังรูปที่ 3.7

Configure ทั้ง 8 แบบ คือ

$$1. R_{BA,CD} = V_{CD}/I_{BA}$$

$$2. R_{AB,DC} = V_{DC}/I_{AB}$$

$$3. R_{DC,AB} = V_{AB}/I_{DC}$$

$$4. R_{CD,BA} = V_{BA}/I_{CD}$$

$$5. R_{CB,DA} = V_{DA}/I_{CB}$$

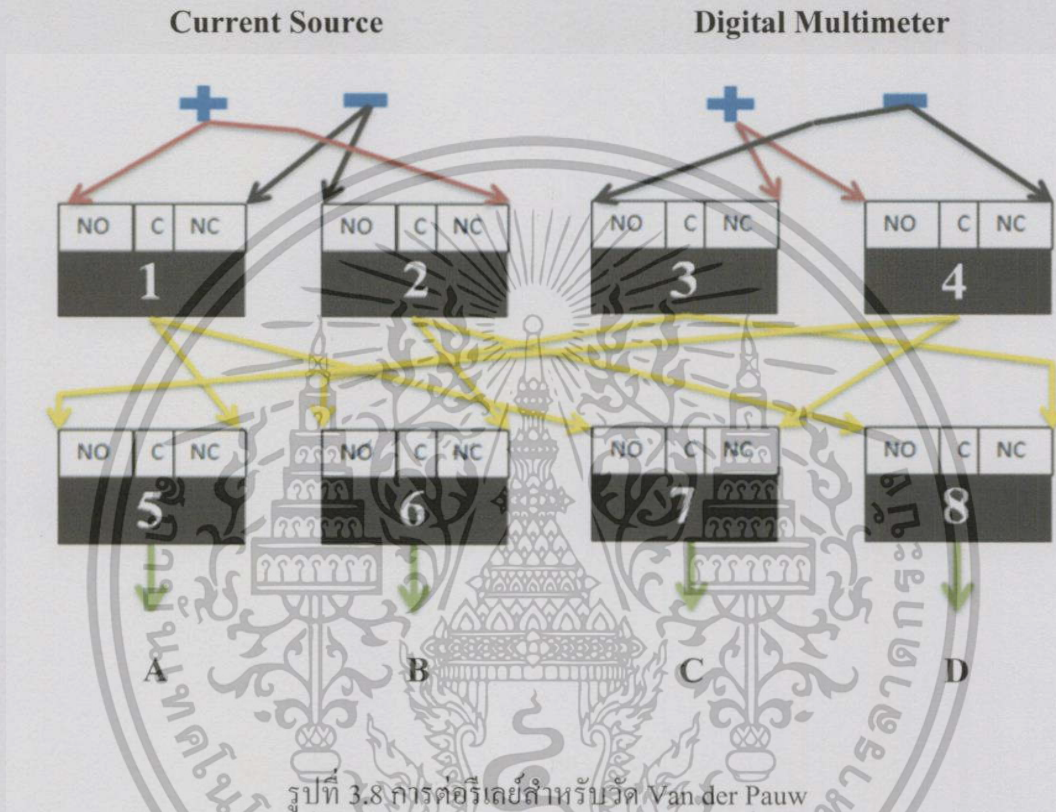
$$6. R_{BC,AD} = V_{AD}/I_{BC}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

7.  $R_{AD,BC} = V_{BC}/I_{AD}$

8.  $R_{DA,CB} = V_{CB}/I_{DA}$

Configure ทั้ง 8 แบบนั้นเป็นการวัดด้วยวิธีของ Van der Pauw การต่อรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การต่อรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw

คำอธิบาย

Current Source ขาบวกต่อกับ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 1 และ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 2

Current Source ขาลบต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 1 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 2

DMM Meter ขาบวกต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 3 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ DMM Meter ขาลบต่อกับ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 3 และ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 4 มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Output ของรีเลย์ตัวที่ 1 ต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 5 และ Normally

Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 7

Output ของรีเลย์ตัวที่ 2 ต่อกับ Normally Closed (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 6 และ Normally Open (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 8

Output ของรีเลย์ตัวที่ 3 ต่อกับ Normally Closed (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 6 และ Normally Open (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 8

Output ของรีเลย์ตัวที่ 4 ต่อกับ Normally Closed (NO) ของรีเลย์ตัวที่ 5 และ Normally Open (NC) ของรีเลย์ตัวที่ 7

Output ของรีเลย์ตัวที่ 5 ต่อกับขาที่ 1

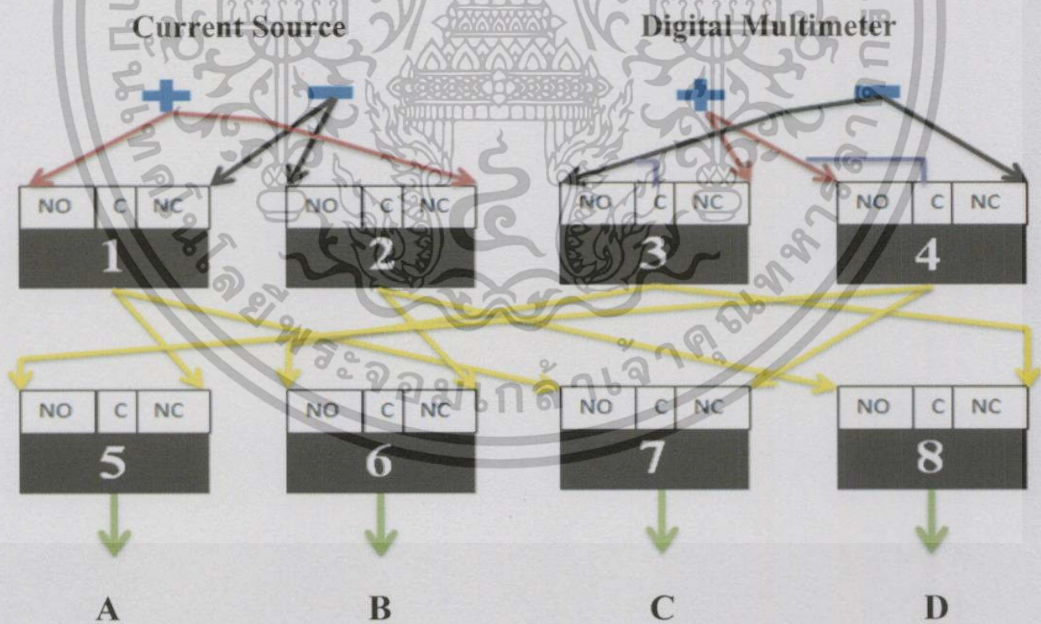
Output ของรีเลย์ตัวที่ 6 ต่อกับขาที่ 2

Output ของรีเลย์ตัวที่ 7 ต่อกับขาที่ 3

Output ของรีเลย์ตัวที่ 8 ต่อกับขาที่ 4

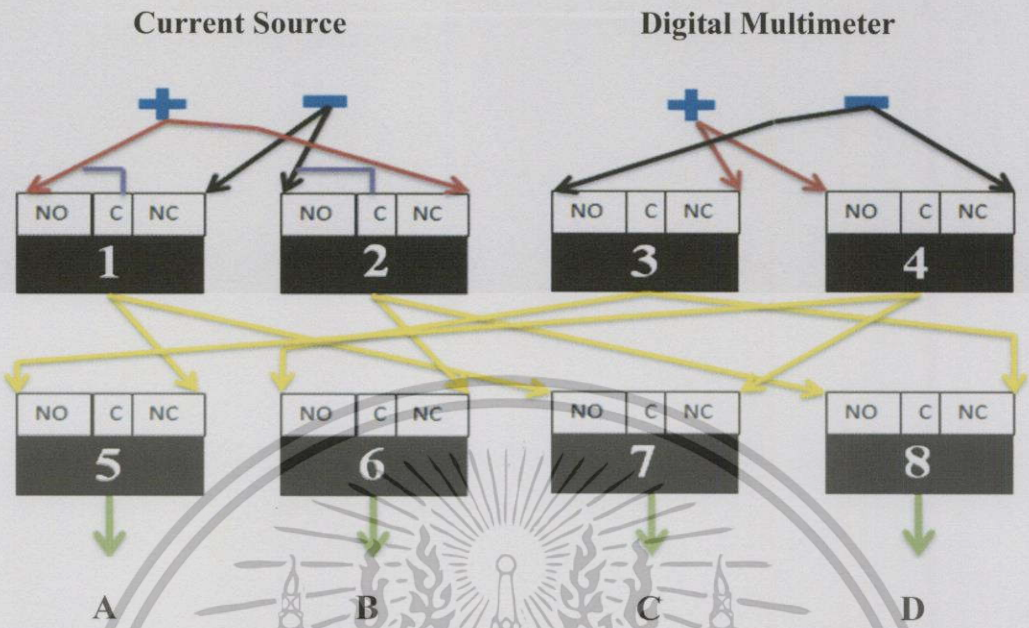
การทริกรีเลย์สำหรับวัด Van der Pauw ที่ 8 Configure แสดงดังนี้

$$1. R_{BA,CD} = V_{CD}/I_{BA}$$



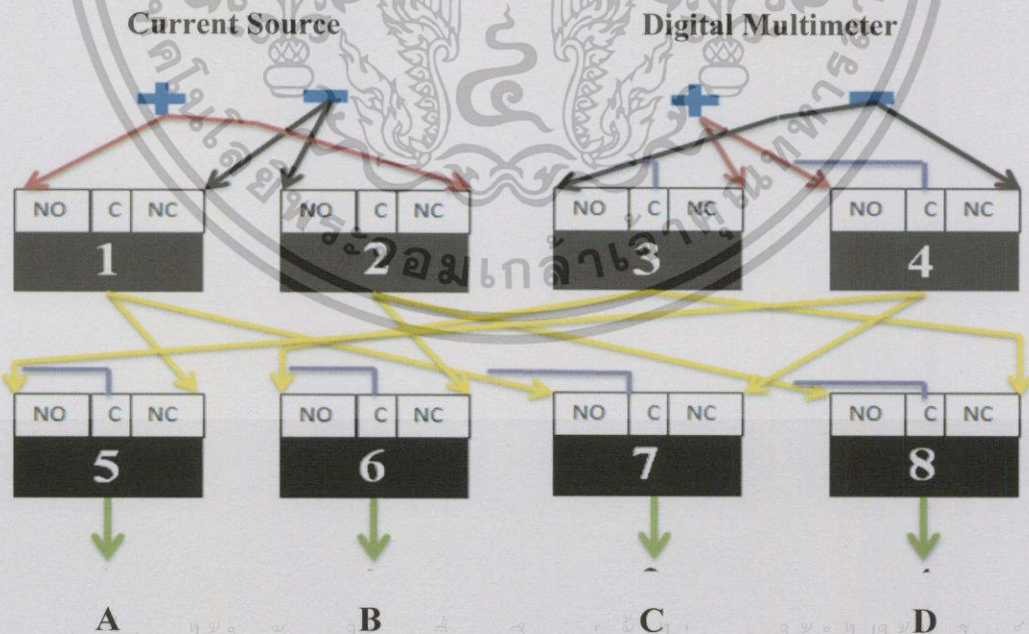
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริกรีเลย์หมายเลข 3 และ 4 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 Configure แบบที่ 1 ได้  
 "ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

2.  $R_{AB,DC} = V_{DC}/I_{AB}$



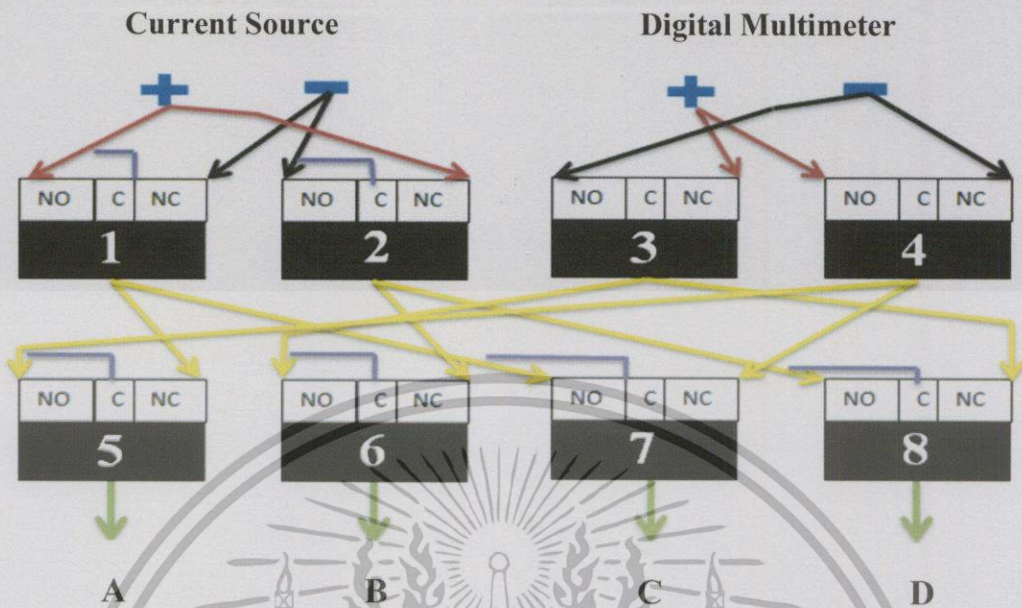
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1 และ 2 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 2 ได้

3.  $R_{DC,AB} = V_{AB}/I_{DC}$



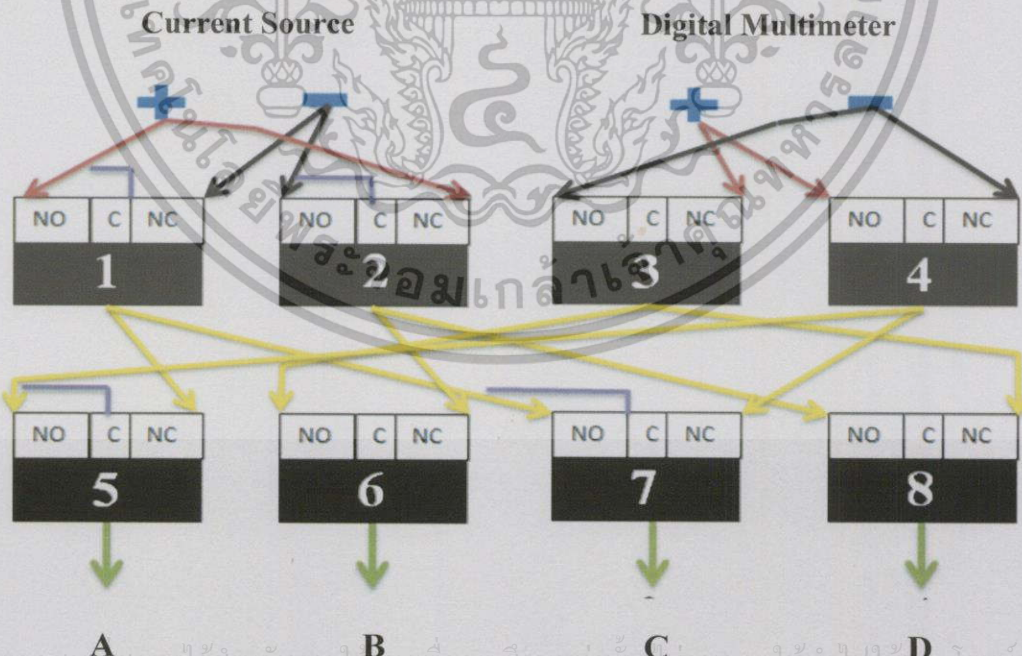
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีควา้นำไปใช้  
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 3 ได้

4.  $R_{CD,BA} = V_{BA}/I_{CD}$



จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1, 2, 5, 6, 7 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 4 ได้

5.  $R_{CB,DA} = V_{DA}/I_{CB}$

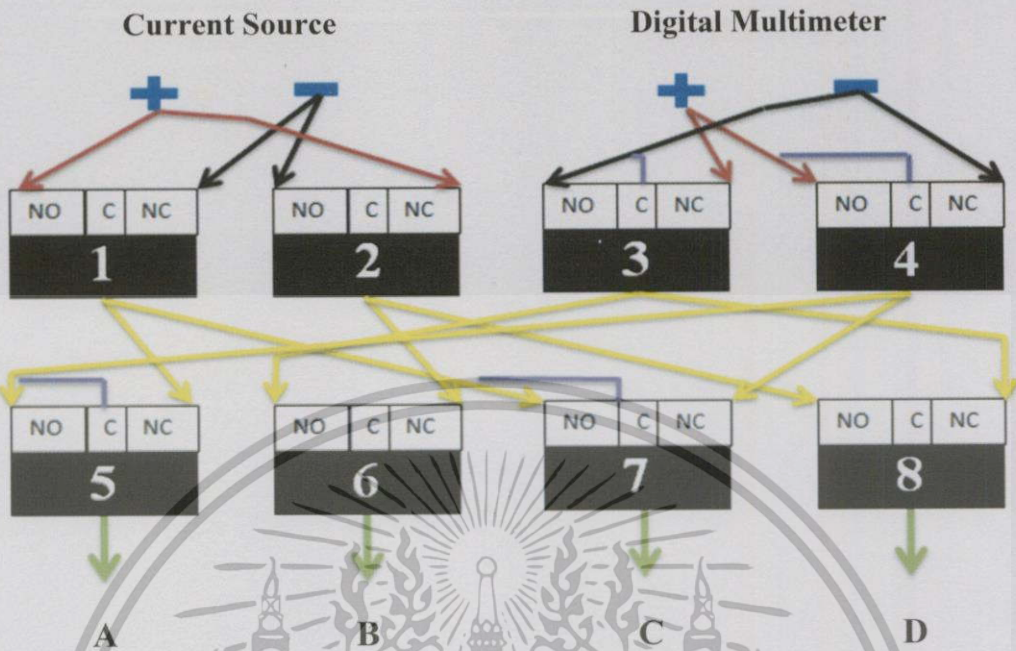


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

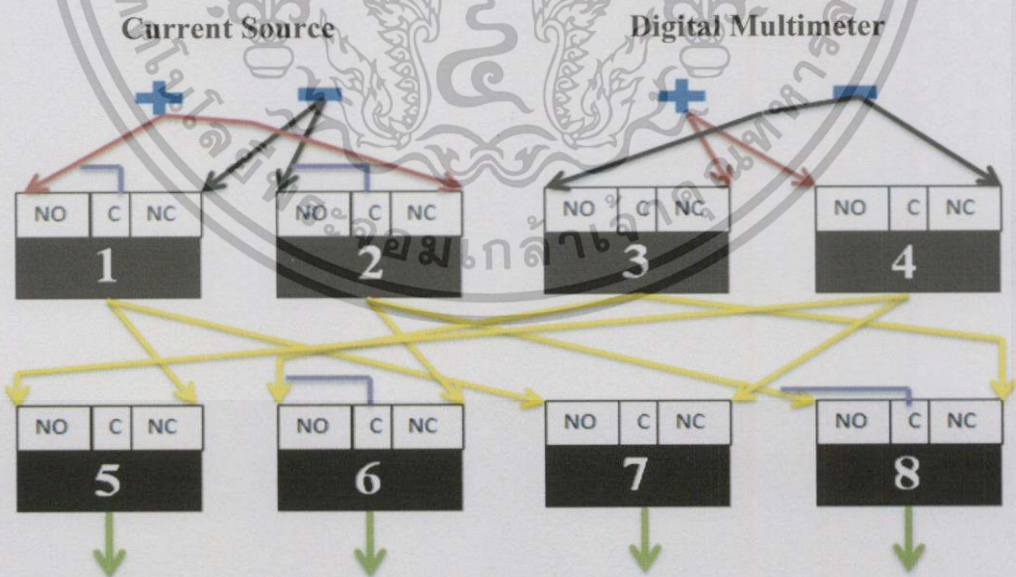
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1, 2, 5 และ 7 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 5 ได้

$$6. R_{BC,AD} = V_{AD}/I_{BC}$$



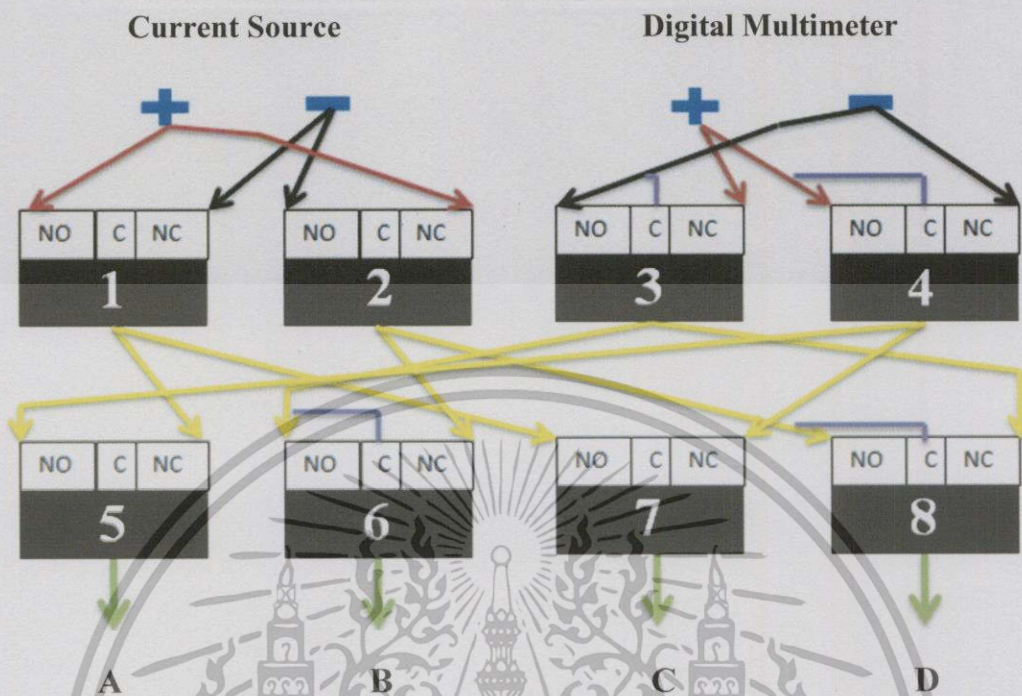
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 3, 4, 5 และ 7 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 6 ได้

$$7. R_{AD,BC} = V_{BC}/I_{AD}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ B เพื่อการศึกษาเท่านั้น C อนุญาตให้นำไปใช้ D โฆษณาด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
จากรูปแผงวงจรจะต้องทริคิรีเลขหมายเลข 1, 2, 6 และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทาน  
ใน Configure แบบที่ 7 ได้

$$8. R_{DA,CB} = V_{CB}/I_{DA}$$

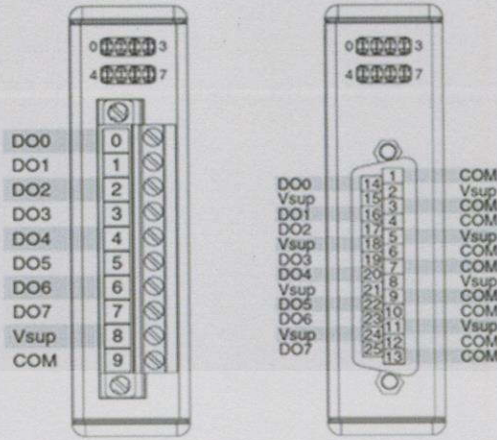


จากรูปแผงวงจรจะต้องทริกซ์หมายเลข 3, 4, 6, และ 8 จึงจะสามารถวัดค่าความต้านทานใน Configure แบบที่ 8 ได้

### 3.1.8 National Instruments 9472 (NI 9472)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.9 NI 9472



รูปที่ 3.10 การกำหนดขาของ NI 9472

National Instruments (NI) ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อข้อมูลจากรีเลย์เข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB โดยขาของ National instruments ทั้ง 10 ขาถูกเชื่อมต่อกับรีเลย์ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การต่อ National instruments กับรีเลย์

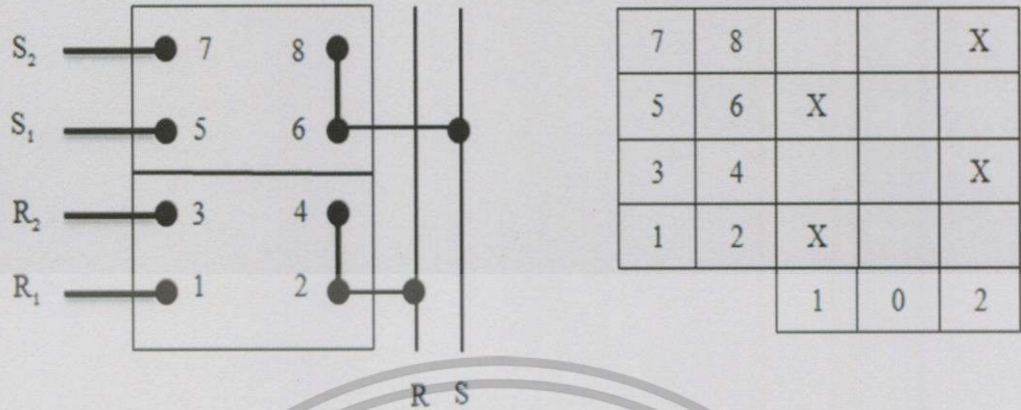
3.1.9 Change over switch



รูปที่ 3.12 Change over switch

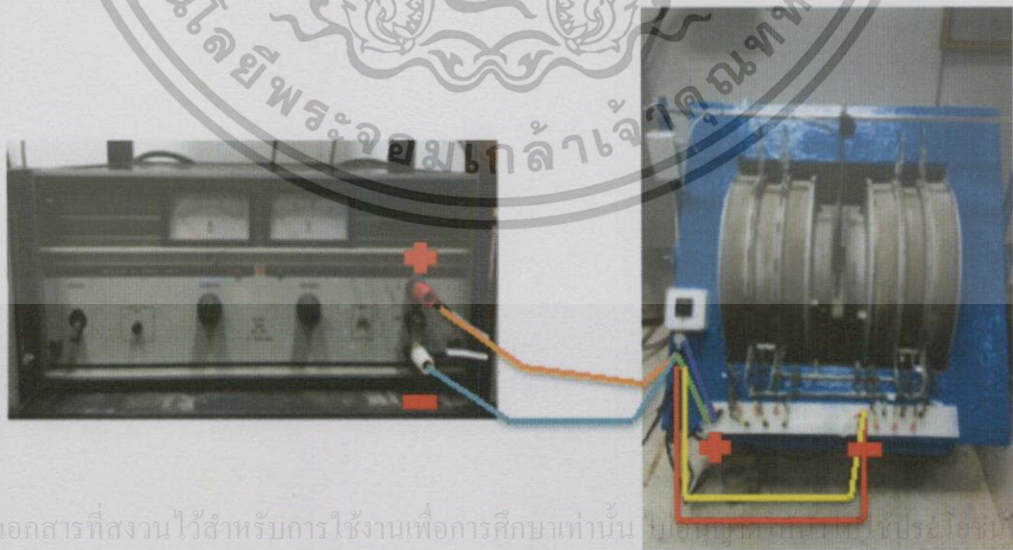
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่แนะนำให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อ Change over switch



รูปที่ 3.13 คู่มือการต่อสับสวิตช์ของ Change over switch

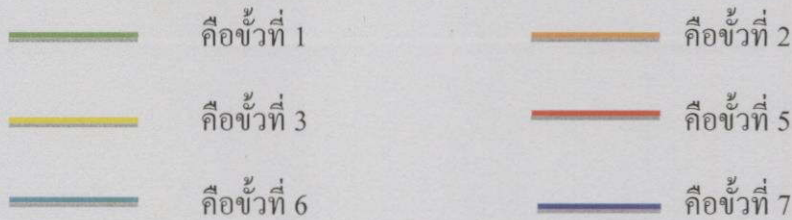
จากรูปที่ 3.13 จะเห็นว่าขั้ว 2 เชื่อมกับขั้ว 4 และขั้ว 6 เชื่อมกับขั้ว 8 ซึ่งขั้วทั้ง 4 นี้เป็นขั้วสำหรับการต่อเข้าไฟเลี้ยง ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ขั้ว 2 หรือ 4 และขั้ว 6 หรือ 8 ก็ได้ ซึ่งผู้ทดลองได้กำหนดให้ขั้ว 2 เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับไฟบวก และขั้ว 6 เป็นขั้วที่ต่อเข้ากับขั้วลบของ DC power supply ส่วนขั้ว 1, 3, 5 และ 7 เป็นขั้วที่ใช้ในการกำหนดสวิตช์ให้ปิดไปทางเลข 1 หรือ เลข 2 จากตารางในรูปที่ 3.13 จะเห็นว่า การปิดสวิตช์ไปทางเลข 1 จะทำงานเมื่อมีการรวมขั้ว 1 กับขั้ว 5 เข้าด้วยกัน และการปิดสวิตช์ไปทางเลข 2 จะทำงานเมื่อมีการรวมขั้ว 3 กับขั้ว 7 เข้าด้วยกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

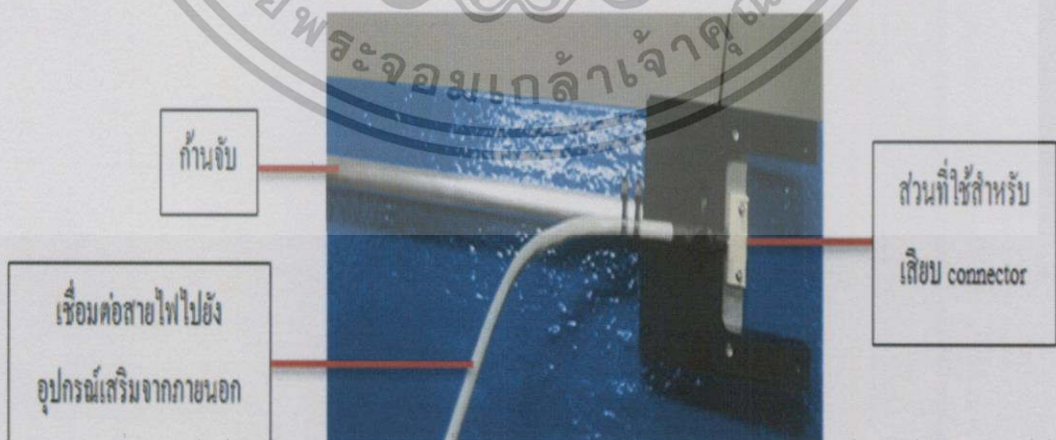
รูปที่ 3.14 การต่อขั้วของ Change over switch เข้ากับ Regulated DC Power Supply และขดลวด

## คำอธิบายเพิ่มเติม



จากรูปที่ 3.14 มีขั้วที่ต่อออกมาจาก Change over switch 6 ขั้ว คือ ขั้ว 1, 2, 3, 5, 6 และ 7 ต่อขั้ว 2 เข้ากับขั้วบวกและต่อขั้ว 6 เข้ากับขั้วลบของ Regulated DC Power Supply จากนั้นรวมขั้ว 1 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกกับขั้ว 7 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบเข้าด้วยกันที่ขั้วบวกของขดลวด แล้วรวมขั้ว 5 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบกับขั้ว 3 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกเข้าด้วยกันที่ขั้วลบของขดลวด เมื่อปิดสวิตช์ไปทางเลข 1 จะทำให้ไฟบวกจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 1 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก และไฟลบจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 5 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ และเมื่อปิดสวิตช์ไปทางเลข 2 จะทำให้ไฟบวกจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 7 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ และไฟลบจาก Regulated DC Power Supply เข้าไปทรिकกับขั้ว 3 ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก จึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกัน สามารถตรวจสอบทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ตกคร่อม ซึ่งพบว่าเมื่อปิดสวิตช์ไปทางเลข 1 ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเป็นบวกและเมื่อปิดสวิตช์ไปทางเลข 2 ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่ากระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงข้ามกันจริง

## 3.1.10 Sample holder

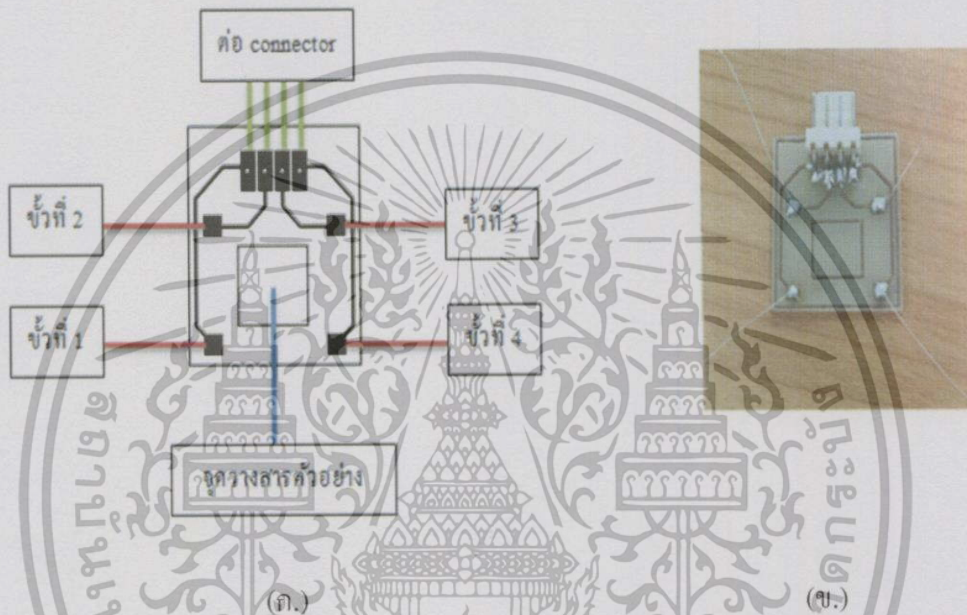


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า โดยอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 Sample holder

Sample holder เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่าง Current Source, DMM และ Sample board แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของก้านจับจะเป็นตัวปรับระดับเพื่อให้ Sample board อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ส่วนที่สองเป็นส่วนที่เชื่อมต่อสายไฟไปยังอุปกรณ์เสริมจากภายนอก คือ เชื่อมต่อไปยัง Current Source และ DMM และส่วนสุดท้ายคือส่วนที่ใช้สำหรับเสียบ Connector ของ Sample board แสดงดังรูปที่ 3.15

### 3.1.11 Sample board



รูปที่ 3.16 Sample board

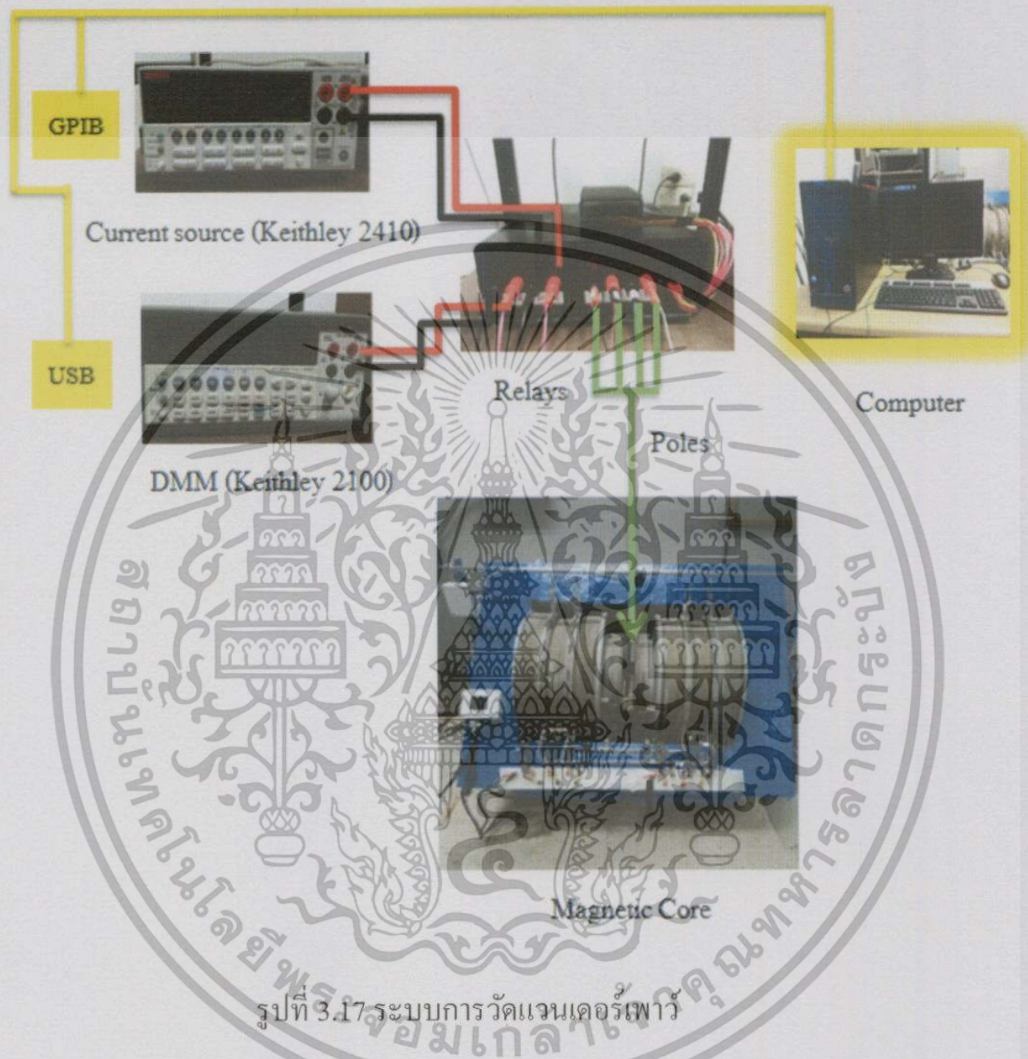
(ก.) สายวงจรและองค์ประกอบของ Sample board

(ข.) Sample board ที่เสร็จสมบูรณ์

Sample board คือ อุปกรณ์สำหรับวางสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ ซึ่งตัว Sample board นั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกใช้สำหรับวางสารตัวอย่างคือบริเวณกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลาง สารตัวอย่างที่นำมาทดสอบควรมีขนาดไม่เกินกรอบสี่เหลี่ยม ส่วนที่สองคือขั้ว ประกอบด้วย 4 ขั้ว อยู่บริเวณกรอบสี่เหลี่ยมที่ใช้วางสารตัวอย่าง ซึ่งขั้วทั้ง 4 นั้นจะถูกติดเข้ากับขอบของสารตัวอย่าง และส่วนที่สาม คือ Connector จะอยู่ด้านบนของ Sample board แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งขั้วที่ติดกับสารตัวอย่างจะเชื่อมกับ Connector และต่อเข้ากับก้านจับเพื่อเชื่อมต่อ ไปยังอุปกรณ์อื่น โดยที่ 2 ขั้วจะเชื่อมต่อไปยัง Current Source (Keithley 2410) ซึ่งเครื่องนี้จะทำหน้าที่ในการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง และอีก 2 ขั้วที่เหลือจะเชื่อมต่อไปยัง DMM (Keithley 2100) เครื่องนี้จะทำหน้าที่ในการวัดความต่างศักย์คร่อมที่สารตัวอย่าง ซึ่งขั้วที่ใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก

และวัดความต่างศักย์ตกคร่อมเป็นไปตามวิธีของแวนเดอร์เพาว์และการวัดฮอลล์ ค่าที่ได้นั้นนำไปใช้ให้ในการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่อไป

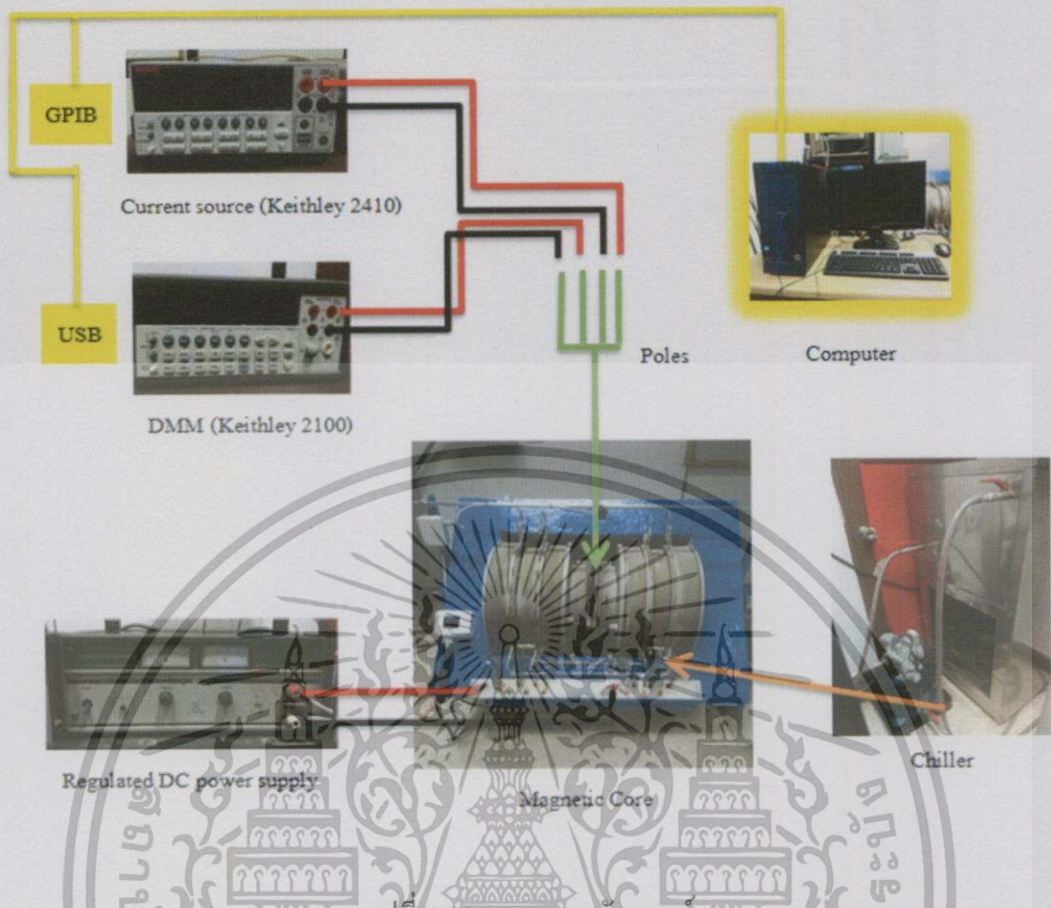
### 3.2 การเตรียมอุปกรณ์



รูปที่ 3.17 ระบบการวัดแวนเดอร์เพาว์

จากรูปที่ 3.17 ระบบการวัดแวนเดอร์เพาว์ ประกอบด้วย Current Source (Keithley 2410) ใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับสารตัวอย่าง DMM (Keithley 2100) ใช้วัดความต่างศักย์ตกคร่อม Relays ทำหน้าที่ในการสลับ Configure และเชื่อมต่อ Current Source และ DMM การป้อนกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์จะถูกกระทำผ่าน Sample holder ไปยัง Sample board ที่ใช้สำหรับติดสารตัวอย่างที่ต้องการวัด หลังจากทำการวัดเสร็จแล้วระบบจะประมวลผลการวัดผ่านทางคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ระบบการวัดฮอลล์

สำหรับระบบการวัดฮอลล์ แสดงดังรูปที่ 3.18 มีการจัดเตรียมอุปกรณ์เช่นเดียวกับแวนเดอร์เพาว์ แต่ Current Source (Keithley 2410) และ DMM (Keithley 2100) จะต่อเข้ากับ Sample holder โดยตรงไม่ผ่านรีเลย์ และไม่ใช้รีเลย์ในการสลับ Configure มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจาก Regulated DC Power Supply เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะต่อขั้วบวกของ Regulated DC Power Supply เข้ากับขั้วบวกของ Magnetic Core และต่อขั้วลบของ Regulated DC Power Supply เข้ากับขั้วลบของ Magnetic Core ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตลอดการทดลองเท่ากับ 0.53 เทสลา เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นดังนั้นจึงต้องใช้ Chiller มาหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนให้กับขดลวด และค่าต่างๆที่ได้จากการทดลอง อาทิ เช่น ความหนาแน่นของพาหะ สภาพคล่องตัวของพาหะ และชนิดของพาหะ จะแสดงผลออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่านทาง USB และ GPIB

### 3.3 วิธีการทดลอง

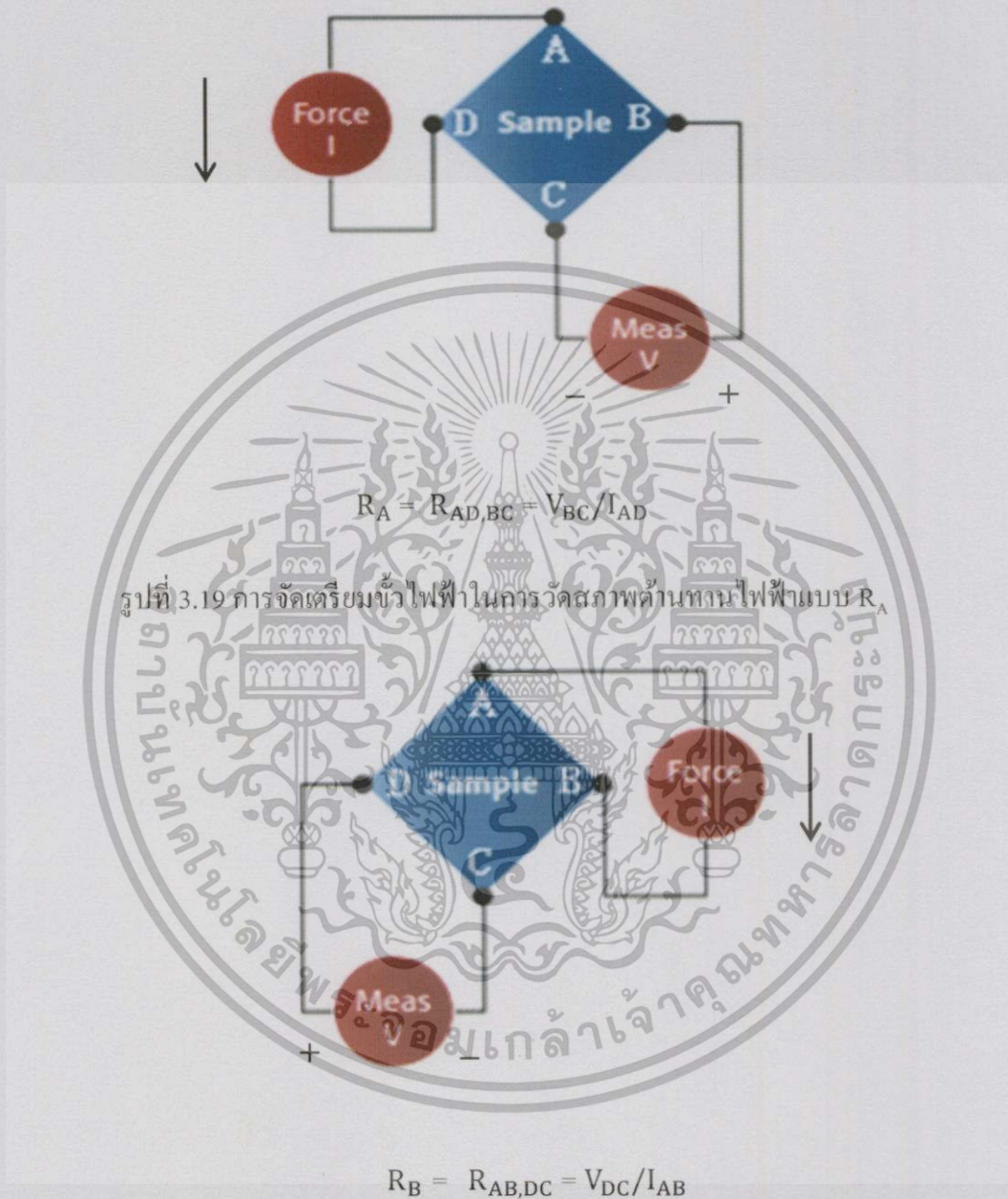
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

#### 3.3.1 การวัด Van der Pauw

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้นหากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดด้วยวิธีของ Van der Pauw นั้นจะมี Contact ที่ใช้ในการวัด 4 จุด หรือ 4 ขั้ว

โดย 2 ขั้วใช้ในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือใช้วัดความต่างศักย์ตกคร่อม การวัดประกอบด้วย การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า  $R_A$  และ  $R_B$  แสดงดังรูปที่ 3.18 และ รูปที่ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.19 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_A$

รูปที่ 3.20 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_B$

$R_{AD,BC}$  คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C

$R_{AB,DC}$  คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D และ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2524-5000

1. ทำการวัด  $R_A$  จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.19

2. จ่ายกระแสไฟฟ้า  $I$  ค่าต่างๆเข้าที่ขั้ว A และ D ด้วยเครื่อง Keithley 2410 เครื่องนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง  $\pm 1 \mu\text{A}$  ถึง  $\pm 1 \text{ A}$  ในการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะปรับที่ด้านหน้าของเครื่อง แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C ด้วยเครื่อง Digital Multimeter (DMM) มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $\pm 100 \text{ mV}$  ถึง  $\pm 1 \text{ kV}$  ก่อนการทดลองต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดก่อน สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า (A)

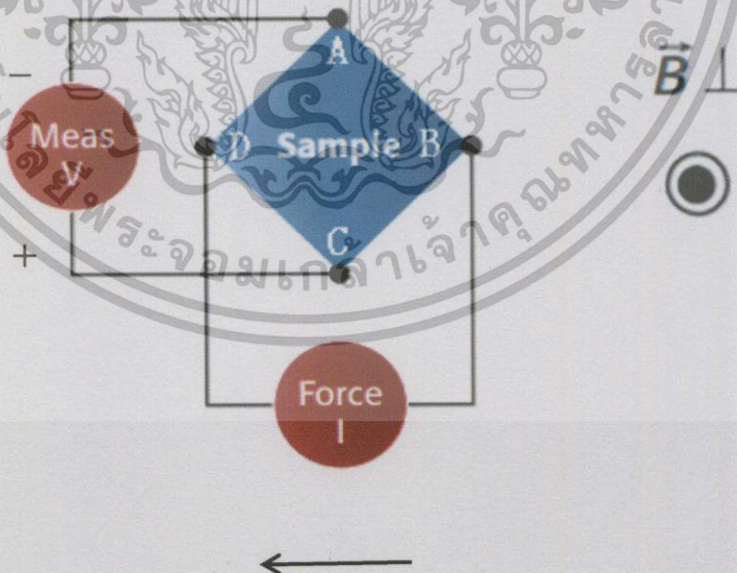
$V$  คือ แรงดันไฟฟ้า (V)

$R$  คือ ความต้านทานของวงจร ( $\Omega$ )

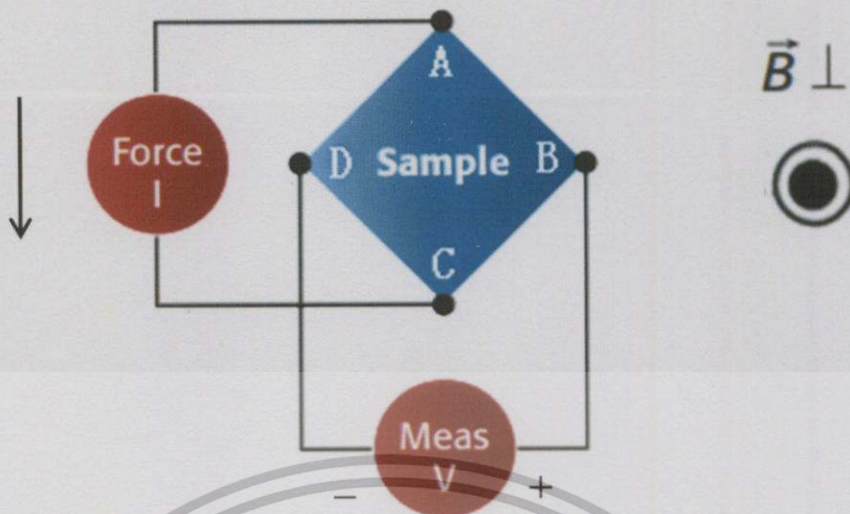
3. วัด  $R_B$  ดังรูปที่ 3.20 ทำการทดลองตามข้อ 1 – 2

4. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจากสมการที่ 2.11 เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้มของแวนเดอร์เพาว์คำนวณได้จากสมการที่ 2.12 หรือหาได้จากกราฟ ดังรูปที่ 2.14

### 3.3.2 การวัด Hall



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.21 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_{BD,CA}$  ไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตีพิมพ์ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้



รูปที่ 3.22 การจัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบ  $R_{AC, BD}$

$R_{BD, CA}$  คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว B และไหลออกทางขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว C และ A

$R_{AC, BD}$  คือ การป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้ว A และไหลออกทางขั้ว C แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ D

1. จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.21
2. นำสารตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็กความเข้ม B
3. จ่ายกระแสไฟฟ้า I ค่าต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Keithley 2410 เครื่องนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ใน ช่วง  $\pm 1 \mu A$  ถึง  $\pm 1 A$  ในการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะปรับที่ด้านหน้าของเครื่อง แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว C และ A (กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก (B+)) ด้วยเครื่อง Digital Multimeter (DMM) มีขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าอยู่ระหว่าง  $\pm 100 mV$  ถึง  $\pm 1 kV$  ก่อนการทดลองต้องคำนวณ หาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดก่อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

4. กลับขั้วแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า แล้วทำการทดลองตามข้อ 3. (กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ (B-))

5. นำค่าความต่างศักย์ตกคร่อมเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวกมาลบกับความต่างศักย์ตกคร่อมเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นลบ คือ  $V_H$  (เมื่อ B+) -  $V_H$  (เมื่อ B-) =  $V_H$  (ของ  $R_{BD, CA}$ )

6. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I กับ  $V_H$  โดยให้  $V_H$  เป็นแกน y และ I เป็นแกน x ความชันของกราฟคือ  $\frac{R_H B}{d}$  (เขียนกราฟทั้งที่สนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบ) ทั้งที่มีกรนำไปใช้

เมื่อ B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 0.53 T

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เมตร

7. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ( $R_H$ ) จากสูตร

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I}\right) \left(\frac{d}{B}\right) \quad (3.3)$$

หรือ

$$R_H = \frac{\text{slope} \times d}{B} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $R_H$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์ ( $\text{cm}^3/\text{C}$ )

$V_H$  คือ ความต่างศักย์ตกคร่อมฮอลล์ มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น เทสลา (T)

I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็น เมตร (m)

8. ความหนาแน่นของพาหะ ( $n$ ) คำนวณได้จาก

$$n = \frac{1}{R_H q} \quad (3.5)$$

9. สภาวะคล่องตัวของพาหะ ( $\mu$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (2.19)

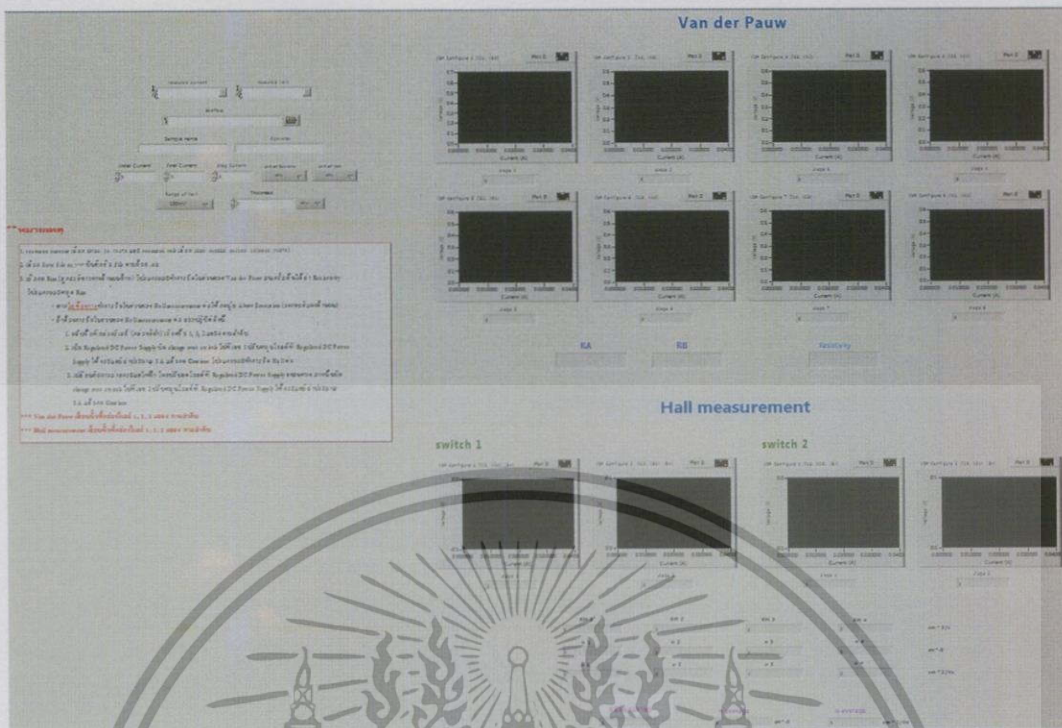
10. จัดเตรียมขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปที่ 3.22 ทำการทดลองตามข้อ 2 -9 วัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ D เมื่อนำค่า  $V_H$  (เมื่อ B+) -  $V_H$  (เมื่อ B-) จะได้  $V_H$  (ของ  $R_{AC, BD}$ )

11. เมื่อนำค่า  $V_H$  (ของ  $R_{BD, CA}$ ) -  $V_H$  (ของ  $R_{AC, BD}$ ) จะทำให้ทราบชนิดของสารตัวอย่างว่าเป็นชนิด n หรือ p ถ้าผลบวกมีค่าส่วนมากเป็นลบแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n แต่ถ้าผลบวกมีค่าส่วนมากเป็นบวกแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p

### 3.4 โปรแกรม LabVIEW

การควบคุมระบบการวัดฮอลล์ ถูกออกแบบและเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW นำมาใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อความสะดวกในการทำการวัดและลดปัญหาความผิดพลาดจากการคำนวณ ซึ่งจะประมวลผลการวัดและคำนวณคุณสมบัติต่างๆของสารตัวอย่างผ่านทางจอคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.22


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

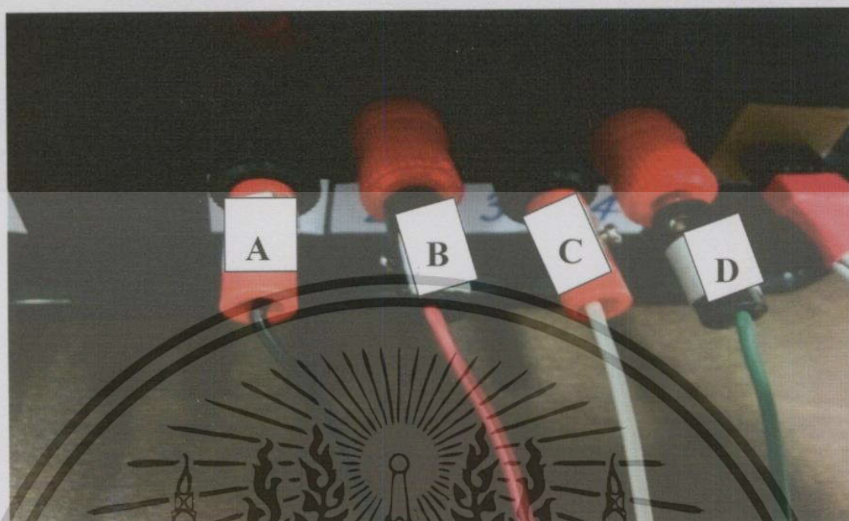


รูปที่ 3.23 โปรแกรม LabVIEW สำหรับการวัด Van der Pauw และ Hall measurement


การใช้โปรแกรม LabVIEW

1. เปิดเครื่อง Current Source และ DMM เชื่อมต่อ Current Source เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยใช้ GPIB และเชื่อมต่อ DMM เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยใช้ USB จากนั้นเลือกการเชื่อมต่อข้อมูลที่ resource current เลือก GPIB0::24::INSTR และ resource volt เลือก USB0::0x05E6::0x2100::1420944::INSTR
2. เลือก Save file as บันทึกข้อมูลจากกรวัด หากต้องการบันทึกข้อมูลลงใน Microsoft excel ให้บันทึกชื่อ file ตามด้วย .xls
3. บันทึกชื่อสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบใน (Sample name) และบันทึกชื่อผู้ทำการทดสอบใน (Operator)
4. กำหนดกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น กระแสไฟฟ้าสุดท้าย และการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า ลงใน Initial Current, Final Current และ Step Current ตามลำดับ
5. เลือกหน่วยของกระแสไฟฟ้า (Unit of Current) และหน่วยของความต่างศักย์ (Unit of Volt) (หน่วยที่เลือกนี้จะแสดงให้เห็นในค่าที่บันทึกไว้ใน file ตามข้อ 2. จากนั้นเลือกช่วงที่เหมาะสมสำหรับวัดค่าความต่างศักย์ (Range of Volt)
6. กำหนดความหนาของสารตัวอย่างที่จะทำการวัด (Thickness)

7. เสียบขั้วที่กล่องรีเลย์ A, B, C และ D ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.24 แล้วกด  (Run) โปรแกรมจะทำการวัดในส่วนของ Van der Pauw จนเสร็จสิ้นจะได้ค่า Resistivity โปรแกรมจะหยุด Run



รูปที่ 3.24 การเสียบขั้วที่กล่องรีเลย์ A, B, C และ D สำหรับวัด Van der Pauw

- หาก **ไม่ต้องการ** ทำการวัดในส่วนของ Hall measurement ต่อให้กด  (Abort Execution)

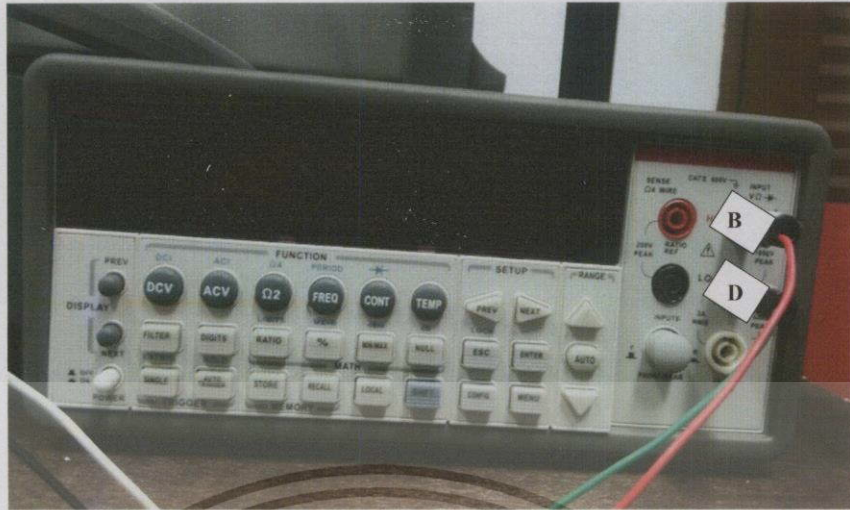
- ถ้าต้องการวัดในส่วนของ Hall measurement ต่อ การปฏิบัติดังนี้

1. เสียบขั้วที่เครื่อง Current Source และ DMM ตาม Configure ที่ 1 คือ  $I_{AC}$  และ  $V_{BD}$  ดังรูปที่ 3.25 และรูปที่ 3.26 ตามลำดับ



รูปที่ 3.25 เสียบขั้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว A ออกขั้ว C

ZS




รูปที่ 3.26 วัดความต่างศักย์ขั้ว B และขั้ว D

2. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เริ่มจากเปิด Regulated DC Power Supply จากนั้นหมุน Change over switch ไปที่เลข 1 ดังรูปที่ 3.27 แล้วปรับหมุน โวลต์ที่ Regulated DC Power Supply ให้กระแสไฟฟ้ามี่ค่าประมาณ 8 A กด  (Continue) เพื่อทำการวัด Hall โปรแกรมจะทำการวัดแล้วจะหยุด Run



รูปที่ 3.27 หมุน Change over switch ไปที่เลข 1

3. สลับขั้วที่ current source และ DMM ตาม Configure ที่ 2 คือ  $I_{BD}$  และ  $V_{CA}$  ตามรูปที่

3.28 และรูปที่ 3.29 ตามลำดับ กด  (Continue) เพื่อทำการวัด Hall ต่อ เมื่อวัด Configure ที่ 2

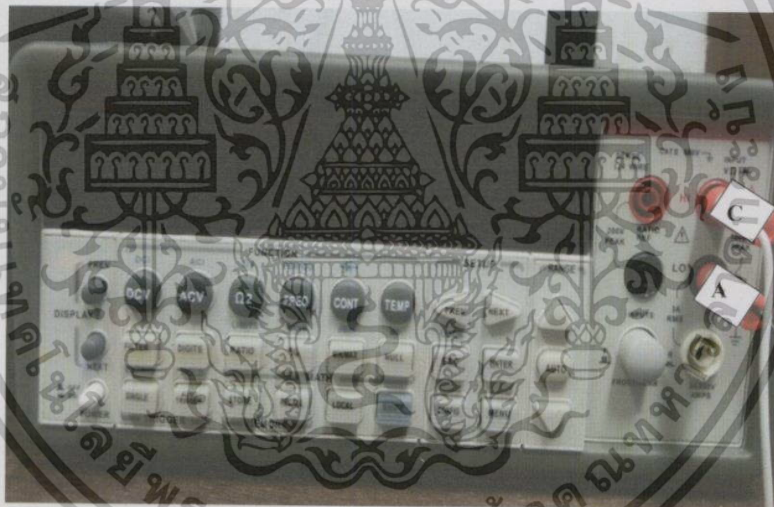
เสร็จแล้วโปรแกรมจะหยุด Run

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า


ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 เสียบขั้วจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว B ออกขั้ว D



รูปที่ 3.29 วัดความต่างศักย์ขั้ว C และขั้ว A

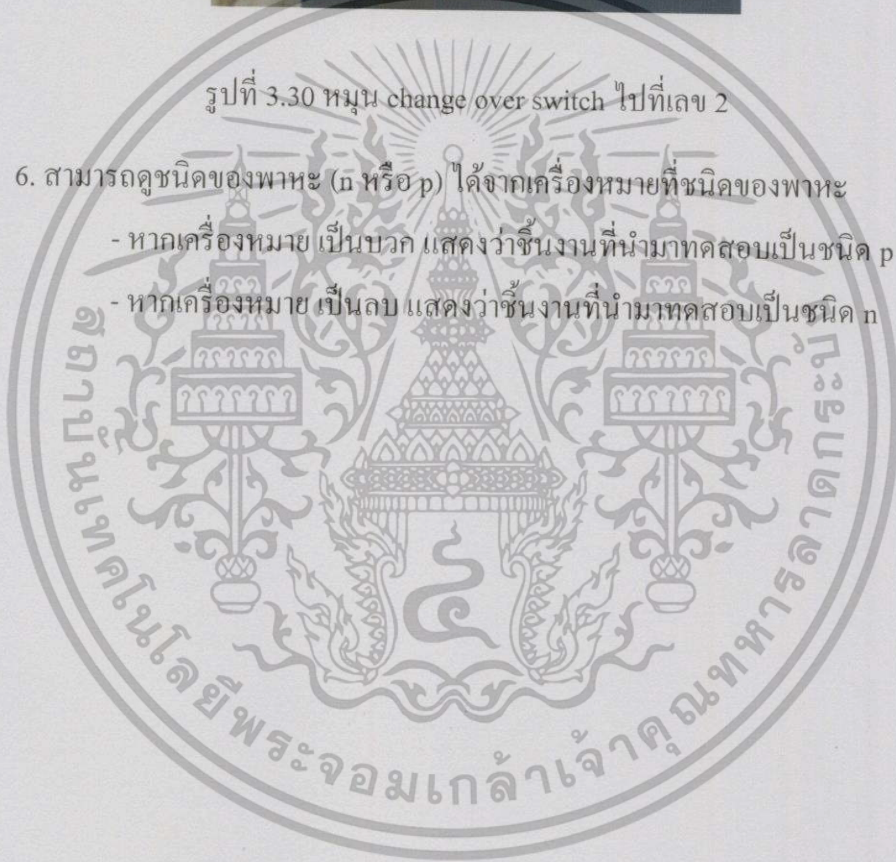
4. เปลี่ยนทิศการจ่ายกระแสไฟฟ้า โดยปรับลดโวลต์ที่ Regulated DC Power Supply ลงจนหมด จากนั้นหมุน Change over switch ไปที่เลข 2 ดังรูปที่ 3.30 แล้วปรับโวลต์ที่ Regulated DC Power Supply ให้กระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 8 A ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1. แล้วกด  เพื่อทำการวัด Hall ต่อ

5. ทำการทดลองตามข้อ 3. เมื่อโปรแกรม Run เสร็จ จะแสดงค่า  $n_{average}$ ,  $\mu_{average}$  และ  $\sigma$  ค่าเหล่านี้เป็นเอกลักษณ์ของพลาสมาที่นำมาใช้ ไม่สามารถนำค่าเหล่านี้ไปใช้กับพลาสมาชนิดอื่นได้



รูปที่ 3.30 หมุน change over switch ไปที่เลข 2

6. สามารถดูชนิดของพหุหะ (n หรือ p) ได้จากเครื่องหมายที่ชนิดของพหุหะ
- หากเครื่องหมาย เป็นบวก แสดงว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชนิด p
  - หากเครื่องหมาย เป็นลบ แสดงว่าชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชนิด n



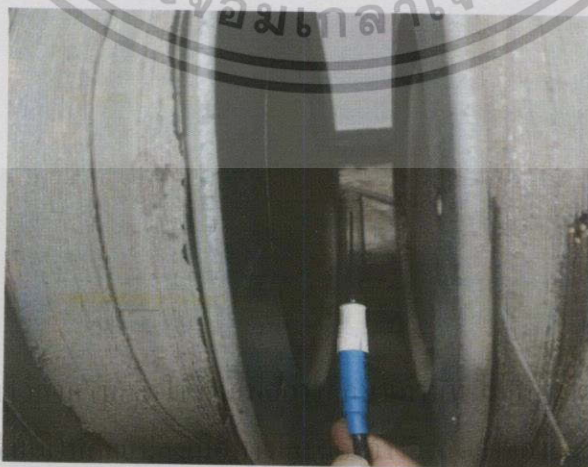
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 6 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการสอบเทียบสนามแม่เหล็ก โดยใช้เกาส์มิเตอร์ (5180 Gauss/Tesla Meter) ส่วนที่สองสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw โดยนำตัวต้านทานขนาด 1 M $\Omega$  จำนวน 4 ตัว ต่อเป็นวงจรบริดจ์ ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานแล้ววัดความต่างศักย์ ส่วนที่สามเป็นส่วนของการออกแบบและเขียน โปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมระบบการวัด Van der Pauw และ Hall measurement ส่วนที่สี่แสดงแผนภาพขั้นตอนในการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล ของโปรแกรม LabVIEW ส่วนที่ห้าเป็นการสอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบคุณสมบัติทางไฟฟ้า และในที่สุดท้ายนั้นได้นำสารตัวอย่าง  $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$  มาทดสอบด้วยการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

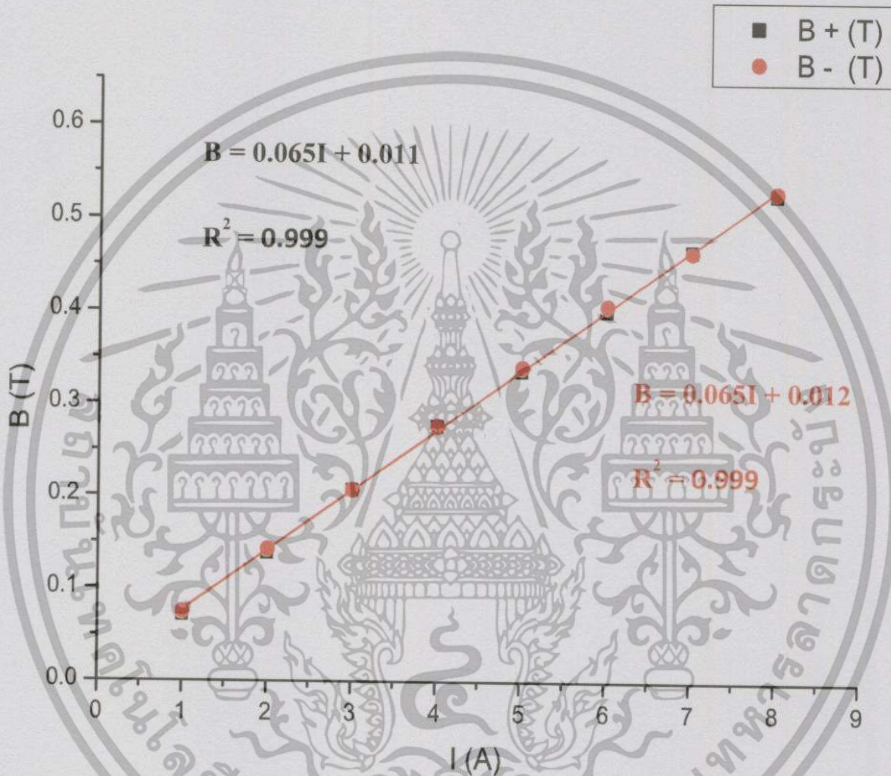
### 4.1 การสอบเทียบสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กเกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด ซึ่งมี 6 ขด โดยแบ่งขดลวดออกเป็น 2 ฟังๆละ 3 ขด ซึ่งแต่ละขดต่อกันแบบขนาน แล้วจึงนำขดลวดทั้ง 2 ฟังมาต่ออนุกรมกัน ขดลวดแต่ละขดนั้นมีความต้านทานขดละ 12.00 โอห์ม ขดลวดแต่ละฟังที่ต่อขนานกันมีความต้านทานฟังละ 4.00 โอห์ม ขดลวดทั้ง 6 ขด มีความต้านทานรวม 8.00 โอห์ม การสอบเทียบสนามแม่เหล็กนั้นสามารถทำได้โดยใช้เกาส์มิเตอร์ (5180 Gauss/Tesla Meter) ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งการวัดนั้นต้องให้เกาส์มิเตอร์อยู่ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การใช้เกาส์มิเตอร์ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

การวัดเริ่มต้นจากการวางเกาส์มิเตอร์ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก เพื่อให้สนามแม่เหล็ก มีความเข้มสูงสุด จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆด้วย Regulated DC Power Supply ซึ่งสามารถ จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0 ถึง 15 A มีความละเอียด 1 A โดยจ่ายให้กับขดลวดแล้วอ่านค่าความ เข้มของสนามแม่เหล็กจากเกาส์มิเตอร์ ทำการวัด 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยกำหนดให้สนาม แม่เหล็กที่ได้จากการวัดครั้งนี้เป็นบวก จากนั้นกลับขั้วการจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้วทำการวัด สนามแม่เหล็ก กำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.2



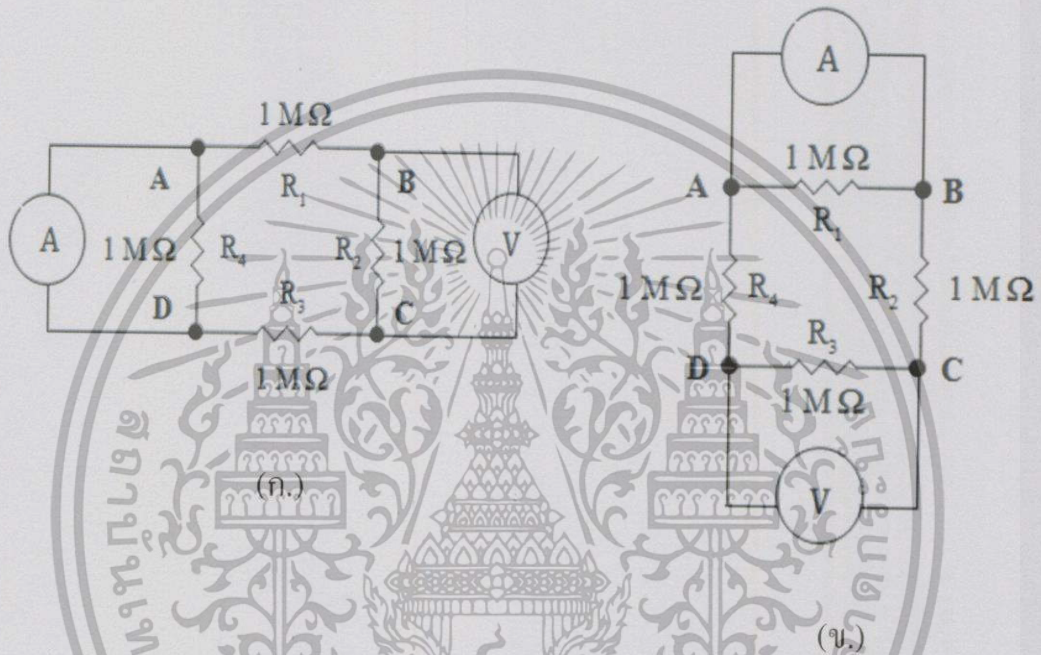
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (T) กับกระแสไฟฟ้า (A)

จากการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าสูงสุด คือ 8.00 A สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุด 0.526 T เมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวก และ 0.528 T เมื่อสนาม แม่เหล็กเป็นลบ นำค่าที่ได้จากการวัดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสนาม แม่เหล็ก (T) กับกระแสไฟฟ้า (A) พบว่าค่าที่ได้จากการวัดเมื่อสนามแม่เหล็กเป็นบวกและลบมีค่า ใกล้เคียงกันมาก กราฟที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีของ Van der Pauw นั้นจะมีขั้วที่ใช้ในการวัด 4 ขั้ว การสอบเทียบกระทำโดยการนำตัวต้านทานขนาด  $1.00 \text{ M}\Omega$  จำนวน 4 ตัว ต่อเป็นวงจรถบรีดจ์ แล้วป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานซึ่งการวัดนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้า-ออก และอีก 2 ขั้วที่เหลือจะใช้วัดความต่างศักย์ตกคร่อม การวัดประกอบด้วย การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า  $R_A$  และ  $R_B$  แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การวัดตัวต้านทานขนาด  $1 \text{ M}\Omega$  ที่ต่อเป็นวงจรถบรีดจ์ ด้วยวิธีของ Van der Pauw

(ก.) การวัด  $R_A$

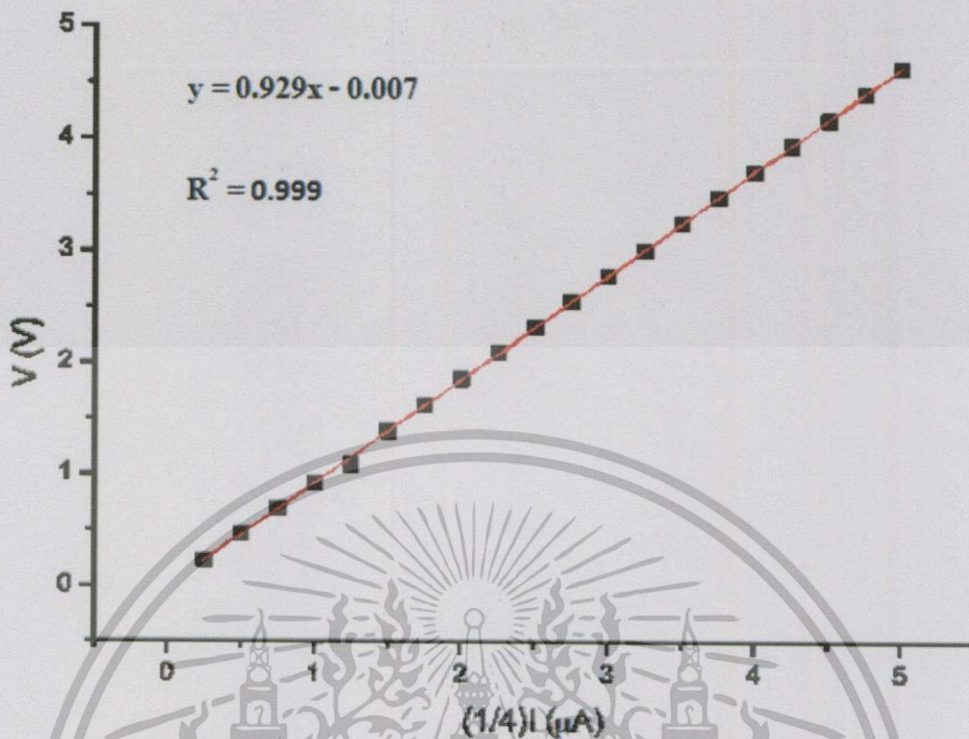
(ข.) การวัด  $R_B$

### 4.2.1 ขั้นตอนการวัด $R_A$ และ $R_B$ ด้วยวิธีของ Van der Pauw

การวัด  $R_A$  และ  $R_B$  เริ่มด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับตัวต้านทานที่ต่อเป็นวงจรถบรีดจ์ ก่อนทำการป้อนกระแสไฟฟ้านั้นต้องคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับวงจรได้ก่อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

จากนั้นวัด  $R_A$  โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C ส่วนการวัด  $R_B$  จะป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว C แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D และ C

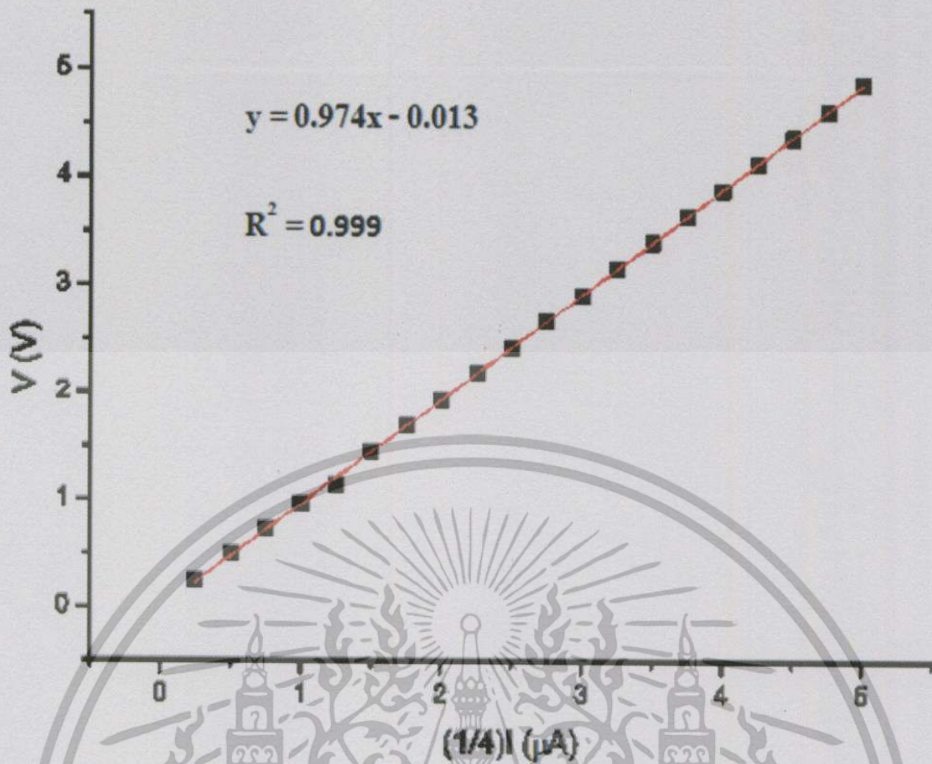
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อม (V) กับ  $1/4$  ของกระแสไฟฟ้า ( $\mu A$ ) จากการวัด  $R_A$

วัด  $R_A$  โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว D แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว B และ C เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A กระแสไฟฟ้าจะแยกไหลไปใน 2 ทิศทาง คือ ไหลผ่าน  $R_4$  เพียงตัวเดียว ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $R_4$  คิดเป็น  $\frac{3}{4}$  ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป และกระแสไฟฟ้าที่แยกไหลอีกทางหนึ่งจะไหลผ่านตัวต้านทาน 3 ตัว คือ  $R_1$ ,  $R_2$  และ  $R_3$  เมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานทั้ง 3 ตัว คิดเป็น  $\frac{1}{4}$  ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อย จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุด คือ  $5.00 \mu A$  ความต่างศักย์ตกคร่อมที่วัดได้มีค่า  $4.64 V$  เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{4}I (\mu A)$  และ  $V_H (V)$  ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 การนำค่า  $\frac{1}{4}I$  มาเขียนกราฟนั้น เนื่องจาก ขั้วที่วัดความต่างศักย์ตกคร่อมนั้น คือ ขั้ว 2 และ 3 ซึ่งเป็นขั้วที่วัดคร่อมตัวต้านทาน  $R_2$  และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียง  $\frac{1}{4}$  ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ได้ค่า Slope ซึ่งก็คือค่า  $R_A$  เท่ากับ  $0.93 M\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ หรือมีค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ตกคร่อม (V) กับ  $1/4$  ของกระแสไฟฟ้า ( $\mu\text{A}$ ) จากการวัด  $R_B$

การวัด  $R_B$  กระทำเช่นเดียวกับการวัด  $R_A$  โดยเริ่มจากการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A และไหลออกที่ขั้ว B แล้ววัดความต่างศักย์ตกคร่อมที่ขั้ว D และขั้ว C เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว A กระแสไฟฟ้าจะแยกไหลไปใน 2 ทิศทาง คือ ไหลผ่าน  $R_1$  เพียงตัวเดียว ซึ่งเมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน  $R_1$  คิดเป็น  $\frac{3}{4}$  ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป และกระแสไฟฟ้าที่แยกไหลอีกทางหนึ่งจะไหลผ่านตัวต้านทาน 3 ตัว คือ  $R_4$ ,  $R_3$  และ  $R_2$  เมื่อคำนวณจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานทั้ง 3 ตัว คิดเป็น  $\frac{1}{4}$  ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เมื่อความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้ามีค่ามากจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อย จากการทดลองพบว่าเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าค่าสูงสุด คือ  $5.00 \mu\text{A}$  ความต่างศักย์ตกคร่อมที่วัดได้มีค่า  $4.87 \text{ V}$  เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{4}I$  ( $\mu\text{A}$ ) และ  $V_H$  (V) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 การนำค่า  $\frac{1}{4}I$  มาเขียนกราฟนั้นเนื่องจาก ขั้วที่วัดความต่างศักย์ตกคร่อมนั้น คือ ขั้ว 4 และ 3 ซึ่งเป็นขั้วที่วัดคร่อมตัวต้านทาน  $R_3$  และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียง  $\frac{1}{4}$  ของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ได้ค่า Slope ซึ่งก็คือค่า  $R_B$  เท่ากับ  $0.97 \text{ M}\Omega$

ค่า  $R_A$  และ  $R_B$  มีค่า 0.93 M $\Omega$  และ 0.97 M $\Omega$  ตามลำดับ ซึ่งค่าความต้านทานจริง คือ 1.00 M $\Omega$  สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการวัด ได้จากสมการที่ (4.1)

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าจากการทดลอง} - \text{ค่าจากทฤษฎี}|}{\text{ค่าจากทฤษฎี}} \times 100\% \quad (4.1)$$

เมื่อ  $R_A$  ที่ได้จากการทดลองมีค่า 0.93 M $\Omega$  และ  $R_A$  จากทฤษฎีมีค่า 1.00 M $\Omega$  สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า  $R_A$  ได้ดังนี้

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อนของค่า } R_A = \frac{|0.93 - 1.00|}{1.00} \times 100\% = 7.00\%$$

เมื่อ  $R_B$  ที่ได้จากการทดลองมีค่า 0.97 M $\Omega$  และ  $R_B$  จากทฤษฎีมีค่า 1.00 M $\Omega$  สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่า  $R_B$  ได้ดังนี้

$$\% \text{ ความคลาดเคลื่อนของค่า } R_B = \frac{|0.97 - 1.00|}{1.00} \times 100\% = 3.00\%$$

แสดงว่าเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ค่อนข้างเที่ยงตรง การคำนวณค่าความต้านทานเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆสำหรับการทดลองนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

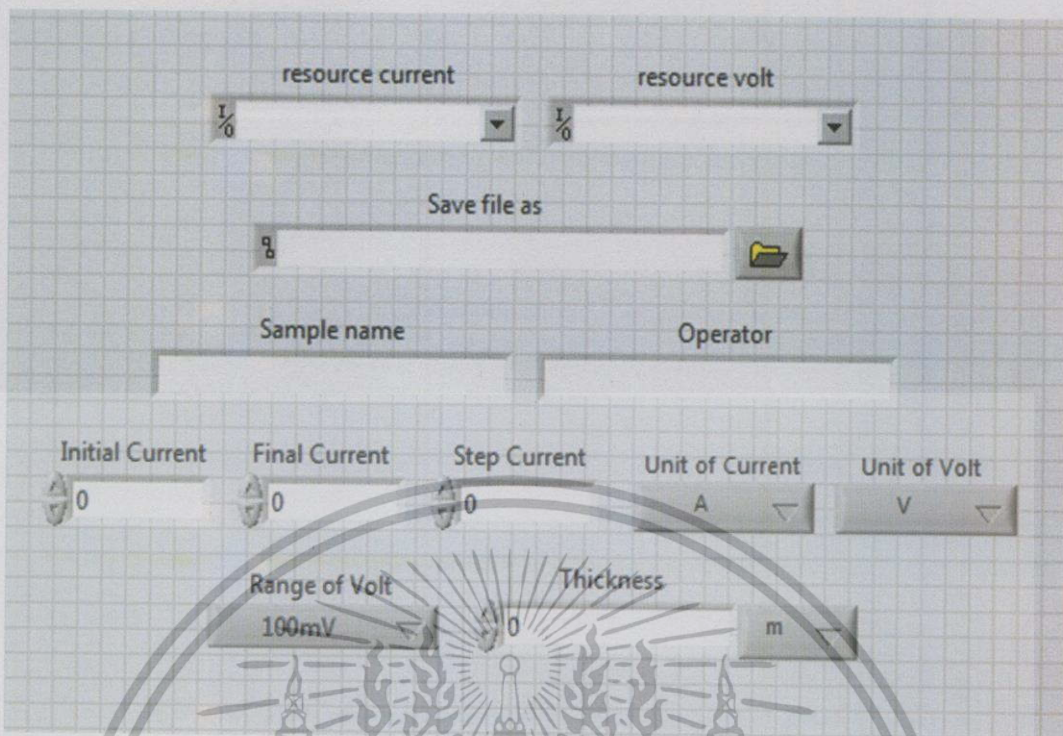
$$R = \frac{V_H}{(1/4)I} = \frac{4V_H}{I} \quad (4.2)$$

#### 4.3 โปรแกรม LabVIEW

ในส่วนของโปรแกรม LabVIEW ประกอบด้วยหน้าต่างหลัก คือ หน้า Front Panel และ หน้า Block Diagram

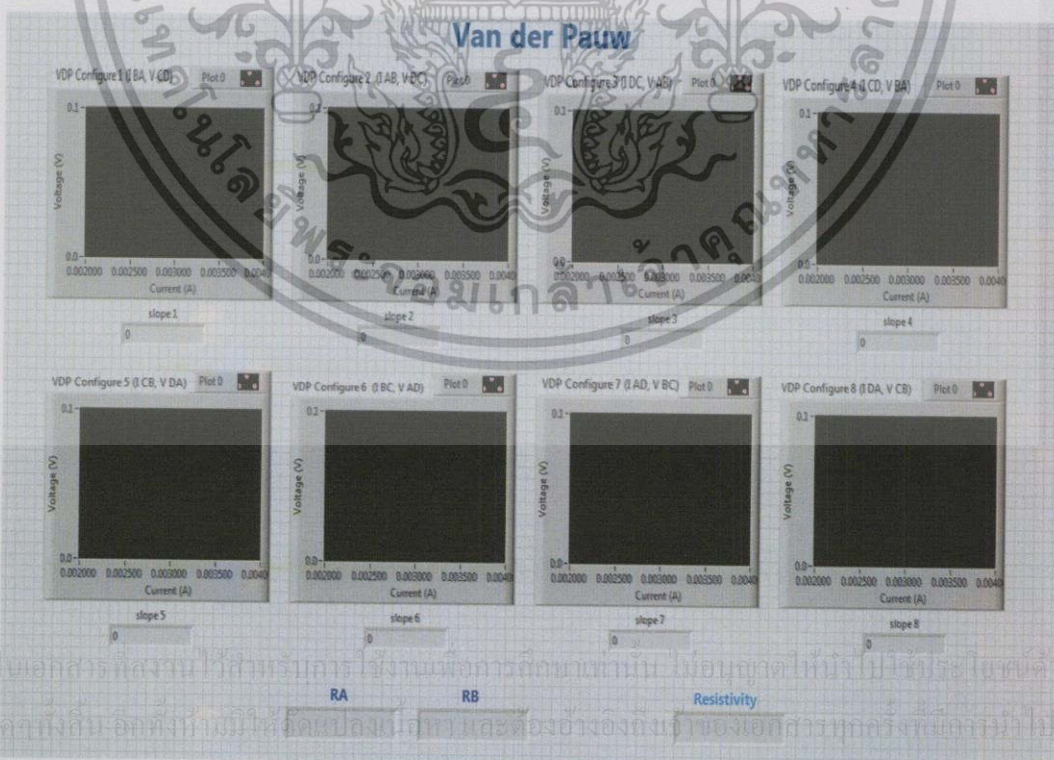
หน้า Front Panel เป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนแรก เป็นส่วนของพารามิเตอร์เป็นส่วนที่สำคัญสำหรับการวัดเป็นการป้อนข้อมูลที่จำเป็น อาทิ เช่น resource current เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง Current source กับ Computer ผ่านทาง GPIB, resource volt เป็นการเชื่อมต่อระหว่าง DMM กับ Computer ผ่านทาง USB, Save file as เป็นส่วนสำหรับการบันทึกผลของข้อมูลที่ได้จากการวัด, Sample name, Operator, Initial Current, Final Current, Step Current, Unit of Current, Unit of Volt, Range of Volt และ Thickness แสดงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



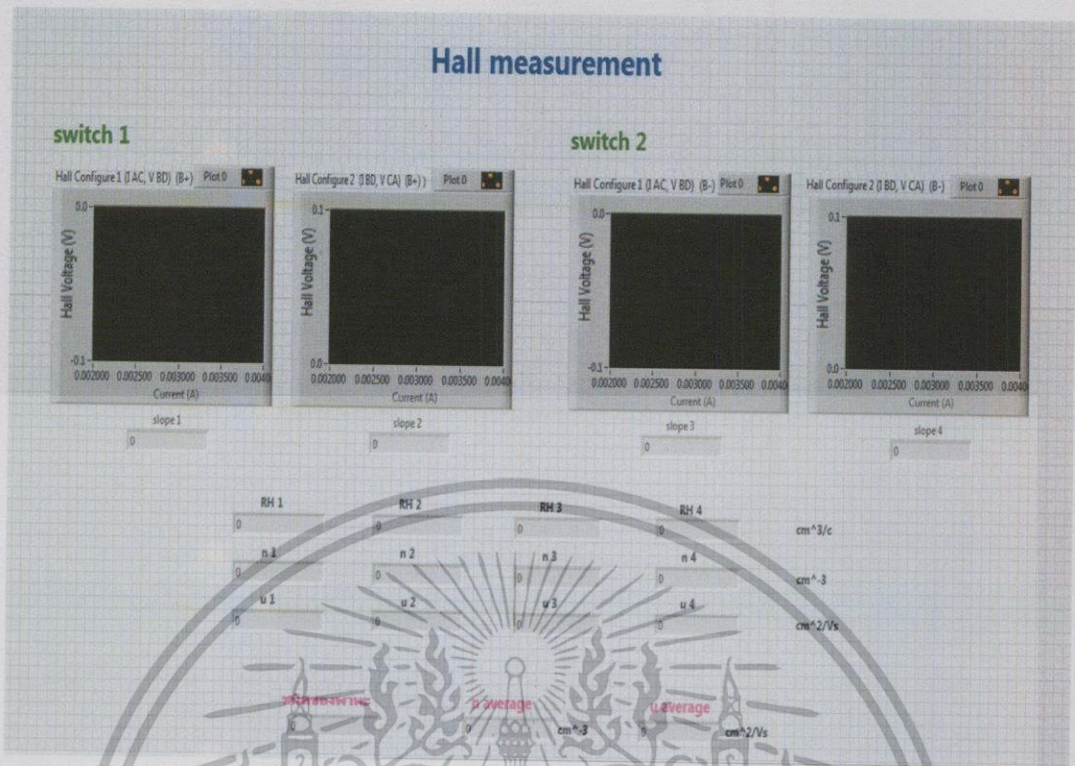
รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ในหน้า Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

ส่วนที่สองเป็นส่วนที่แสดงผลจากการวัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการวัด Van der Pauw และ Hall measurement แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ส่วนการวัด Van der Pauw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้มีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไม่ใช้

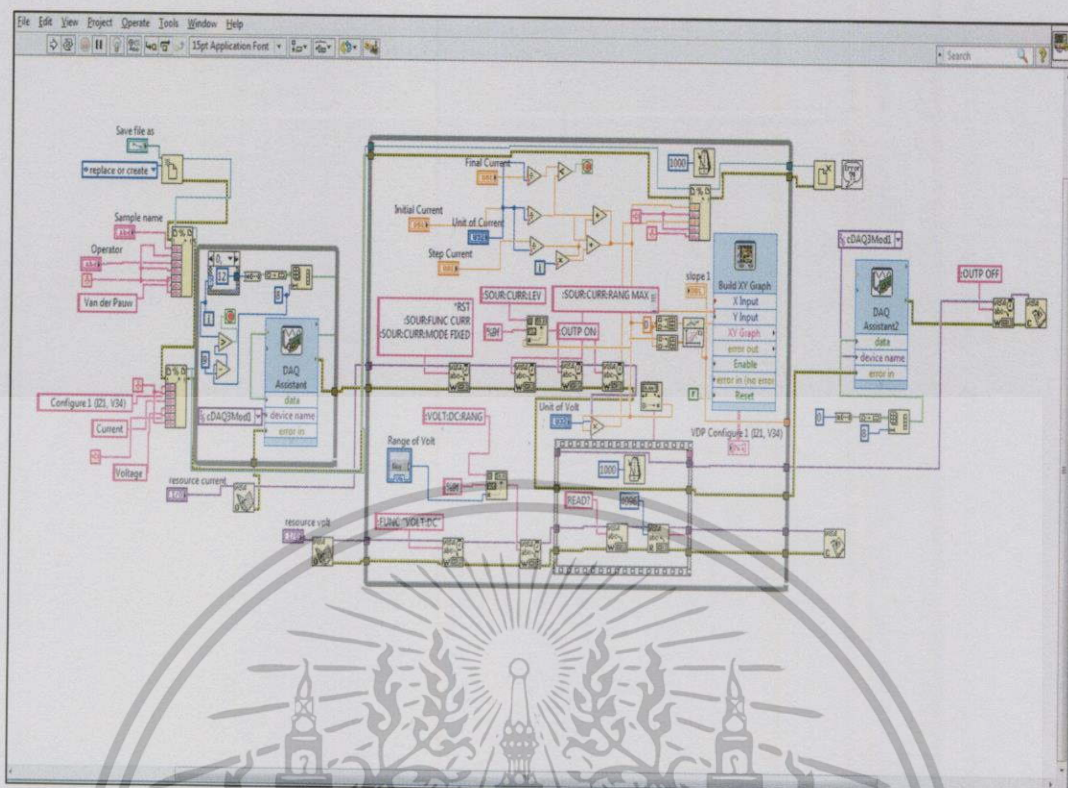


รูปที่ 4.8 ส่วนการวัด Hall measurement

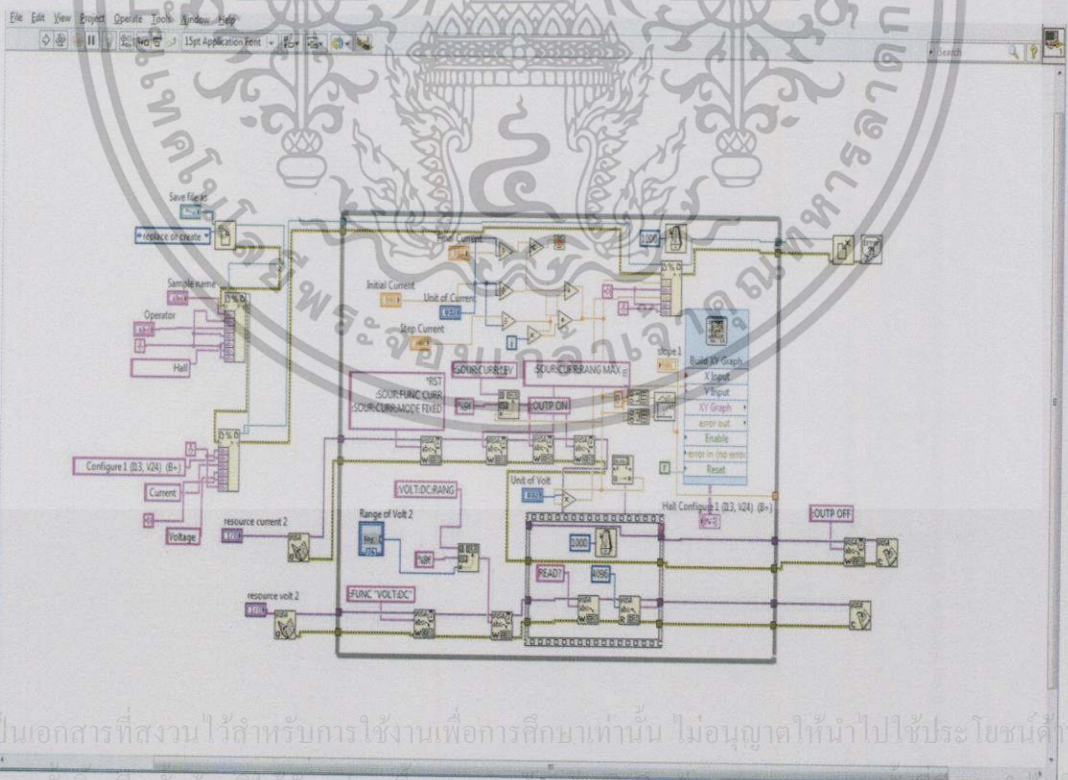
จากรูปที่ 4.7 เป็นส่วนที่แสดงผลจากการวัด Van der Pauw ในรูปของกราฟ I-V เป็นกราฟที่ได้จากการป้อนกระแสไฟฟ้า แล้ววัดความต่างศักย์ ประกอบด้วย 8 กราฟเนื่องจากการวัดทั้งหมด 8 configure ซึ่งกราฟแสดงข้อมูลในรูปของจุด จากนั้นแต่ละกราฟจะประมวลผลแสดงค่าความชันเพื่อนำไปคำนวณหาค่า  $R_A$ ,  $R_B$  และ Resistivity รูปที่ 4.8 เป็นส่วนที่แสดงผลจากการวัด Hall measurement ในรูปของกราฟ I-V ประกอบด้วย 4 กราฟแสดงผลในรูปของจุดเช่นเดียวกัน ผลจากการวัดจะแสดงค่าความชัน,  $R_H$ ,  $n$  และ  $\mu$  ของแต่ละกราฟ, ค่าเฉลี่ยของ  $n$ ,  $\mu$  และชนิดของพาหะ

หน้า Block Diagram ส่วนประกอบภายใน Block Diagram นี้ประกอบด้วยฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block แต่ละ Block นั้นจะถูกต่อสายเข้าด้วยกันเพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านี้ ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการและแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ต่อไป หน้า Block Diagram ของระบบการวัด Van der Pauw และระบบการวัด Hall แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 หน้า Block Diagram ของระบบการวัด Van der Pauw

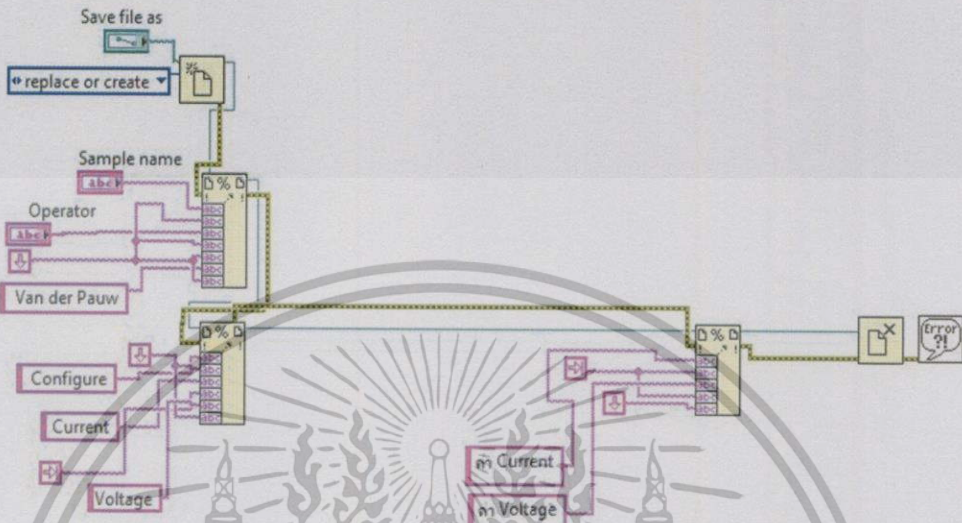


รูปที่ 4.10 หน้า Block Diagram ของระบบการวัด Hall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

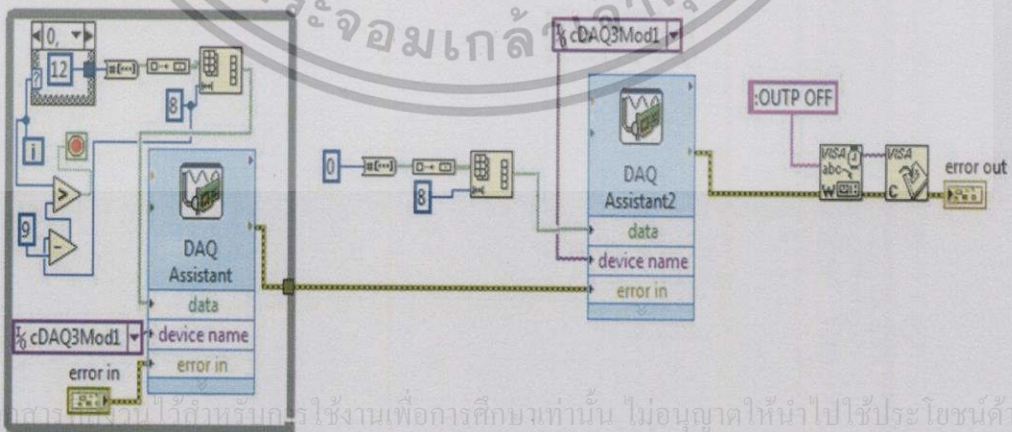
สำหรับตัวโปรแกรมในหน้า Block Diagram แบ่งออกเป็น 4 ส่วน หลักๆ คือ

1. ส่วนของการเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.11 สามารถเลือกการบันทึกข้อมูลได้ เช่น หากต้องการบันทึกผลไว้ใน Microsoft excel ให้บันทึกชื่อ file ตามด้วย .xls เป็นต้น



รูปที่ 4.11 ส่วนของการจัดเก็บข้อมูลในหน้า Block Diagram

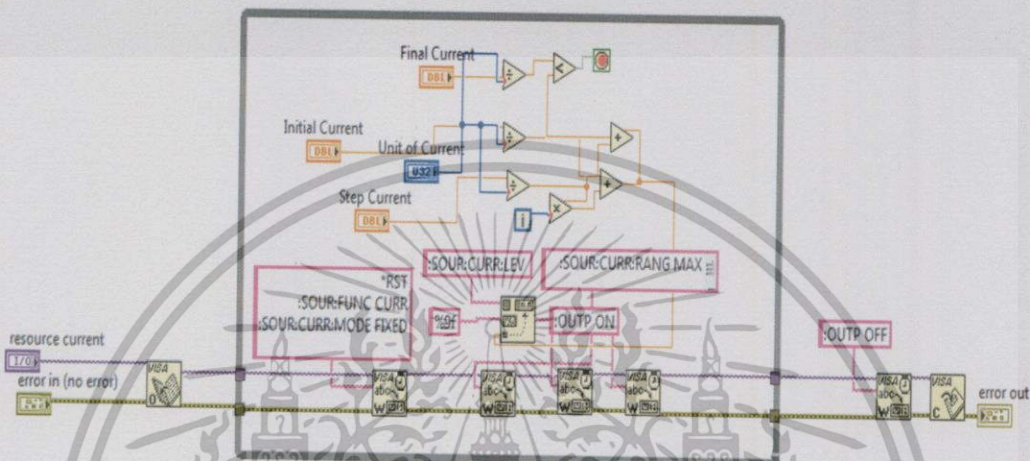
2. รีเลย์ ในส่วนนี้เป็นการใช้รีเลย์สลับขั้วในแต่ละ Configure การเขียนจะป้อนเลขฐานสิบ จากนั้นใช้ Number To Boolean Array เพื่อแปลงค่าให้เป็นเลขฐานสองส่งเข้ารีเลย์ รีเลย์จะทรูตามค่าที่ป้อนเข้าไปทำให้เกิดการสลับขั้ว จึงทำให้มี Configure ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแสดงผลให้เห็นผ่าน National Instruments การเขียนรีเลย์เพื่อเปลี่ยน Configure แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเขียนรีเลย์ในหน้า Block Diagram

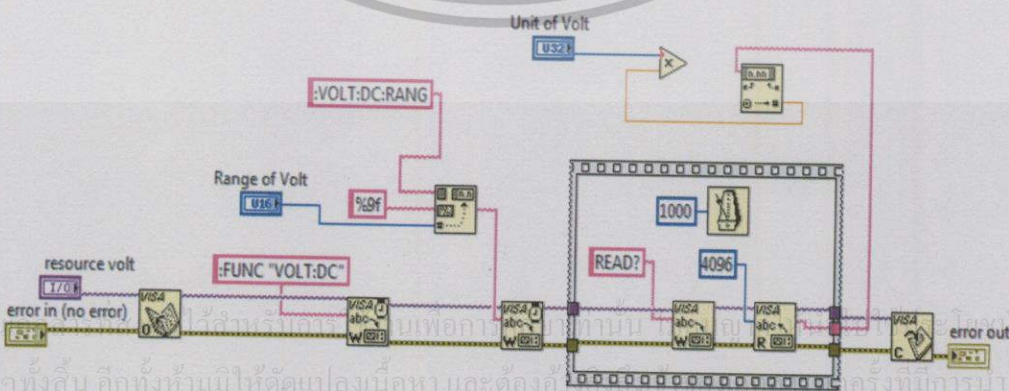
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คำสั่งเครื่อง Current source (Keithley 2410) การเขียนคำสั่งนั้นต้องศึกษาข้อมูลจาก Manual ของอุปกรณ์ เนื่องจากแต่ละอุปกรณ์นั้นจะมีคำสั่งในการเชื่อมต่อข้อมูลที่แตกต่างกัน การเขียนเป็นลักษณะของการนำ Command ของอุปกรณ์มาเขียนป้อนผ่าน VISA Write สามารถเขียนคำสั่งเพื่อให้เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วงที่เราต้องการได้ โดยใช้ Format Value เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่าง VISA Write กับช่วงของกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.13



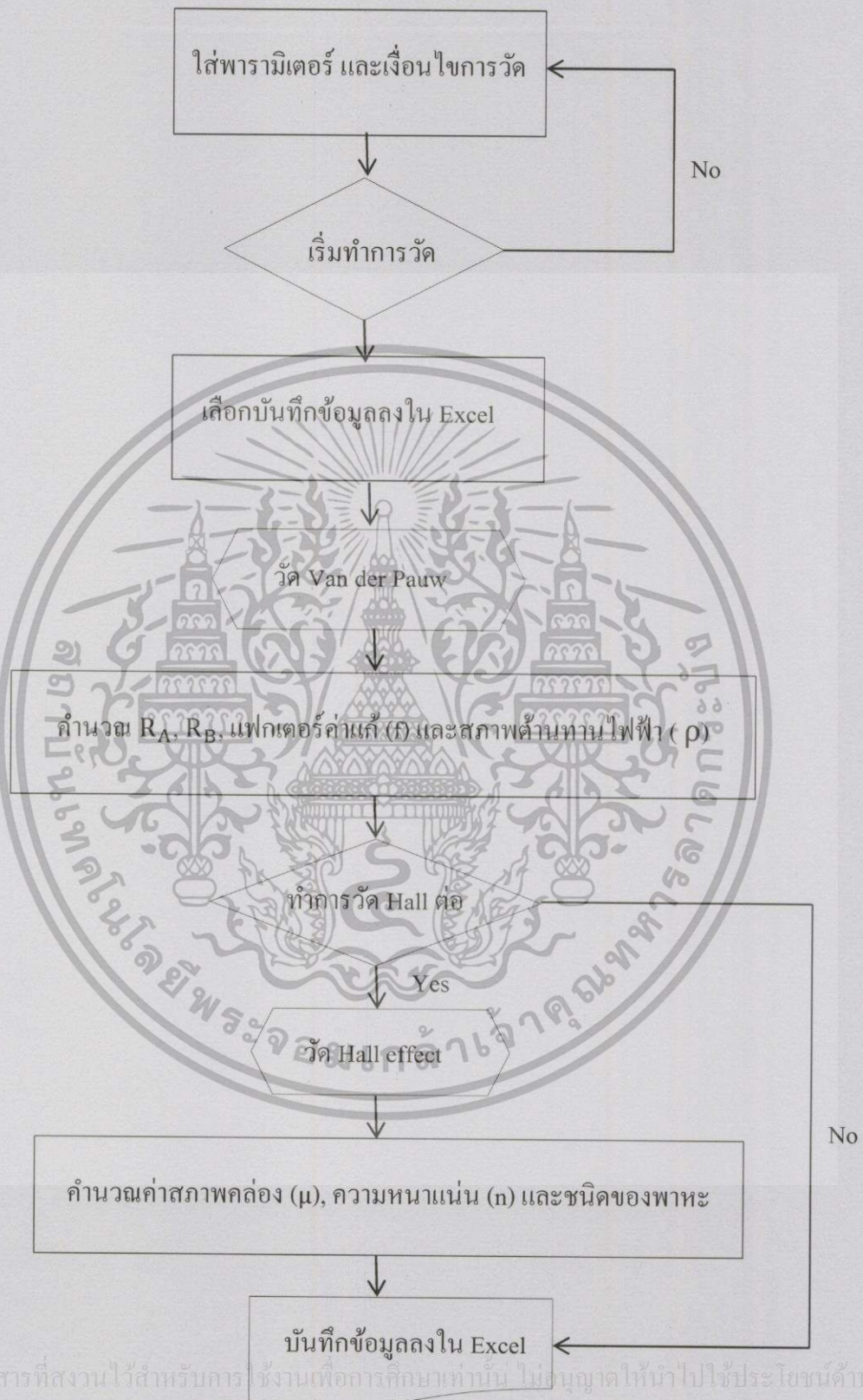
รูปที่ 4.13 การเขียนคำสั่งเครื่อง Current source (Keithley 2410)

4. คำสั่งเครื่อง DMM (Keithley 2100) การเขียนคำสั่งนั้นต้องศึกษาข้อมูลจาก Manual ของอุปกรณ์เช่นเดียวกับการเขียนคำสั่งเครื่อง Current source สำหรับเครื่อง DMM นั้นต้องมีการหน่วงเวลาในการอ่านค่า โดยใช้ Flat Sequence Structure และ Wait Until Next ms Multiple เนื่องจากต้องรอให้เครื่อง Current source ทำงานครบตามคำสั่งที่เขียนไว้ก่อนจึงจะเริ่มให้เครื่อง DMM อ่านค่าได้ หากไม่มีการหน่วงเวลาค่าที่บันทึกได้จะไม่ใช่ค่าที่แท้จริง การเขียนคำสั่งเครื่อง DMM แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การเขียนคำสั่งเครื่อง DMM (Keithley 2100)

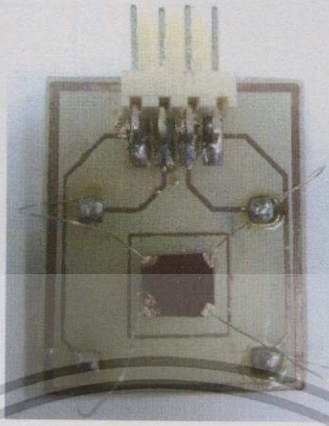
#### 4.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

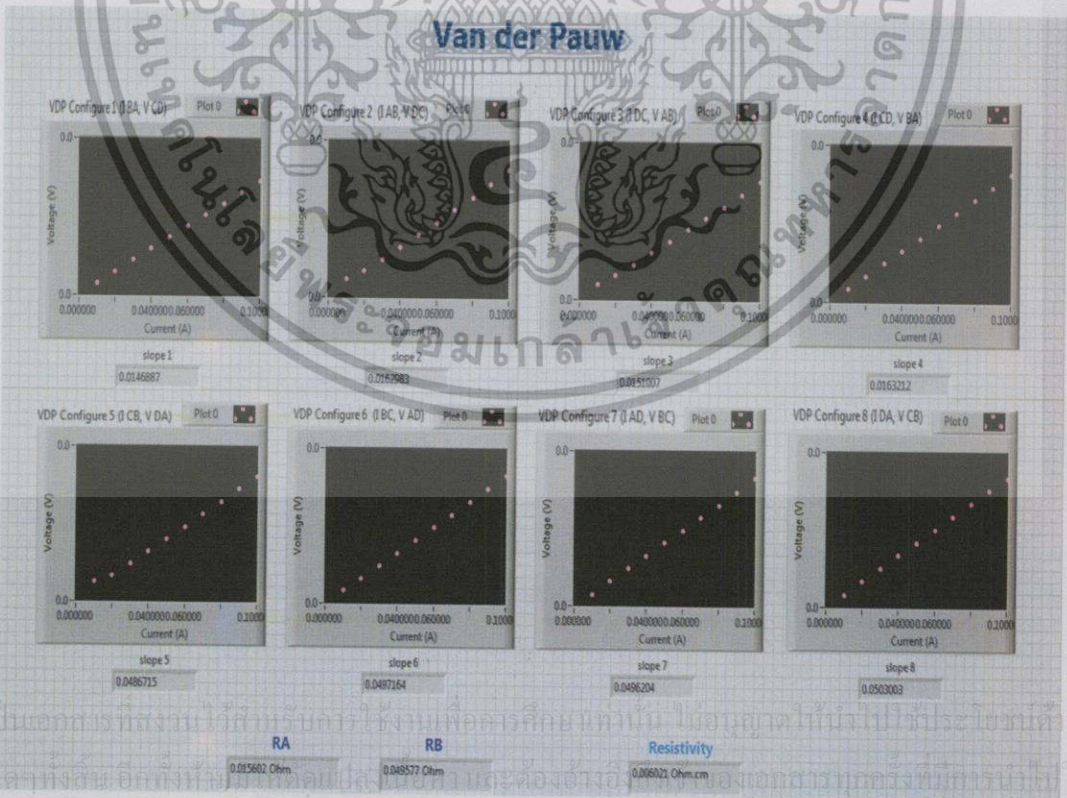
รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการวัด การเก็บข้อมูล และการประมวลผลข้อมูล

### 4.5 สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐาน GaSb:Te และ GaSb:Si

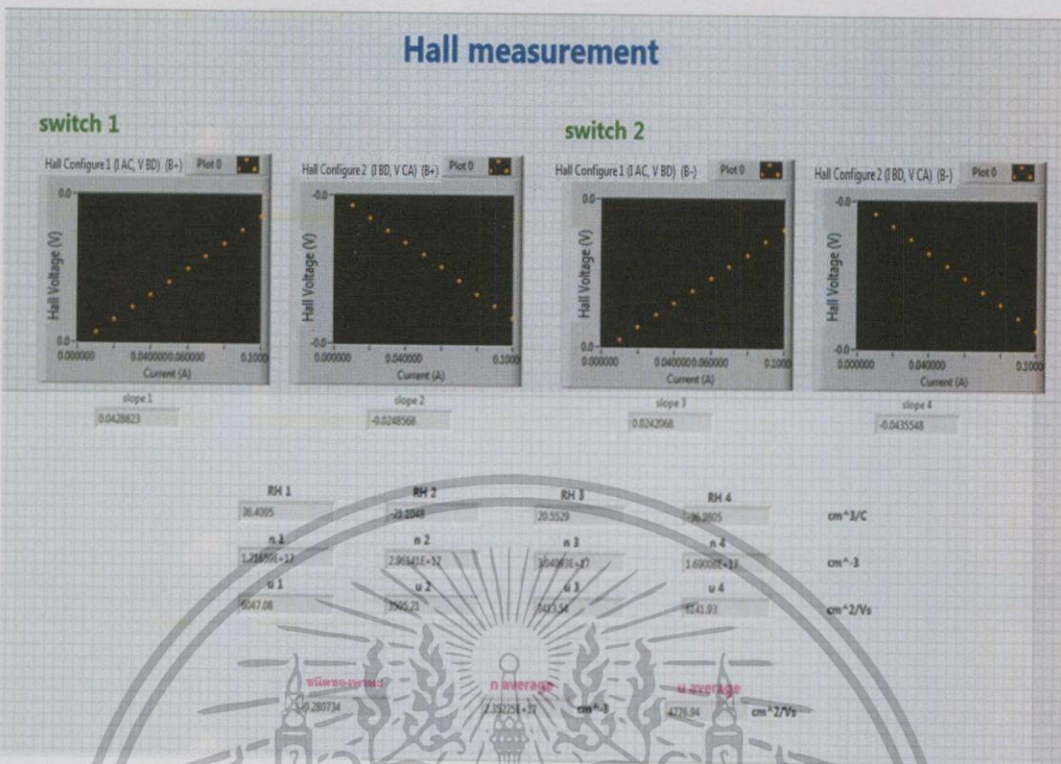


รูปที่ 4.16 สารตัวอย่าง GaSb:Te ที่ติดตั้งบน Sample board ด้วย Silver paint contact

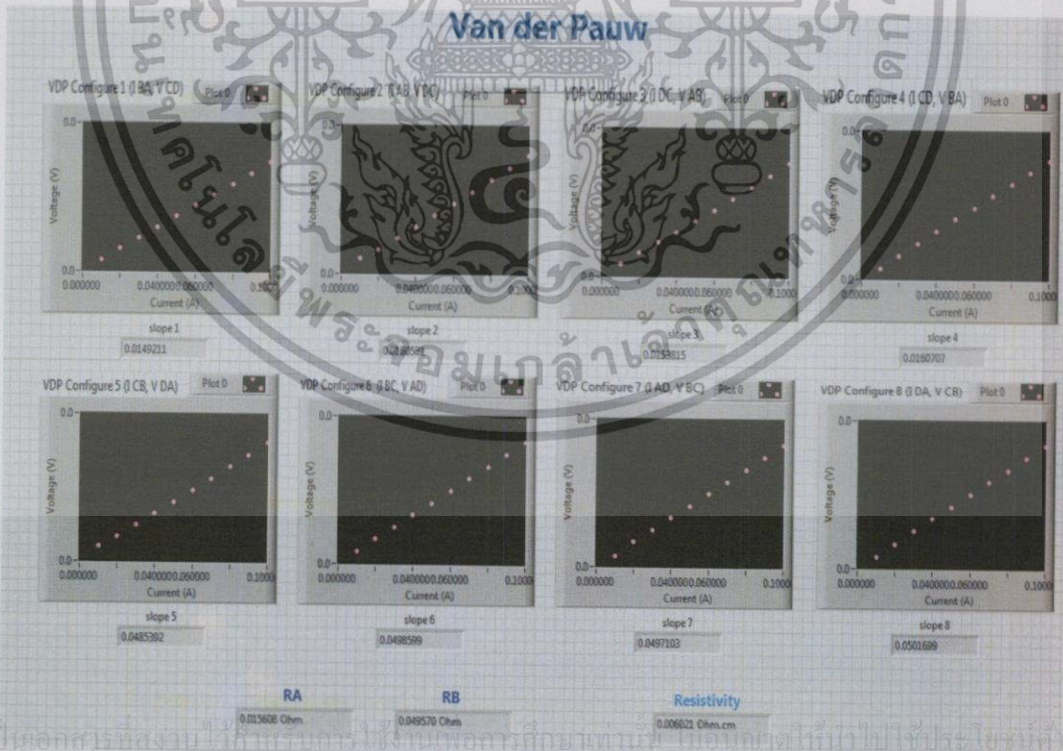
GaSb:Te เป็นสารกึ่งตัวนำ GaSb ที่เจือ Te ซึ่งแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n นำมาวัดด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติที่ถูกออกแบบและเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัด Van der Pauw และ Hall measurement จากการวัดทั้ง 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ได้ผลดังรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.17 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

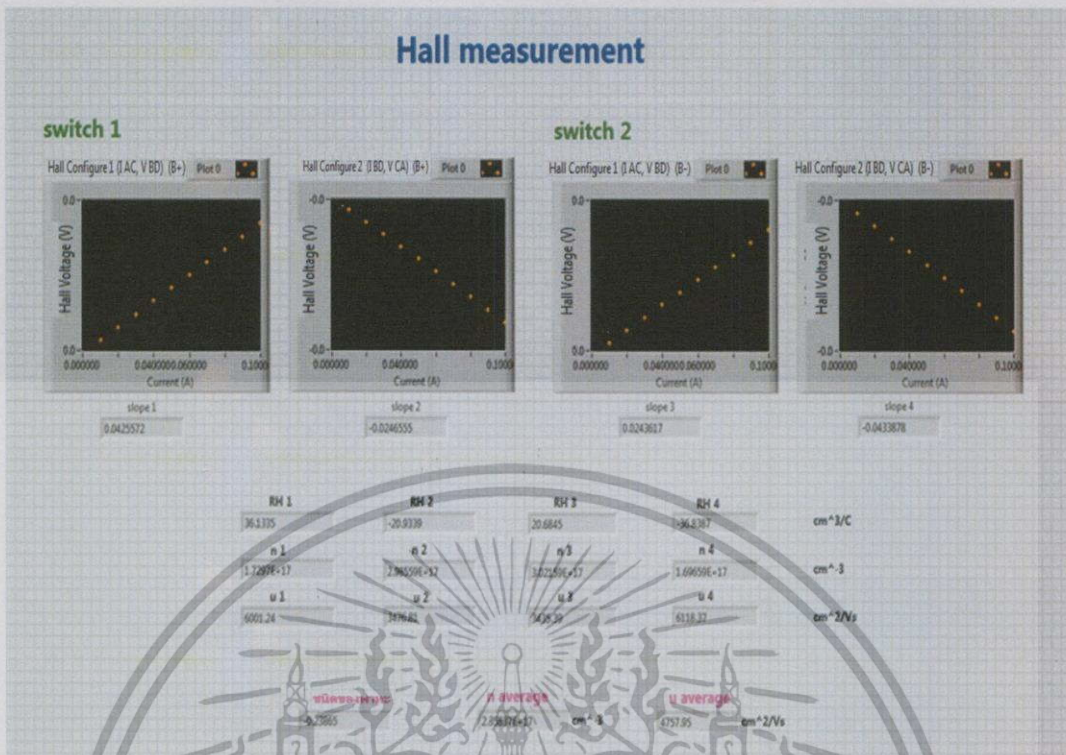


รูปที่ 4.18 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

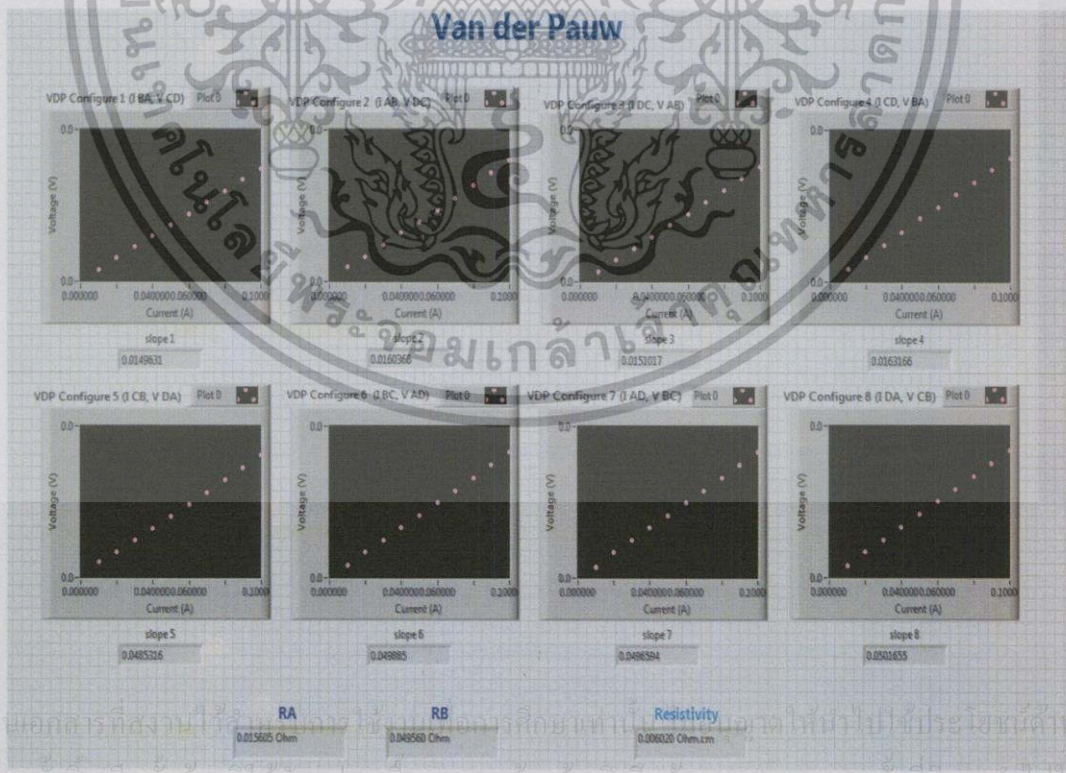


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในอาคารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.19 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

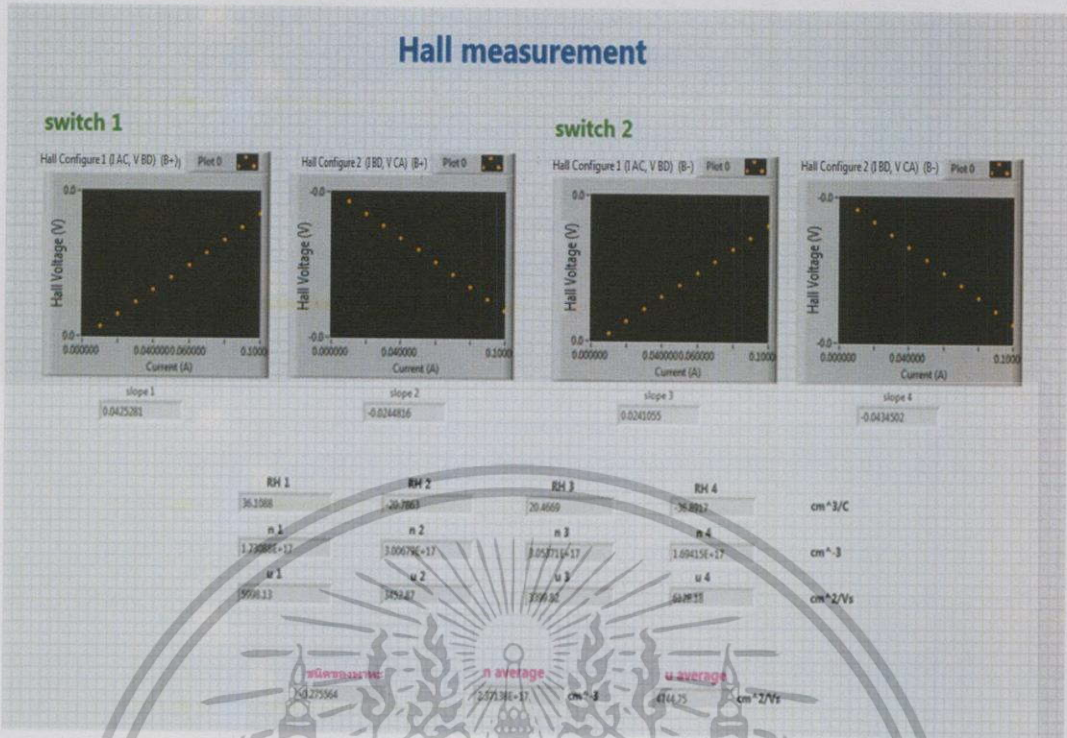


รูปที่ 4.20 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทางสั้น อีเมล ทวิตเตอร์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

รูปที่ 4.21 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.22 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

รูปที่ 4.17 ถึง 4.22 เป็นผลจากการทดลองวัดสารตัวอย่าง GaSb:Te (n-type) ที่มีความหนา 450  $\mu\text{m}$  จำนวน 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw และ Hall measurement พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V มีความเป็นเชิงเส้น ค่าจากการวัดและการคำนวณ Resistivity, Carrier concentration และ Mobility ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัด GaSb:Te (n-type) ด้วยระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K

วัด	ครั้งที่				S.D.	Uncertainty
	1	2	3	เฉลี่ย		
Resistivity ( $\Omega\text{cm}$ )	$6.02 \times 10^{-3}$	$6.02 \times 10^{-3}$	$6.02 \times 10^{-3}$	$6.02 \times 10^{-3}$	0.00	0.00
Carrier concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.352 \times 10^{17}$	$2.358 \times 10^{17}$	$2.371 \times 10^{17}$	$2.360 \times 10^{17}$	$0.012 \times 10^{17}$	$0.007 \times 10^{17}$
Mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	4776.94	4757.95	4744.75	4759.88	16.18	9.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือในทางอื่นใด

จากการวัด GaSb:Te (n-type) ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่า มีค่า Resistivity =  $6.02 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ , Carrier concentration =  $(2.360 \pm 0.007) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  และ Mobility =  $4759.88 \pm 9.34 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

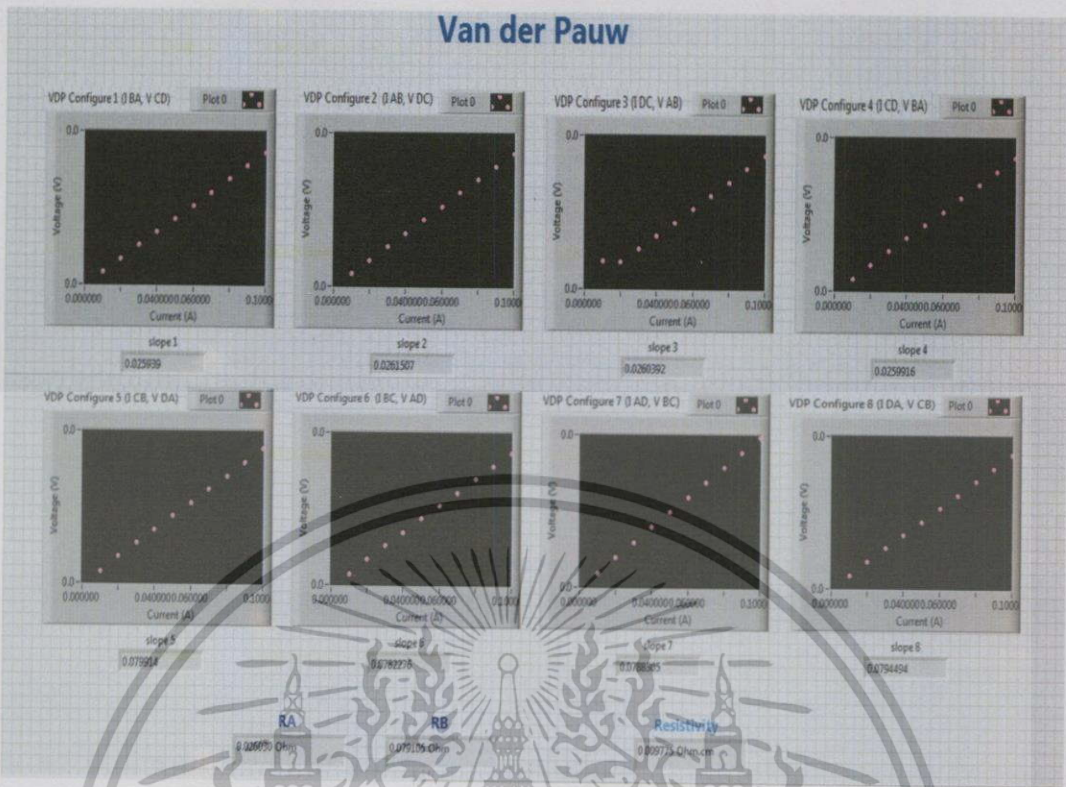
ตารางที่ 4.2 Certificate measurements temperature 300 K ของ GaSb:Te (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul.Wólczyńska 133

Sample	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Resistivity ( $\Omega\text{cm}$ )	Carrier concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Type
GaSb:Te	450	$4.40 \times 10^{-3}$	$4.20 \times 10^{17}$	n

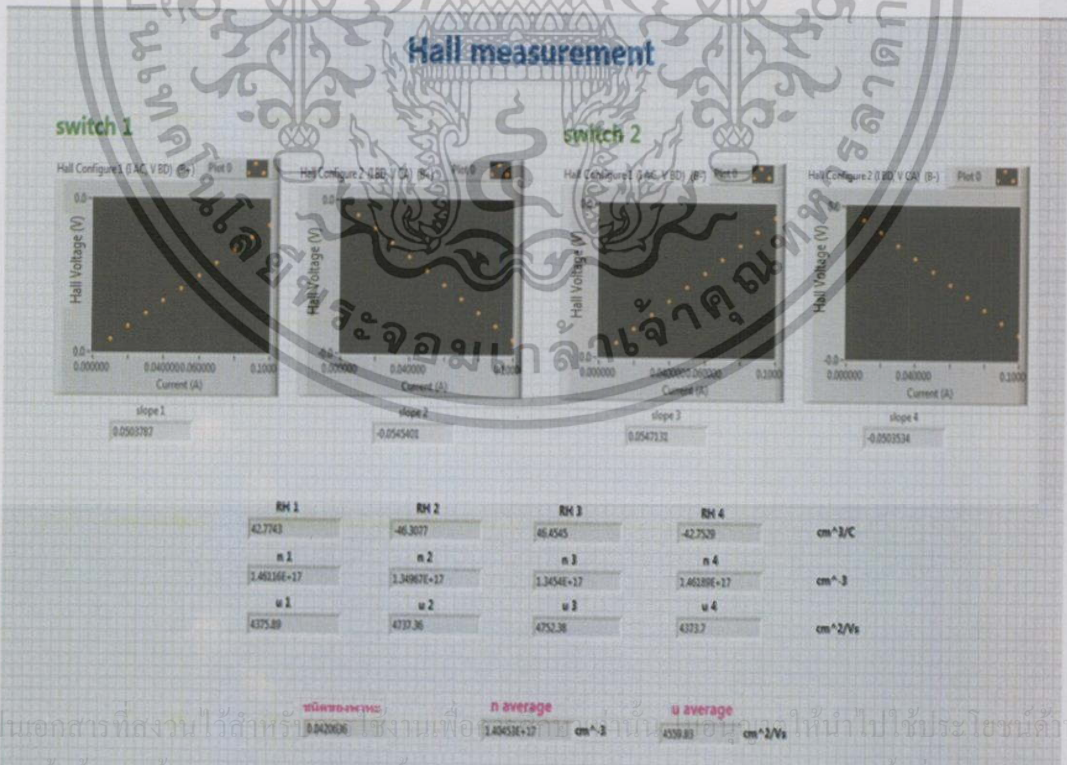
เมื่อเทียบผลจากการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติกับ Certificate measurements temperature 300 K จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการวัดเกิดขึ้น แต่ค่าที่ได้จากการวัดทั้ง 3 ครั้งมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความเที่ยงตรงในการวัดค่อนข้างสูง สำหรับการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัตินั้นสามารถดูชนิดของพาหะข้างมากได้จากเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะ พบว่าเครื่องหมายเป็นลบแสดงถึงพาหะข้างมาก คือ อิเล็กตรอน แสดงว่าเป็นสารชนิด n

รูปที่ 4.23 สารตัวอย่าง GaSb:Si ที่ติดลงบน Sample board ด้วย Silver paint contact

GaSb:Si เป็นสารกึ่งตัวนำ GaSb ที่เจือ Si ซึ่งแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p นำมาวัดด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติที่ถูกออกแบบและเขียนคำสั่งด้วยโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัด Van der Pauw และ Hall measurement จากการวัดทั้ง 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ได้ผลดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่

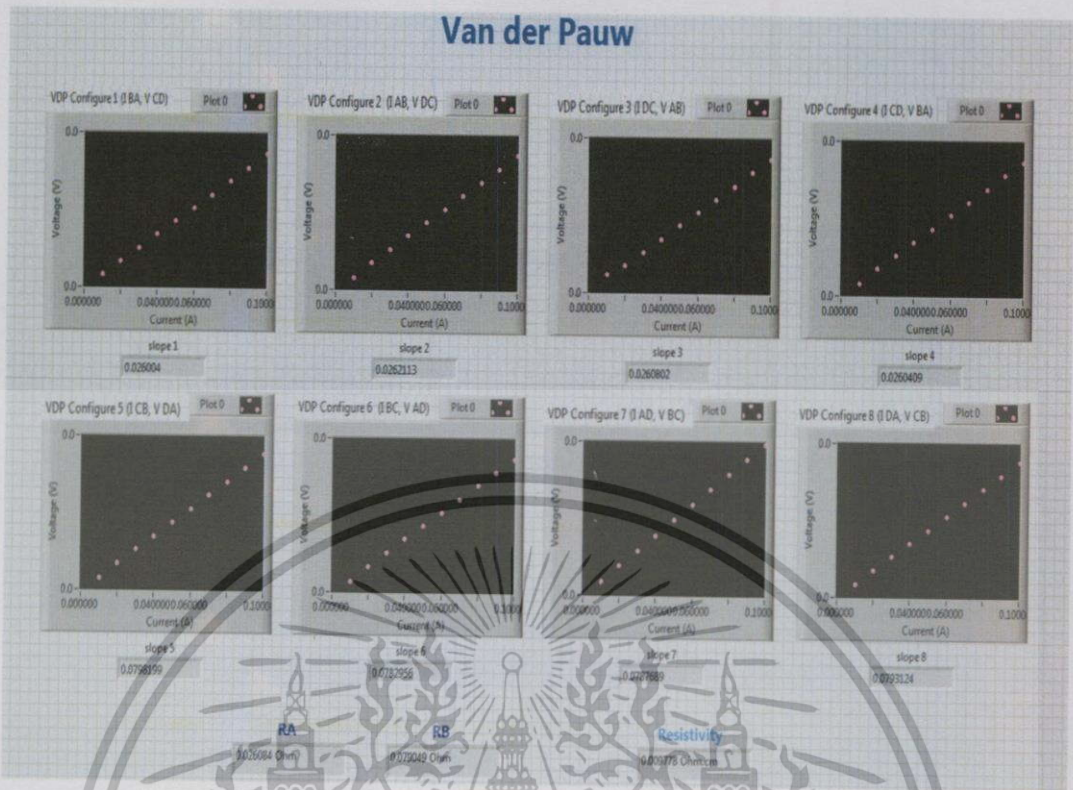


รูปที่ 4.24 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

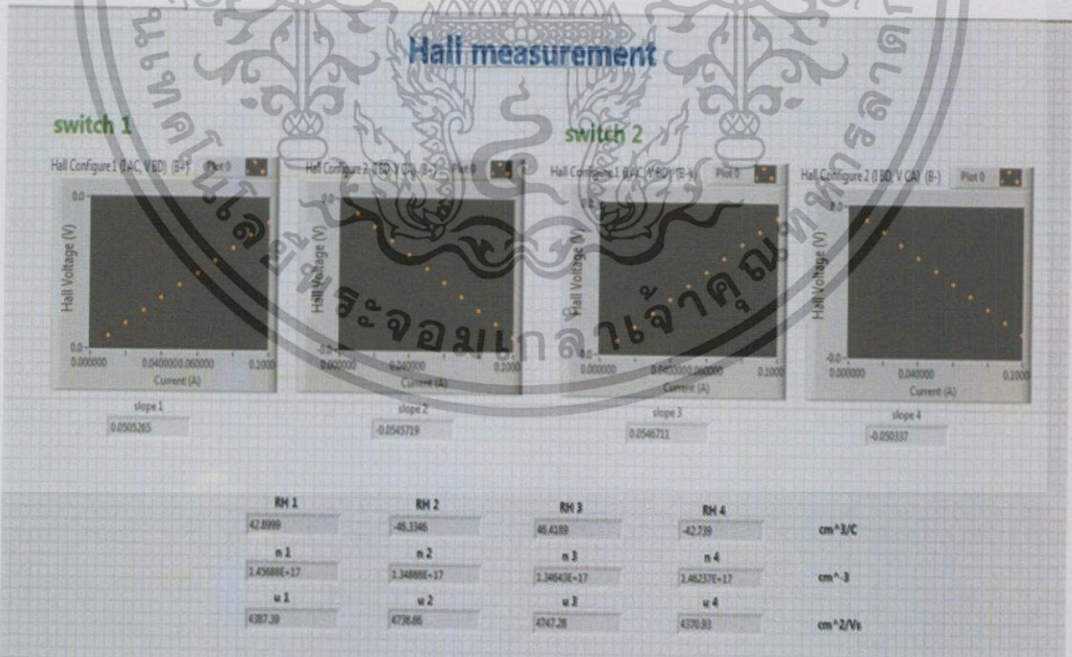


รูปที่ 4.25 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

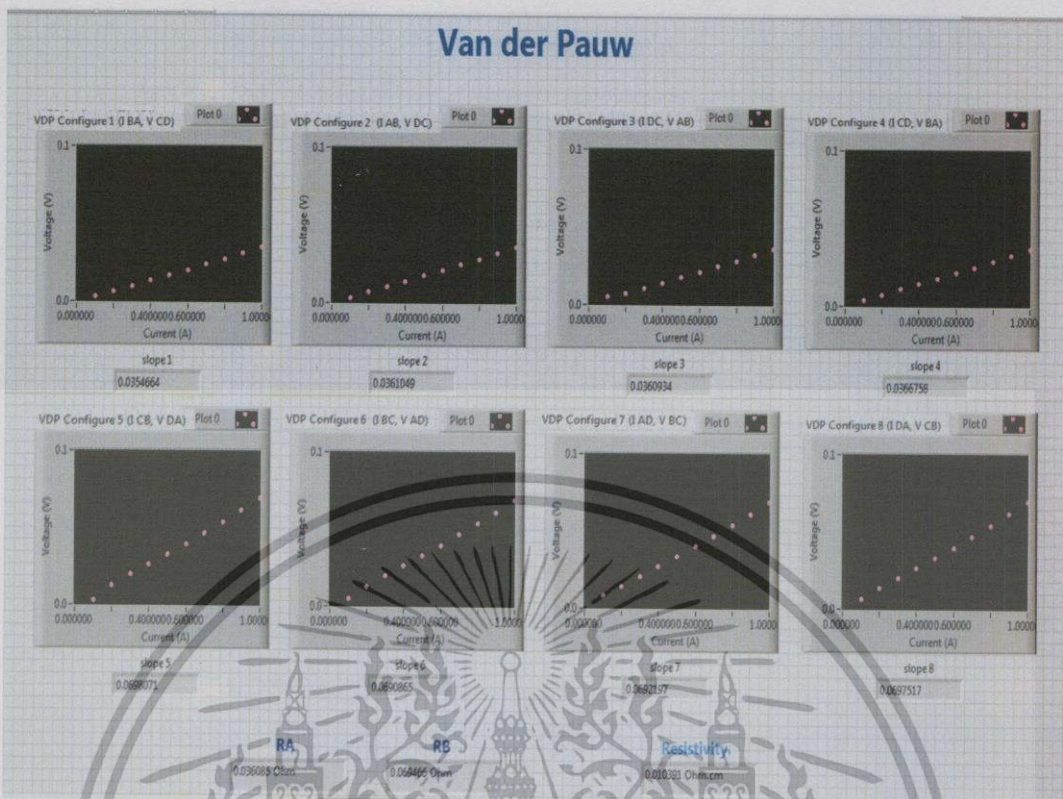


รูปที่ 4.26 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

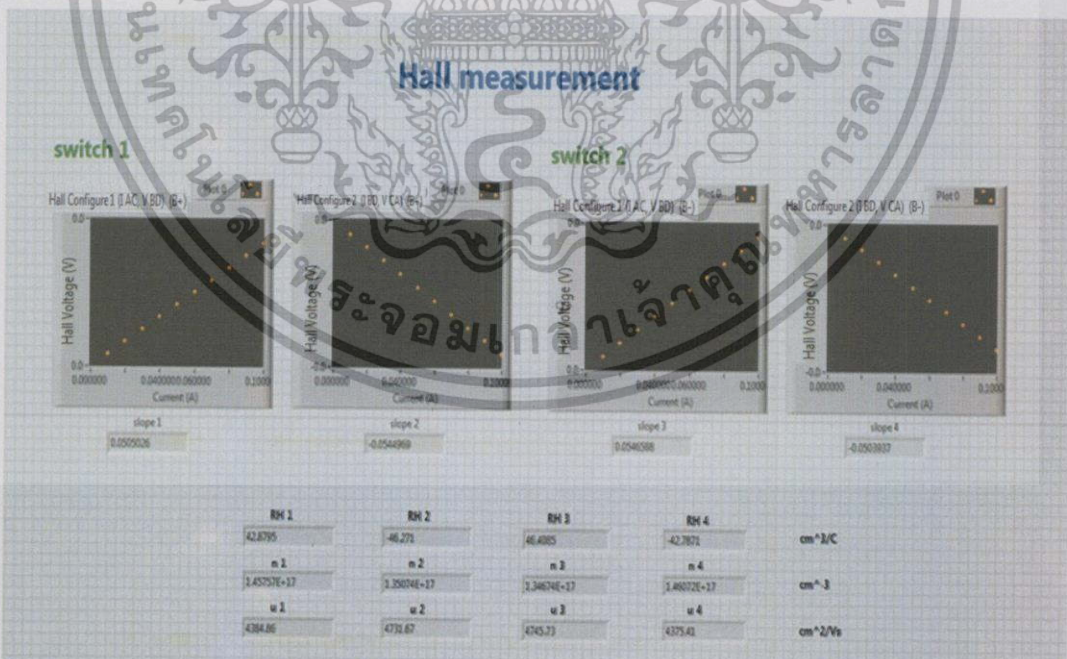


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... **ขณิลของพหุภาค** **n average** **w average** ...

รูปที่ 4.27 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.28 ผลการวัด Van der Pauw ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ



รูปที่ 4.29 ผลการวัด Hall measurement ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.29 เป็นผลจากการทดลองวัดสารตัวอย่าง GaSb:Te (n-type) ที่มีความหนา 450  $\mu\text{m}$  จำนวน 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 300 K ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw และ Hall measurement พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V มีความเป็นเชิงเส้น ค่าจากการวัดและการคำนวณ Resistivity, Carrier concentration และ Mobility ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวัด GaSb:Si (p-type) ด้วยระบบการวัดอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K

วัด	ครั้งที่			เฉลี่ย	S.D.	Uncertainty
	1	2	3			
Resistivity ( $\Omega\text{cm}$ )	$9.78 \times 10^{-3}$	$9.78 \times 10^{-3}$	$9.78 \times 10^{-3}$	$9.78 \times 10^{-3}$	0.00	0.00
Carrier concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.405 \times 10^{17}$	$1.404 \times 10^{17}$	$1.404 \times 10^{17}$	$1.404 \times 10^{17}$	$0.006 \times 10^{17}$	$0.003 \times 10^{17}$
Mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	4559.83	4561.06	4559.41	4560.10	0.86	0.50

จากการวัด GaSb:Si (p-type) ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่ามีค่า Resistivity =  $9.78 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ , Carrier concentration =  $(1.404 \pm 0.003) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  และ Mobility =  $4560.10 \pm 0.50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

ตารางที่ 4.4 Certificate measurements temperature 77 K ของ GaSb:Si (n-type) จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133

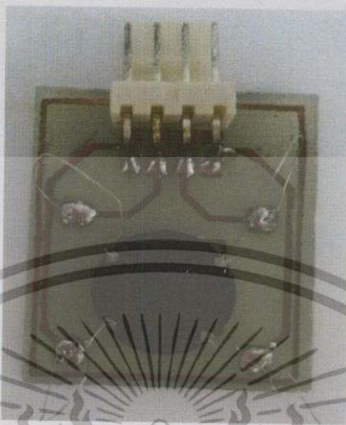
Sample	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Resistivity ( $\Omega\text{cm}$ )	carrier concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Type
GaSb:Si	450	$7.2 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{18}$	p

เมื่อเทียบผลจากการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติกับ Certificate measurements

temperature 77 K จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133 พบว่ามีค่าที่วัดได้มีความแตกต่างกันเนื่องจากการทดลองนั้นวัดที่อุณหภูมิ 300 K

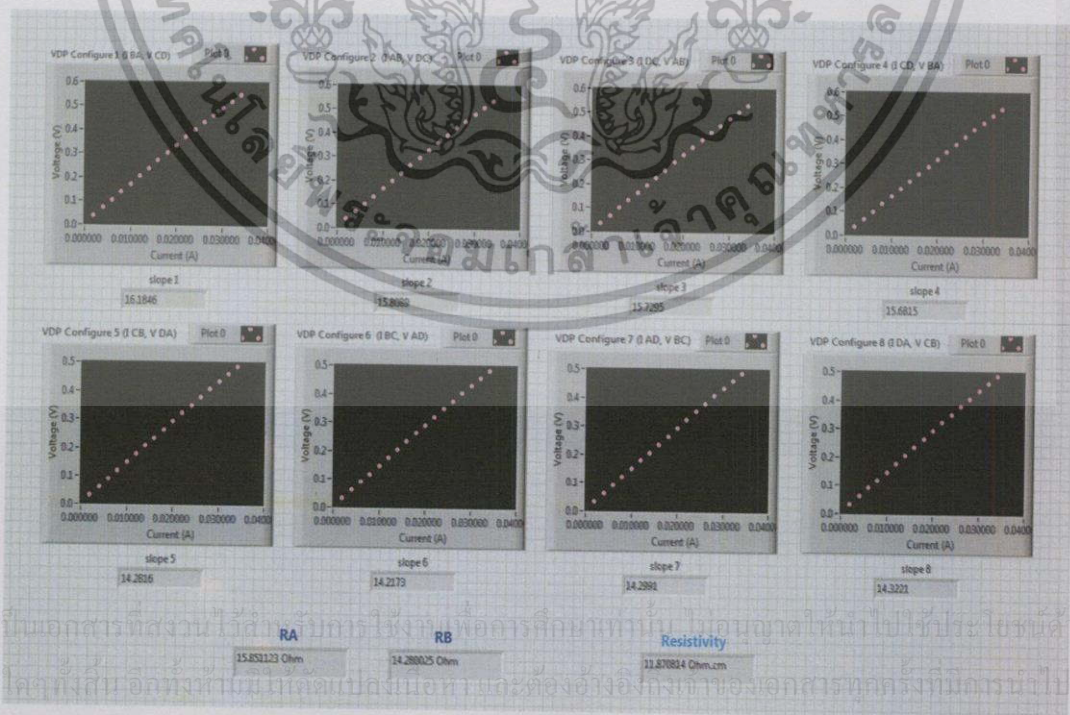
เป็นการวัดเพื่อตรวจสอบชนิดของพาหะจากการวัดด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติพบว่าเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะเป็นบวก แสดงถึงพาหะข้างมาก คือ โฮล แสดงว่าเป็นสารชนิด p

#### 4.6 ทดสอบสารตัวอย่าง $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$



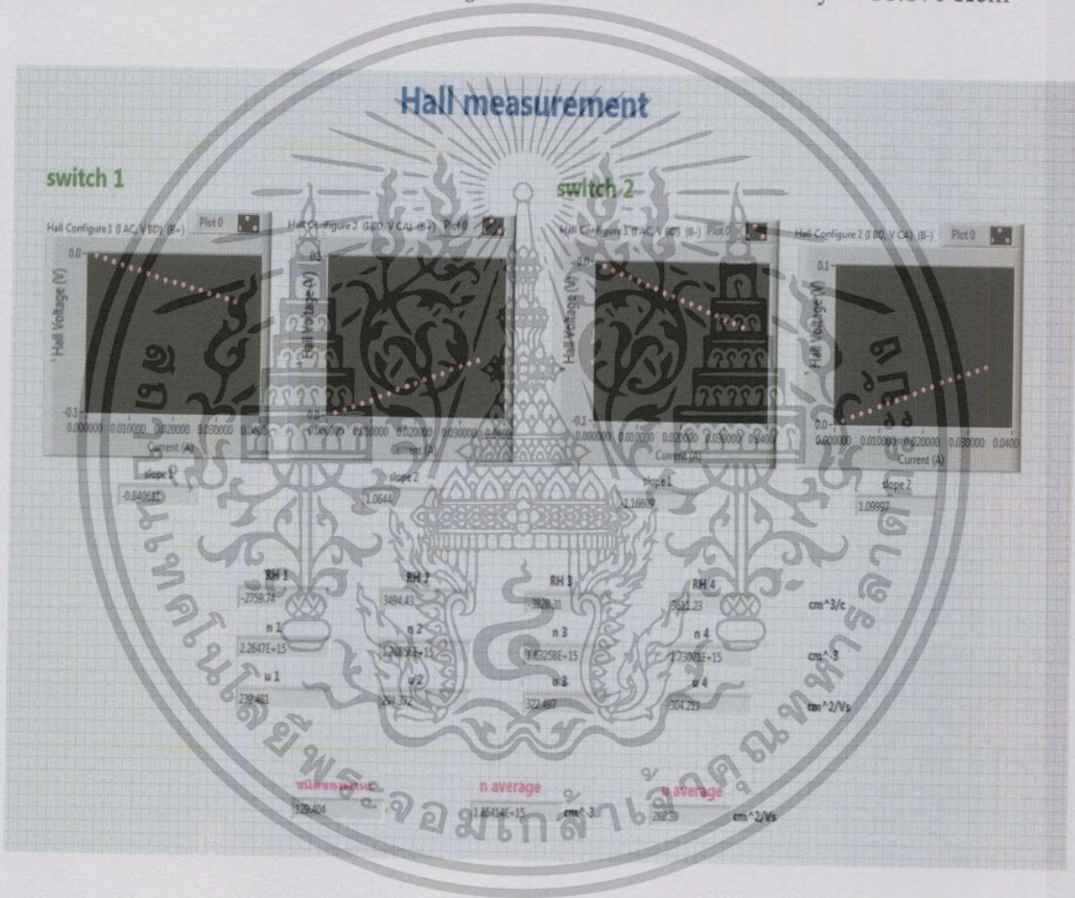
รูปที่ 4.30 สารตัวอย่าง  $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$  ที่ติดตั้งบน Sample board ด้วย Silver paint contact

สารตัวอย่าง  $\text{CuAl}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}\text{O}_2$  มีโครงสร้างแบบ Delafossite คือ  $\text{ABO}_2$  ซึ่ง  $\text{Al}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$  หมายความว่า เจือ  $\text{Fe}_{0.1}$  ลงใน  $\text{Al}_{0.9}$  สารตัวอย่างที่นำมาวัดอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า bulk มีความหนา 0.174 cm นำมาวัดด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw และ Hall measurement ทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 K ได้ผลดังรูปที่ 4.31 ถึงรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ค่า  $R_A$ ,  $R_B$  และ Resistivity จากการวัด Van der Pauw ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

จากรูปที่ 4.31 เป็นการวัด Van der Pauw ด้วยระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติ จากภาพประกอบด้วยการวัดทั้งหมด 8 configure โดย 4 configure บนเป็นการวัดเพื่อหาค่า  $R_A$  และ 4 configure ล่างเป็นการวัดเพื่อหาค่า  $R_B$  ระบบจะประมวลผลการวัดออกมาในรูปแบบของกราฟ I-V แสดงผลในรูปแบบของจุด และแสดงค่า slope ของแต่ละ configure ออกมา จากการวัด 4 configure บนพบว่าได้ ค่า slope ของแต่ละ configure ดังนี้คือ  $R_{(BA,CD)} = 16.185 \Omega$ ,  $R_{(AB,DC)} = 15.809 \Omega$ ,  $R_{(DC,AB)} = 15.729 \Omega$  และ  $R_{(CD,BA)} = 15.682 \Omega$  ดังนั้นจะได้ค่า  $R_A = 15.851 \Omega$  และจากการวัด 4 configure ล่างพบว่าได้ค่า slope ของแต่ละ configure ดังนี้คือ  $R_{(AD,BC)} = 14.282 \Omega$ ,  $R_{(DA,CB)} = 14.217 \Omega$ ,  $R_{(CB,DA)} = 14.299 \Omega$  และ  $R_{(BC,AD)} = 14.322 \Omega$  ดังนั้นจะได้ค่า  $R_B = 14.280 \Omega$  และค่า Resistivity = 11.871  $\Omega\text{cm}$



รูปที่ 4.32 ค่า  $R_H$ ,  $n$  และ  $\mu$  จากการวัด Hall measurement ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ

การวัด Hall measurement ด้วยระบบวัดกึ่งอัตโนมัติ ระบบจะทำการวัดและประมวลผลออกมาในรูปแบบของกราฟ I-V แสดงค่า slope,  $R_H$ ,  $n$ ,  $\mu$  และค่าเฉลี่ย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.32

ซึ่งพบว่ามีค่า  $n$  average =  $1.854 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\mu$  average =  $288.39 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  และมีเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะเป็นบวก แสดงว่าสารนั้นเป็นชนิด p

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้ได้ออกแบบและเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการวัดแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยโปรแกรม LabVIEW สำหรับวัด Van der Pauw และ Hall measurement เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ อาทิ เช่น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ฮอลล์ ความหนาแน่นของพาหะ สภาพคล่องของพาหะ และชนิดของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดทั้งหมด 6 ขด มีความต้านทานรวม 8 โอห์ม เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าสูงสุด 8 แอมแปร์ สามารถให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 0.53 เทสลา การสอบเทียบระบบจะใช้สารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบคุณสมบัติทางไฟฟ้าจาก Certificate measurements จาก Institute of Electronic Materials Technology 01-919 WARSZAWA ul. Wólczyńska 133 สารตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบระบบ คือ GaSb:Te เป็นสารตัวอย่างชนิด n มีความหนาเท่ากับ 450  $\mu\text{m}$  มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ  $4.40 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$  ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ  $4.20 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  และสภาพคล่องเท่ากับ  $3300.00 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (ค่าจากการวัดที่อุณหภูมิ 300 K) และ GaSb:Si เป็นสารตัวอย่างชนิด p มีความหนาเท่ากับ 450  $\mu\text{m}$  มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ  $7.20 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$  ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ  $1.60 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  และสภาพคล่องเท่ากับ  $536.00 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (ค่าจากการวัดที่อุณหภูมิ 77 K) นำสารตัวอย่างทั้งสองไปวัดด้วยระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 300 K โดยทำการวัด 3 ครั้งพบว่า GaSb:Te มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ  $6.02 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$  ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ  $(2.360 \pm 0.007) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  และสภาพคล่องเท่ากับ  $4759.88 \pm 9.34 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  และ GaSb:Si มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ  $9.78 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$  ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ  $(1.404 \pm 0.003) \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  และสภาพคล่องเท่ากับ  $4560.10 \pm 0.50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  จากการวัดพบว่าระบบวัดมีความเที่ยงตรงค่อนข้างสูง แต่ยังคงขาดความถูกต้องบ้างในการวัดเนื่องจากปัจจัยหลายประการ อาทิ เช่น การติด Contact ที่ไม่ดี การที่ระบบยังมีสัญญาณรบกวน เครื่องมือวัดมี Impedance ต่ำ และสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก Regulated DC Power Supply ที่ใช้เป็นแบบ Analog จึงทำให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดแต่ละครั้งอาจมีค่าไม่เท่าเดิม นอกจากนี้ยังได้นำสารตัวอย่างอีกสารที่เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไมออนคาไฟท์ไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา CuAl<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย พบว่ามีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ  $11.87 \Omega\text{cm}$  ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้ ความหนาแน่นพาหะเท่ากับ  $1.85 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  และสภาพคล่องเท่ากับ  $288.39 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  มีเครื่องหมายที่ชนิดของพาหะเป็นบวก แสดงว่าเป็นสารชนิด p

## ข้อเสนอแนะ

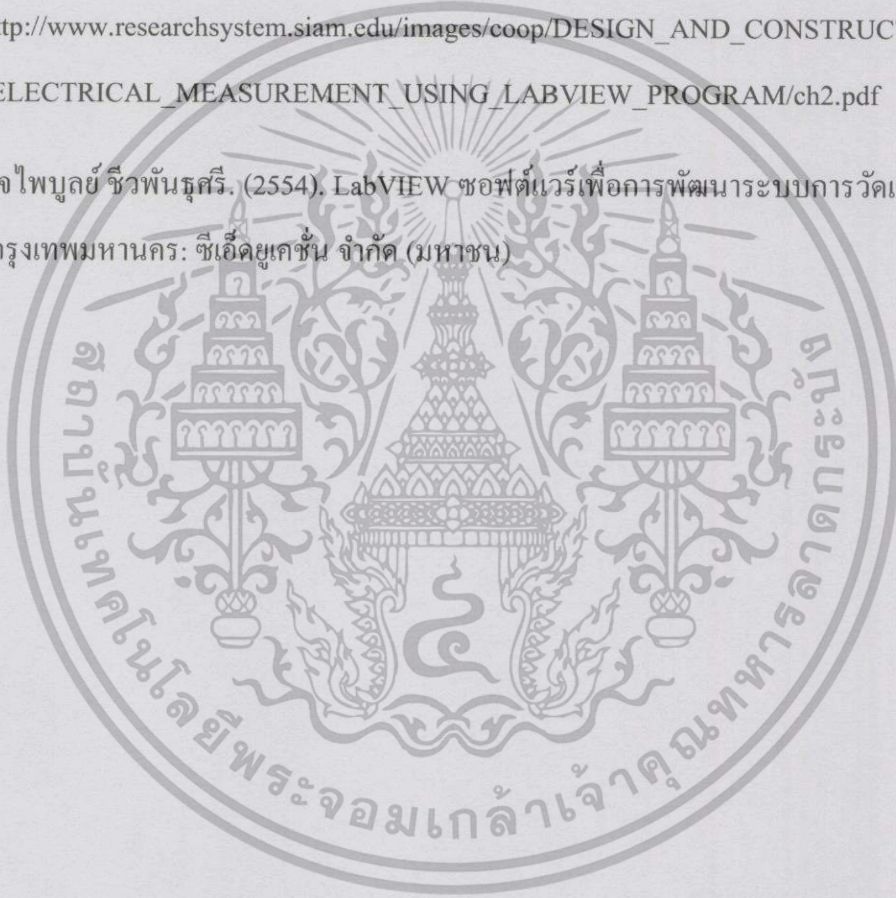
1. ในการเตรียม Sample ที่ใช้ในการทดลอง ผู้ทำการทดลองควรทำ Contact ให้ดีเพื่อลดความผิดพลาดจากการวัด
2. ในการทำการทดลองควรให้ Sample holder อยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ
3. เลือกใช้เครื่องมือวัดที่มี Impedance สูง เพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เครื่องมือวัดทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ชิ้นงานน้อยลง
4. ออกแบบวงจรกรองสัญญาณเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวน
5. ออกแบบ Regulated DC Power Supply ใหม่ให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก
6. ระบบวัดควรมีเกาส์มิเตอร์สอบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา
7. ผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับระบบการวัดกึ่งอัตโนมัติก่อนการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Runyan, W.R., in *Semiconductor Measurements and Instrumentation*, pp. 67-91, Mc Graw-Hill, Bombay, New York, 1975
- [2] Gangopadhyay, U., Kim K., Mangalaraj, D., Yi J., 2004. Low Cost CBD ZnS Antireflection Coating on Large Area Commercial Mono-Crystalline Silicon Solar Cells, *Applied Surface Science*, 230: 364-370.
- [3] <http://four-point-probes.com/ecopia.html>.
- [4] งามนิตย์ แก้วแดง, สุนิษฐ์ แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติ  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์”, รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [5] คูสัต เครื่องงาม, 2535. โพลีคริสตัลฟิสิกส์, กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [6] KINDER, R, et al : *Journal of Electrical Engineering* 56 (2005),268-270.
- [7] Van der Pauw L.J. A method of measuring the resistivity and Hall coefficient on lamellae of arbitrary shape. *Phil. Tech. Rev.* 20 (1958): 220-224
- [8] L. J. van der Pauw, "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shapes," *Philips Res. Repts.* 13, 1-9 (1958).
- [9] MATSUMURA, T.—SATO, Y.: A Theoretical Study on Van Der Pauw Measurement Values of Inhomogeneous Compound Semiconductor Thin Films, *J. Mod. Phys.* 1 (2010), 340
- [10] H. Ryssel and I. Ruge, *Ion Implantation* (Wiley, Chichester, 1986).
- [11] E. H. Hall, On a new action of the magnet on electric currents, *Am. J. Math.*, 2, pp. 287–292 (1879).

- [12] GREEN, R. : Hall Effect Measurements in Materials Characterization, Keithley Instruments, Inc., Keithley Instruments, Inc.2011.
- [13] Brandley Armen. 2007. Hall Effect Experiment. Tennessee, department of Physics and Astronomy.
- [14] Donal A. Neaman. Semiconductor Physics & Device, USA: The Mc Graw-Hill Companies, Inc., 1997
- [15] [http://www.researchsystem.siam.edu/images/coop/DESIGN\\_AND\\_CONSTRUCTION\\_OF\\_ELECTRICAL\\_MEASUREMENT\\_USING\\_LABVIEW\\_PROGRAM/ch2.pdf](http://www.researchsystem.siam.edu/images/coop/DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_ELECTRICAL_MEASUREMENT_USING_LABVIEW_PROGRAM/ch2.pdf)
- [16] กิจไพบูรณ์ ชิวพันธุ์ศรี. (2554). LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

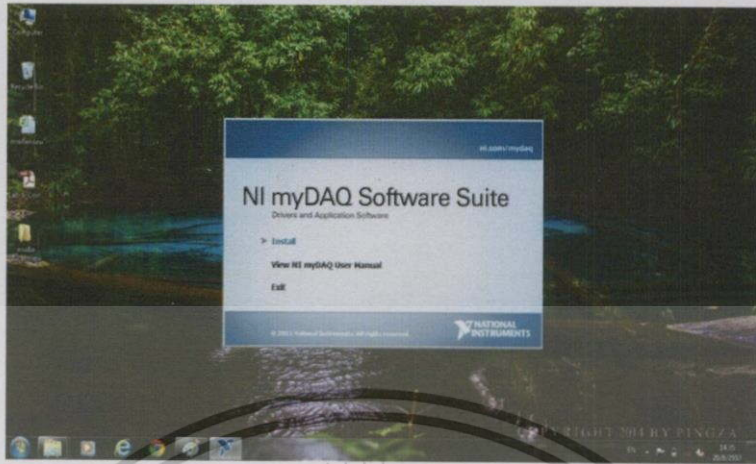


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

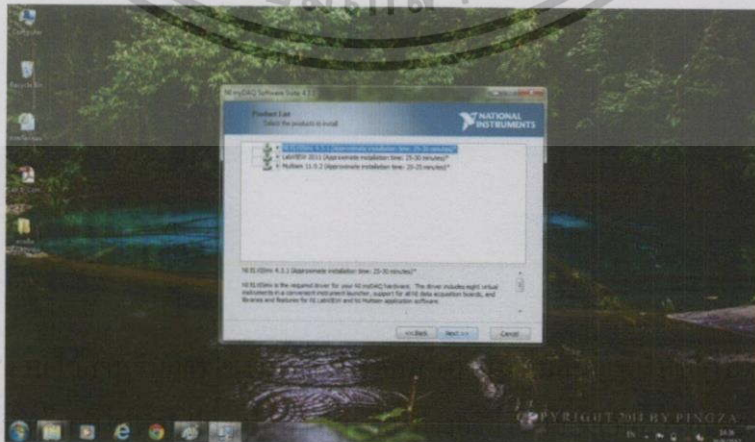
# การติดตั้งโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 1 เริ่มต้นติดตั้งโปรแกรม เลือก Install



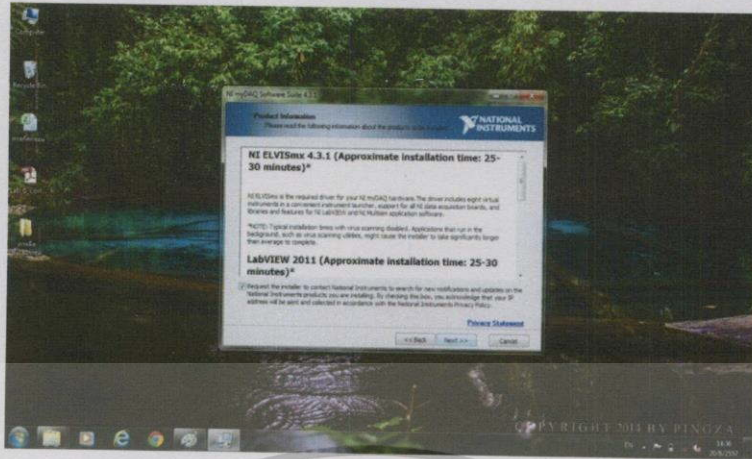
รูปที่ 2 หน้าต่างเริ่มต้นการติดตั้ง คลิกปุ่ม Next



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก

ข้อประโยชน์ด้านการค้า  
ที่มีการนำไปใช้

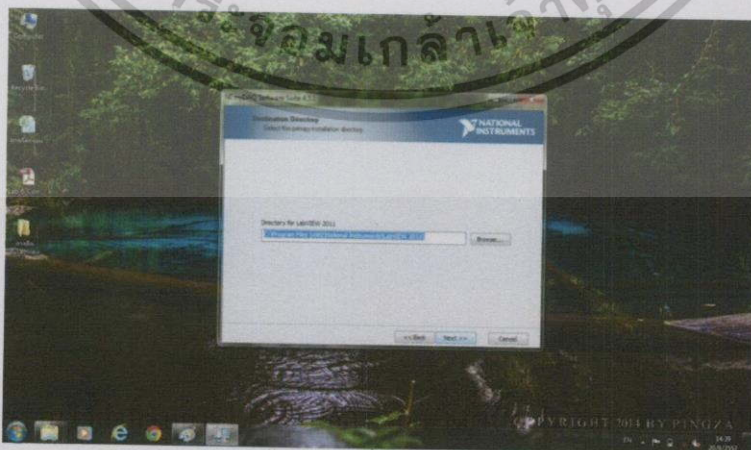
รูปที่ 3 รายการโปรแกรมที่จะทำการติดตั้ง คลิกปุ่ม Next



รูปที่ 4 ข้อมูลและรายละเอียดของแต่ละ โปรแกรมที่จะทำการติดตั้ง คลิกปุ่ม Next



รูปที่ 5 เลือกโฟลเดอร์ในการติดตั้งโปรแกรม คลิกปุ่ม Next

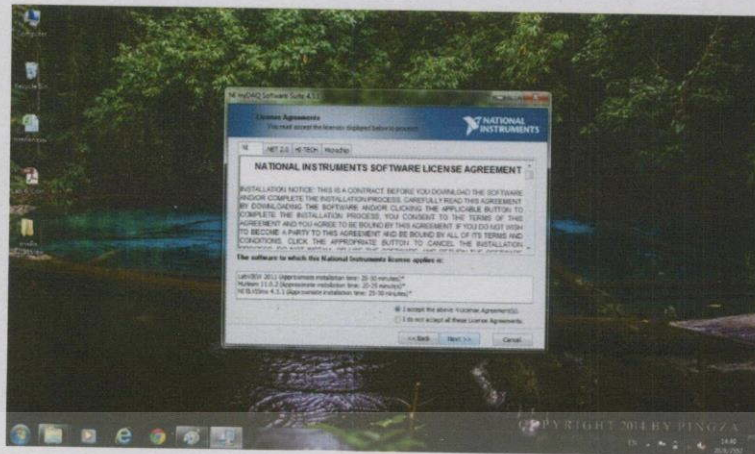


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ด้านการค้า

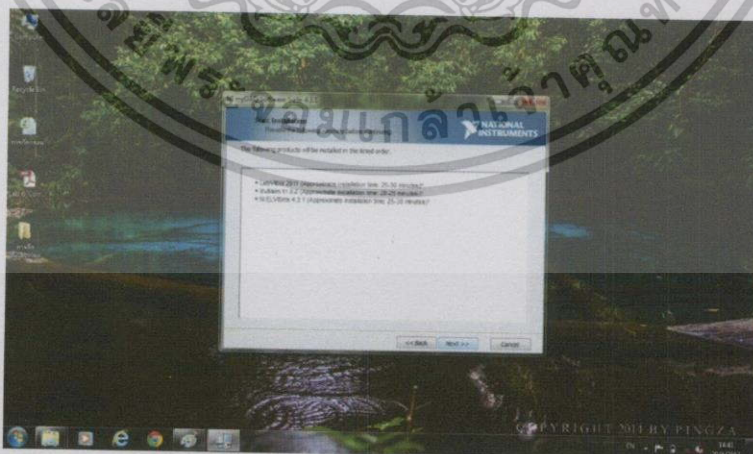
รูปที่ 6 เลือกโฟลเดอร์ในการติดตั้งโปรแกรม คลิกปุ่ม Next



รูปที่ 7 รายละเอียดลิขสิทธิ์ เลือกAccept คลิกปุ่ม Next

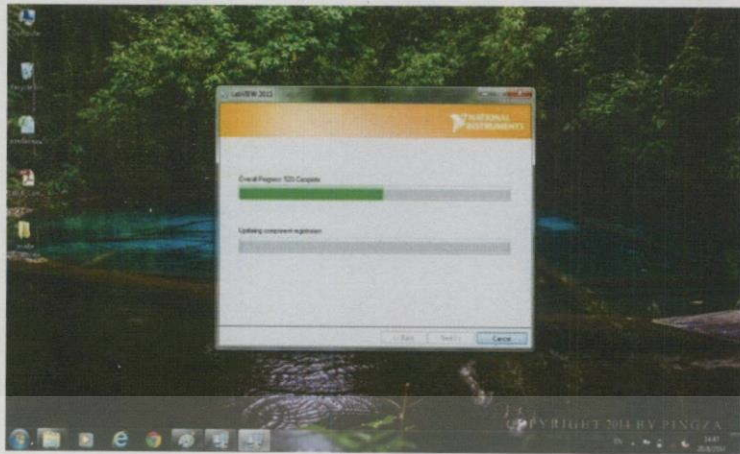


รูปที่ 8 รายละเอียดลิขสิทธิ์ เลือกAccept คลิกปุ่ม Next



รูปที่ 9 หน้าต่างเริ่มการติดตั้ง คลิกปุ่ม Next

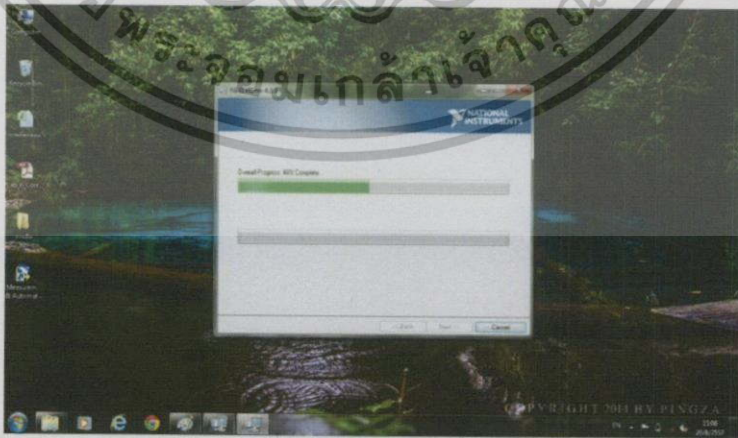
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



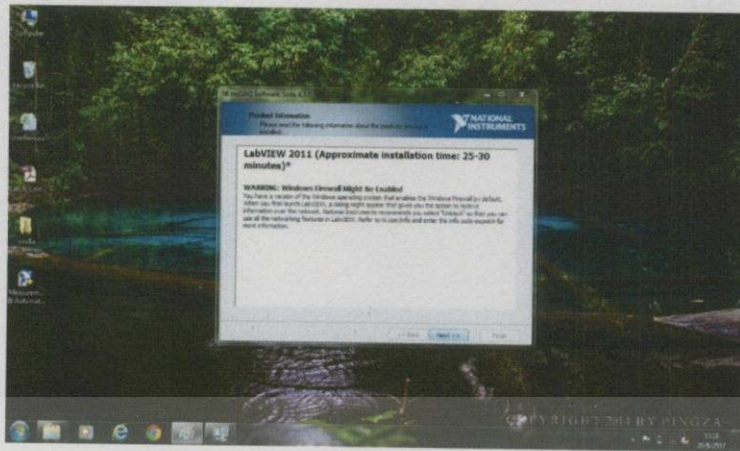
รูปที่ 10 หน้าต่างระหว่างทำการติดตั้งโปรแกรม



รูปที่ 11 หน้าต่างขณะทำการติดตั้งโปรแกรมถัดไป



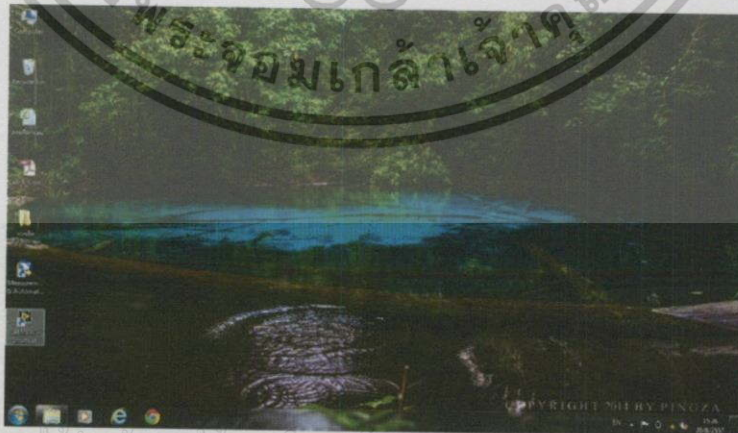
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รูปที่ 12 หน้าต่างระหว่างทำการติดตั้งโปรแกรม ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 ข้อมูลและรายละเอียดของแต่ละโปรแกรมที่จะทำการติดตั้งถัดไป คลิกปุ่ม Next



รูปที่ 14 ผลการติดตั้ง โปรแกรมทั้งหมด คลิกปุ่ม Next



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 15 การติดตั้ง โปรแกรมเสร็จสมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

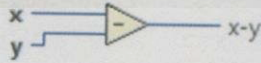
# ฟังก์ชันที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม

1. Add



Computes the sum of the inputs.

2. Subtract



Computes the difference of the inputs.

3. Multiply



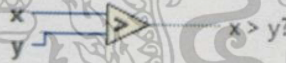
Returns the product of the inputs.

4. Divide



Computes the quotient of the inputs.

5. Greater



Returns TRUE if  $x$  is greater than  $y$ . Otherwise, this function returns FALSE. You can change the comparison mode of this function.

6. Less



Returns TRUE if  $x$  is less than  $y$ . Otherwise, this function returns FALSE. You can change the comparison mode of this function.

7. Tab Constant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

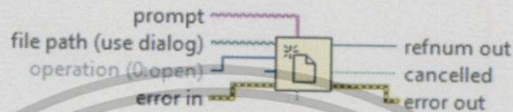
Consists of a constant string containing the ASCII HT (horizontal tab) value.

## 8. Line Feed Constant



Consists of a constant string containing the ASCII LF value.

## 9. Open/Create/Replace File



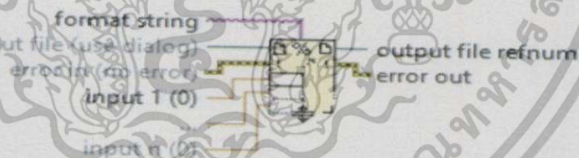
Opens an existing file, creates a new file, or replaces an existing file, programmatically or interactively using a file dialog box. This function does not work for files inside an LLB.

## 10. Close File



Closes an open file specified by **refnum** and returns the path to the file associated with the **refnum**.

## 11. Format Into File



Formats string, numeric, path, or Boolean data as text and writes the text to a file. If you wire a file **refnum** to the **file input**, writing begins at the current file position. To append to an existing file, open the file and set the file position to the end of the file by using the Set File Position function. Otherwise, the function will open the file and write to the beginning of the file. This function does not work for files inside an LLB.

## 12. Format Value

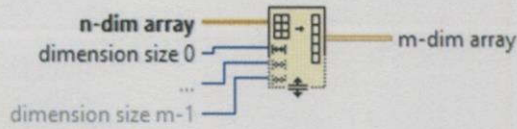


Converts a number into a regular string according to the format specified in **format string** and appends this to **string**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

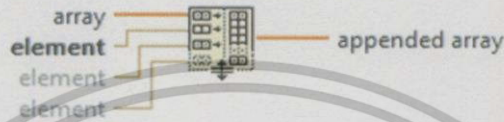
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้อ่านตามเอกสารฉบับอื่นๆในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. Reshape Array



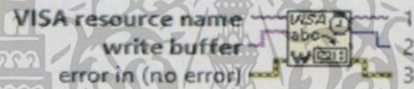
Changes the dimensions of an array according to the values of **dimension size 0..m-1**.

14. Build Array



Concatenates multiple arrays or appends elements to an n-dimensional array.

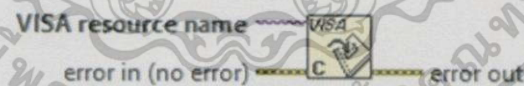
15. VISA Write



**Outputs**  
 1 [E20] VISA resource name out  
 2 [U19] return count  
 3 [E21] error out

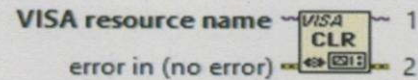
Writes the data from **write buffer** to the device or interface specified by **VISA resource name**.

16. VISA Close



Closes a device session or event object specified by **VISA resource name**.

17. VISA Clear

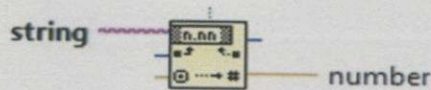


**Outputs**  
 1 [E20] VISA resource name out  
 2 [E21] error out

Clears the input and output buffers of the **device**.

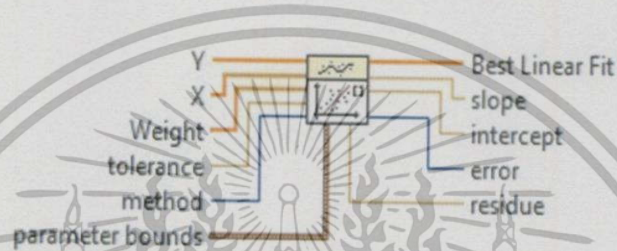
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 18. Fract/Exp String To Number



Interprets the characters 0 through 9, plus, minus, e, E, and the decimal point (usually period) in **string** starting at **offset** as a floating-point number in engineering notation, exponential, or fractional format and returns it in **number**.

### 19. Linear Fit



Returns the linear fit of a data set (X, Y) using the Least Square, Least Absolute Residual, or Bisquare method.

### 20. XY Graphs

#### XY Graphs:

Single Plot XY Graph:

x array

y array

XY Graph  
(Single Plot)

Multiplot XY Graph:

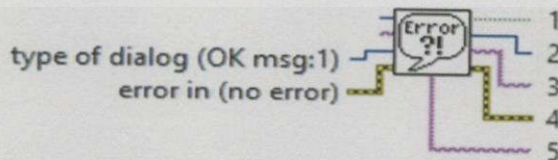
single plot 1

single plot N

XY Graph  
(N plots)

See the example: XY Graph.vi

### 21. Simple Error Handler



#### Outputs

- 1 error?
- 2 code out
- 3 source out
- 4 error out
- 5 message

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 22. Wait Until Next ms Multiple

millisecond multiple



Waits until the value of the millisecond timer becomes a multiple of the specified **millisecond multiple**. Use this function to synchronize activities. You can call this function in a loop to control the loop execution rate. However, it is possible that the first loop period might be short. Wiring a value of 0 to the **milliseconds multiple** input forces the current thread to yield control of the CPU.

## 23. Number To Boolean Array

### Number To Boolean Array

number  Boolean array

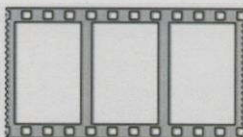
Converts an integer or fixed-point number to a Boolean array. If you wire an integer to **number**, **Boolean array** returns an array of 8, 16, 32, or 64 elements, depending on the number of bits in the integer. If you wire a fixed-point number to **number**, the size of the array that **Boolean array** returns equals the word length of the fixed-point number. The 0th element of the array corresponds to the least significant bit of the two's complement of the binary representation of the integer.

## 24. While Loop



Repeats the subdiagram inside it until the conditional terminal, an input terminal, receives a particular Boolean value. The Boolean value depends on the continuation behavior of the While Loop. Right-click the conditional terminal and select **Stop if True** or **Continue if True** from the shortcut menu. You also can wire an error cluster to the conditional terminal, right-click the terminal, and select **Stop on Error** or **Continue while Error** from the shortcut menu. The While Loop always executes at least once.

## 25. Flat Sequence Structure



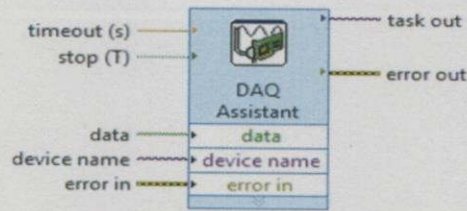
Consists of one or more subdiagrams, or frames, that execute sequentially. Use the Flat Sequence structure to ensure that a subdiagram executes before or after another subdiagram.

Data flow for the Flat Sequence structure differs from data flow for other structures. Frames in a Flat Sequence structure execute from left to right and when all data values wired to a frame are available. The data leaves each frame as the frame finishes executing. This means the input of one frame can depend on the output of another frame.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

## 26. DAQ Assistance

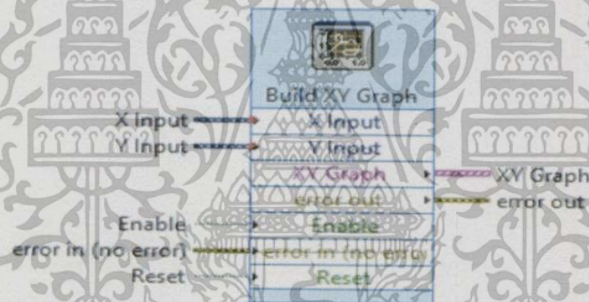


Creates, edits, and runs tasks using NI-DAQmx. Refer to the NI-DAQmx Readme for a complete listing of devices NI-DAQmx supports.

When you place this Express VI on the block diagram, the DAQ Assistant launches to create a new task. After you create a task, you can double-click the DAQ Assistant Express VI to edit that task. For continuous measurement or generation, place a while loop around the DAQ Assistant Express VI.

For continuous single-point input or output, the DAQ Assistant Express VI might not provide optimal performance. Refer to the Cont Acq&Graph Voltage-Single Point Optimization VI in examples\DAQmx\Analog In\Measure Voltage.lib for an example of techniques to create higher-performance, single-point I/O applications.

## 27. Build XY Graph

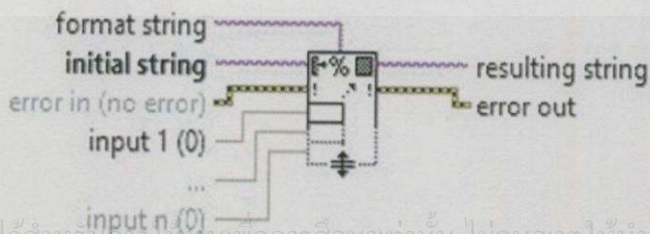


formats the data displayed on an X-Y Graph.

This Express VI is configured as follows:

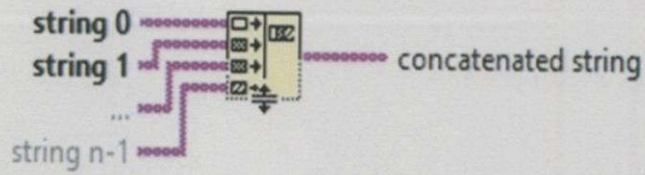
Clear data on each call: On

## 28. Format Into String



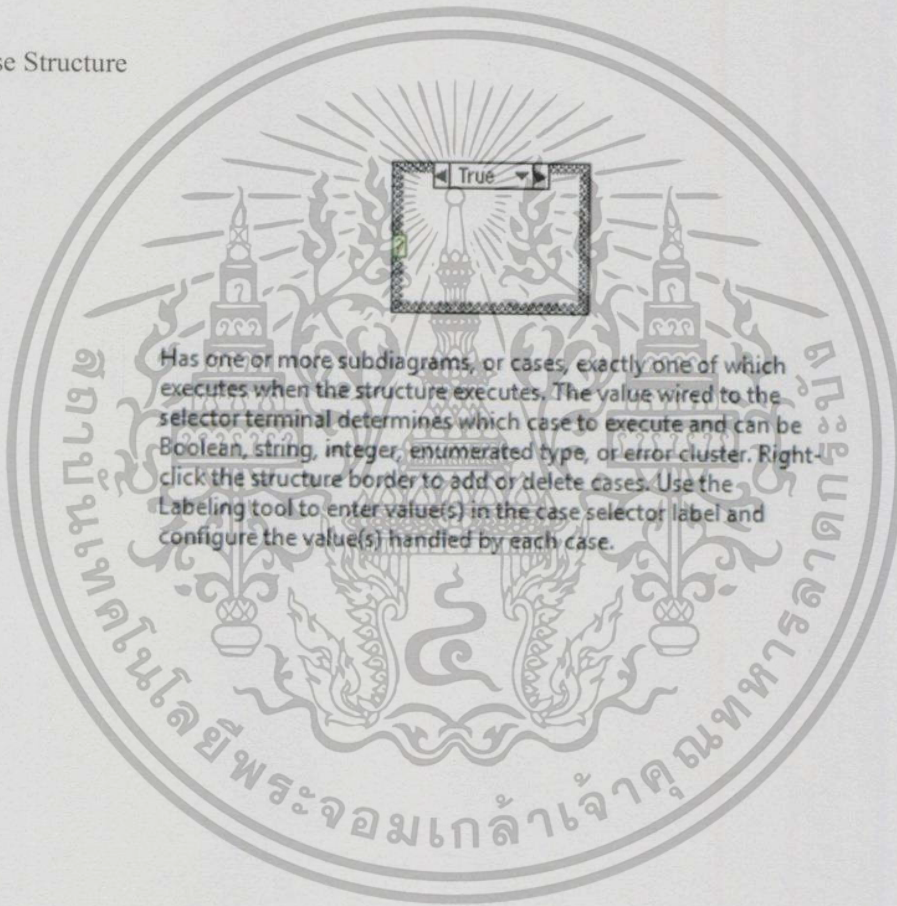
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
Formats string, path, enumerated type, time stamp, Boolean, or numeric data as text.

### 29. Concatenate Strings



Concatenates input strings and 1D arrays of strings into a single output string. For array inputs, this function concatenates each element of the array.

### 30. Case Structure



Has one or more subdiagrams, or cases, exactly one of which executes when the structure executes. The value wired to the selector terminal determines which case to execute and can be Boolean, string, integer, enumerated type, or error cluster. Right-click the structure border to add or delete cases. Use the Labeling tool to enter value(s) in the case selector label and configure the value(s) handled by each case.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

**Keithley Model 2100 6 1/2-Digit Resolution Digital  
Multimeter User's Manual**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**To install the software:**

**NOTE** You must have one of the following items installed on the remote interface in order to obtain the proper VISA layer:

- Keithley I/O Layer 5.0 or greater
- NI-VISA 3.1 or greater
- Agilent I/O Library Suite 14.2 or greater  
(the Keithley I/O Layer 5.0 is included on the CD-ROM that came with your Model 2100)

1. On the CD-ROM that came with your Model 2100, double-click the **2100.exe** file to start the software installation.
2. Accept all defaults. Select **Next**.
3. Select **Install**.
4. Connect the USB cable between the Model 2100 and the USB port on the remote computer.
5. The "Found New Hardware Wizard" will launch, and you will see a dialogue box asking, "Can Windows connect to Windows Update to search for software?" Select **No**, then **Next**.
6. "USB Test and Measurement device" will appear on the computer screen; select **Next**, then **Finish**.
7. Icons for KI-TOOL, 2100 Excel Add-in, and 2100 Word Add-in will display on the desktop. Double-click any of these to control or configure the Model 2100.

**Remote interface commands**

You can program the multimeter to take measurements using SCPI commands (after appropriately setting up the USB remote interface).

The following conventions are used in SCPI command syntax:

- **Triangle brackets (<>)** indicate that you must specify a value for the enclosed parameter.
- **The square brackets ([ ])** indicate that the parameter is optional and can be omitted.
- **Braces ({} )** enclose the parameter choices for a given command string.
- **A vertical bar (|)** separates several choices for a parameter.

**Common commands****MEASure?****Definition**

Although it does not offer much flexibility, using the **MEASure?** command is the simplest way to program the multimeter for measurements. You can select the measurement function, range, and resolution; then the multimeter automatically sets the other parameters for you, makes the measurement, and sends the results to the output buffer.

**Commands: MEASure:**

```
VOLTage:DC? {<range>|MIN|MAX|DEF}, {<resolution>|MIN|MAX|DEF}
VOLTage:DC:RATio? {<range>|MIN|MAX|DEF }, {<resolution>|MIN|MAX|DEF}
VOLTage:AC? {<range>|MIN|MAX|DEF}, {<resolution>|MIN|MAX|DEF}
CURRent:DC? {<range>|MIN|MAX|DEF}, {<resolution>|MIN|MAX|DEF}
CURRent:AC? {<range>|MIN|MAX|DEF}, {<resolution>|MIN|MAX|DEF}
RESISTance? {<range>|MIN|MAX|DEF}, {<resolution>|MIN|MAX|DEF}
```

```

FRESistance? {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
FREQuency? {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
PERiod? {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
CONTinuity?
DIODE?
TEMPerature?

```

## CONFigure:

### Definition

The **CONFigure** command offers a little more flexibility than the **MEASure?** command. The multimeter sets the parameters for the requested function, range and resolution, but does not make the measurements. You have an option to change the configuration. To initiate the measurement, use the **INITiate** or **READ?** command.

### Commands: CONFigure:

```

VOLTage:DC {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
VOLTage:DC:RATio {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
VOLTage:AC {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
CURRent:DC {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
CURRent:AC {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
RESistance {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
FRESistance {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
FREQuency {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
PERiod {<range>|MIN|MAX|DEF},{<resolution>|MIN|MAX|DEF}
CONTinuity
DIODE
TEMPerature

```

## CONFigure?

### Definition

Query the selected function.

## READ?

The **READ?** command changes the state of the trigger system from "idle" to "wait-for-trigger." When the specified trigger condition requirements are met after the multimeter receives the **READ?** command, the measurement will be initiated. The results are sent to the output buffer right away. You must enter the reading data into your bus controller or the multimeter will stop making measurements when the output buffer fills. Readings are not stored in the multimeter's internal memory when using the **READ?** command.

Using the **READ?** command has a similar effect as using the **INITiate** command followed immediately by the **FETCh?** command, except readings are not buffered internally.

## INITiate and FETCh?

### Definition

These two commands provide the lowest level of control of measurement triggering and reading retrieval, but offer the most flexibility. After you have configured the multimeter, use **INITiate** to change the state of the triggering system from the "idle" to "wait-for-trigger." The multimeter will start the measurements when the specified trigger condition requirements are met (after it receives the **INITiate** command). The results are sent to the internal memory and stored until you are ready to read them.

The **FEtCh?** command sends the data in the multimeter's internal memory to the output buffer, where you can read them into your bus controller.

## SENSE

### Definition

The **SENSE** subsystem is used to configure and control the measurement functions.

**NOTE** Default parameters are shown in **bold italic**.

### Commands: [SENSe:]

```

FUNCTION "VOLTage:DC"
FUNCTION "VOLTage:DC:RATio"
FUNCTION "VOLTage:AC"
FUNCTION "CURRent:DC"
FUNCTION "CURRent:AC"
FUNCTION "RESistance" (2-wire  $\Omega$ )
FUNCTION "FRESistance" (4-wire  $\Omega$ )
FUNCTION "FREQuency"
FUNCTION "PERiod"
FUNCTION "CONTinuity"
FUNCTION "DIODE"
FUNCTION "TEMPerature"
FUNCTION?

```

### [SENSe:]

```

VOLTage:DC:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
VOLTage:DC:RANGe? [MINimum|MAXimum]
VOLTage:AC:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
VOLTage:AC:RANGe? [MINimum|MAXimum]
CURRent:DC:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
CURRent:DC:RANGe? [MINimum|MAXimum]
CURRent:AC:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
CURRent:AC:RANGe? [MINimum|MAXimum]
RESistance:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
RESistance:RANGe? [MINimum|MAXimum]
FRESistance:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
FRESistance:RANGe? [MINimum|MAXimum]
FREQuency:VOLTage:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
FREQuency:VOLTage:RANGe? [MINimum|MAXimum]
PERiod:VOLTage:RANGe {<range>|MINimum|MAXimum}
PERiod:VOLTage:RANGe? [MINimum|MAXimum]

```

### [SENSe:]

```

VOLTage:DC:RANGe:AUTO {OFF|ON}
VOLTage:DC:RANGe:AUTO?
VOLTage:AC:RANGe:AUTO {OFF|ON}
VOLTage:AC:RANGe:AUTO?
CURRent:DC:RANGe:AUTO {OFF|ON}
CURRent:DC:RANGe:AUTO?
CURRent:AC:RANGe:AUTO {OFF|ON}
CURRent:AC:RANGe:AUTO?
RESistance:RANGe:AUTO {OFF|ON}
RESistance:RANGe:AUTO?
FRESistance:RANGe:AUTO {OFF|ON}
FRESistance:RANGe:AUTO?
FREQuency:VOLTage:RANGe:AUTO {OFF|ON}

```

```

FREquency:VOLTage:RANGe:AUTO?
PERiod:VOLTage:RANGe:AUTO {OFF|ON}
PERiod:VOLTage:RANGe:AUTO?

```

**[SENSe:]**

```

VOLTage:DC:RESolution {<resolution>|MINimum|MAXimum}
VOLTage:DC:RESolution? [MINimum|MAXimum]
VOLTage:AC:RESolution {<resolution>|MINimum|MAXimum}
VOLTage:AC:RESolution? [MINimum|MAXimum]
CURRent:DC:RESolution {<resolution>|MINimum|MAXimum}
CURRent:DC:RESolution? [MINimum|MAXimum]
CURRent:AC:RESolution {<resolution>|MINimum|MAXimum}
CURRent:AC:RESolution? [MINimum|MAXimum]
RESistance:RESolution {<resolution>|MINimum|MAXimum}
RESistance:RESolution? [MINimum|MAXimum]
FRESistance:RESolution {<resolution>|MINimum|MAXimum}
FRESistance:RESolution? [MINimum|MAXimum]

```

**[SENSe:]**

```

TEMPerature:RTD:TYPE {PT100|D100|F100|PT385|PT3916|USER|SPRTD}
TEMPerature:RTD:TYPE?
TEMPerature:RTD:RZerO {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:RTD:RZerO? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:RTD:ALPhA {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:RTD:ALPhA? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:RTD:BETA {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:RTD:BETA? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:RTD:DELTA {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:RTD:DELTA? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:RZerO {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:RZerO? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:A4 {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:A4? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:B4 {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:B4? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:AX {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:AX? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:BX {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:BX? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:CX {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:CX? [MINimum|MAXimum]
TEMPerature:SPRTD:DX {<value>|MINimum|MAXimum}
TEMPerature:SPRTD:DX? [MINimum|MAXimum]

```

**[SENSe:]**

```

UNIT {Cel|Far|K}
UNIT?

```

**[SENSe:]**

```

VOLTage:DC:NPLCycles {0.02|0.1|1|10|MINimum|MAXimum}
VOLTage:DC:NPLCycles? [MINimum|MAXimum]
CURRent:DC:NPLCycles {0.02|0.1|1|10|MINimum|MAXimum}
CURRent:DC:NPLCycles? [MINimum|MAXimum]
RESistance:NPLCycles {0.02|0.1|1|10|MINimum|MAXimum}
RESistance:NPLCycles? [MINimum|MAXimum]
FRESistance:NPLCycles {0.02|0.1|1|10|MINimum|MAXimum}
FRESistance:NPLCycles? [MINimum|MAXimum]

```

**[SENSe:]**

```

FREQuency:APERTure {0.01|0.1|1|MINimum|MAXimum}
FREQuency:APERTure? [MINimum|MAXimum]
PERiod:APERTure {0.01|0.1|1|MINimum|MAXimum}
PERiod:APERTure? [MINimum|MAXimum]

```

**[SENSe:]**

```

DETEctor:BANDwidth {3|20|200|MINimum|MAXimum}
DETEctor:BANDwidth? [MINimum|MAXimum]
[SENSe:]
AVERAge:TCONtrol {MOVing|REPeat}
AVERAge:TCONtrol?
AVERAge:COUNT {<value>|MINimum|MAXimum}
AVERAge:COUNT? [MINimum|MAXimum]
AVERAge:STATe {OFF|ON}
AVERAge:STATe?

```

**[SENSe:]**

```

ZERO:AUTO {OFF|ONCE|ON}
ZERO:AUTO?
GAIN:AUTO {OFF|ONCE|ON}
GAIN:AUTO?

```

**Other measurement configuration commands****[INPut:]**

```

IMPedance:AUTO {OFF|ON}
IMPedance:AUTO?
ROUTE:TERMinals?

```

**Math operation commands**

There are eight math operations. Only one of them can be enabled at a time. They either store data for later use or perform mathematical operations on the readings. Note that these eight math operations are available to all measurement functions except continuity and diode testing.

The math operations use one or more internal registers. You can preset the values in some of the registers by entering constants in some of the commands (e.g., **CALCulate:NULL:OFFSet 0.1**), while others hold the results of the math operations (some commands are the result of a calculation, e.g., **CALCulate:AVERAge:MINimum?**).

**[CALCulate:]**

```

FUNCTION {PERCent|AVERAge|NULL|LIMIT|MXB|DB|DBM}
FUNCTION?
STATe {OFF|ON}
STATe?

```

**[CALCulate:]**

```

PERCent:TARGet {<value>|MINimum|MAXimum}
PERCent:TARGet? [MINimum|MAXimum]

```

**[CALCulate:]**

```

AVERAge:MINimum?
AVERAge:MAXimum?

```

## Source-measure programming example

Table 3-6 summarizes the command sequence for a basic source-measure procedure. Note that the steps correspond to those listed previously in “Front panel source-measure procedure.” These commands set up the SourceMeter as follows:

- Source function and range: volts, 20V
- Source mode: fixed
- Source output level: 10V
- Current compliance: 10mA
- Measure function and range: current, 10mA

Table 3-6

### Basic source-measure programming example

Step <sup>1</sup>	Action	Commands <sup>2,3</sup>	Comments
1	Select source function, mode	*RST :SOUR:FUNC VOLT	Restore GPIB defaults. Select voltage source.
2	Set source range, level, compliance	:SOUR:VOLT:MODE FIXED :SOUR:VOLT:RANG 20 :SOUR:VOLT:LEV 10	Fixed voltage source mode. Select 20V source range. Source output = 10V.
3	Set measure function, range	:SENS:CURR:PROT 10E-3 :SENS:FUNC "CURR" :SENS:CURR:RANG 10E-3	10mA compliance. Current measure function. 10mA measure range.
4	Turn on output	:FORM:ELEM CURR :OUTP ON	Current reading only. Output on before measuring.
5	Read data	:READ?	Trigger, acquire reading.
6	Turn off output	:OUTP OFF	

1. Steps correspond to front panel steps listed previously in “Front panel source-measure procedure.”

2. Commands must be sent in order given.

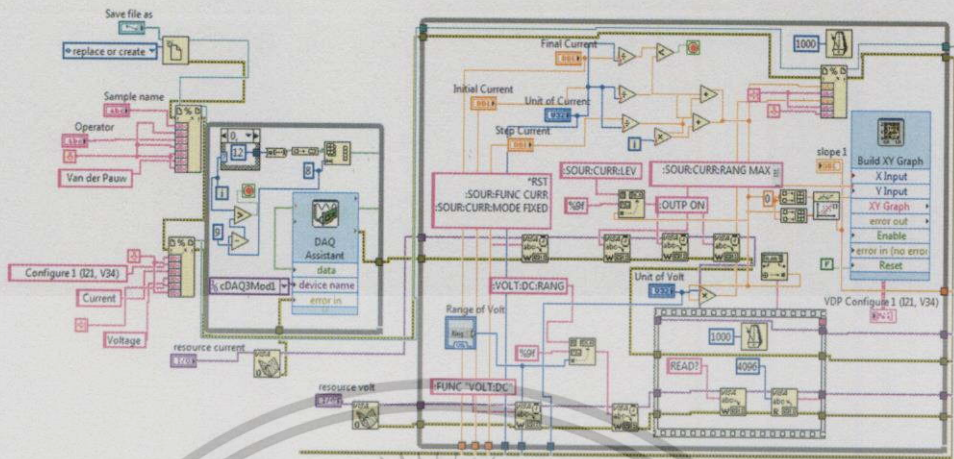
3. Instrument must be addressed to talk after :READ? to acquire data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

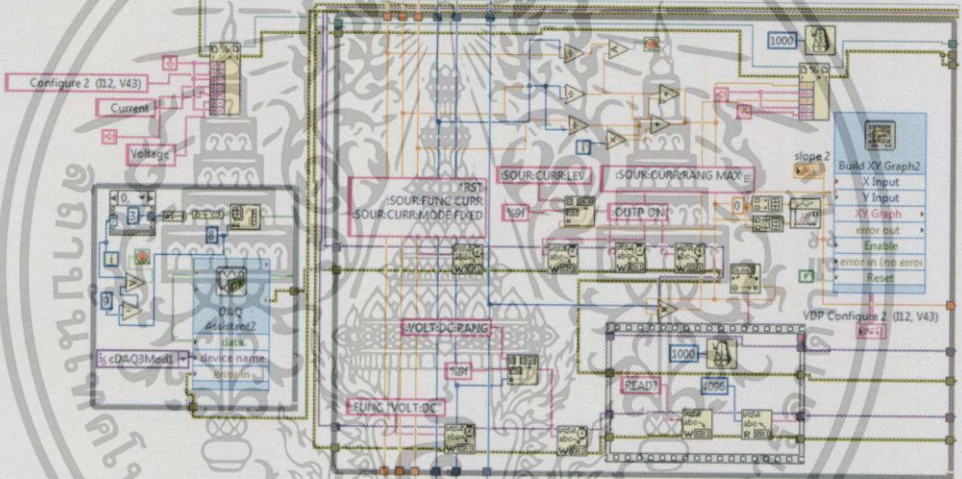


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

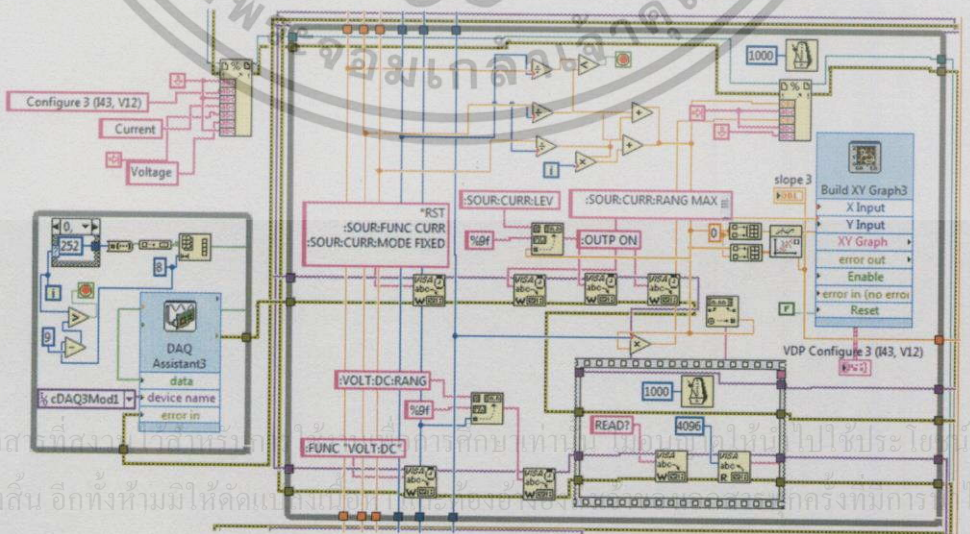
# แสดงโปรแกรมในส่วนของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 1 การวัด Configuration ที่ 1 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

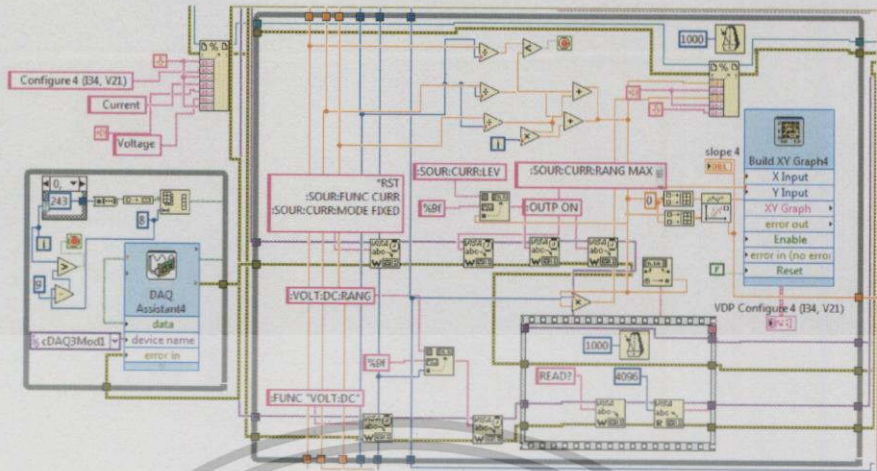


รูปที่ 2 การวัด Configuration ที่ 2 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

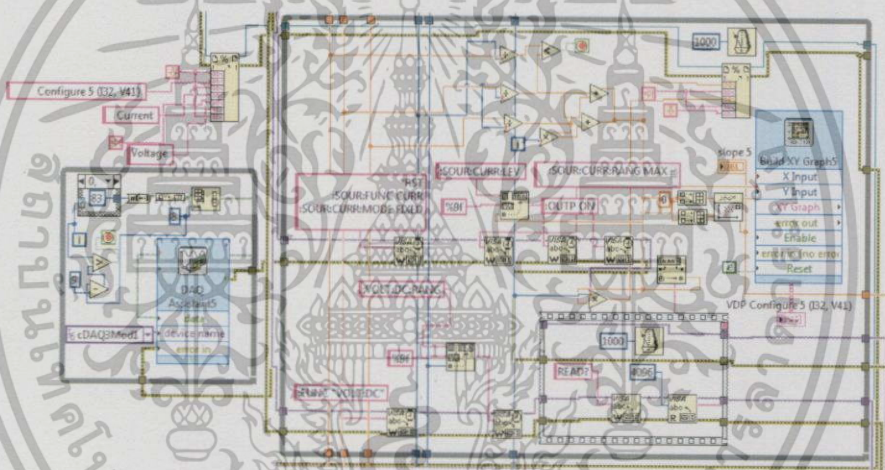


รูปที่ 3 การวัด Configuration ที่ 3 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

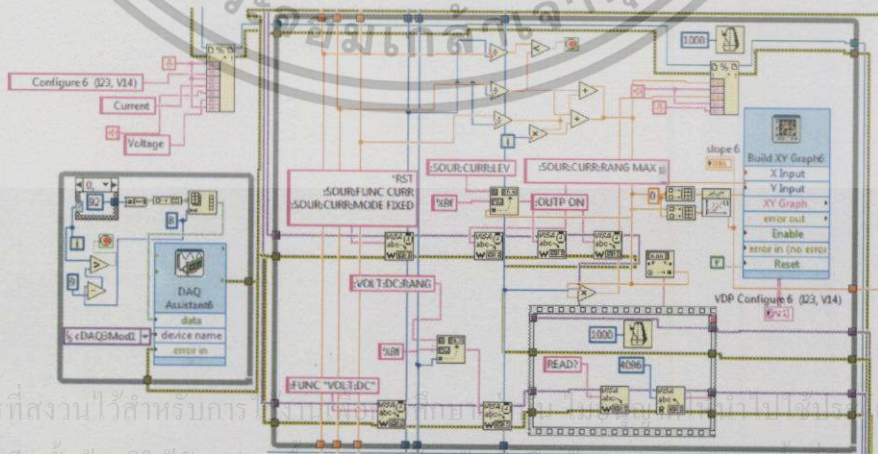
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือว่าผิดกฎหมาย



รูปที่ 4 การวัด Configure ที่ 4 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

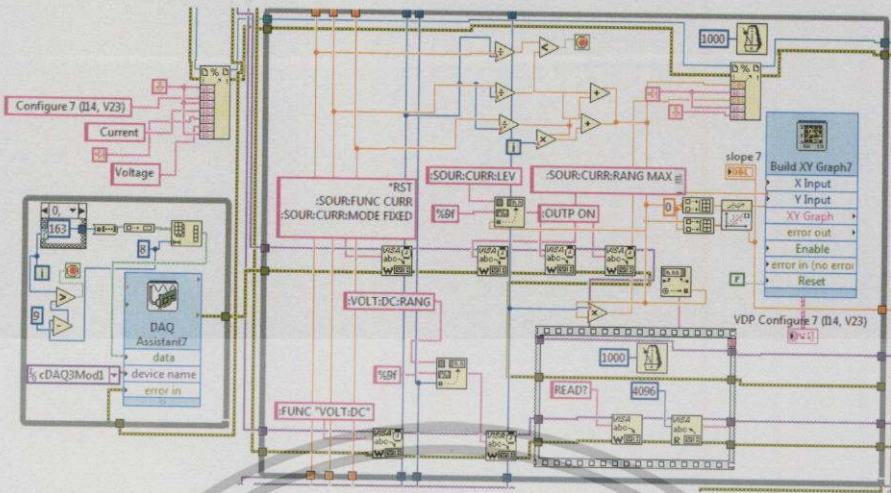


รูปที่ 5 การวัด Configure ที่ 5 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

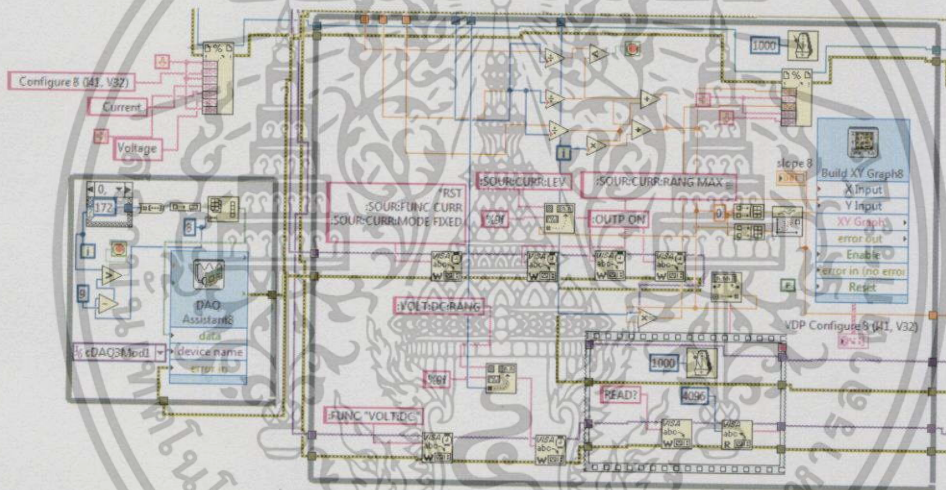


รูปที่ 6 การวัด Configure ที่ 6 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

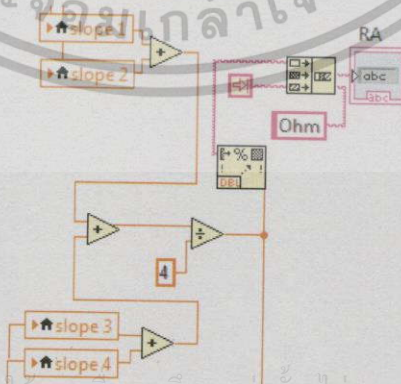
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากหน่วยงานต้นสังกัด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้



รูปที่ 7 การวัด Configure ที่ 7 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

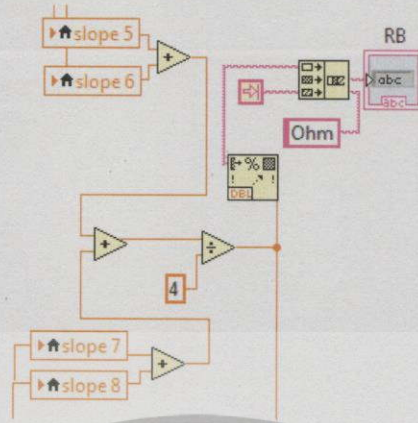


รูปที่ 8 การวัด Configure ที่ 8 ด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

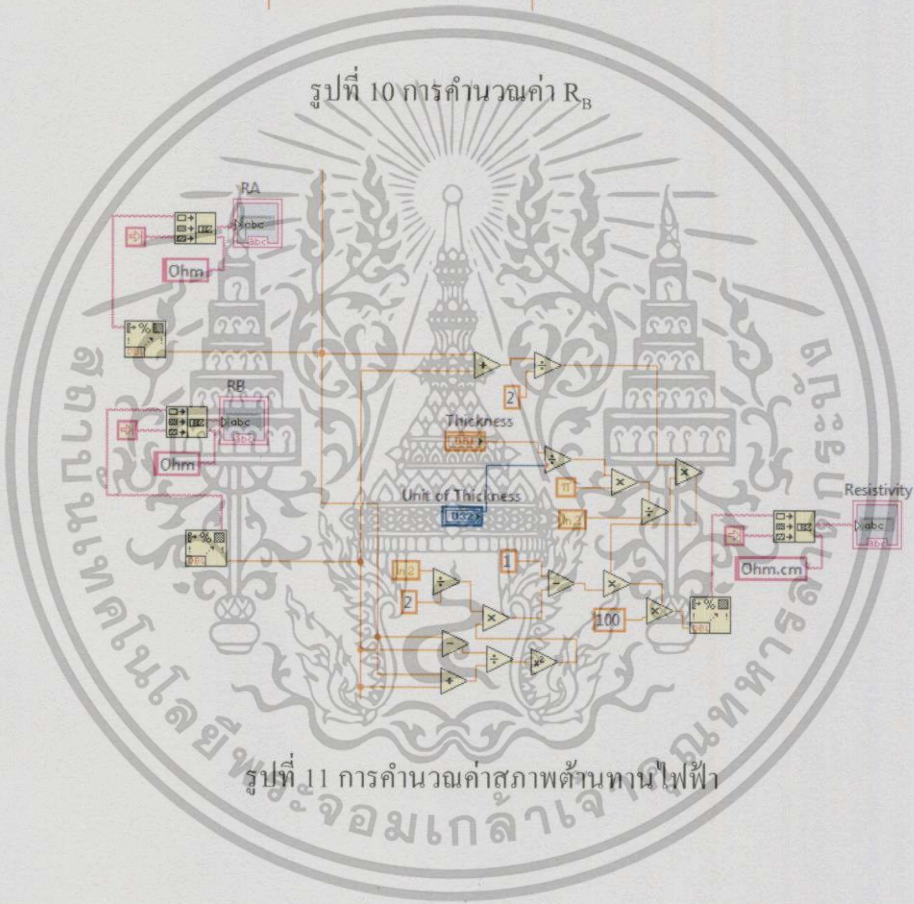


รูปที่ 9 การคำนวณค่า  $R_A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตัวอย่างจริงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



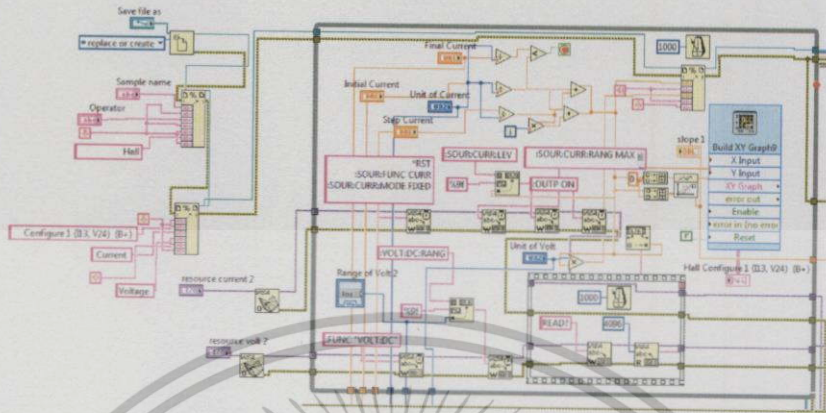
รูปที่ 10 การคำนวณค่า  $R_B$



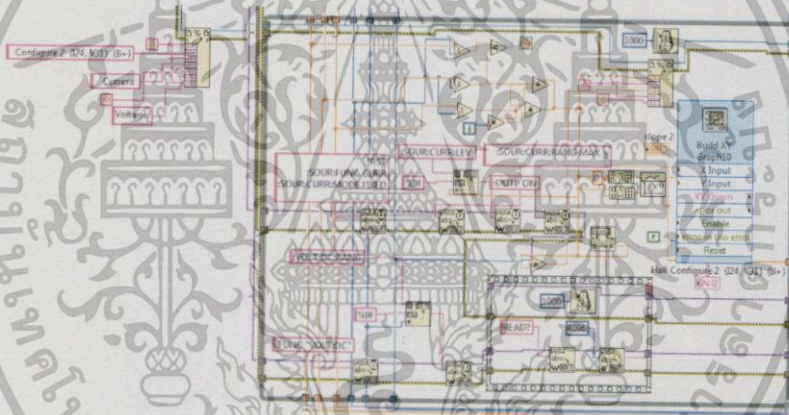
รูปที่ 11 การคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

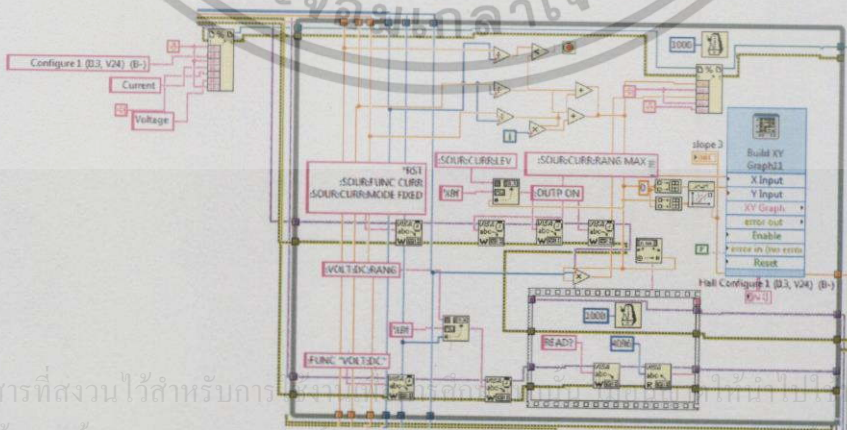
## แสดงโปรแกรมในส่วนของ Hall measurement



รูปที่ 12 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ Configure 1 โดยให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก



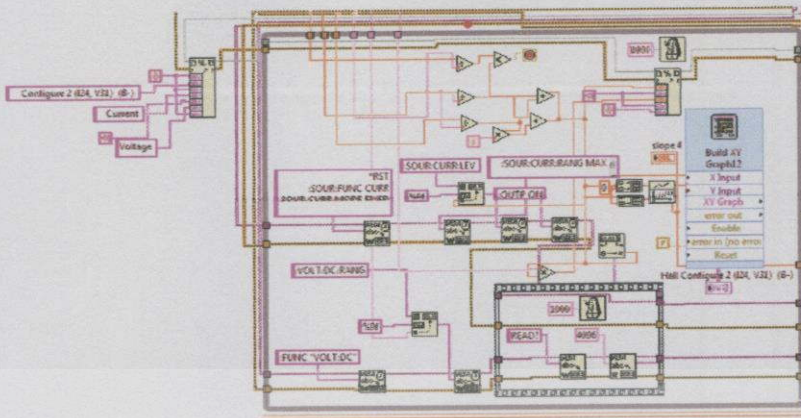
รูปที่ 13 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ Configure 2 โดยให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก



รูปที่ 14 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ Configure 1 โดยให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะผู้บริหาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ Configure 2 โดยให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ  
วิธีการเตรียมสารมาตรฐานที่นำมาใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วิธีการเตรียมสารมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 1 สารมาตรฐานที่นำมาใช้ในการทดสอบ GaSb:Si และ GaSb:Te



รูปที่ 2 สารมาตรฐาน



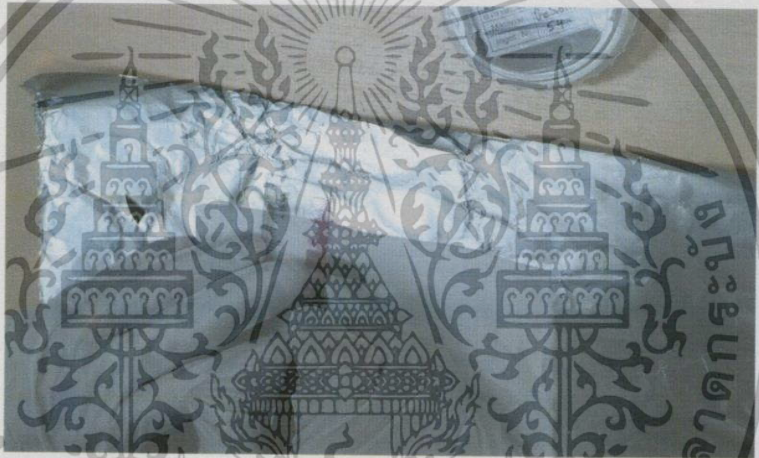
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีก

ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่มีการนำไปใช้

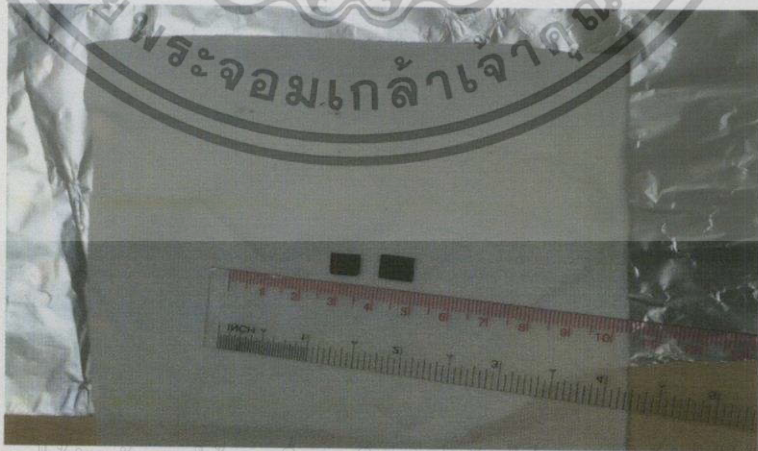
รูปที่ 3 อุปกรณ์ในการทำความสะอาดและตัดสารมาตรฐาน



รูปที่ 4 ขณะทำการตัดสารมาตรฐาน โดยใช้ปากกาหัวเพชร



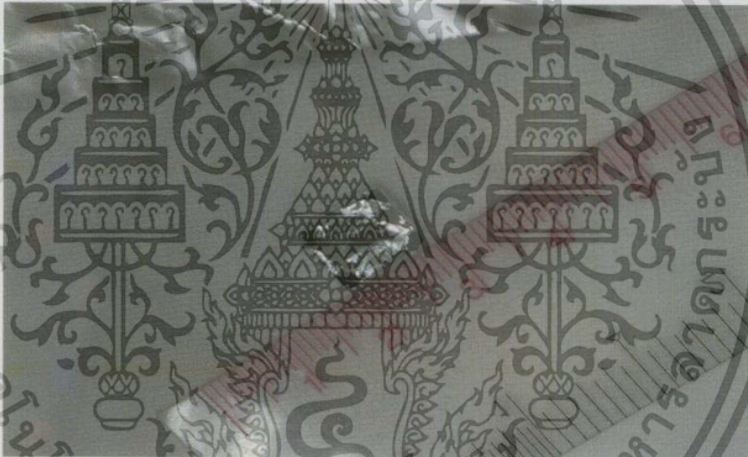
รูปที่ 5 ขณะทำการตัดสารมาตรฐาน โดยใช้ปากกาหัวเพชร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 6 ขนาดสารมาตรฐานที่ทำการตัดเรียบร้อยแล้ว ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 สารมาตรฐานขณะทำการห่อสารด้วยอลูมิเนียมและเปิดมุมทั้งสองเพื่อเตรียมการทำจุดสัมผัส



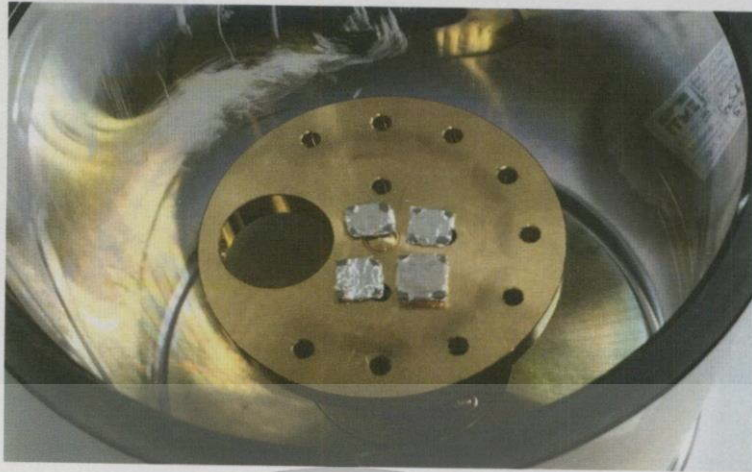
รูปที่ 8 เตรียมสารมาตรฐานเพื่อนำไปสเปกโตรริงจุดสัมผัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง

ประโยชน์ด้านการค้า  
หากมีการนำไปใช้

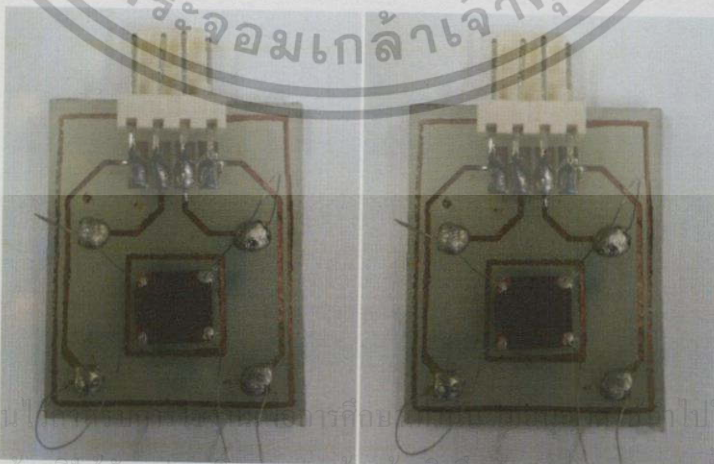
รูปที่ 9 เครื่องสเปกโตรริง



รูปที่ 10 นำสารมาตรฐานวางในห้องสุญญากาศเพื่อเตรียมทำการสปีดเตอริงจุดสัมผัส



รูปที่ 11 สารมาตรฐานหลังการสปีดเตอริงจุดสัมผัส



รูปที่ 12 สารมาตรฐานที่ทำจุดสัมผัสเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเขาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การสอบเทียบสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อกำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นบวก

I (A)	B (T)			$\bar{B}$ (T)	S.D.	Uncertainty
	1	2	3			
1	0.071	0.075	0.071	0.072	0.002	0.001
2	0.138	0.139	0.139	0.139	0.001	0.000
3	0.205	0.211	0.205	0.207	0.003	0.002
4	0.275	0.277	0.275	0.276	0.001	0.001
5	0.338	0.337	0.334	0.336	0.002	0.001
6	0.401	0.405	0.396	0.401	0.005	0.003
7	0.462	0.464	0.470	0.465	0.004	0.002
8	0.523	0.525	0.531	0.526	0.004	0.002

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อกำหนดให้สนามแม่เหล็กเป็นลบ

I (A)	B (T)			$\bar{B}$ (T)	S.D.	Uncertainty
	1	2	3			
1	0.070	0.079	0.072	0.074	0.005	0.003
2	0.140	0.147	0.140	0.142	0.004	0.002
3	0.207	0.214	0.197	0.206	0.009	0.005
4	0.273	0.277	0.274	0.275	0.002	0.001
5	0.337	0.340	0.340	0.339	0.002	0.001
6	0.403	0.406	0.405	0.405	0.002	0.001
7	0.460	0.463	0.466	0.463	0.003	0.002
8	0.526	0.528	0.531	0.528	0.003	0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การสอบเทียบระบบวัด Van der Pauw

ตารางที่ 4.3 ผลการวัด  $R_A$  แบบไม่อัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw

I ( $\mu\text{A}$ )	(1/4)I ( $\mu\text{A}$ )	V (V)	Calculate R ( $\text{M}\Omega$ )
1	0.25	0.23	0.92
2	0.50	0.47	0.94
3	0.75	0.70	0.93
4	1.00	0.92	0.92
5	1.25	1.09	0.87
6	1.50	1.39	0.93
7	1.75	1.63	0.93
8	2.00	1.86	0.93
9	2.25	2.09	0.93
10	2.50	2.32	0.93
11	2.75	2.55	0.93
12	3.00	2.78	0.93
13	3.25	3.01	0.93
14	3.50	3.25	0.93
15	3.75	3.48	0.93
16	4.00	3.71	0.93
17	4.25	3.94	0.93
18	4.50	4.17	0.93
19	4.75	4.40	0.93
20	5.00	4.64	0.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการวัด  $R_B$  แบบไม่อัตโนมัติด้วยวิธีของ Van der Pauw

I ( $\mu$ A)	(1/4) I ( $\mu$ A)	V (V)	Calculate R ( $M\Omega$ )
1	0.25	0.24	0.96
2	0.50	0.49	0.98
3	0.75	0.73	0.97
4	1.00	0.96	0.96
5	1.25	1.14	0.91
6	1.50	1.46	0.97
7	1.75	1.70	0.97
8	2.00	1.94	0.97
9	2.25	2.18	0.97
10	2.50	2.42	0.97
11	2.75	2.67	0.97
12	3.00	2.91	0.97
13	3.25	3.15	0.97
14	3.50	3.40	0.97
15	3.75	3.64	0.97
16	4.00	3.88	0.97
17	4.25	4.13	0.97
18	4.50	4.37	0.97
19	4.75	4.61	0.97
20	5.00	4.87	0.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 สอบเทียบระบบการวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐาน GaSb:Te และ GaSb:Si

ตารางที่ 4.5 ผลการวัด  $R_A$  ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.01	0.156	0.230	0.190	0.171
0.02	0.306	0.334	0.312	0.321
0.03	0.453	0.483	0.449	0.493
0.04	0.598	0.639	0.599	0.654
0.05	0.743	0.794	0.747	0.815
0.06	0.889	0.955	0.896	0.979
0.07	1.034	1.119	1.044	1.138
0.08	1.178	1.286	1.193	1.302
0.09	1.326	1.457	1.344	1.468
0.10	1.469	1.630	1.510	1.632

ตารางที่ 4.6 ผลการวัด  $R_B$  ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.01	0.424	0.478	0.777	0.513
0.02	0.988	1.023	1.033	0.998
0.03	1.480	1.525	1.496	1.488
0.04	1.965	2.024	1.968	1.978
0.05	2.454	2.526	2.440	2.474
0.06	2.944	3.028	2.921	2.966
0.07	3.445	3.520	3.397	3.460

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

I (mA)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.08	3.933	4.025	3.883	3.963
0.09	4.445	4.538	4.375	4.463
0.10	4.962	5.030	4.867	4.972

ตารางที่ 4.7 ผลการวัด Hall ของ GaSb:Te ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	$V_H$ (V) B+		$V_H$ (V) B-	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.01	0.439	-0.242	0.261	-0.444
0.02	0.861	-0.477	0.502	-0.867
0.03	1.287	-0.727	0.740	-1.297
0.04	1.708	-0.97	0.979	-1.732
0.05	2.130	-1.206	1.216	-2.154
0.06	2.557	-1.457	1.457	-2.587
0.07	2.978	-1.719	1.696	-3.028
0.08	3.411	-1.991	1.928	-3.480
0.09	3.849	-2.229	2.180	-3.914
0.10	4.288	-2.486	2.421	-4.355

ตารางที่ 4.8 ผลการวัด  $R_A$  ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	V (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.01	0.157	0.206	0.172	0.146

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

I (mA)	V (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.02	0.307	0.326	0.322	0.311
0.03	0.454	0.478	0.468	0.478
0.04	0.602	0.634	0.604	0.655
0.05	0.752	0.792	0.757	0.817
0.06	0.897	0.950	0.906	0.973
0.07	1.046	1.117	1.06	1.131
0.08	1.194	1.276	1.213	1.293
0.09	1.338	1.443	1.379	1.448
0.10	1.492	1.606	1.538	1.607

ตารางที่ 4.9 ผลการวัด  $R_B$  ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.01	0.432	0.483	0.622	0.529
0.02	1.007	0.998	1.015	1.002
0.03	1.495	1.517	1.486	1.493
0.04	1.987	2.02	1.956	1.986
0.05	2.475	2.516	2.430	2.481
0.06	2.966	3.021	2.910	2.978
0.07	3.465	3.519	3.387	3.476
0.08	3.961	4.011	3.874	3.977
0.09	4.455	4.511	4.358	4.479
0.10	4.971	5.017	4.854	4.986

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้หรือเผยแพร่โดยไม่ผ่านการพิจารณาจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4.10 ผลการวัด Hall ของ GaSb:Te ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	$V_H$ (mV) B+		$V_H$ (mV) B-	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.01	0.444	-0.239	0.256	-0.434
0.02	0.870	-0.482	0.502	-0.858
0.03	1.290	-0.719	0.745	-1.285
0.04	1.724	-0.962	0.982	-1.716
0.05	2.139	-1.204	1.223	-2.146
0.06	2.551	-1.454	1.466	-2.589
0.07	2.975	-1.699	1.704	-3.02
0.08	3.399	-1.956	1.945	-3.463
0.09	3.828	-2.215	2.188	-3.897
0.10	4.256	-2.466	2.436	-4.339

ตารางที่ 4.11 ผลการวัด  $R_x$  ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	$V$ (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.01	0.160	0.200	0.125	0.174
0.02	0.307	0.327	0.290	0.324
0.03	0.453	0.478	0.431	0.489
0.04	0.603	0.634	0.588	0.660
0.05	0.748	0.785	0.748	0.830
0.06	0.893	0.945	0.889	0.976
0.07	1.042	1.103	1.045	1.154
0.08	1.190	1.271	1.205	1.308
0.09	1.340	1.437	1.357	1.473
0.10	1.496	1.604	1.510	1.632

ตารางที่ 4.12 ผลการวัด  $R_B$  ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.01	0.450	0.470	0.628	0.527
0.02	1.019	1.010	1.013	1.004
0.03	1.504	1.506	1.486	1.485
0.04	1.990	2.002	1.955	1.987
0.05	2.475	2.508	2.434	2.481
0.06	2.972	3.003	2.901	2.966
0.07	3.467	3.506	3.387	3.471
0.08	3.966	4.006	3.873	3.968
0.09	4.472	4.514	4.359	4.474
0.10	4.966	5.017	4.853	4.988

ตารางที่ 4.13 ผลการวัด Hall ของ GaSb:Te ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (mA)	$V_H$ (V) B+		$V_H$ (V) B-	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.01	0.445	-0.233	0.260	-0.440
0.02	0.870	-0.477	0.503	-0.856
0.03	1.292	-0.720	0.748	-1.285
0.04	1.708	-0.964	0.987	-1.704
0.05	2.126	-1.207	1.224	-2.133
0.06	2.543	-1.453	1.463	-2.572
0.07	2.964	-1.700	1.697	-3.021
0.08	3.394	-1.951	1.941	-3.439
0.09	3.824	-2.201	2.174	-3.883
0.10	4.253	-2.448	2.411	-4.345

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2329-3000

ตารางที่ 4.14 ผลการวัด  $R_A$  ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.01	0.250	0.247	0.540	0.233
0.02	0.510	0.518	0.535	0.519
0.03	0.775	0.782	0.784	0.778
0.04	1.031	1.047	1.041	1.038
0.05	1.289	1.308	1.303	1.298
0.06	1.549	1.575	1.563	1.558
0.07	1.813	1.835	1.823	1.817
0.08	2.072	2.099	2.084	2.079
0.09	2.334	2.358	2.345	2.337
0.10	2.594	2.615	2.604	2.599

ตารางที่ 4.15 ผลการวัด  $R_B$  ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.01	0.727	0.761	0.708	0.629
0.02	1.570	1.596	1.607	1.546
0.03	2.371	2.386	2.39	2.353
0.04	3.164	3.175	3.185	3.144
0.05	3.951	3.963	3.976	3.932
0.06	4.740	4.757	4.775	4.710
0.07	5.527	5.549	5.579	5.492
0.08	6.314	6.347	6.373	6.274
0.09	7.098	7.143	7.181	7.049
0.10	7.883	7.945	7.991	7.823

ตารางที่ 4.16 ผลการวัด Hall ของ GaSb:Si ครั้งที่ 1 ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	$V_H$ (mV) B+		$V_H$ (mV) B-	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.01	0.512	-0.573	0.546	-0.531
0.02	1.014	-1.114	1.095	-1.033
0.03	1.518	-1.663	1.645	-1.538
0.04	2.021	-2.207	2.188	-2.043
0.05	2.526	-2.753	2.739	-2.543
0.06	3.031	-3.292	3.286	-3.042
0.07	3.537	-3.832	3.829	-3.544
0.08	4.038	-4.376	4.379	-4.042
0.09	4.544	-4.914	4.924	-4.538
0.1	5.038	-5.454	5.471	-5.035

ตารางที่ 4.17 ผลการวัด  $R_H$  ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	$V$ (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.01	0.255	0.240	0.355	0.233
0.02	0.513	0.522	0.535	0.521
0.03	0.770	0.786	0.782	0.780
0.04	1.033	1.050	1.044	1.040
0.05	1.294	1.313	1.306	1.301
0.06	1.557	1.575	1.566	1.562
0.07	1.812	1.835	1.826	1.822
0.08	2.070	2.093	2.087	2.081
0.09	2.332	2.358	2.348	2.344
0.10	2.600	2.621	2.608	2.604

ตารางที่ 4.18 ผลการวัด  $R_B$  ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.01	0.752	0.760	0.709	0.635
0.02	1.569	1.596	1.605	1.549
0.03	2.371	2.385	2.399	2.355
0.04	3.161	3.171	3.185	3.149
0.05	3.951	3.962	3.975	3.931
0.06	4.735	4.757	4.771	4.711
0.07	5.521	5.545	5.563	5.493
0.08	6.306	6.342	6.368	6.275
0.09	7.089	7.133	7.172	7.051
0.10	7.877	7.931	7.982	7.830

ตารางที่ 4.19 ผลการวัด Hall ของ GaSb:Si ครั้งที่ 2 ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	$V_H$ (mV) B+		$V_H$ (mV) B-	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.01	0.511	-0.572	0.55	-0.535
0.02	1.021	-1.115	1.091	-1.035
0.03	1.526	-1.665	1.642	-1.540
0.04	2.027	-2.21	2.19	-2.043
0.05	2.532	-2.753	2.736	-2.544
0.06	3.036	-3.297	3.283	-3.040
0.07	3.538	-3.838	3.825	-3.541
0.08	4.044	-4.379	4.377	-4.041
0.09	4.544	-4.92	4.919	-4.540
0.10	5.053	-5.457	5.467	-5.034

ตารางที่ 4.20 ผลการวัด  $R_A$  ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (mV)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.01	0.256	0.244	0.447	0.232
0.02	0.514	0.522	0.528	0.521
0.03	0.776	0.791	0.783	0.782
0.04	1.040	1.047	1.044	1.041
0.05	1.298	1.312	1.306	1.304
0.06	1.557	1.573	1.567	1.564
0.07	1.818	1.832	1.829	1.824
0.08	2.079	2.099	2.089	2.087
0.09	2.339	2.360	2.349	2.348
0.10	2.602	2.620	2.612	2.611

ตารางที่ 4.21 ผลการวัด  $R_B$  ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (mV)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.01	0.846	0.787	0.704	0.658
0.02	1.584	1.594	1.597	1.552
0.03	2.377	2.385	2.388	2.355
0.04	3.16	3.169	3.177	3.146
0.05	3.946	3.954	3.97	3.933
0.06	4.732	4.747	4.761	4.719
0.07	5.518	5.537	5.557	5.498
0.08	6.306	6.33	6.358	6.285
0.09	7.086	7.126	7.168	7.060
0.10	7.872	7.924	7.964	7.843

ตารางที่ 4.22 ผลการวัด Hall ของ GaSb:Si ครั้งที่ 3 ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	$V_H$ (V) B+		$V_H$ (V) B-	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.01	0.515	-0.573	0.552	-0.530
0.02	1.016	-1.118	1.101	-1.031
0.03	1.524	-1.662	1.649	-1.538
0.04	2.027	-2.208	2.193	-2.041
0.05	2.534	-2.750	2.742	-2.541
0.06	3.040	-3.288	3.287	-3.042
0.07	3.544	-3.832	3.823	-3.543
0.08	4.046	-4.373	4.372	-4.042
0.09	4.551	-4.913	4.919	-4.539
0.10	5.050	-5.450	5.466	-5.039

4.4 ทดสอบสารตัวอย่าง  $Cu_{0.9}Al_{0.1}Fe_{0.1}O_2$

ตารางที่ 4.23 ผลการวัด  $R_x$  ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (V)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.002	0.039	0.037	0.037	0.037
0.004	0.073	0.069	0.069	0.068
0.006	0.107	0.102	0.100	0.099
0.008	0.140	0.135	0.132	0.131
0.010	0.174	0.167	0.164	0.163
0.012	0.208	0.200	0.196	0.195
0.014	0.241	0.233	0.228	0.227
0.016	0.274	0.265	0.260	0.259
0.018	0.307	0.297	0.292	0.291
0.020	0.339	0.329	0.324	0.323

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเอกสารหรือสื่ออิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.23 (ต่อ)

I (A)	V (V)			
	$R_{(BA,CD)}$	$R_{(AB,DC)}$	$R_{(DC,AB)}$	$R_{(CD,BA)}$
0.022	0.371	0.360	0.356	0.354
0.024	0.403	0.391	0.387	0.385
0.026	0.434	0.422	0.418	0.416
0.028	0.464	0.452	0.448	0.446
0.030	0.494	0.480	0.477	0.476
0.032	0.522	0.509	0.507	0.505
0.034	0.550	0.538	0.535	0.533

ตารางที่ 4.24 ผลการวัด  $R_B$  ด้วยวิธี Van der Pauw โดยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	V (V)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.002	0.032	0.033	0.033	0.033
0.004	0.061	0.062	0.062	0.061
0.006	0.090	0.090	0.090	0.090
0.008	0.119	0.119	0.119	0.119
0.010	0.149	0.148	0.149	0.148
0.012	0.178	0.177	0.178	0.177
0.014	0.208	0.206	0.207	0.207
0.016	0.236	0.235	0.237	0.236
0.018	0.266	0.263	0.266	0.265
0.020	0.294	0.292	0.295	0.294
0.022	0.323	0.321	0.323	0.323
0.024	0.351	0.349	0.352	0.351
0.026	0.379	0.377	0.379	0.379
0.028	0.407	0.404	0.407	0.407

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้เพื่ออื่นด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีผู้ใดที่ประสงค์จะนำเอกสารฉบับนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต  
 จากผู้จัดทำเอกสารฉบับนี้ ผู้จัดทำเอกสารขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ และไม่รับผิดชอบต่อความเสียหาย  
 ใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้

ตารางที่ 4.24 (ต่อ)

I (A)	V (V)			
	$R_{(AD,BC)}$	$R_{(DA,CB)}$	$R_{(CB,DA)}$	$R_{(BC,AD)}$
0.030	0.434	0.431	0.434	0.434
0.032	0.460	0.458	0.460	0.461
0.034	0.486	0.483	0.486	0.487

ตารางที่ 4.25 ผลการวัด Hall ด้วยระบบวัดแบบกึ่งอัตโนมัติ

I (A)	$V_H (V) B+$		$V_H (V) B-$	
	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$	$R_{(AC,BD)}$	$R_{(BD,CA)}$
0.002	-0.00067	0.00206	-0.00286	0.00287
0.004	-0.00266	0.00372	-0.00508	0.00501
0.006	-0.00456	0.00579	-0.00720	0.00729
0.008	-0.00649	0.00772	-0.00946	0.00943
0.010	-0.00825	0.01002	-0.01187	0.01168
0.012	-0.01007	0.01213	-0.01414	0.01385
0.014	-0.01183	0.01438	-0.01644	0.01593
0.016	-0.01357	0.01681	-0.01866	0.01787
0.018	-0.01537	0.01900	-0.02102	0.02034
0.020	-0.01707	0.02111	-0.02322	0.02255
0.022	-0.01861	0.02327	-0.02564	0.02507
0.024	-0.02011	0.02572	-0.02822	0.02720
0.026	-0.02149	0.02770	-0.03054	0.02950
0.028	-0.02326	0.02992	-0.03285	0.03143
0.030	-0.02481	0.03210	-0.03520	0.03338
0.032	-0.02682	0.03410	-0.03738	0.03540
0.034	-0.02858	0.03618	-0.03965	0.03739

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมาให้แก่กรมการช่างเทคนิคการศึกษานานาชาติเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้