การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยคอมพิวเตอร์

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

นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน

นายณัฐภัทร เร่งรัด

นางสาวนลินี ไชยสงค์

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

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

นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน

นายณัฐภัทร เร่งรัด

นางสาวเสาวณีย์ ไชยสลี

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

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

Mr. Narasad Phikun-ngoen

Mr. Nattapat Rengrad

Miss Saowanee Chaisalee

A SPECIAL PROJECT SUBMITTEDIN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT
ชื่อนักศึกษา	นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน นายณัฐภัทร เร่งรัด นางสาวเสาวณีย์ ไชยสลี
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
ดร.ประธาน บุรณศิริ	
อ.สุรชาติ กมลดิลก	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การปรับปรุงระบบวัดแวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน นายณัฐภัทร เร่งรัด นางสาวเสาวณีย์ ไชยสลี
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้เป็นการพัฒนาระบบวัดสารกึ่งตัวนำโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ชิ้นงานที่ต้องการวัดจะถูกต่อขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีของแวนเดอร์พาว กระแสจะถูกป้อนและความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกวัดด้วยเครื่องจ่ายกระแสคงที่แบบโปรแกรมได้ของ Keithley รุ่น 220 และดิจิตอลมัลติมิเตอร์ของ Agilent รุ่น 34401A ตามลำดับ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกวัดภายในสนามแม่เหล็กขนาด 4600-4900 เกาส์คู่ของขั้วไฟฟ้าที่ถูกป้อนกระแสและคู่ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์จะถูกต่อผ่านรีเลย์ชนิด 2 หน้าสัมผัส จำนวน 12 ตัวและการสลับขั้วการวัดตามวิธีของแวนเดอร์พาวจะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-Easy 168 STAMP โปรแกรมควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกพัฒนาขึ้นโดยโปรแกรม C การควบคุมระบบการวัดและแสดงผลจะทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์พีซี ซึ่งโปรแกรมควบคุมการทำงานถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา Visual basic คำสั่งการสลับขั้วการวัดจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ต USB คำสั่งควบคุมกระแสและควบคุมการอ่านค่าความต่างศักย์จะถูกส่งไปยังเครื่องจ่ายกระแสและเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ผ่านทางพอร์ต IEE488 ตามลำดับ ผลการวัดจะถูกส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์พีซีเพื่อประมวลผลและแสดงผลการวัด ระบบที่พัฒนาขึ้นถูกทดสอบโดยการวัดสารกึ่งตัวนำซิลิกอน พบว่าค่าที่วัดได้ได้แก่ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น สภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้า ความหนาแน่นพาหะ สภาพคล่องของพาหะข้างมากและชนิดของการโดป มีค่าที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับผลการวัดจากระบบอื่น

คำสำคัญ : ปรากฏการณ์ฮอลล์, แวนเดอร์พาว, ขั้วไฟฟ้า, สนามแม่เหล็ก

Title	IMPROVEMENT OF COMPUTER-BASED SYSTEM FOR VAN DER PAUW AND HALL EFFECT MEASUREMENT
Students	Mr. Narasad Phikun-ngoen
	Mr. Nattapat Rengrad
	Miss Saowanee Chaisalee
Degree	Bachelor of science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
Co-Advisor	Dr. S.Tipawan Khalayboonme

ABSTRACT

This special project proposes development of a computer-based system for determination of semiconductor properties by Hall effect measurement. Four electrodes with ohmic contacts are prepared on a surface of a tested sample by Van der Pauw method. Current is applied and potential difference id measured by a Keithley 220 programmable Current Source and an Agilent 34401A Digital Multimeter, respectively. The Hall effect is measured under a magnetic field of 4600-4900 G. The current and voltage electrodes are connected via twelve 2-contact relays. The alternation of a pair of current and voltage electrodes are controlled by ET-Easy 168 STAMP microcontroller. A control program is developed by C language. The measurement system is controlled by computer PC. A controlled programmed is developed by Visual Basic programming. A control command to alter the pair of electrodes is transferred to the controller via an USB port. A current control command and voltage-measuring control command are transferred to the current source and multimeter via IEEE 488 port, respectively, The measurement results are processed and displayed by PC. The developed system was tested by measuring the properties of silicon wafers. The measurement results of sheet resistance, resistivity, conductivity, carrier concentration, majority mobility and doping type are in agree with those of another

Keywords : Hall effect, Van Der Pauw, Electrodes, Magnetic field

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุน ช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

รศ.ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา ผู้ซึ่งถ่ายทอดวิชาความรู้และให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องมือซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการทำโครงงานพิเศษนี้และยังเป็นประโยชน์ในการนำความรู้และเทคนิคต่างๆไปใช้ในหน้าที่การงานในอนาคตได้อีกด้วย อีกทั้งยังอดทนให้คนไม่ขยันได้ทำงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จนเกิดความรู้ความสามารถในด้านใหม่ๆ จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ดร. ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี พี่สมภพ แซ่เจี่ย ผู้ซึ่งคอยแนะนำและสนับสนุนการทำโครงงานพิเศษนี้ในทุกๆด้าน ทั้งด้านทักษะความรู้ความสามารถในการทำงานและสนับสนุนเครื่องมือต่างๆการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

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

นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน

นายณัฐภัทร เร่งรัด

นางสาวเสาวณีย์ ไชยสลี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สารกึ่งตัวนำ	4
2.2 Silicon wafer	11
2.3 ความต้านทานไฟฟ้า	11
2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก	14
3.2 ระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	21
3.3 ภาคแหล่งจ่ายไฟ	25

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4 ระบบรวม 28

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก 30

4.2 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ 41

4.3 สอบเทียบเครื่องมือ 59

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง 62

5.2 ข้อเสนอแนะ 64

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชิ้นที่ทราบค่าแล้ว 48

ตารางที่ 2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว 48
ของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR1-MeasR4
ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

ตารางที่ 3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ 51
ของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR5และMeasR6
ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

ตารางที่ 4 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Silicon wafer 53
ชิ้นที่ 1

ตารางที่ 5 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาว 53
ของ Si wafer ชิ้นที่ 2 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR1-MeasR4
ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

ตารางที่ 6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ 57
ของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR5และMeasR6
ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

ตารางที่ 7 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Silicon wafer 59
ชิ้นที่ 2

ตารางที่ 8 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจาก American Society for Testing 59
and Materials Licensed by Information Handling Service

ตารางที่ 9 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Silicon wafer 60
ชิ้นที่ 1

ตารางที่ 10 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Silicon wafer 60
ชิ้นที่ 2

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะตอม 4

รูปที่ 2.2 วาเลนซ์อิเล็กตรอนและพันธะโควาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ 5

รูปที่ 3.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร 15

รูปที่ 3.2 MMC-2 5 Phase stepping motor driver 16

รูปที่ 3.3 USB/GPIB Agilent Technology 16

รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมควบคุมระบบขับเคลื่อนของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส 16

รูปที่ 3.5 ติดตั้งสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสแบบแกนเกลียวสองแกน 17

รูปที่ 3.6 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็น 110 V 17

รูปที่ 3.7 โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 18

รูปที่ 3.8 โปรแกรม PC5180 1.4 18

รูปที่ 3.9 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ไดแล้ว 19

รูปที่ 3.10 แสดงการเขียนโค๊ดโปรแกรม Visual basic เพียงแค่บางส่วนเพื่อ User การใช้งาน 19

รูปที่ 3.11 การจัดวางและติดตั้งระบบเพื่อวัดหาค่าสนามแม่เหล็ก 20

รูปที่ 3.12 แสดงการจับยึดหัววัดขององ FW BELL5180 Gauss meter 20

รูปที่ 3.13 การต่อขั้วแบบแวนเดอร์พาว 21

รูปที่ 3.14 วงจรสวิตซ์รีเลย์ 22

รูปที่ 3.15 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP 22

รูปที่ 3.16 โปรแกรม Arduino23 23

รูปที่ 3.17 วงจรสวิตซ์รีเลย์และ ET-EASY168 STAMP ที่ถูกบรรจุลงกล่องแล้ว 23

รูปที่ 3.18 ไฟ LED แสดงสถานการณ์ทำงานของเครื่องวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้า ของสารกึ่งตัวนำ 24

รูปที่ 3.19 Digital multimeter(ซ้าย) และ Current source(ขวา) 24

รูปที่ 3.20 สาย 408JE ใช้ต่อขนานระหว่าง Digital multimeter กับ Current source 25

รูปที่ 3.21 Adapter 5 V ,1A 25

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.22 แบบแผ่นวาง Sample ออกแบบด้วยโปรแกรม Altium designer(ซ้าย) แผ่นพีซีบีที่นา มากัดเป็น แผ่นสา หรับวาง Sample เสร็จเรียบร้อยแล้ว(ขวา) 26

รูปที่ 3.23 ลักษณะการต่อขั้วของ Sample เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวน เดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ 26

รูปที่ 3.24 ET-EASY168 STAMP สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว 27

รูปที่ 3.25 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ Save เป็นไฟล์ CSV เปิดด้วยโปรแกรม Notepad 27

รูปที่ 3.26 ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า Save เป็นไฟล์XLS 28

รูปที่ 3.27 กราฟเป็น Save ไฟล์ภาพ PNG 28

รูปที่ 3.28 ไดอะแกรมการทำงานของระบบรวม 29

รูปที่ 4.1 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ 30

รูปที่ 4.2 คอมพิวเตอร์สามารถเชื่อมกับGauss meterได้จะสามารถเปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ได้ 31

รูปที่ 4.3 การจัดวางอุปกรณ์กับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก 31

รูปที่ 4.4 ใส่ Address ของ MMC-2 และ คลิกที่ปุ่ม Connect MMC-2 32

รูปที่ 4.5 คลิก RESET เพื่อให้ตำแหน่งเริ่มต้นเป็น X=0 ,Y=0 32

รูปที่ 4.5 เมนูโหมดการสแกน 34

รูปที่ 4.6 ใส่ค่าที่ต้องการตามตำแหน่ง 34

รูปที่ 4.6 เริ่มสแกนและวัดค่า 34

รูปที่ 4.7 บันทึกข้อมูลไปยังโปรแกรม Microsoft excel 35

รูปที่ 4.8 ข้อมูลในรูปของ String ไม่สามารถสร้างกราฟได้ 35

รูปที่ 4.9 ข้อมูลในรูปของตัวเลขสามารถสร้างกราฟได้ 36

รูปที่ 4.10 ใช้คำสั่งตัดตัวอักษรสุดท้ายและทำ String เป็นตัวเลข 36

รูปที่ 4.11 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 1 มม. 37

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 2 มม. 37

รูปที่ 4.13 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 3 มม. 38

รูปที่ 4.14 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 4 มม. 38

รูปที่ 4.15 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 5 มม. 39

รูปที่ 4.16 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 6 มม. 39

รูปที่ 4.17 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 7 มม. 40

รูปที่ 4.18 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 8 มม. 40

รูปที่ 4.19 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 9 มม. 41

รูปที่ 4.20 รูปการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ 42

รูปที่ 4.21 สายต่อจากเครื่องเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปยัง แผ่นวาง Sample 42

รูปที่ 4.22 การต่อขั้วกับแผ่นวาง Sample แบบถูกต้อง 43

รูปที่ 4.23 Connect อุปกรณ์ และใส่ค่าสนามแม่เหล็กกับความหนาของ Sample 43

รูปที่ 4.24 แท็บ MeasR1 44

รูปที่ 4.25 แท็บ MeasR1 ใส่ Sample เข้าไปในบริเวณที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก 44

รูปที่ 4.26 โปรแกรมแสดงข้อความว่าให้นำ Sample ใส่เข้าไปในสนามแม่เหล็ก 45

รูปที่ 4.27 ใส่ Sample เข้าไปในสนามแม่เหล็ก 45

รูปที่ 4.28 แท็บ Result จะแสดงผลจากการวัดทั้งหมด 46

รูปที่ 4.29 Save ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เป็นไฟล์CSV เปิดด้วยโปรแกรม Notepad 46

รูปที่ 4.30 Save ค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นไฟล์XLS 47

รูปที่ 4.31 Save กราฟเป็นไฟล์PNG 47

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง V34 กับ I12 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 1 49

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง V12 กับ I34 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 1 50

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง V23 กับ I14 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 1 50

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง V14 กับ I23 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 1 51

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง V24 กับ I13 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 1 52

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง V13 กับ I24 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 1 53

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง V34 กับ I12ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 2 55

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง V12 กับ I43 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 2 55

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง V23 กับ I14 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 2 56

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง V14 กับ I23 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 2 56

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง V24 กับ I13 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 2 58

รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง V13 กับ I24 ของ Silicon wafer ชิ้นที่ 2 58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

การวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำ เช่น ความต้านทาน ความหนาแน่นของพาหะ สภาพความคล่องของพาหะ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยการวัดส่งผลให้ทราบถึงสมบัติ รวมทั้งสามารถทำให้ปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้สมบัติของสารตามต้องการ

ระบบการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นเป็นวิธีการที่สามารถวัดผลและคำนวณหาค่าต่างๆของสารกึ่งตัวนำได้หลายค่าด้วยกันการวัดเพียงครั้งเดียว เช่น ความต้านทานที่ผิวหน้า(sheet resistance : R_s) ความเข้มข้นของพาหะที่ผิวหน้า (sheet carrier concentration : n_s) ความคล่องตัวของพาหะข้างมาก (majority carrier mobility : μ_m) สภาพต้านทานไฟฟ้า (bulk electrical resistivity : ρ) เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดได้อย่างง่ายดายด้วย จึงทำให้การวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์นี้เป็นวิธีการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์ในห้องปฏิบัติการณ์ที่เราใช้ส่วนใหญ่เป็นการวัดมือ ซึ่งต้องใช้เวลาในการจดบันทึกและคำนวณผล

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเกี่ยวกับการสร้างระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์แบบอัตโนมัติเพื่อใช้เองในห้องปฏิบัติการณ์ในงบประมาณที่ไม่มากจนเกินไป โดยประยุกต์จากการวัดมือที่ใช้อยู่เข้ากับวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ลำการเขียนโปรแกรมขึ้นมาควบคุมการทำงานให้สามารถใช้งานและประมวลผลได้สะดวกสบายยิ่งขึ้นและให้เหมาะสมกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของปรากฏการณ์ฮอลล์
2. เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
3. เพื่อทำการสอบเทียบการทำงานของเครื่องมือกับชิ้นสารที่ได้มาตรฐาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
3. ออกแบบและสร้างระบบการวัดคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำด้วยระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
4. ทำการสอบเทียบการใช้ระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์กับสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า
5. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
กรกฎาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2556	- ศึกษาประวัติความเป็นมาของปรากฏการณ์ฮอลล์ - ศึกษาคุณลักษณะและหลักการทำงานของระบบการวัดผลปรากฏการณ์ฮอลล์ - ศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
กันยายน – ตุลาคม พ.ศ. 2556	- จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้ในการวิจัย - ออกแบบชุดวางแม่เหล็กของระบบการวัดผลของปรากฏกาฮอลล์ - วางแผนการสร้างระบบ เขียนโปรแกรม และ วิเคราะห์ผล
พฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2556	- ทดลองการวัดสารกึ่งตัวนำกับเครื่องมือที่มีอยู่โดยการวัดมือ - วัดความสม่ำเสมอของสนามแม่เหล็ก - สร้างระบบการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์ - ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบวัด - ทำการทดลองใช้ระบบที่สร้างขึ้นมาว่าใช้ได้ดีหรือไม่
มกราคม – มีนาคม พ.ศ. 2557	- ทำการสอบเทียบและบันทึกผลระบบที่สร้างขึ้นมากับสารตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่า - วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลองเพื่อทำการปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

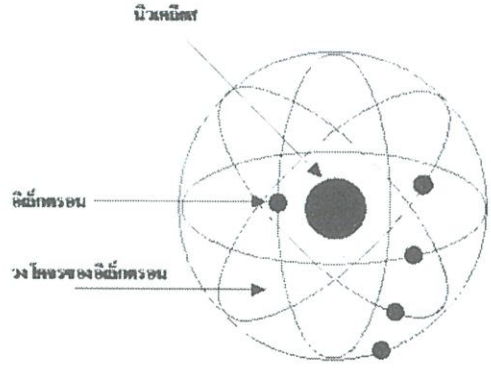
1. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวกับหลักการทำงานของระบบการวัดผลของปรากฏการณ์ฮอลล์
2. ทำให้มีความรู้และความเข้าใจในคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ
3. ทำให้ทราบถึงหลักการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการสั่งงานของระบบ
4. สามารถทำการออกแบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากระบบการวัดมือเป็นระบบการวัดแบบอัตโนมัติ
5. สามารถนำอุปกรณ์เครื่องมือการวัดไปใช้ทำการทดลองได้จริง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ

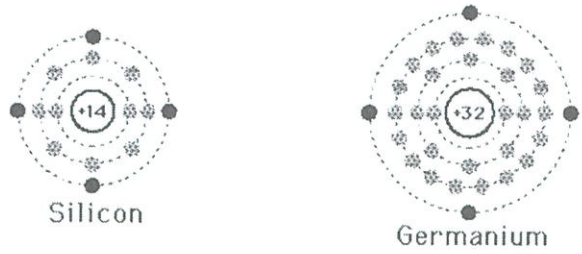
สารกึ่งตัวนำเป็นธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งธาตุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอมโดยที่ภายในอะตอมของธาตุเหล่านี้จะประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอน โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ภายในนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอกคล้ายๆ กับวงโคจรในระบบสุริยะ โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้กับนิวเคลียสจะมีระดับพลังงานต่ำเนื่องจากนิวเคลียสสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ได้ ขณะที่อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสที่อยู่ห่างไกลออกไปจะมีระดับพลังงานสูง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระถ้าได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกอย่างเพียงพอ อิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุดของอะตอมนั้นๆ เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน ดังในแสดงรูปที่ 2.1



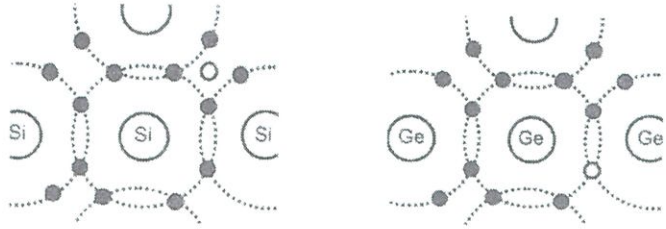
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะตอม

สารกึ่งตัวนำ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นกลางระหว่างสภาวะความเป็นตัวนำและฉนวนโดยเมื่อนำไปทำฉนวน ก็จะเป็นฉนวนที่ไม่ดี หรือเอาไปทำเป็นตัวนำก็จะเป็นตัวนำที่ไม่ดี เช่นกัน วัสดุประเภทนี้ได้แก่ซิลิกอน(Si : Silicon) และเยอร์มาเนียม(Ge : Germanium) เป็นต้น

การโด๊ปสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะเป็นสารที่มีอยู่ในธาตุหมู่ที่ 4 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนวงนอกสุดจำนวน 4 ตัว เช่น ซิลิกอนและเยอร์มาเนียมที่มีโครงสร้างอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) เมื่ออะตอมของซิลิกอนและเยอร์มาเนียมอยู่รวมกันเป็นผลึกจะยึดกันด้วยพันธะแบบโควาเลนซ์ (Covalent bond) ซึ่งอะตอมจะมีเสถียรภาพถ้าวาเลนซ์อิเล็กตรอนมีจำนวนครบ 8 ตัว ดังนั้นอะตอมของซิลิกอนและเยอร์มาเนียมจึงจับกลุ่มกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ข)



(ก) ลักษณะวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว



(ข) พันธะโควาเลนซ์

รูปที่ 2.2 วาเลนซ์อิเล็กตรอนและพันธะโควาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

สารกึ่งตัวนำที่ยังไม่มีอะตอมของสารเจือปนเลย เรียกว่า สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) ซึ่งจะนำไฟฟ้าได้ไม่ดี แต่เมื่อผ่านกระบวนการโด๊ปสาร (Doping) โดยการใส่อะตอมสารเจือ (Impurity) เข้าไปจะทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic Semiconductor) ซึ่งจะทำให้นำไฟฟ้าได้ดี และนำไปประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยการทำสารกึ่งตัวนำด้วยการโด๊ปอะตอมสารเจือเข้าไปดังกล่าว ทำให้ได้สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด

1. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor)
2. สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductor)

2.1.1 สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้ $N_C(E)dE$ เป็นสถานะในแถบนำ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ E+dE ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \qquad (2.1)$$

ถ้า N_C คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_C(E) = 2\pi\left[\frac{2m_e^*}{h}\right]^{3/2}E^{1/2} \quad (2.2)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

จากสมการที่ (2.2) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำ นั่นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$N_i = \int_0^{E_t} n(E)dE$$

$$= \int_0^{E_t} N_C(E)f(E)dE \quad (2.3)$$

เมื่อ E_t คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ n(E)dE มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.3) จึงสามารถขยายขอบเขต E_t ออกไปจนถึงอนันต์และสามารถเขียนสมการที่ (2.3) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi\left[\frac{2m_e^*}{h^2}\right]^{3/2}\int_0^{\infty}\frac{E^{2/3}}{\exp\left[\frac{E-E_p}{kT}\right]+1}dE \quad (2.4)$$

เนื่องจาก $\exp\left[\frac{E-E_p}{kT}\right] + 1 >> 1$ นั่นคือ

$$n_i = N_C\exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.5)$$

เมื่อ $$N_C = 2\left[\frac{2m_{ekT}^*}{h^2}\right]^{3/2} \quad (2.6)$$

และในทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$P_i = N_V\exp\left[-\frac{E_F-E_g}{kT}\right] \quad (2.7)$$

โดย $$N_V = 2\left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2}\right]^{3/2} \quad (2.8)$$

เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากันดังนั้นจากสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.7) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_C N_V \exp[-\frac{E_g}{kT}] \quad (2.9)$$

และ $$n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp[-\frac{E_g}{2kT}] \quad (2.10)$$

หรือ $$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} [\frac{m_e^* m_h^*}{m^2}]^{3/4} \exp[-\frac{E_g}{2kT}] \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญทางคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิกเป็นสรกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน และโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำ คือ

$$n = N_C \exp[\frac{E_F}{kT}] \quad (2.12)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp[-\frac{E_F + E_g}{kT}] \quad (2.13)$$

ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานซ้อนจะยังคงมีความสัมพันธ์

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp[-\frac{E_g}{kT}] \quad (2.14)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-Type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_d) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level : E_d) และอะตอมผู้รับ (N_a) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level : E_a) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a + n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.15)$$

เมื่อ n,p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

N_d,N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

n_a,n_d คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณี

1. กรณีความหนาแน่นของสิ่งเจือปนมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในการเช่นนั้นอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือมาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.15) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - n_a) \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2}[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \quad (2.17)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.18)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณฆภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.17) และ (2.18) จะกลายเป็นสมการอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.19)$$

ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวินจะมีน้อยกว่าอะตอมที่มาจากอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.17) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \tag{2.20}$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมดดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ยังไม่ถูกไอออไนซ์ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_d) จะมีน้อยมากดังนั้นสมการที่ (2.20) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \tag{2.21}$$

และ $$n_d = Nd\left[\frac{1}{1+\beta \exp\left[\frac{E_d + E_f}{kt}\right]}\right] \tag{2.22}$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานไม่ซับซ้อน (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.12), (2.21) และ (2.22) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c') - (N_d - N_a)N_c' = 0 \tag{2.23}$$

เมื่อ $$N_c' = \beta N_c \exp[-\frac{E_d}{kT}] \tag{2.24}$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราดิกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_a + N_c') + \frac{1}{2}[(N_d + N_n')^2 + 4N_c'(N_d + N_a)]^{1/2} \tag{2.25}$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N_c' จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.25) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

$$n = -\left[\frac{N_a + N_c'}{2}\right] + \frac{1}{2}(N_a + N_c') + \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} + \cdots$$

$$n \cong \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} \tag{2.26}$$

ถ้า $N_a \gg N_c'$ สมการที่ (2.32) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a}\beta N_c \exp[-\frac{E_d}{kT}] \tag{2.27}$$

ถ้า N_a มีค่าน้อยมากนั่นคือ $N_d \gg N_c' \gg N_a$ จะทำให้สมการที่ (2.27) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N_c' = 0 \qquad (2.28)$$

หรือ $$n = \sqrt{\beta N_d N_c \exp[-\frac{E_d}{2kT}]} \qquad (2.29)$$

จะได้เห็นว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่า ย่านฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.28) เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.29) เมื่อ อุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามแถบการนสารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 eV ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้น สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.1.4 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการ (2.30)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[\frac{E-E_F}{kT}]+1} \qquad (2.30)$$

เมื่อ f(E) คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)

k คือ 1.38×10^{-23} J/K ค่าคงตัวของโบลต์มันน์ (Boltzmann'sconstant)

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

Silicon Wafer

เวเฟอร์ คือ แผ่นซิลิกอนที่นำเอามาทำชิป ลักษณะเป็นแผ่นกลมๆ บางๆ เหมือนโรตี จึงไม่น่าแปลกใจว่าวงการไมโครชิปและพวกชิปต่างๆ ความสำเร็จในเทคโนโลยีใหม่ๆ จะขึ้นอยู่กับ Silicon Technology เสมอ เวเฟอร์เหล่านี้ถูกผลิตจากโรงผลิตเรียกชื่อกันย่อๆ ว่า FAB (Semiconductor manufacturing Facility) หลังจากนั้นผู้ผลิตชิปก็จะเวเฟอร์เหล่านี้มาเข้าสู่กระบวนนการผลิตชิปอีกที แผ่นซิลิกอนนั้นต้องบริสุทธิ์ 100.00% (การมีสารแปลกปลอมได้ไม่เกิน 1/100,000,000) และ homogenous (สารไม่บริสุทธิ์กระจายไปเท่าๆ กันทั่วทั้งแผ่น) แผ่นๆ หนึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-6 นิ้ว และเทคโนโลยีของซิลิกอนใหม่นั้น คาดว่าในโรงงานผลิตสามารถผลิตเวเฟอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ 12-20 นิ้ว

2.3 ความต้านทานไฟฟ้า

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหล หมายถึง มีการเคลื่อนไหวของอิเล็กตรอนในลวดสายไฟและอิเล็กตรอนจะวิ่งชนอะตอมของเส้นลวด เกิดดารต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น เราเรียกว่าความต้านทาน (Resistance) ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm) ความต้านทานเกิดขึ้นทุกๆ ที่ที่มีกระแสไฟฟ้าไหล ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะในสายไฟเท่านั้น ตัวอย่างความต้านทานต่างๆ มีดังนี้

-ความต้านทานของตัวนำได้แก่ ความต้านทานของลวดสายไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหลผ่าน ความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ ความต้านทานของสารละลายกรดเกลือ กรดกำมะถันน้ำเกลือ เป็นต้น

-ความต้านทานของจุดสัมผัส ได้แก่ ความต้านทานที่เกิดขึ้นที่จุดสัมผัสของสวิตซ์หรือรอยเชื่อมต่อระหว่างสายไฟที่จุดนี้ กระแสจะไหลได้ยากเพราะมีความต้านสูง ความต้านทานของจุดสัมผัสนี้จะเป็นปัญหาเมื่อกระแสไหลผ่านจำนวนมาก ค่าความต้านทานนี้จะลดลงโดยการขัดผิวที่จุดสัมผัสให้เรียบเพื่อเพิ่มแรงดันที่จุดสัมผัสหรือบัดกรีเชื่อมต่อระหว่างสายไฟเสีย

-ความต้านทานของสายดิน ได้แก่ ความต้านที่เกิดขึ้นระหว่างดินและแผ่นโลหะผังลงดิน ความต้านทานของฉนวน เพื่อป้องกันไฟฟ้ารั่วจากสายไฟจะใช้ไวนิลหรือยางซึ่งเป็นวัสดุที่ค่าความต้านทานจำเพาะสูง หุ้มสายไฟนั้นไว้ เราเรียกการป้องกันกระแสไฟรั่วนี้ว่า การฉนวน และวัสดุที่ใช้ในการฉนวนนี้เรียกว่า ฉนวน แต่การฉนวนนั้นมิได้หมายความกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไม่ได้เลย

2.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอพคินส์ ซึ่งในขณะนี้มีอายุ 24 ปี ได้พบว่าเมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (Charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า "ปรากฏการณ์ฮอลล์"

ปรากฏการณ์ฮอลล์ เกิดขึ้นเนื่องจากธรรมชาติของกระแสไฟฟ้าในตัวนำ กระแสประกอบด้วยการเคลื่อนที่ของหลายพาหะ เช่น อิเล็กตรอน โฮล ไอออน เมื่อสนามแม่เหล็กที่มีอยู่ซึ่งไม่ได้ทำมุมขนานกับทิศของการเคลื่อนไหวของประจุที่เคลื่อนที่ จะพบว่าแรงเกิดขึ้นกับประจุเหล่านี้ เราเรียกนี้ว่า แรงลอเรนซ์ เมื่อหยุดให้สนามแม่เหล็ก ประจุก็จะเดินทางเป็นเส้นตรงในทิศทางเดิม แต่เมื่อเราใส่สนามแม่เหล็ก ให้มีองค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของประจุแล้ว เส้นทางการเคลื่อนที่จะโค้ง เพื่อให้ประจุเคลื่อนที่ไปสะสมที่ขอบด้านหนึ่งของวัสดุ ผลที่ได้คือเกิดความไม่สมดุลในการกระจายของความหนาแน่นของพาหะข้ามองค์ประกอบของฮอลล์ที่ตั้งฉากกับทั้งการเดินทางของกระแสและสนามแม่เหล็กที่ใช้ การแยกกันของประจุทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกัน จึงมีศักย์คงที่เกิดขึ้น ตราบเท่าที่ยังมีกระแสไหลอยู่ ในมุมมองแบบคลาสสิคัลกำหนดให้มีเพียงอิเล็กตรอนเท่านั้นที่เคลื่อนที่ในทิศทางเฉลี่ย จากทั้งในกรณีของการนำอิเล็กตรอนหรือโฮล หลักการนี้ไม่สามารถอธิบายเครื่องหมายที่ตรงกันข้ามของปรากฏการณ์ฮอลล์ที่เกิดขึ้น ความแตกต่างคือ อิเล็กตรอนในขอบบนของแถบวาเลนซ์มีความเร็วรวมในทิศตรงข้ามกับทิศของเวกเตอร์เมื่อมีการเคลื่อนที่ซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับถ้าอนุภาคมีประจุบวก (โฮล) เดินทางไปในทิศตรงข้ามกับอิเล็กตรอน

สำหรับตัวอย่างโลหะที่มีพาหะประจุเพียงชนิดเดียว (อิเล็กตรอน) แรงดันฮอลล์ V_H ที่ได้คือ

$$V_H = -\frac{IB}{ned} \tag{2.31}$$

เมื่อ I คือ กระแสข้ามความยาวของแผ่น

B คือ สนามแม่เหล็ก

d คือ ความลึก(หนา)ของแผ่น

e คือ ประจุไฟฟ้า

n คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะอิเล็กตรอน

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์กำหนดให้เป็น

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B} \tag{2.32}$$

เมื่อ j คือ ความหนาแน่นของกระแสของพาหะอิเล็กตรอน

และ E_y คือ สนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ใน SI Unit จะกลายเป็น

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B} = \frac{V_H d}{IB} = \frac{-1}{ne} \tag{2.33}$$

ผล คือ ปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นประโยชน์อย่างมากที่จะเป็นวิธีการวัดทั้งเพื่อหาความหนาแน่นของพาหะหรือสนามแม่เหล็ก

หนึ่งคุณลักษณะที่สำคัญมากของปรากฏการณ์ฮอลล์ก็คือผลต่างระหว่างประจุบวกเคลื่อนที่ในทิศทางหนึ่งและประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศตรงข้าม ปรากฏการณ์ฮอลล์ให้เหตุผลจริงเป็นครั้งแรกที่ว่ากระแสไฟฟ้าในโลหะมีพาหะที่เคลื่อนที่โดยอิเล็กตรอนไม่ใช่โปรตอน ปรากฏการณ์ฮอลล์ยังพบว่าในสารบางอย่าง(โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี) ก็จะเหมาะสมกว่าถ้าเราคิดว่ากระแสบวก "โฮล" เป็นตัวที่เคลื่อนที่มากกว่าอิเล็กตรอน แหล่งที่มาของความสับสนกับปรากฏการณ์ฮอลล์ คือ โฮล เคลื่อนที่ไปด้านซ้าย อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้านขวาดังนั้นจึงมักคิดเครื่องหมายเดียวกันของค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สำหรับทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ความสับสนนี้สามารถแก้ไขได้โดยทฤษฎีโมเดลควอนตัมแมกคานิกส์ของการเคลื่อนที่มนของแข็ง

ในตัวอย่างที่สารไม่เป็นเนื้อเดียวกันอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของปรากฏการณ์ฮอลล์แม้จะต่อขั้วให้อยู่ในรูปแบบของแวนเดอร์พาวก็ตาม ดังตัวอย่างเช่นผลของปรากฏการณ์ฮอลล์เป็นบวกอย่างเห็นได้ชัดในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เครื่องมือวัดแบบแวนเดอร์พาว (van der Pauw) สามารถวัดคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า โมบิลิตี้ และความหนาแน่นพาหะ ใช้วัดกับชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่จำกัด (arbitrarily shaped)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

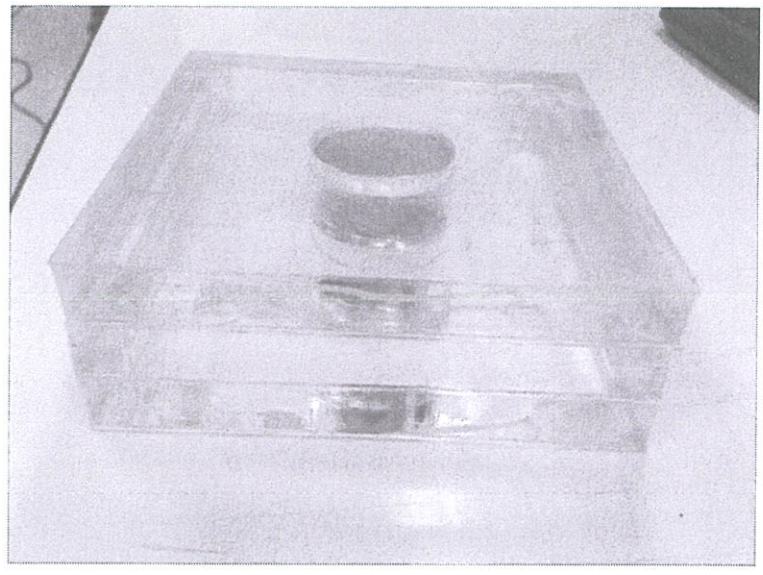
ในการสร้างเครื่องมือวัดแวนเดอร์พาวร์และวัดปรากฏการณ์ฮอลล์นี้ จะต้องมีการสร้างส่วนประกอบใหม่ขึ้นมาอีกสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนของระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก และระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นจึงนำส่วนประกอบเหล่านี้นำมาใช้งานควบคู่กับเครื่องมือวัดสำเร็จรูปอื่นๆ ที่เรามีอยู่โดยรายละเอียดในการสร้างส่วนประกอบต่างๆ มีดังนี้

3.1 ระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก

3.1.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

ชุดสนามแม่เหล็กถาวรนั้นเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญที่สุดในการสร้างเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ดังนั้นการสร้างชุดแม่เหล็กถาวรขึ้นมาต้องมีความสม่ำเนสมอของสนามแม่เหล็กอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ และต้องการทราบค่าที่แท้จริงของสนามแม่เหล็กที่เราใช้ เราจึงทำการสร้างและวัดสนามแม่เหล็กของชุดแม่เหล็กถาวรนี้โดยเริ่มต้นจากการออกแบบชุดในการยึดและวางของแผ่นเหล็กโดยใช้โปรแกรม Solid Workจากนั้นนำแบบที่เขียนไว้ไปทำการตัด เจาะ กัด กลึงตามแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อะคลีลิกหนา 12 มม. ตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100 มม. X 100 มม. และเจาะทะลุที่จุดศูนย์กลางของชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. จำนวน 2 ชิ้น
- อะคลีลิกหนา 1 มม. ตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 100 มม. X 100 มม. จำนวน 2 ชิ้น
- อะคลีลิกหนา 4 มม. ตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 10 มม. X 100 มม. จำนวน 4 ชิ้น
- อะคลีลิกหนา 2 มม. ตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 0.7 มม. X 100 มม. จำนวน 2 ชิ้น
- ชิ้นงานประกอบเข้าด้วยกันโดยยึดส่วนประกอบต่างๆ จากนั้นนำแม่เหล็กถาวรที่เตรียมไว้มาใส่ในชิ้นงานที่ประกอบไว้แล้ว จะได้ชุดสนามแม่เหล็กถาวรดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดสนามแม่เหล็กถาวร

เมื่อทำการประกอบชุดแม่เหล็กถาวรเสร็จเรียบร้อยแล้วสิ่งหนึ่งที่สำคัญมากคือ เราต้องการทราบค่าที่แน่นอนของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นขั้นตอนต่อไปคือ การวัดสนามแม่เหล็ก เริ่มจากการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

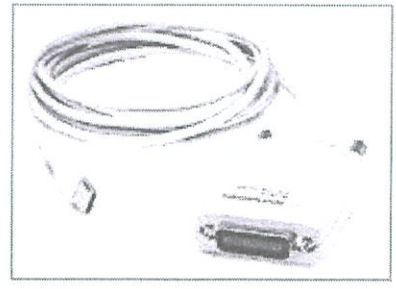
เครื่องมือที่ใช้ในการวัดนี้คือ Gauss meter ยี่ห้อ F.W. Bell รุ่น 5180 เนื่องจากมีหัววัดขนาดเล็กสามารถสอดเข้าไปในชุดแม่เหล็กของเราได้และสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB ได้ โดยทำการยึดหัววัดให้ระดับของปลายหัววัดอยู่ที่จุดกึ่งกลางระหว่างแม่เหล็กทั้งสองก้อน จากนั้นเราทำการวัดจุดต่างๆ โดยการใช้มอเตอร์สองแกน สแกน "ในระนาบ X,Y" ที่มีพื้นที่ขนาด 40 มม. X 40 มม. ความละเอียดห่างกันจุดละ 0.5 มม. ในตำแหน่ง Z ที่จุดที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 1 มม. จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่ง Z จากจุดที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 1 มม. ไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 9 มม.

3.1.2 ระบบขับเคลื่อน

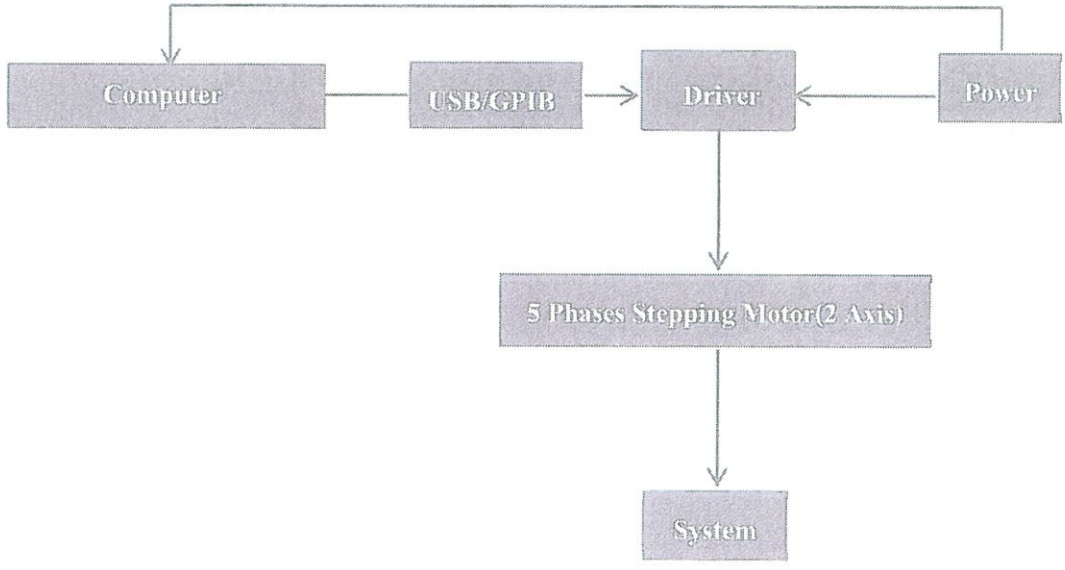
3.1.2.1 ชุดขับสเต็ปปิงมอเตอร์ MMC-2 5 Phase stepping motor driver และ USB/GPIB

MMC-2 5 Phase stepping motor driver ดังรูป 3.2 เป็นชุดขับสเต็ปปิงมอเตอร์ที่สามารถโปรแกรมเพื่อควมคุมการหมุนของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่าน USB/GPIB ดังรูป 3.3 โดยการ Interface เพื่อควบคุมการหมุนของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส ตามไดแกรมดังรูป 3.4

รูปที่ 3.2 MMC-2 5 Phase stepping motor driver



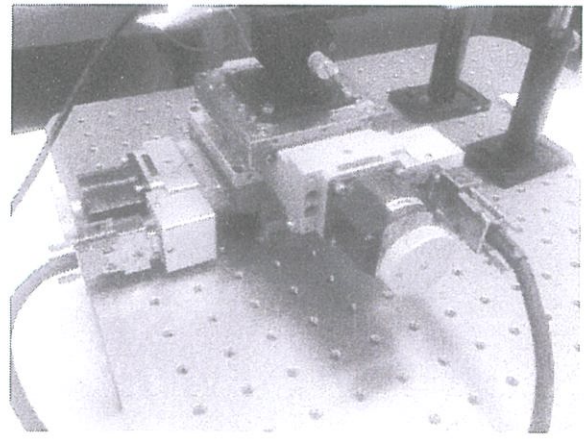
รูปที่ 3.3 USB/GPIB Agilent Technology



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมควบคุมระบบขับเคลื่อนของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส

3.1.2.2 สเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส

เนื่องจากเราต้องการความแม่นยำในตำแหน่งในการวัด ความสะดวก และความรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องมีสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส ซึ่งสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสสามารถหมุนได้ตำแหน่งที่แม่นยำและละเอียดกว่ามอเตอร์แบบทั่วไป โดยที่ความละเอียดสูงที่สุดของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟส คือ 0.72 องศาต่อสเต็ป เราจำเป็นต้องใช้สเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสสองตัวเนื่องจากต้องจะวัดค่าสนามแม่เหล็กในระนาบแกน X กับแกน Y ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องติดตั้งสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสสองตัวให้อยู่ในแกนเกลียวสองแกน ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 ติดตั้งสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสแบบแกนเกลียวสองแกน

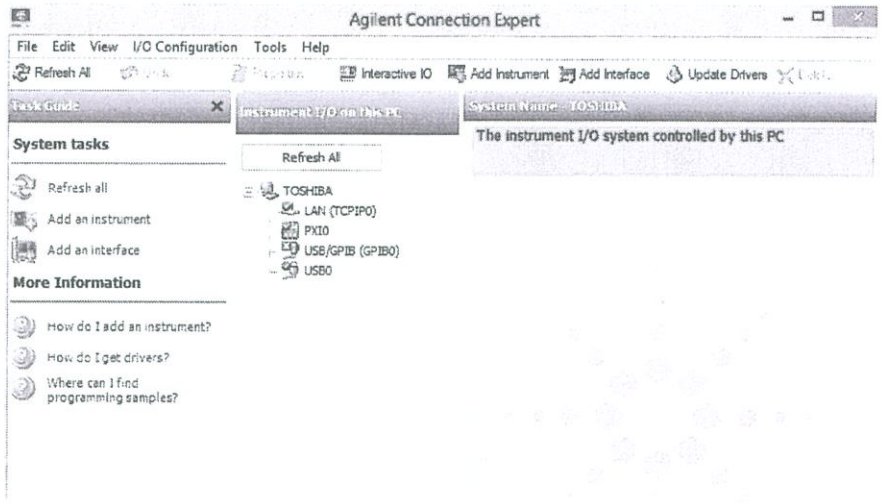
3.1.2.3 ภาคจ่ายไฟ

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

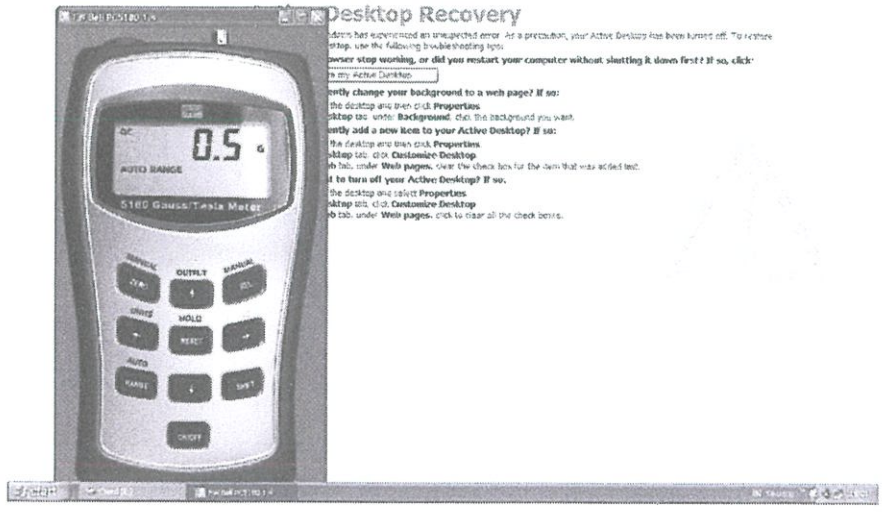
รูปที่ 3.6 หม้อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็น 110 V

3.1.3 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

เนื่องจากความต้องการให้เป็นระบบอัตโนมัติ ดังนั้นจำเป็นต้องมีโปรแกรมมาควบคุมและบันทึกผล คอมพิวเตอร์ปกติที่ต้องทำการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ดังนั้นต้องเริ่มจากติดตั้งโปรแกรมหรือ Driver เพื่อให้คอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ คือโปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 ดังรูป 3.7 เพื่อ USB/GPIB และโปรแกรม PC5180 1.4 เพื่อ FW BELL5180 Gaussmeter ดังรูป 3.8

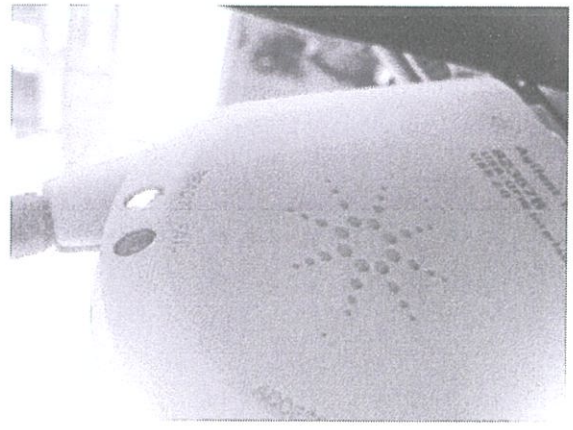


รูปที่ 3.7 โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16



รูปที่ 3.8 โปรแกรม PC5180 1.4

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



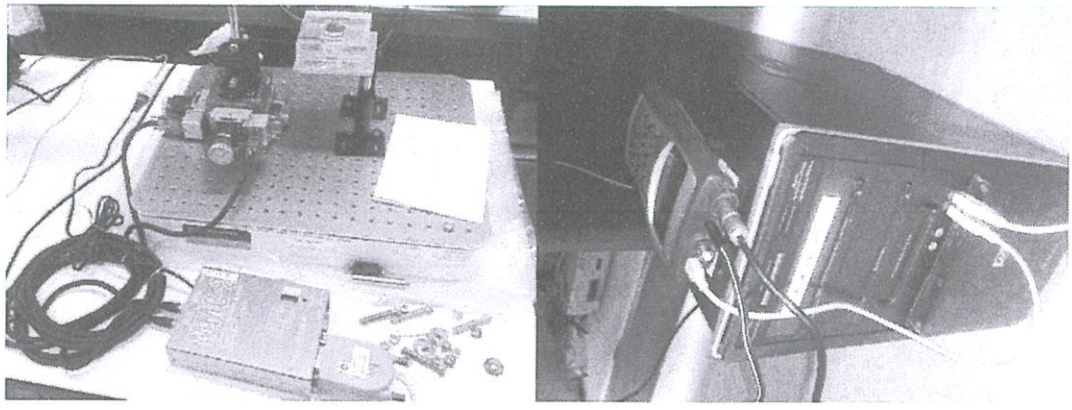
รูปที่ 3.9 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว

ต่อไปต้องเขียน User ให้ผู้ใช้งานด้วยโปรแกรม Visual basic โดยที่ User นี้ต้องสามารถควบคุมการทำงานของสเต็ปปิงมอเตอร์ 5 เฟสกับ FW BELL5180 Gaussmeter ให้ทำงานสัมพันธ์กันและต้องสามารถเก็บข้อมูลไว้ในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อสร้างกราฟให้ได้ ดังรูป 3.10 เมื่อเขียน User เสร็จแล้วให้จัดวางและติดตั้งระบบเพื่อวัดหาค่าสนามแม่เหล็ก การจัดวางและติดตั้งจะต้องวางไว้บนอุปกรณ์ทางแสงเพื่อให้แน่ใจว่าระบบของเราไม่มีการขยับหรือเปลี่ยนตำแหน่งขณะทำงาน ดังรูป 3.11

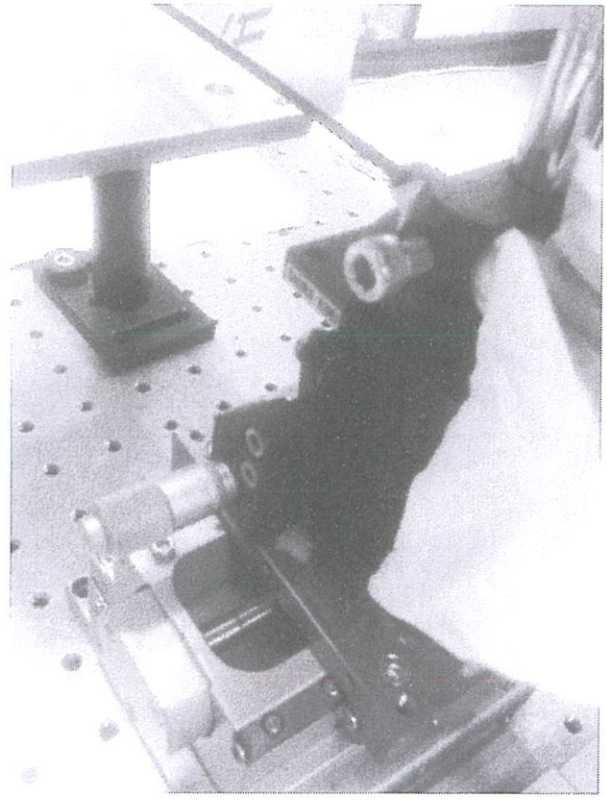
```
Bar.Maximum = axisx
For i As Integer = 0 To axisx

    If (i Mod 2 = 0) Then
        For j As Integer = 0 To axisy
            ReDim Preserve value(0 To j)
            value(j) = (connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
            data(i, j) = value(j)
            If (j <> axisy) Then
                mmc.WriteString("P:14P0")
                mmc.WriteString("P:15P0")
                mmc.WriteString(goy)
                Delay(timey.Text)
            End If
```

รูปที่ 3.10 แสดงการเขียนโค๊ดโปรแกรม Visual basic เพียงแค่บางส่วนเพื่อ User การใช้งาน

สำหรับส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งก็คือ ส่วนของการยึดหัววัดของ FW BELL5180 Gaussmeter ซึ่งต้องยึดให้ตรงและปรับระดับตามใจของผู้ใช้ได้ ดังนั้นจึงยึดด้วยเสาที่มีสเกลสามารถปรับระดับได้ตามสเกล ดังรูป 3.12 เมื่อจัดวางอุปกรณ์ทุกอย่างเรียบร้อยแล้วจากนั้นก็ทำการวัดตามขั้นตอนต่อไป



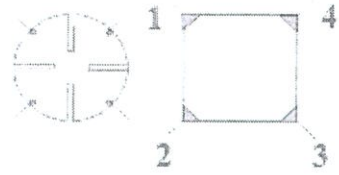
รูปที่ 3.11 การจัดวางและติดตั้งระบบเพื่อวัดหาค่าสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.12 แสดงการจับยึดหัววัดของ FW BELL5180 Gaussmeter

3.2 ระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

การวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ในที่นี้จะใช้เทคนิคแวนเดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ วิธีวัดก็คือต้องใช้เทคนิคแวนเดอร์พาวเพื่อหาค่า Sheet resistance ก่อนเนื่องจากต้องใช้ในการคำนวณหาค่าอื่นๆการวัดแบบแวนเดอร์พาวจะต้องต่อขั้วแบบแวนเดอร์พาวให้ถูกต้องดังรูปที่ 3.13

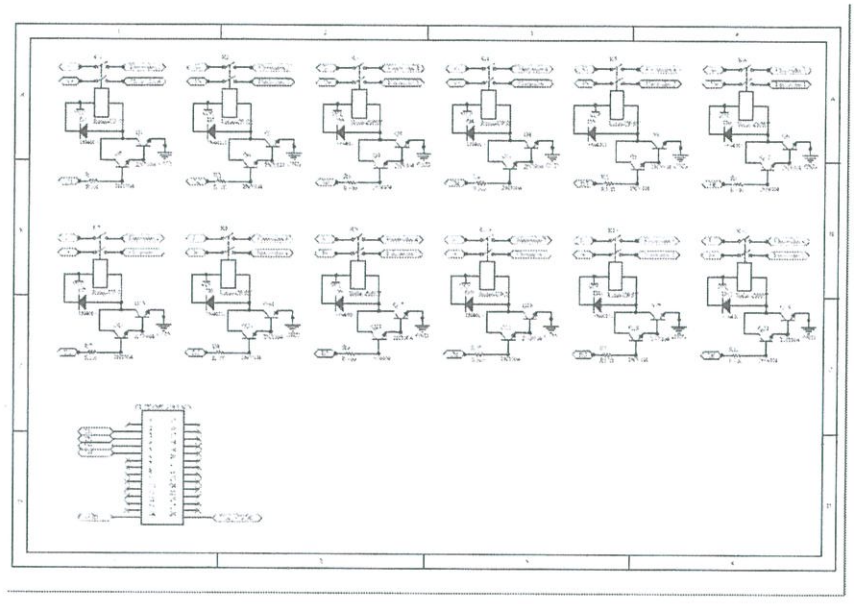


รูปที่ 3.13 การต่อขั้วแบบแวนเดอร์พาว

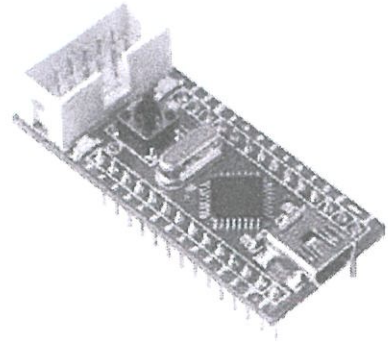
จากนั้นต้องจ่ายกระแสให้ไหลจากขั้วหนึ่งไปยังขั้วหนึ่ง (ตัวอย่างเช่นจ่ายกระแสจากขั้วที่หนึ่งไปยังขั้วที่สอง ; I12) และวัดแรงดันเทียบกันที่ขอบตรงกันข้าม จากตัวอย่างขอบตรงข้ามของขั้วที่หนึ่งและขั้วที่สองก็คือขั้วที่สามเทียบกับขั้วที่สี่จะได้ V43 ต่อไปให้นำค่ากระแสและแรงดันไปคำนวณหาค่าความต้านทานจากสมการ R12,43 = V43 / I12 และใช้วิธีเดิมนี้หา R43,12 , R14,23 และ R32,41 จากนั้นนำความต้านทานทั้งสี่ค่ามาเฉลี่ย (Rave = (R12,43 + R43,12 + R14,23 + R32,41)/4) และใช้สมการแวนเดอร์พาวคำนวณหาค่า Sheet resistance ; Rs สมการแวนเดอร์พาวคือ $Rs = (\pi Rave)/\ln(2)$ จะได้ค่าต่อไปคือค่า Resistivity ; ρ จาก $\rho = Rs(Thickness)$ เสร็จการวัดแบบแวนเดอร์พาวแล้วต่อไปจะวัดแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยต้องนำ Sample ใส่ไปในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจ่ายกระแสค่าคงที่ให้จากขั้วที่หนึ่งไปยังขั้วที่สามและวัดแรงดันขั้วที่สองเทียบกับขั้วที่สี่ ; Vh1 และจ่ายกระแสค่าคงที่ให้จากขั้วที่สองไปยังขั้วที่สี่และวัดแรงดันขั้วที่หนึ่งเทียบกับขั้วที่สาม ; Vh2 ซึ่งตามทฤษฎี Vh1 ต้องจะเท่ากับ Vh2 ต่อไปก็จะได้ค่า Sheet carrier concentration ; ns จาก$ns = |2x10^{-8}(IB)/q(Vh1 + Vh2)|$ Bulk carrier concentration ; Nb จาก $Nb = ns/Thicknees$ ค่า Mobility ; μ จาก $\mu = 1/(q(ns)(Rs)$ ค่า Conductivity ; σ จาก $\sigma = 1/\rho$ และชนิดของสารกึ่งตัวนำดูจากเครื่องหมายของแรงดันฮอลล์ถ้าตรงข้ามกับเครื่องหมายของกระแสแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแต่ถ้าเครื่องหมายเหมือนกับเครื่องหมายของกระแสแสดงว่าเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

3.2.1 วงจรสวิตซ์รีเลย์และตัวควบคุม

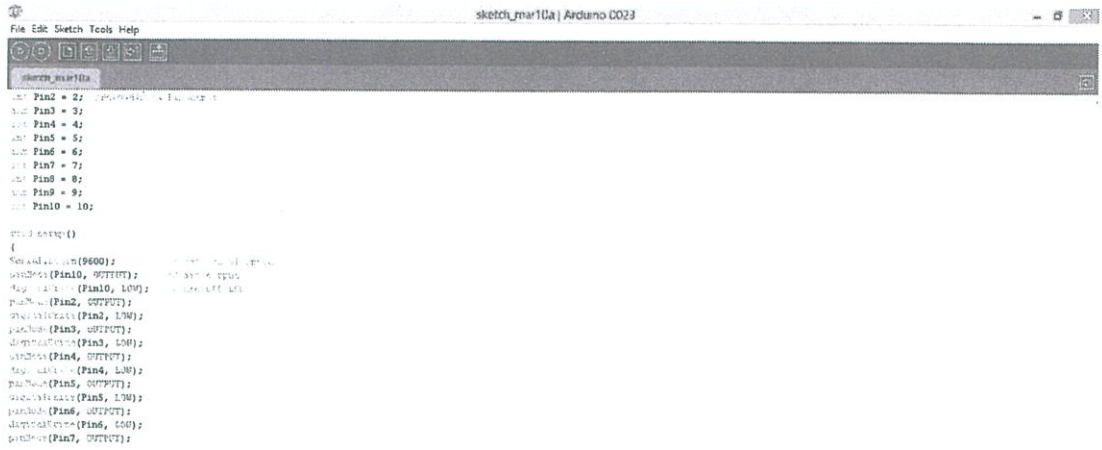
เนื่องจากการวัดแบบแวนเดอร์พาวต้องทำการสลับขั้วไฟฟ้าในการจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นวงจรสวิตซ์รีเลย์ ดังรูป 3.14 กับ 3.17 และตัวควบคุมจึงสำคัญมากสำหรับการวัดแบบแวนเดอร์พาวเพราะสามารถควบคุมการสับสวิตซ์ด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านตัวควบคุมได้ ตัวควบคุมที่ใช้ในโครงงานนี้ก็คือ ET-EASY168 STAMP ดังรูป 3.15 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กที่มีพอร์ดเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านสาย USB และสามารถใช้โปรแกรม Arduino23 ดังรูป 3.16 สั่งการโดยใช้ภาษาซีแล้วอัพโหลดลงบอร์ด



รูปที่ 3.14 วงจรสวิตซ์รีเลย์

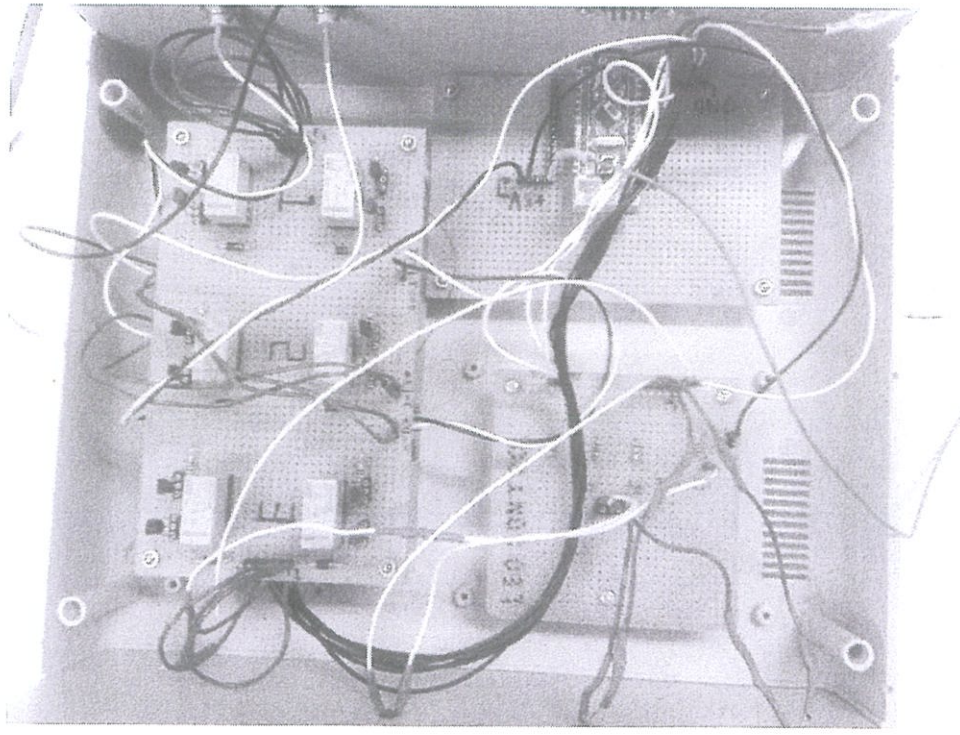


รูปที่ 3.15 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP

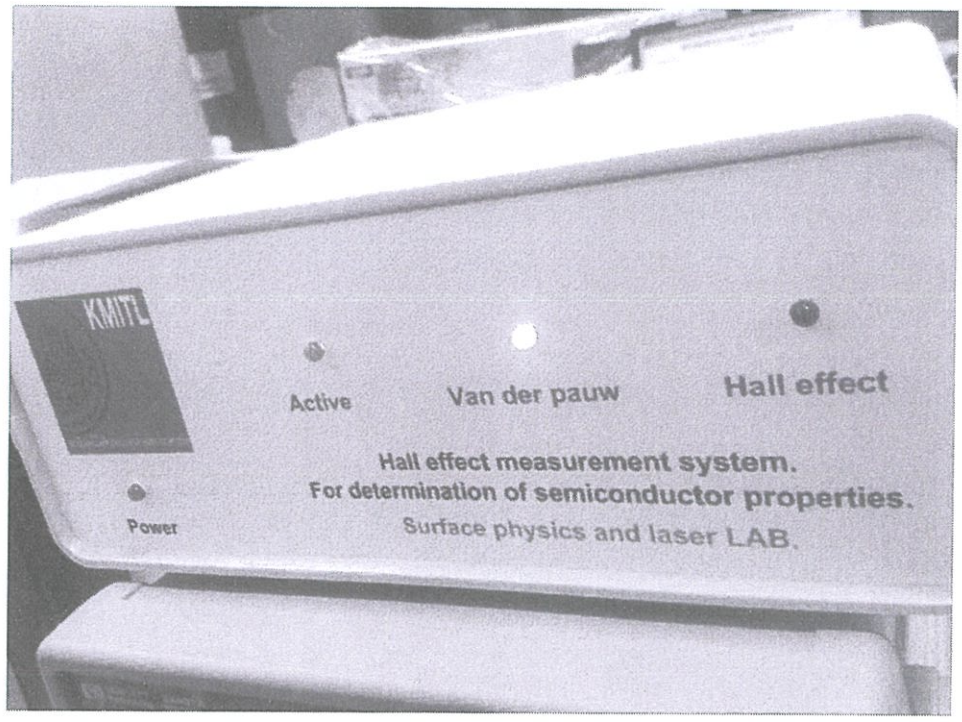


รูปที่ 3.16 โปรแกรม Arduino23

ตัวควบคุม ET-EASY168 STAMP นอกจากจะควบคุมวงจรสวิตซ์รีเลย์แล้ว ยังควบคุมไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่องอีกด้วย ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานจะติดอยู่ที่หน้าของเครื่องทั้งหมดสี่ดวง ดังรูป 3.18



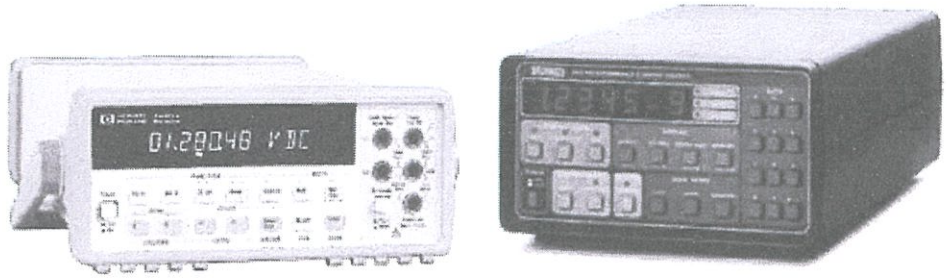
รูปที่ 3.17 วงจรสวิตซ์รีเลย์ และ ET-EASY168 STAMP ที่ถูกบรรจุลงกล่องแล้ว



รูปที่ 3.18 ไฟ LED แสดงสถานะการทำงานของเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

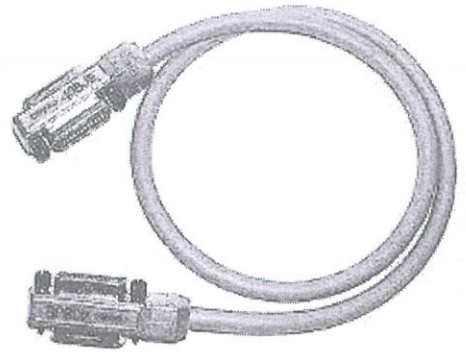
3.2.2 Digital multimeter และ Current source

เนื่องจากการวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิค แวนเดอร์พาวและปรากฏการณ์ฮอลล์ จะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นจะต้องมี Digital multimeter และ Current source เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังรูป 3.19



รูปที่ 3.19 Digital multimeter(ซ้าย) และ Current source(ขวา)

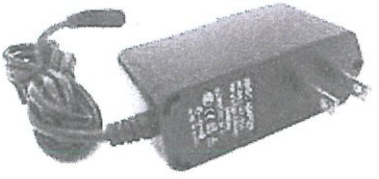
Digital multimeter และ Current source สามารถควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่าน GPIB/USB โดยการ Interface ปัญหาก็คือจะใช้สาย GPIB/USB หนึ่งสายควบคุมทั้งสองเครื่องพร้อมกันได้ยังไง คำตอบคือให้ใช้สาย 408JE ดังรูป 3.20 ต่อแบบขนานระหว่างเครื่องทั้งสองเครื่อง



รูปที่ 3.20 สาย 408JE ใช้ต่อขนานระหว่าง Digital multimeter กับ Current source

3.3.3 ภาคจ่ายไฟ

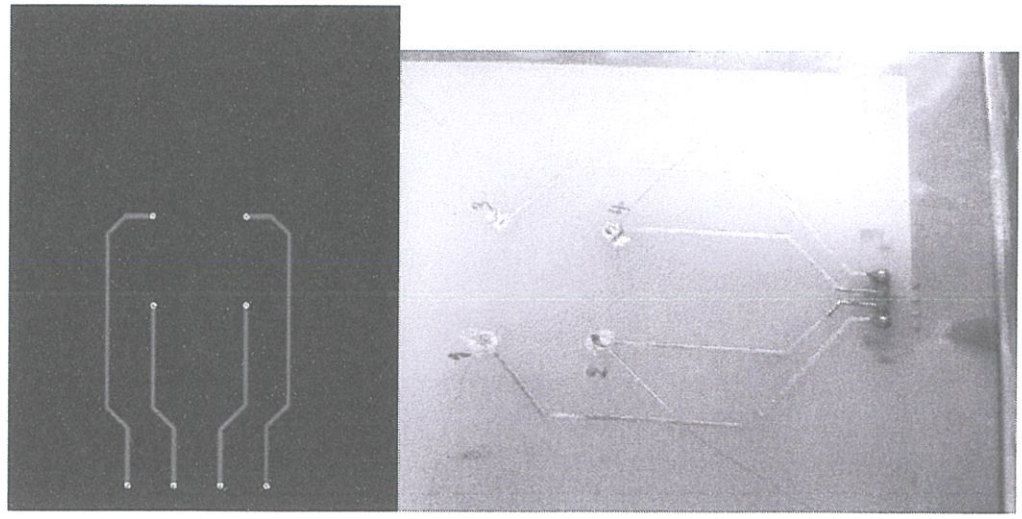
เนื่องจากวงจรสวิตซ์รีเลย์และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP จะต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้า 5 V จึงมี Adapter เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V เป็น ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้า 5 V ดังรูป 3.21



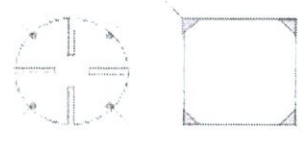
รูปที่ 3.21 Adapter 5 V ,1A

3.3.4 แผ่นวาง Sample

การวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ จำเป็นสร้างแผ่นวาง Sample ด้วยโปรแกรม Altium designer เพื่อนำไปกัดแผ่นพีซีบี เพื่อที่จะวาง Sample และต่อขั้วของ Sample เข้ากับ Digital multimeter เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ Sample และ Current source เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Sample ในลักษณะดังรูป 3.22 และ รูป 3.23



รูปที่ 3.22 แบบแผ่นวาง Sample ออกแบบด้วยโปรแกรม Altium designer(ซ้าย) แผ่นพีซีบีที่นำมากัดเป็นแผ่นสำหรับวาง Sample เสร็จเรียร้อยแล้ว(ขวา)

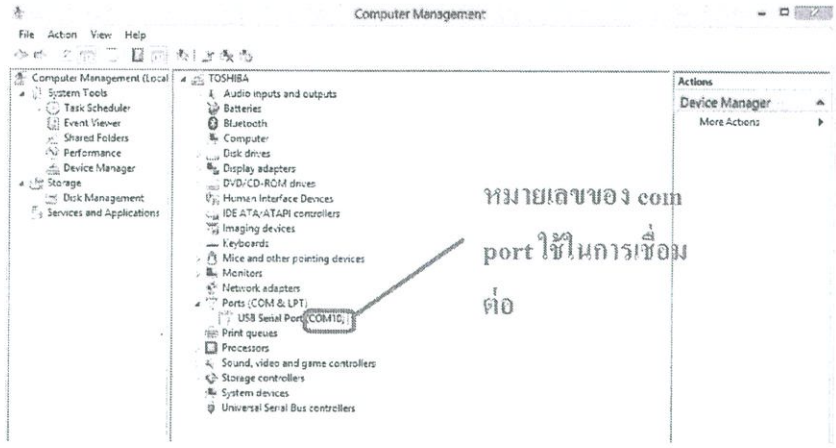


รูปที่ 3.23 ลักษณะการต่อขั้วของ Sample เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคแวนเดอร์พาวและเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์

3.3.5 โปรแกรมควบคุมและบันทึกผล

เนื่องจากคอมพิวเตอร์ต้องทำการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก จึงจำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมหรือ Driver เพื่อให้คอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ คือโปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 และโปรแกรมArduino0023

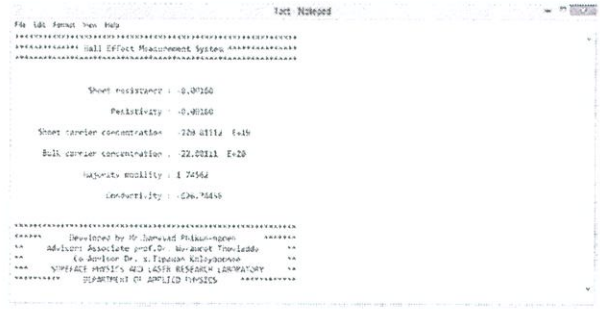
โปรแกรม Arduino0023 จะรวม Driver ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-EASY168 STAMP ไว้ในโปรแกรมแล้ว Driver ตัวนี้ชื่อ FTDI USB ซึ่งสามารถแยกลง Driver ตัวนี้ได้โดยไม่ต้องลงโปรแกรมArduino0023 วิธีเช็คว่า ET-EASY168 STAMP สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้หรือยัง ให้คลิ๊กขวาที่ My computer และคลิ๊กที่ Management หรือ Manage คลิ๊กที่ Device Manager ถ้าเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้วจะไม่มีเครื่องหมายตกใจและจะมีหมายเลขของ Comport ดังรูป 3.24



รูปที่ 3.24 ET-EASY168 STAMP สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว

ต่อไปต้องเขียน User ให้ผู้ใช้งานด้วยโปรแกรม Visual basic โดยที่ User นี้ต้องสามารถควบคุมการการทำงานของ ET-EASY168 STAMP ,Digital multimeter และ Current source ให้ทำงานสัมพันธ์กัน โดยเริ่มจากเขียนโค๊ดโปรแกรมจากโปรแกรม Arduino23 อัฟโหลดให้กับ ET-EASY168 STAMP เพื่อที่จะควบคุมวงจรสวิตซ์รีเลย์ และพร้อมรับคำสั่งจากโปรแกรม Visual basic ในคอมพิวเตอร์ จากนั้นเขียนโค๊ดในโปรแกรม Visual basic เพื่อสั่งงาน ET-EASY168 STAMP ,Digital multimeter และ Current source เพื่อที่จะวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

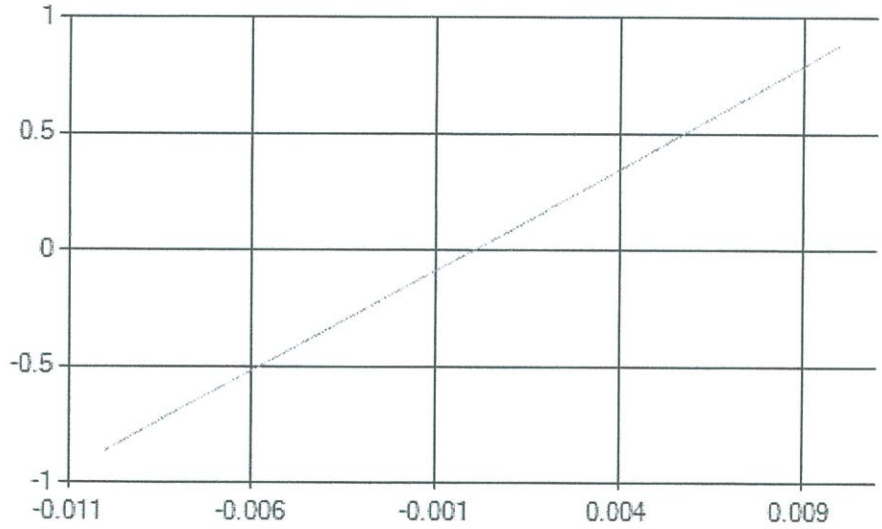
ผลจากการวัดนั้นจะต้องเขียนให้ Saveได้ทุกค่าที่วัดได้สำหรับค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ Save เป็นไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์เปิดได้หลายโปรแกรม ดังรูป 3.25 ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า Save เป็นไฟล์ XLSไว้ไดร์ใดไดร์หนึ่งของคอมพิวเตอร์ดังรูป 3.26 จะต้องใช้โปรแกรม Microsoft excel เปิดโปรแกรมเท่านั้น ส่วนกราฟเป็น Save ไฟล์ภาพ PNG ไว้ไดร์ใดไดร์หนึ่งของคอมพิวเตอร์ดังรูป 3.27



รูป 3.25 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ Save เป็นไฟล์ CSV เปิดด้วยโปรแกรม Notepad

	A	B	C	D	E	F	G
1	I(mA)	V(Volts) of R1,V43,I12	V(Volts) of R2,V12,I43	V(Volts) of R3,V23,I14	V(Volts) of R4,V14,I23	V(Volts) of R5,V24,I13	V(Volts) of R6,V13,I24
2	-10	-0.000107367	-9.30E-05	-8.59E-05	-0.000103833	-8.59E-05	-8.59E-05
3	-9	-0.0001217	-8.95E-05	-0.000100233	-0.000128867	-9.30E-05	-8.59E-05
4	-8	-0.0001217	-0.000114533	-6.80E-05	-0.000143167	-9.31E-05	-0.000125267
5	-7	-8.59E-05	-0.000110967	-8.95E-05	-0.000114533	-0.000128867	-0.0001002
6	-6	-0.000114567	-8.23E-05	-8.23E-05	-8.59E-05	-0.0001289	-8.23E-05
7	-5	-0.000128867	-8.95E-05	-8.95E-05	-7.87E-05	-9.66E-05	-0.0001217
8	-4	-9.31E-05	-8.95E-05	-0.000114533	-9.66E-05	-7.52E-05	-0.0001038
9	-3	-0.000136	-0.000114533	-0.0001396	-8.95E-05	-8.95E-05	-8.59E-05
10	-2	-9.66E-05	-0.0001002	-0.000110967	-0.0001181	-8.23E-05	-9.30E-05
11	-1	-9.66E-05	-0.0001253	-0.000178967	-0.000107367	-0.000103767	-8.95E-05
12	0	-7.87E-05	-9.31E-05	-0.000121667	-9.66E-05	-0.0001074	-0.000110967
13	1	-0.000125267	-9.31E-05	-0.000110933	-0.000132467	-8.95E-05	-8.59E-05
14	2	-9.31E-05	-0.000128867	-0.000128867	-0.000128867	-0.000114533	-0.000114533
15	3	-0.0001181	-9.66E-05	-3.94E-05	-0.000100233	-0.0001324	-8.95E-05
16	4	-0.0001396	-9.66E-05	-0.000110967	-0.000118133	-0.000114533	-8.95E-05
17	5	-9.31E-05	-0.000136	-0.000196867	-9.31E-05	-8.95E-05	-0.000121733
18	6	-0.000268467	-0.000128867	-0.000125267	-0.000118133	-9.67E-05	-0.0001217
19	7	2.15E-05	-0.000136033	-0.000136033	-0.000110967	-0.000128867	-0.000132433
20	8	-0.0003615	-7.88E-05	-0.000204033	-0.0001253	-0.000128867	-0.0001253
21	9	0.000293533	-9.66E-05	-7.88E-05	-7.52E-05	-9.66E-05	-9.30E-05
22	10	-0.000286367	-9.31E-05	-6.44E-05	-0.000128867	-8.59E-05	-7.87E-05
23							

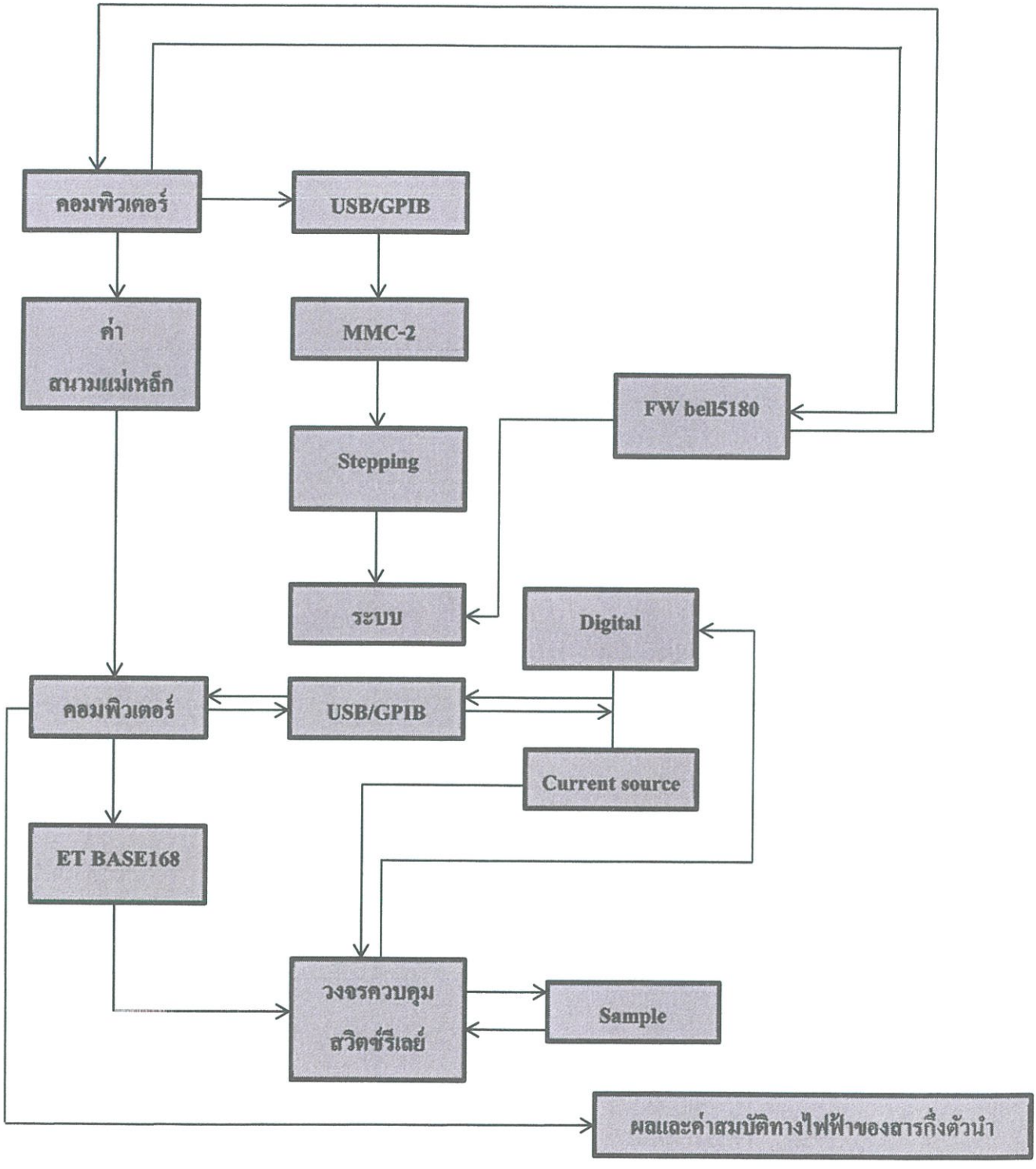
รูป 3.26 ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า Save เป็นไฟล์ XLS



รูป 3.27 กราฟเป็น Save ไฟล์ภาพ PNG

3.4 ระบบรวม

เมื่อระบบวัดค่าสนามแม่เหล็กกับระบบวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำมารวมกัน ดังรูปที่ 3.27 จะได้เครื่องมือวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและเป็นการใช้งานในแบบอัตโนมัติโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งใช้งานง่ายและสะดวกรวดเร็ว



รูป 3.28 ไดอะแกรมการทำงานของระบบรวม

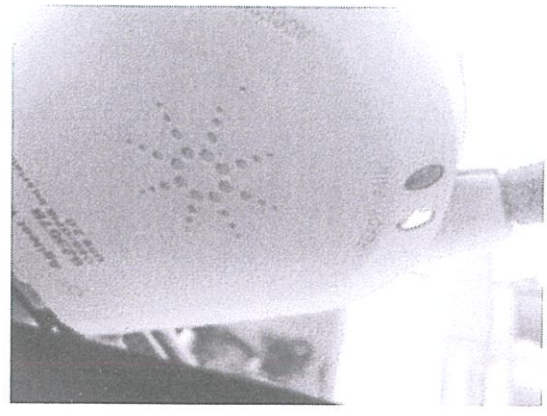
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

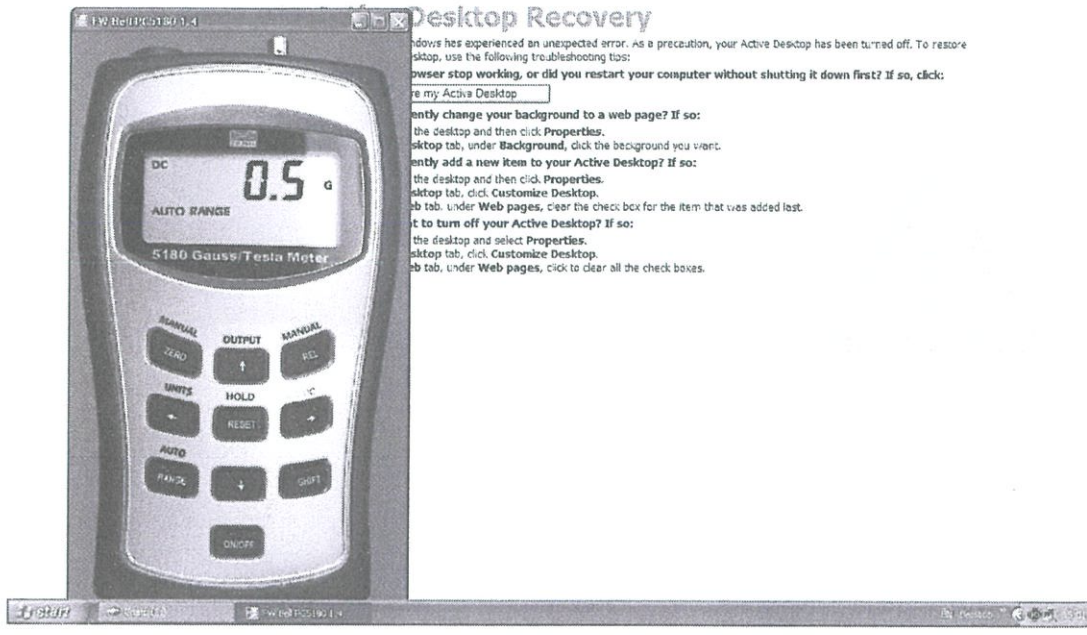
4.1 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก

สำหรับจุดมุ่งหมายในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก เพื่อสนองความต้องการที่อยากทราบว่าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กนั้นมีค่าคงที่หรือไม่ ถ้าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กคงที่ จึงจะนำค่าสนามแม่เหล็กไปใช้ในการคำนวณในระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำต่อไปได้ แต่ถ้าค่าสนามแม่เหล็กในแท่นแม่เหล็กมีค่าไม่คงที่จะนำค่าสนามแม่เหล็กไปคำนวณในระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ได้ ดังนั้นต้องทำการจัดยึดแม่เหล็กใหม่หรือเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่เหล็กเพื่อให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กที่คงที่ให้ได้

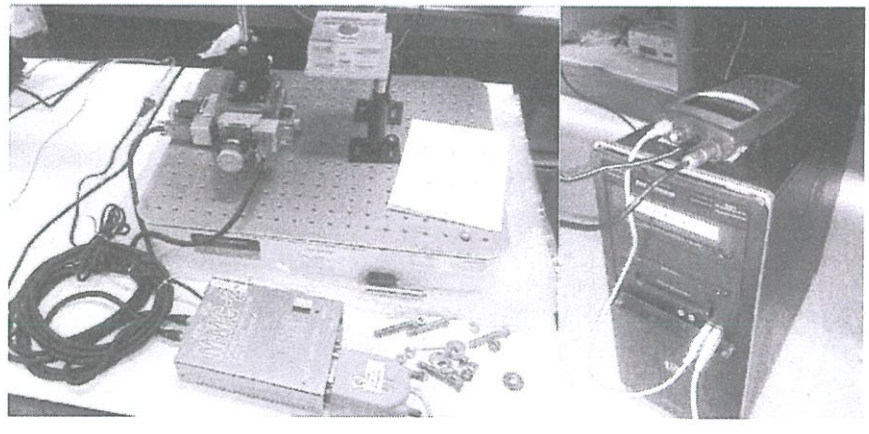
เริ่มจากการติดตั้งโปรแกรม Interface Gaussmeter and MMC-2 For scan Full V.1 , โปรแกรมAgilent connection expert IO Library suite 16 และ โปรแกรม PC5180 1.4 ให้เรียบร้อย จากนั้นจัดวางอุปกรณ์และเชื่อมต่ออุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 4.3 รอประมาณหนึ่งนาทีสังเกต LED ที่สาย USB/GPIB จะติดเป็นสีเขียวอ่อนที่คำว่า “READY” ดังรูปที่ 4.1 แสดงว่า USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว ต่อไปให้เปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ถ้าสามารถเปิดโปรแกรม PC5180 1.4ได้ ดังรูปที่ 4.2 แสดงว่าคอมพิวเตอร์เชื่อมกับ Gauss meterได้แล้ว และระบบพร้อมที่จะวัดแล้ว



รูปที่ 4.1 USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้



รูปที่ 4.2 คอมพิวเตอร์สามารถเชื่อมกับGauss meterได้ จะสามารถเปิดโปรแกรม PC5180 1.4 ได้

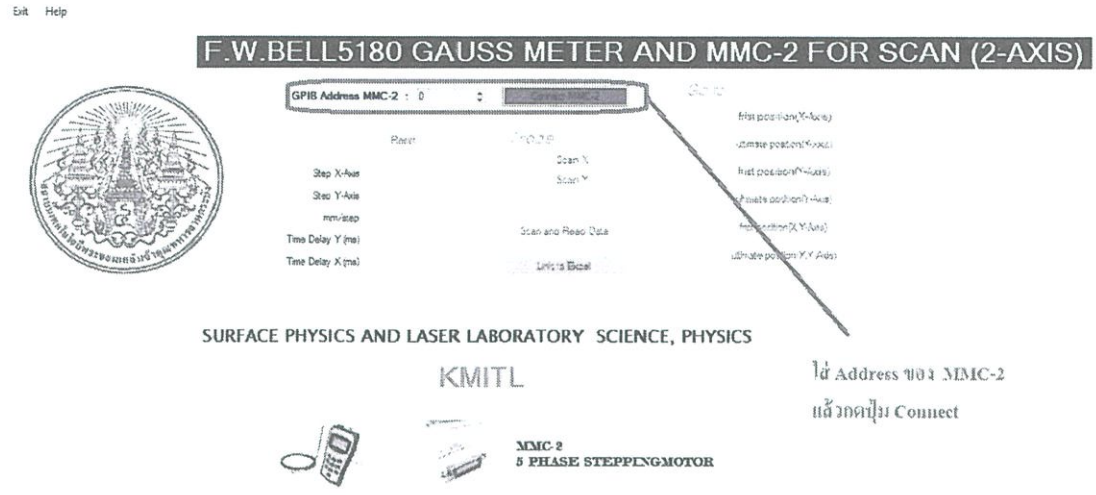


รูปที่ 4.3 การจัดวางอุปกรณ์กับระบบวัดค่าสนามแม่เหล็ก

จากนั้นเปิดโปรแกรม Interface Gaussmeter and MMC-2 For scan Full V.1 และทำตามขั้นตอนดังนี้

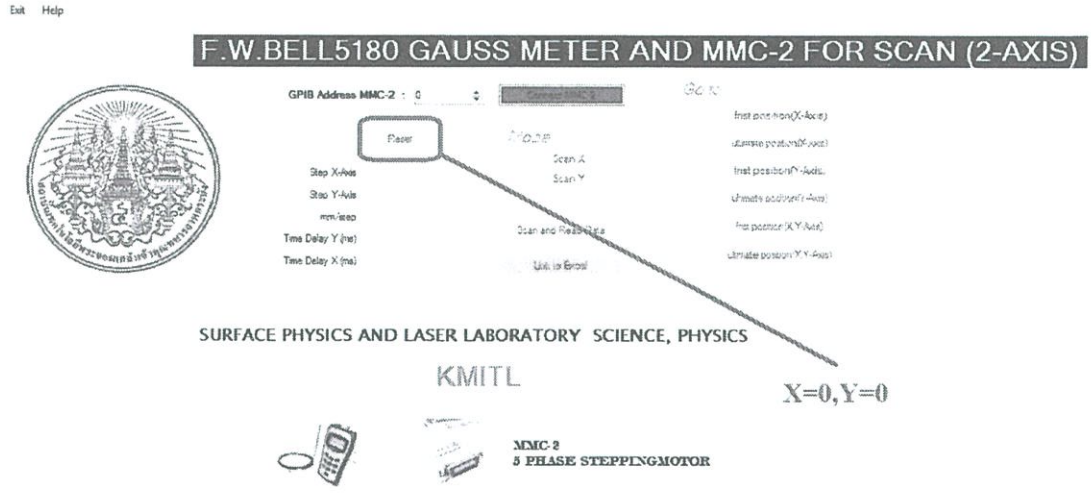
1. ป้อนค่า Address ของ MMC-2 ปกติคือเลข 7 จากนั้นคลิ๊ก Connect MMC-2 ดังรูปที่ 4.4 ถ้า Address ถูกต้องปุ่มกดจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวและชื่อปุ่มจะเปลี่ยนเป็น Connected กรณีไม่ทราบ

Address ให้ใช้โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 ซึ่งสามารถบอก Address ผู้ใช้งานได้



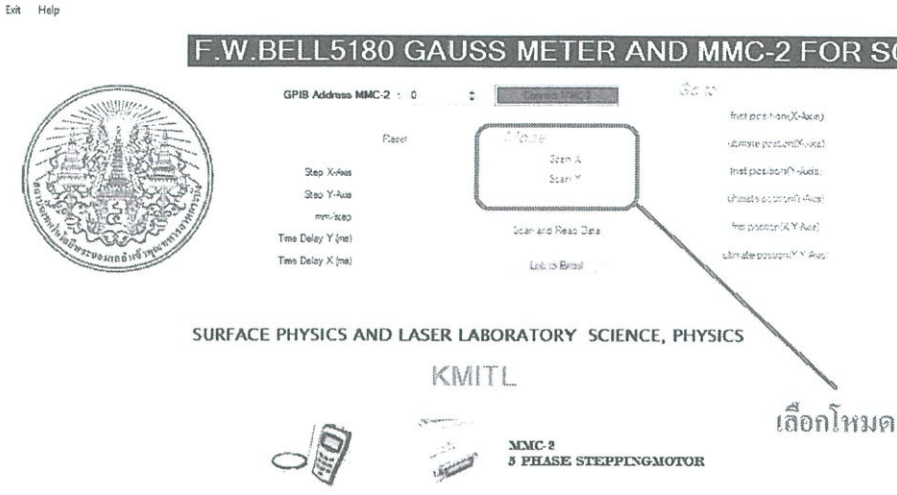
รูปที่ 4.4 ใส่ Address ของ MMC-2 และ คลิ๊กที่ปุ่ม Connect MMC-2

2. คลิ๊ก RESET เพื่อให้ตำแหน่งเริ่มต้นเป็น X=0 ,Y=0 ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 คลิ๊ก RESET เพื่อให้ตำแหน่งเริ่มต้นเป็น X=0 ,Y=0

3. เลือกโหมดการสแกนในเมนูโหมด ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 เมนูโหมดการสแกน

4. ตั้งค่าการสแกนค่าที่ต้องการต่อไปนี้

- ค่า Step X-Axis คือ จำนวนครั้งในการสแกน X

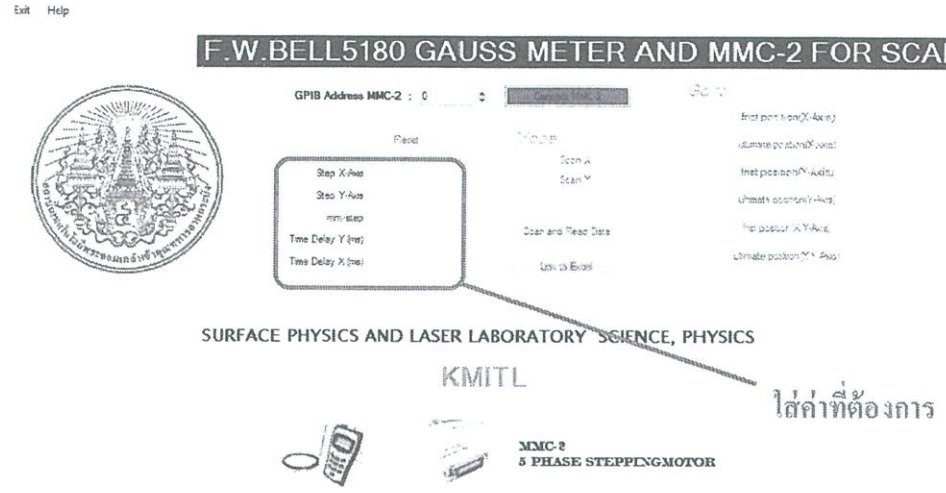
- ค่า Step Y-Axis คือ จำนวนครั้งในการสแกน Y

- ค่า mm/step คือ ระยะการเปลี่ยนตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งมีหน่วยเป็น มม.

- ค่า Time delay X คือ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน X

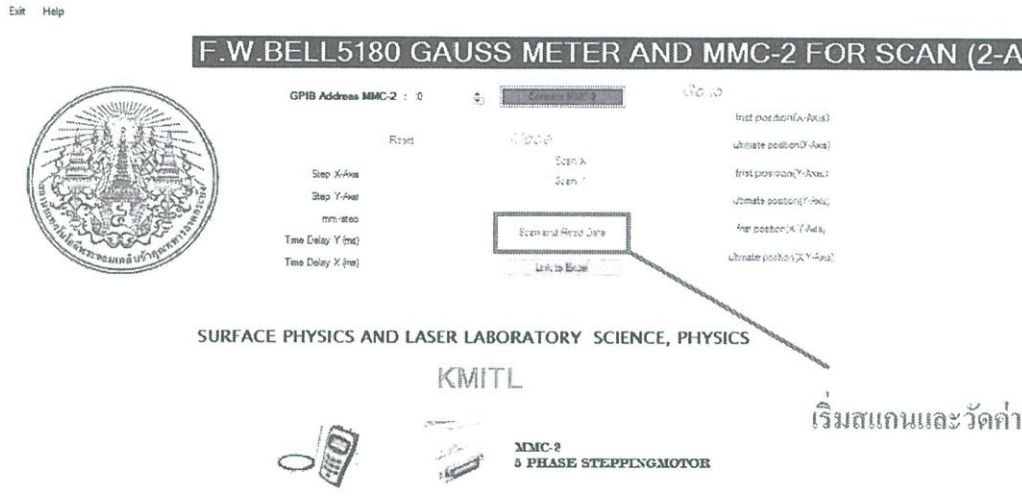
- ค่า Time delay Y คือ เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกน Y

- ค่าทุกค่าใส่ในตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.6



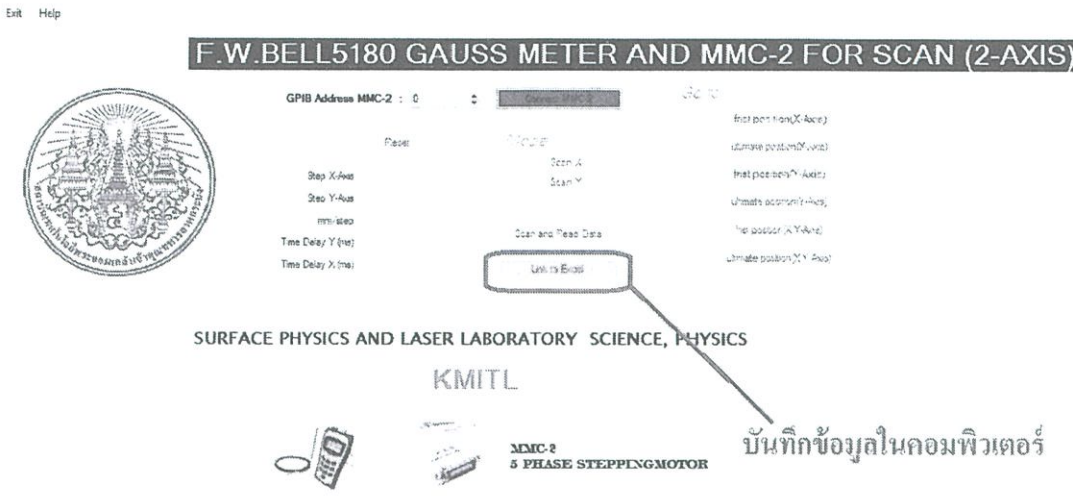
รูปที่ 4.6 ใส่ค่าที่ต้องการตามตำแหน่ง

5. คลิ๊กที่ปุ่ม Scan and Read Data เพื่อเริ่มสแกนและวัดค่า ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 เริ่มสแกนและวัดค่า

6. สแกนเสร็จแล้วจะมีข้อความขึ้นว่า Finish scan ให้คลิ๊กที่ปุ่ม Link to excel ดังรูปที่ 4.7 เพื่อบันทึกข้อมูล ถ้าบันทึกสำเร็จจะมีข้อความว่า Link to excel complete และข้อมูลจะถูก Link ไปไดร์ใดไดร์หนึ่งในคอมพิวเตอร์ชื่อไฟล์ “Value from gauss meter.xls”



รูปที่ 4.7 บันทึกข้อมูลไปยังโปรแกรม Microsoft excel

7. เมื่อเปิดไฟล์ "Value from gauss meter.xls" ในโปรแกรม Microsoft excel ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของ String ให้สังเกตที่หน่วยของข้อมูลจะมีตัวอักษรติดมาด้วย ดังรูปที่ 4.8 เพราะฉะนั้นต้องตัดอักษรที่ติดมาและเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในรูปของตัวเลขก่อนที่จะสร้างกราฟ ตัดอักษรที่ติดมาและเปลี่ยนข้อมูลให้อยู่ในรูปของตัวเลข ดังรูปที่ 4.9 ด้วยคำสั่ง

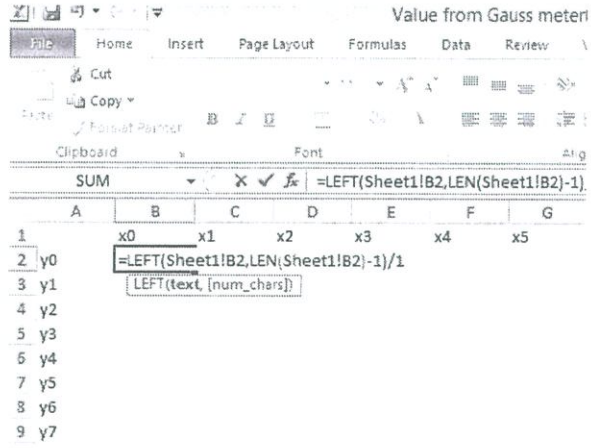
" =LEFT(Sheet1!B2,LEN(Sheet1!B2)-1)/1 " ดังรูปที่ 4.10

	A	B	C	D	E	F	G
1	Y / X	X0	X1	X2	X3	X4	X5
2	Y0	-323G	-331G	-337G	-344G	-350G	-357G
3	Y1	-328G	-335G	-343G	-350G	-356G	-362G
4	Y2	-334G	-340G	-348G	-355G	-361G	-367G
5	Y3	-339G	-346G	-353G	-360G	-366G	-372G
6	Y4	-344G	-351G	-358G	-365G	-370G	-376G
7	Y5	-349G	-356G	-363G	-369G	-375G	-380G
8	Y6	-354G	-361G	-368G	-373G	-378G	-383G
9	Y7	-358G	-365G	-371G	-377G	-381G	-386G
10	Y8	-362G	-369G	-375G	-380G	-384G	-388G
11	Y9	-366G	-372G	-378G	-383G	-386G	-389G

รูปที่ 4.8 ข้อมูลในรูปของ String ไม่สามารถสร้างกราฟได้

	A	B	C	D	E	F	G
1	Y/X	x0	x1	x2	x3	x4	x5
2	y0	-323	-331	-337	-344	-350	-357
3	y1	-328	-335	-343	-350	-356	-362
4	y2	-334	-340	-348	-355	-361	-367
5	y3	-339	-346	-353	-360	-366	-372
6	y4	-344	-351	-358	-365	-370	-376
7	y5	-349	-356	-363	-369	-375	-380
8	y6	-354	-361	-368	-373	-378	-383
9	y7	-358	-365	-371	-377	-381	-386
10	y8	-362	-369	-375	-380	-384	-388
11	y9	-366	-372	-378	-383	-386	-389

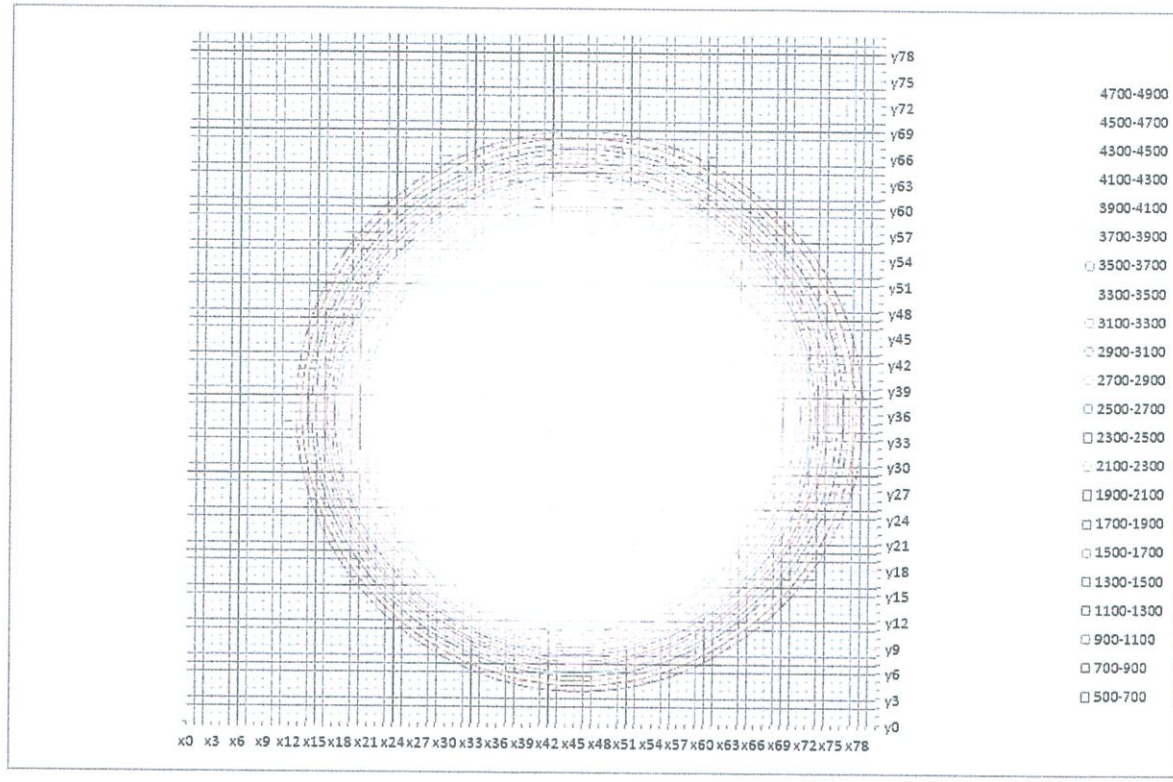
รูปที่ 4.9 ข้อมูลในรูปของตัวเลขสามารถสร้างกราฟได้



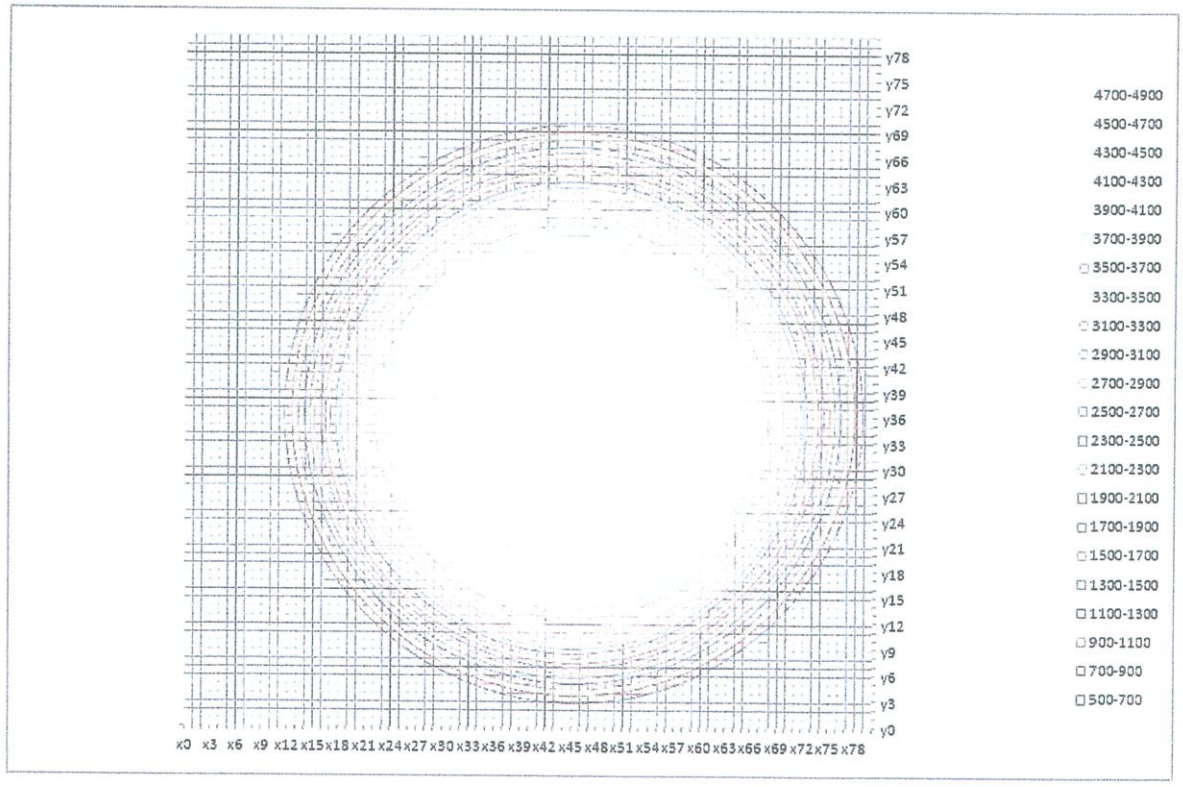
รูปที่ 4.10 ใช้คำสั่งตัดตัวอักษรสุดท้ายและทำ String เป็นตัวเลข

4.1.1 ผลการทดลอง

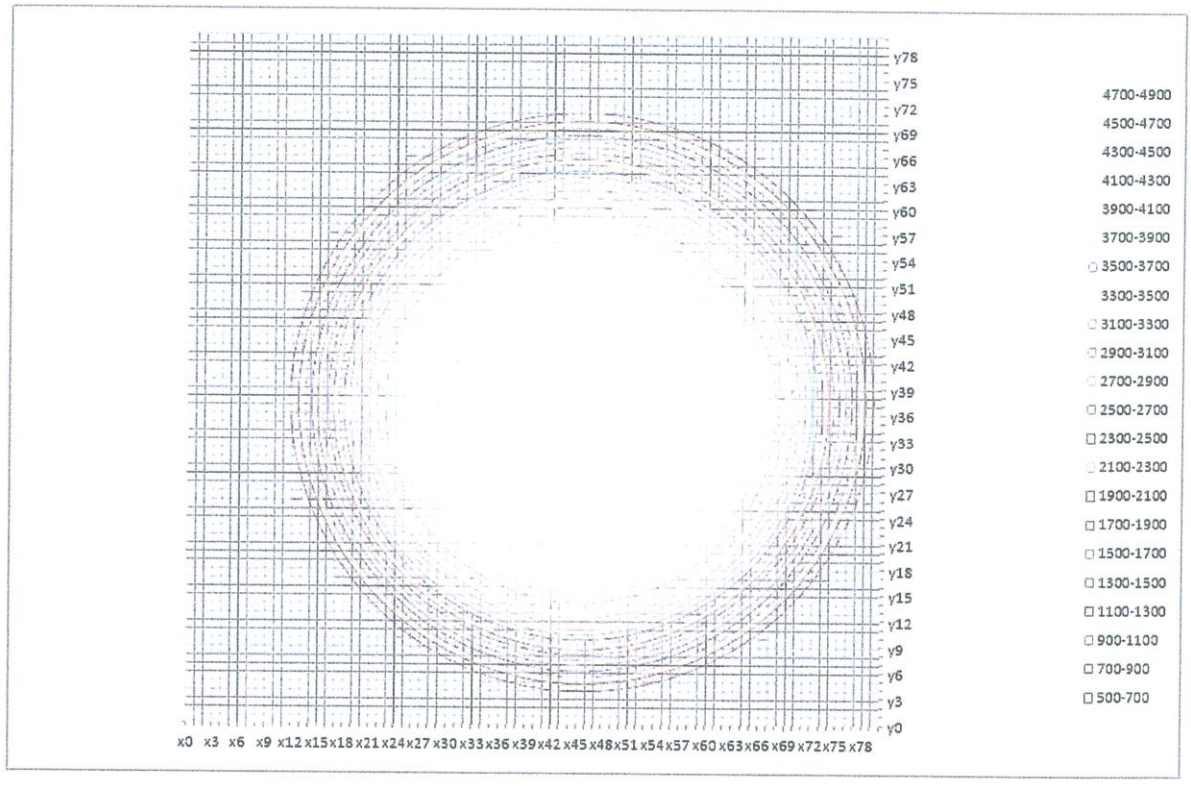
ผลการทดลองที่ได้จากสแกนหาค่าสนามแม่เหล็กจะออกมาเป็นกราฟแบบพื้นผิว มีสเกลตำแหน่งของพื้นที่ในระนาบแกน X และแกน Y ในตำแหน่งแกน Z ใดๆ เราทำการสแกนโดยให้แกน Z คงที่ค่าหนึ่งคือห่างจากแม่เหล็กด้านบน 1 มม. เมื่อสแกนเสร็จแล้วก็เปลี่ยนตำแหน่งแกน Z เป็นห่างจากแม่เหล็กด้านบน 2 มม. เมื่อสแกนเสร็จแล้วก็เปลี่ยนตำแหน่งแกน Z อีกครั้งและสแกนทำแบบนี้ไปเรื่อยๆตามลำดับจนถึงตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 9 มม. และได้ผลจากการสแกนหาค่าสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.11 – รูป 4.19



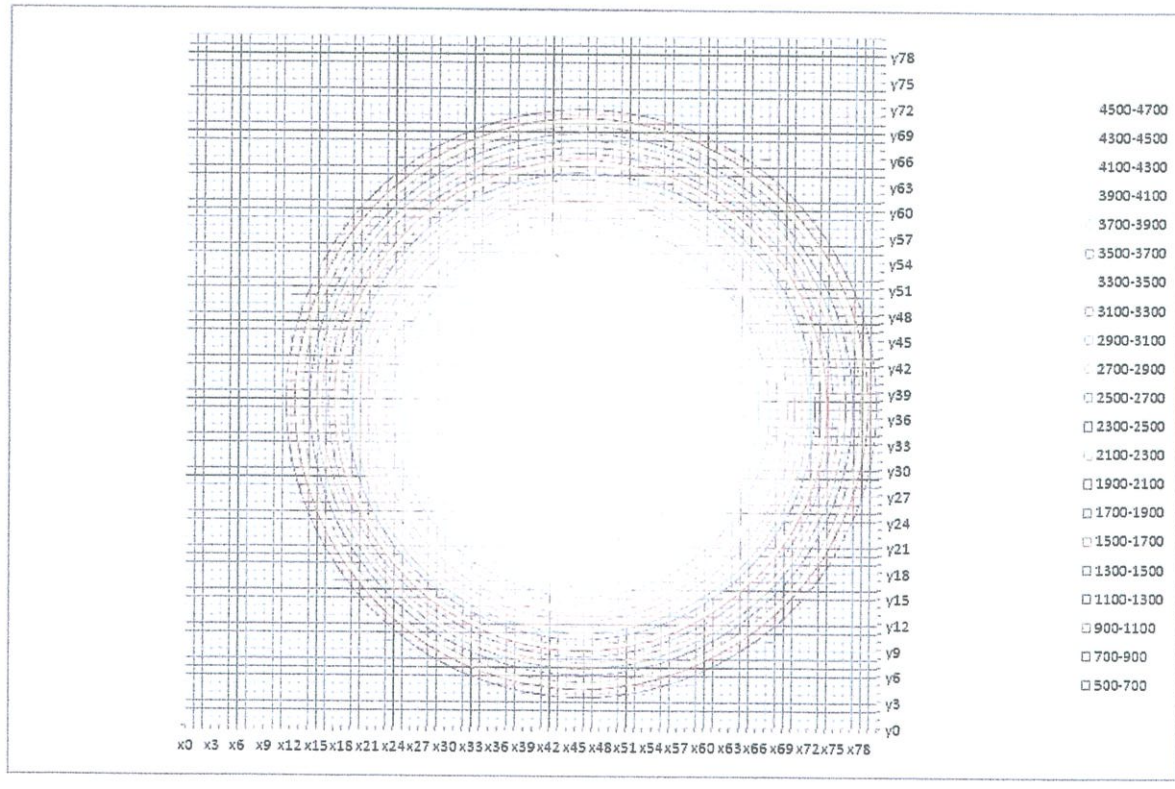
รูปที่ 4.11 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 1 มม.



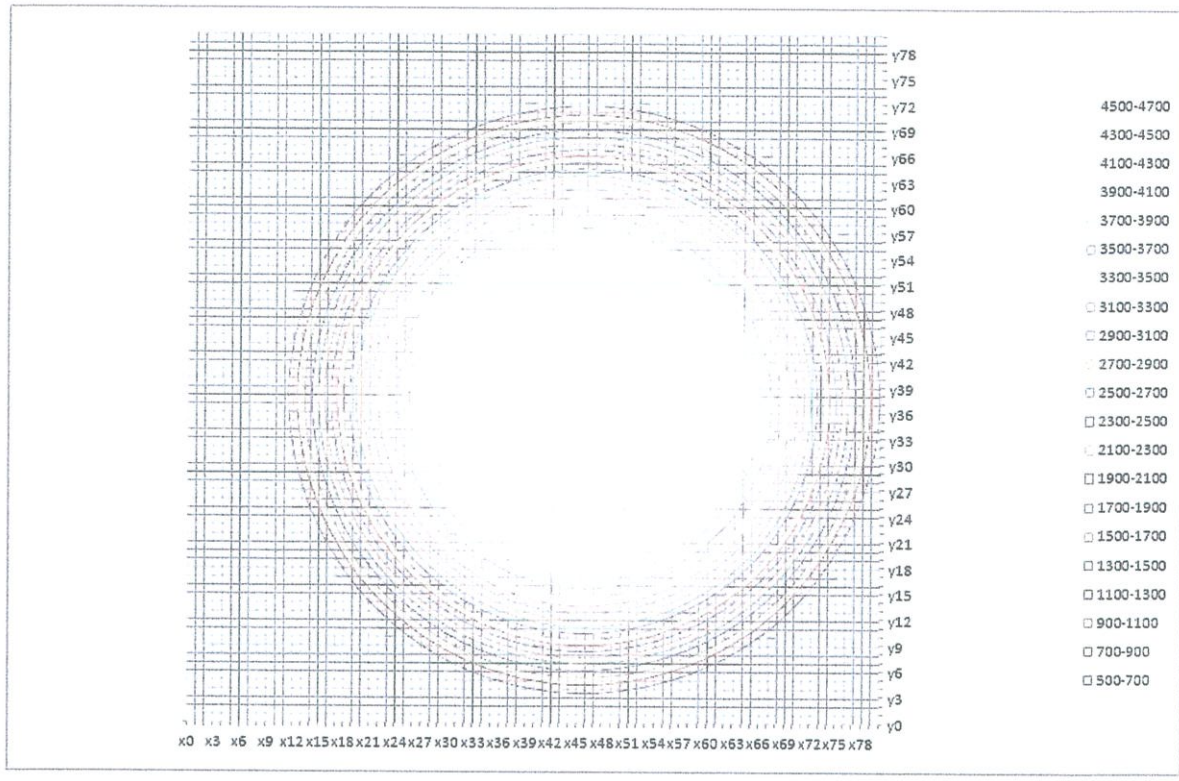
รูปที่ 4.12 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 2 มม.



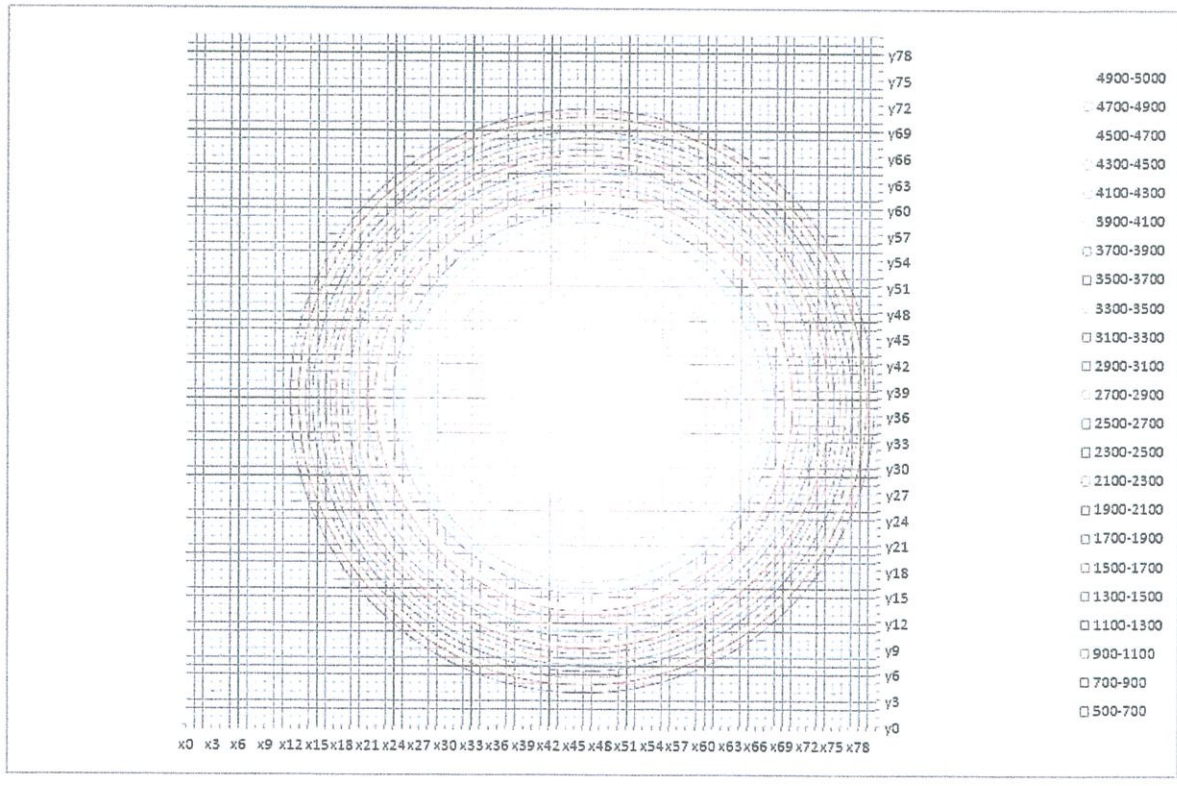
รูปที่ 4.13 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 3 มม.



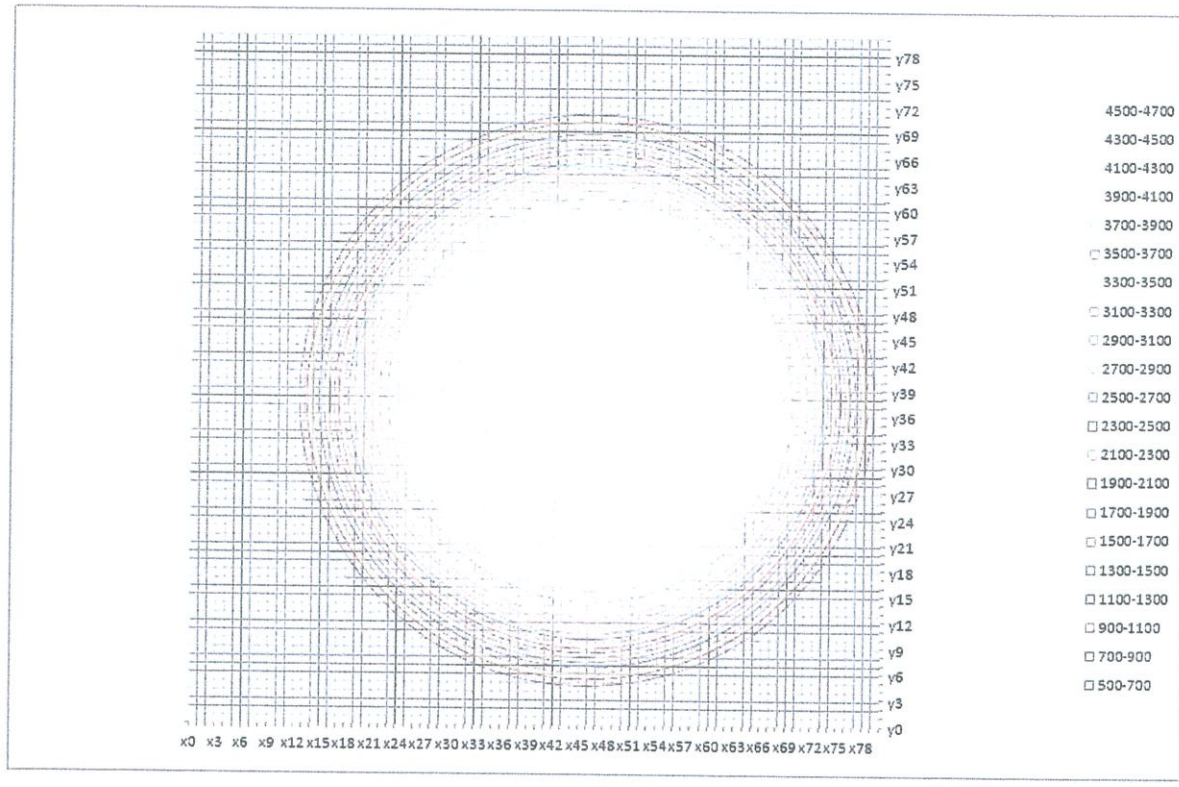
รูปที่ 4.14 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 4 มม.



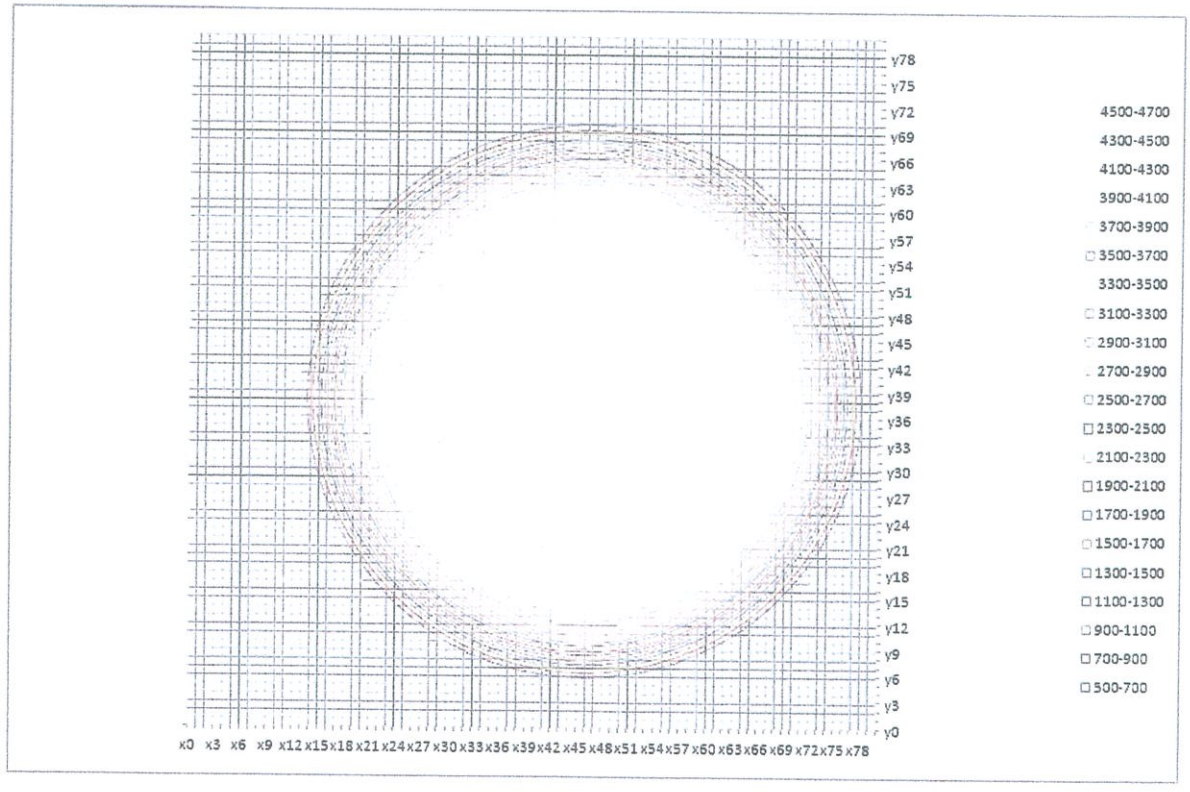
รูปที่ 4.15 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 5 มม.



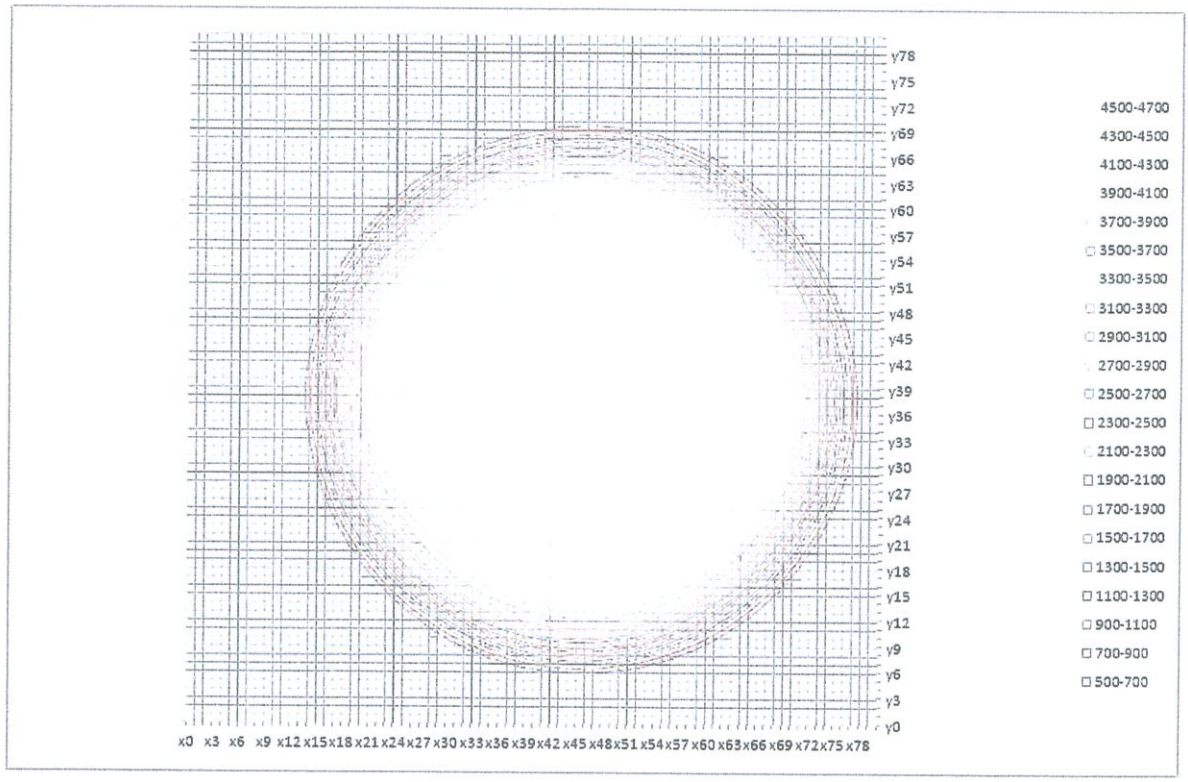
รูปที่ 4.16 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 6 มม.



รูปที่ 4.17 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 7 มม.



รูปที่ 4.18 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 8 มม.

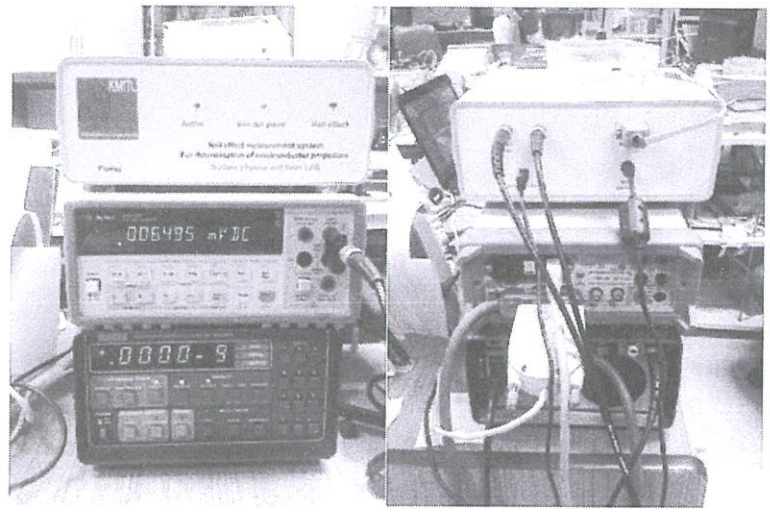


รูปที่ 4.19 ค่าของสนามแม่เหล็กตำแหน่งที่แกน Z ที่ห่างจากแม่เหล็กด้านบน 9 มม.

4.2 ขั้นตอนการวัดกับระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

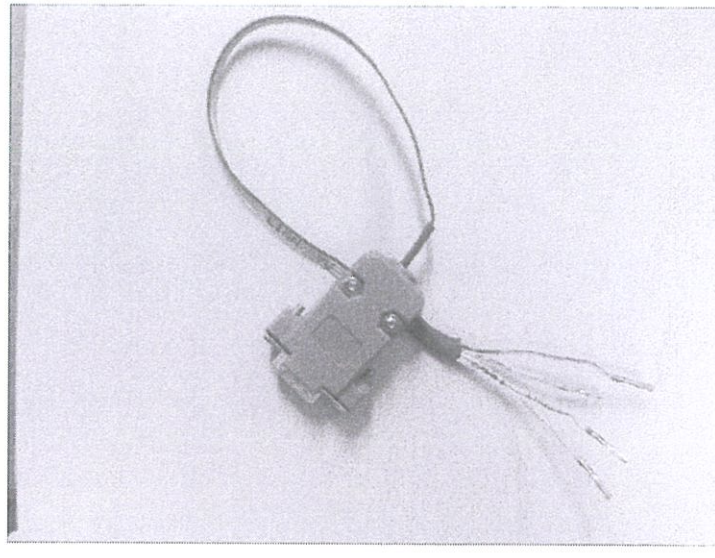
ชิ้นงานที่ใช้ทดลองคือ Si wafer สองชิ้นที่ทราบค่าความหนาและค่า Resistivity ซึ่งข้อมูลมาจากบริษัทที่น่าเชื่อถือที่ทำการขายชิ้นงานสองชิ้นนี้ ส่วนค่า Bulk carrier concentration ทราบจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ซึ่งเป็นค่าที่น่าเชื่อถือ ดังนั้นเราจึงทำการกับเครื่องมือของเราเพื่อเปรียบเทียบผลจากการวัดว่าได้ผล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

เริ่มจากการติดตั้งโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1 ,โปรแกรม Agilent connection expert IO Library suite 16 และ โปรแกรม Arduino0023 ให้เรียบร้อย จากนั้นจัดวางอุปกรณ์และเชื่อมต่ออุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ให้เรียบร้อยรอประมาณหนึ่งนาทีสังเกต LED ที่สาย USB/GPIB จะติดเป็นสีเขียวอ่อนที่คำว่า “READY” แสดงว่า USB/GPIB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้แล้ว ต่อไปให้เช็คว่า ET-EASY168 STAMP สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้เรียบร้อย ดังรูปที่ 4.20

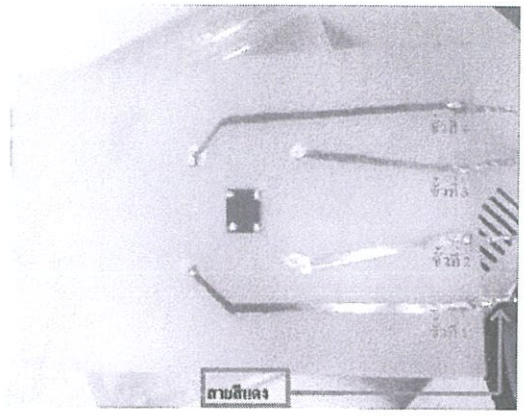


รูปที่ 4.20 รูปการจัดวางอุปกรณ์เพื่อวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

การเชื่อมต่อเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเข้ากับแผ่นวาง Sample นั้น ต้องต่อให้ถูกขั้วด้วย โดยให้ใช้สายต่อจากเครื่องไปยังแผ่นวาง Sample ที่ได้จัดทำไว้ให้ ดังรูปที่ 4.21 และให้ใช้สายสีแดงต่อที่ขั้วที่หนึ่ง แล้วสายถัดไปก็คือขั้วที่สอง ขั้วที่สาม ขั้วที่สี่ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 ถ้าต่อไม่ถูกขั้วจะทำให้ไม่สามารถเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำได้ถูกต้อง จากนั้นให้เปิดโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1 จะอยู่ในหน้า Setting และทำตามขั้นตอนการวัด



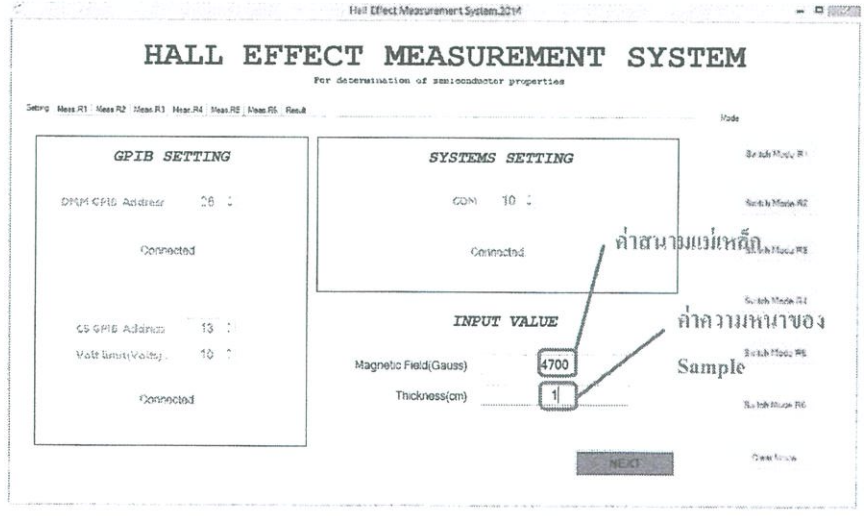
รูปที่ 4.21 สายต่อจากเครื่องเครื่องวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไปยังแผ่นวาง Sample



รูปที่ 4.22 การต่อขั้วกับแผ่นวาง Sample แบบถูกต้อง

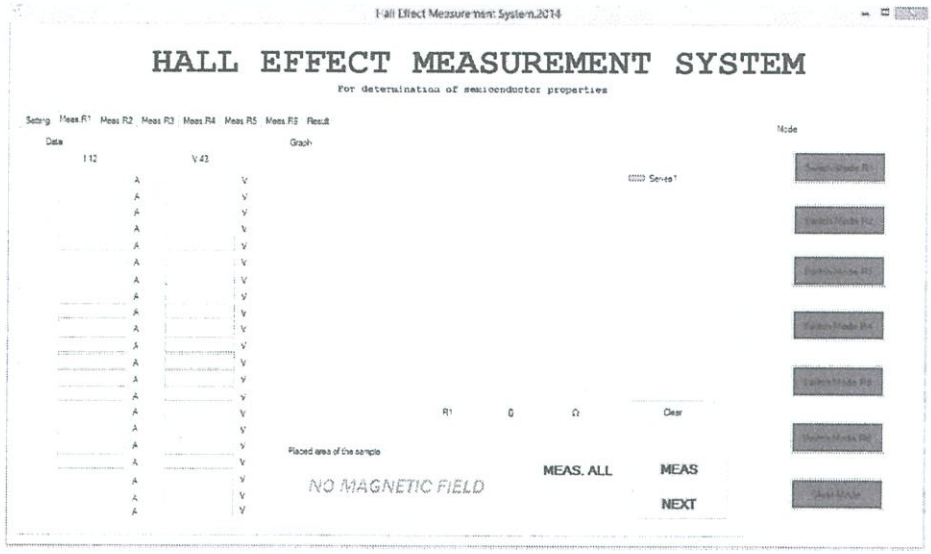
ต่อไปคือส่วนของขั้นตอนการวัดมีดังต่อไปนี้

1. เชื่อมต่ออุปกรณ์ทุกอย่างให้เรียบร้อยโดยการป้อน Address, Volt limit และหมายเลข Comport จากนั้นคลิ๊กที่ปุ่ม Connect ถ้าเชื่อมต่อ Digital multimeter หน้าจอของ Digital multimeter จะแสดง " _ _ _ . _ _ _ " ส่วน Current source LED ที่เครื่อง Current source จะติดที่คำว่า "LISTEN" และLED ที่เครื่อง Hall effect measurement system จะกระพริบที่คำว่า Active และปุ่ม Connect ในโปรแกรมทุกปุ่มจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและแสดงคำว่า Connected ต่อไปให้ป้อนค่าสนามแม่เหล็กในช่อง Magnetic fiend(Gauss) และค่าความหนาของ Sample ในช่อง Thickness(cm) ดังรูปที่ 4.23

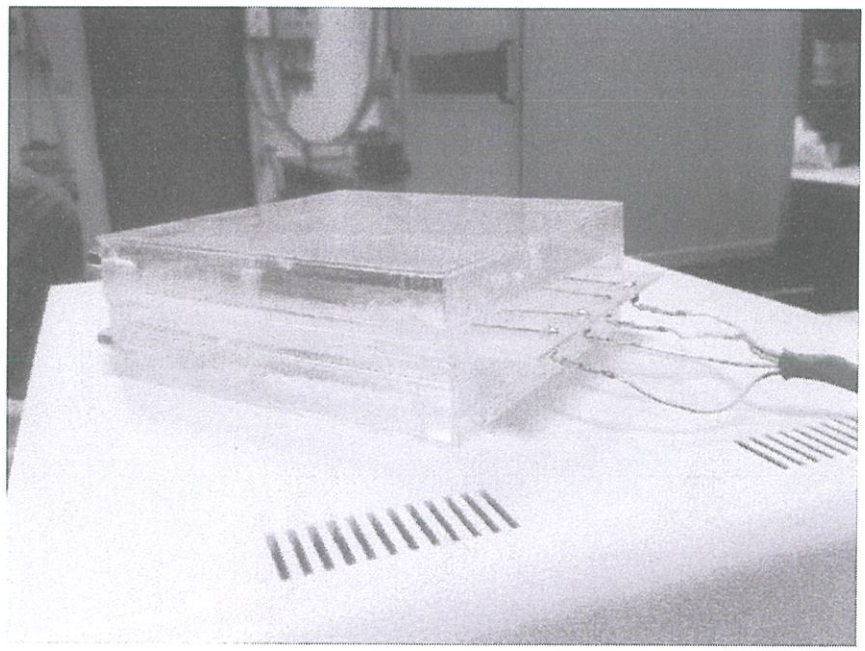


รูปที่ 4.23 Connect อุปกรณ์ และใส่ค่าสนามแม่เหล็กกับความหนาของ Sample

2. ให้คลิ๊กที่ปุ่ม NEXT จะแสดงแท็บถัดไปคือแท็บ MeasR1 ดังรูปที่ 4.24 ต่อไปให้ใส่ Sample เข้าไปในบริเวณที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.25 จากนั้นให้คลิ๊กที่ปุ่ม MEAS.ALL

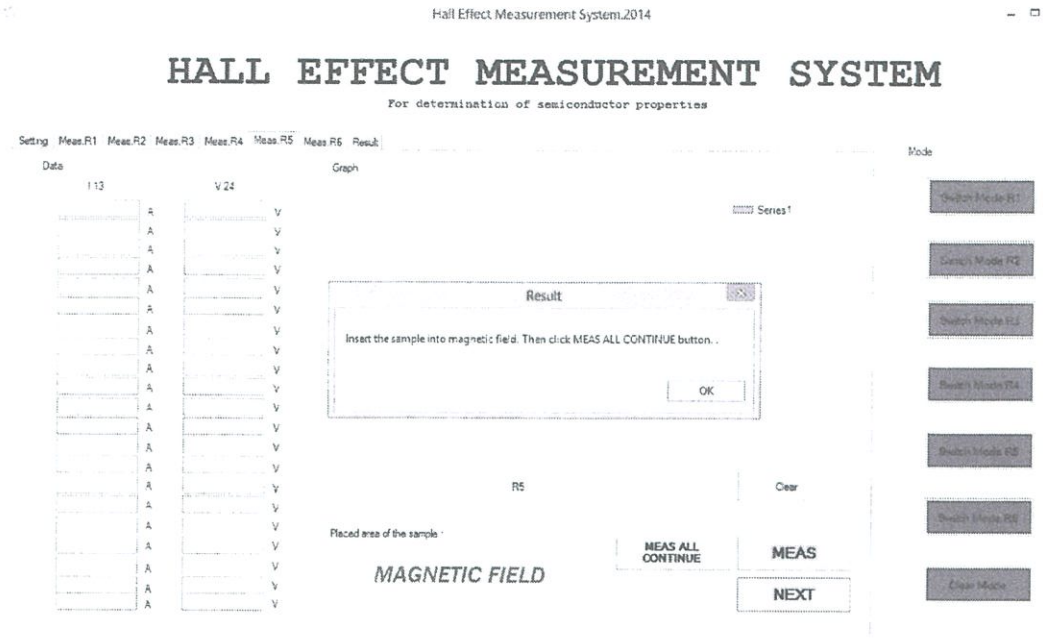


รูปที่ 4.24 แท็บ MeasR1

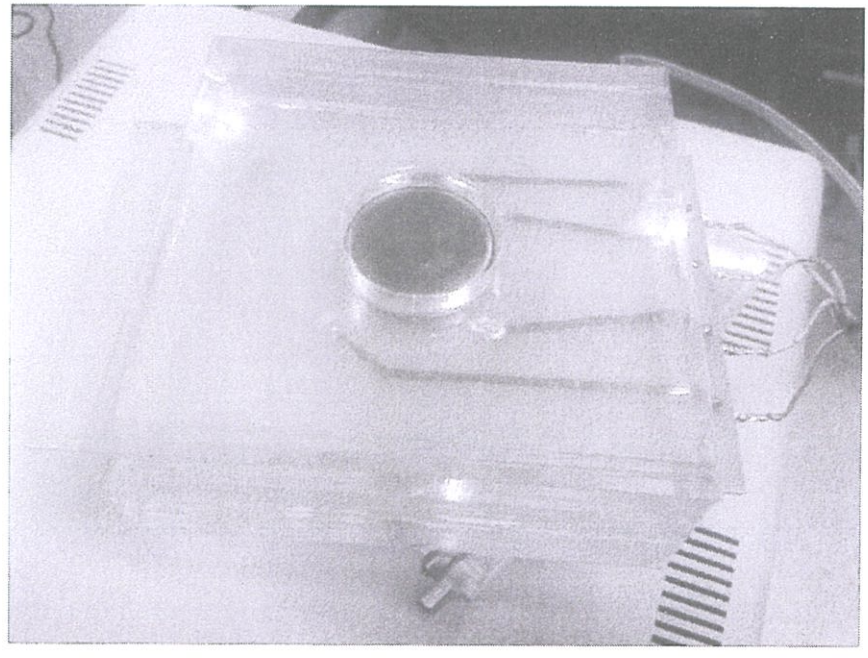


รูปที่ 4.25 แท็บ MeasR1 ใส่ Sample เข้าไปในบริเวณที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก

3. โปรแกรมจะวัดจนไปถึงแท็บ MeasR4 และหยุดวัดในแท็บ MeasR5 จากนั้นจะขึ้นข้อความให้นำ Sample ใส่เข้าไปในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.26 จากนั้นก็ให้นำ Sample ใส่เข้าไปในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.27

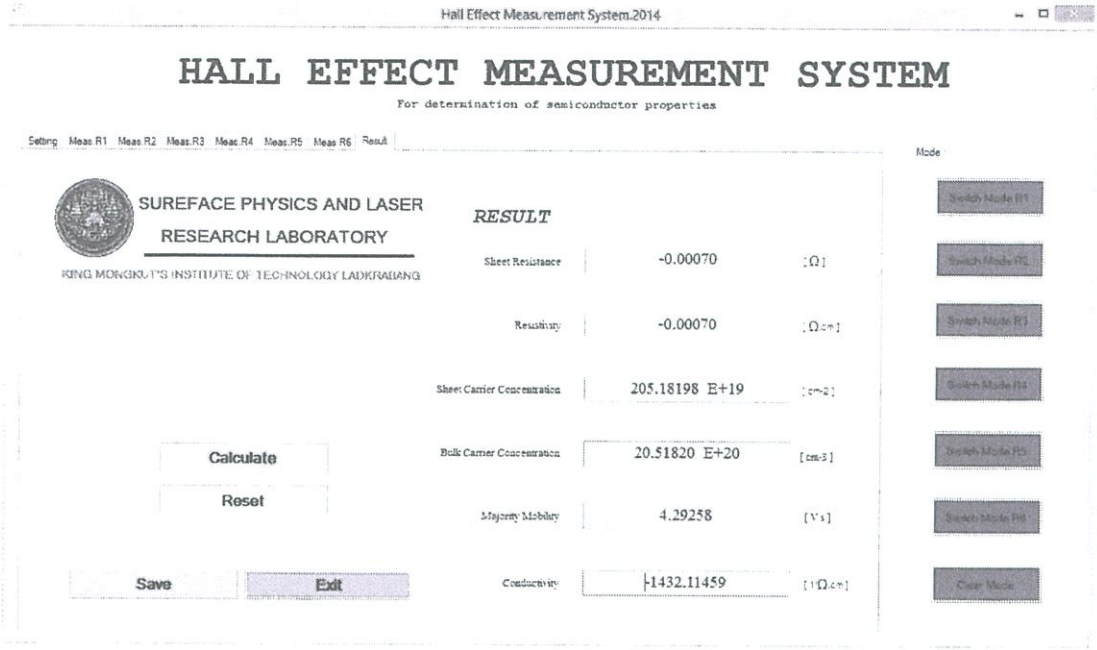


รูปที่ 4.26 โปรแกรมแสองข้อความว่าให้นำ Sample ใส่เข้าไปในสนามแม่เหล็ก



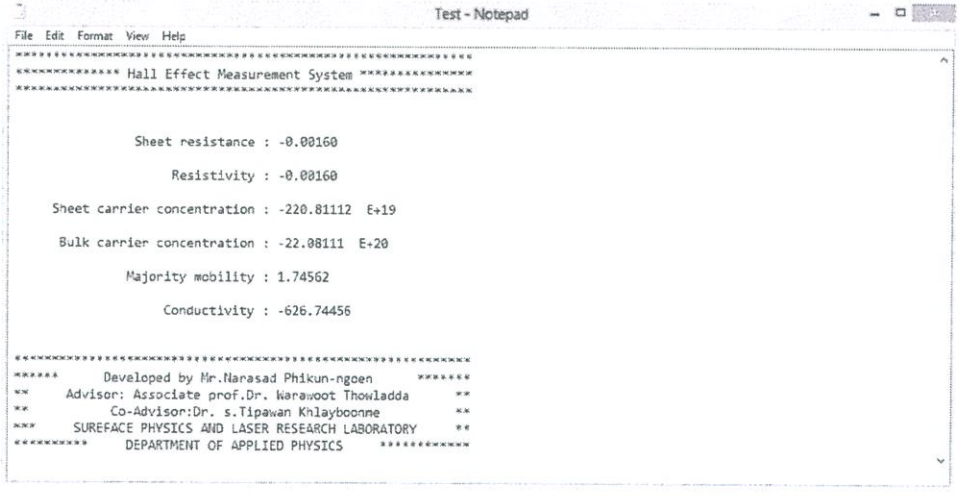
รูปที่ 4.27 ใส่ Sample เข้าไปในสนามแม่เหล็ก

4. เมื่อใส่ Sample เข้าไปในสนามแม่เหล็กแล้วให้คลิ๊กที่ปุ่ม MEAS.ALL CONTINUE จะวัดไปจนถึงแท็บสุดท้ายคือแท็บ Result จะแสดงผลจากการวัดทั้งหมด ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 แท็บ Result จะแสดงผลจากการวัดทั้งหมด

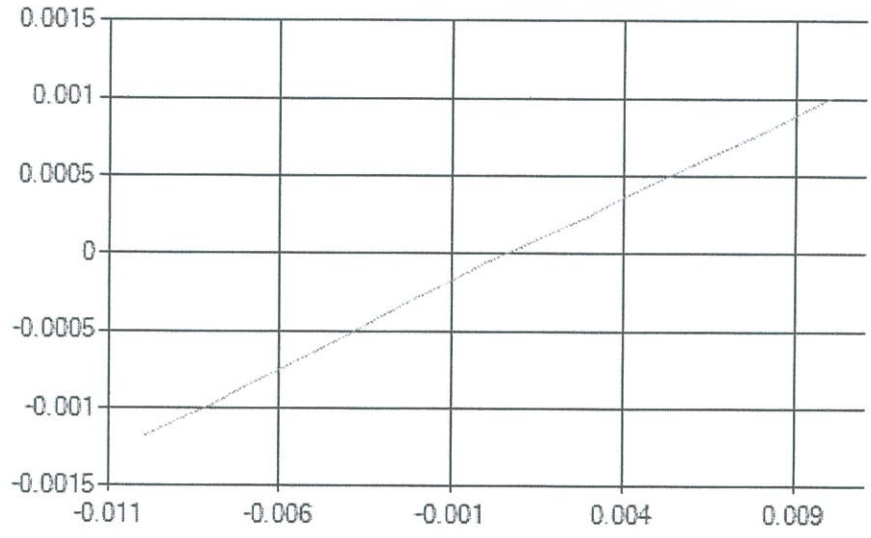
5. คลิ๊ก Save จะ Save ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเป็นไฟล์ CSV ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมในคอมพิวเตอร์เปิดได้หลายโปรแกรม ดังรูปที่ 4.29 ค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นไฟล์ XLS ดังรูปที่ 4.30 และกราฟเป็นไฟล์ PNG ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.29 Save ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเป็นไฟล์ CSV เปิดด้วยโปรแกรม Notepad

	A	B	C	D	E	F	G
1	I(mA)	V(Volts) of R1,V43,I12	V(Volts) of R2,V12,I43	V(Volts) of R3,V23,I14	V(Volts) of R4,V14,I23	V(Volts) of R5,V24,I13	V(Volts) of R6,V13,I24
2	-10	-0.000107367	-9.30E-05	-8.59E-05	-0.000103833	-8.59E-05	-8.59E-05
3	-9	-0.0001217	-8.95E-05	-0.000100233	-0.000128867	-9.30E-05	-8.59E-05
4	-8	-0.0001217	-0.000114533	-6.80E-05	-0.000143167	-9.31E-05	-0.000125267
5	-7	-8.59E-05	-0.000110967	-8.95E-05	-0.000114533	-0.000128867	-0.0001002
6	-6	-0.000114567	-8.23E-05	-8.23E-05	-8.59E-05	-0.0001289	-8.23E-05
7	-5	-0.000128867	-8.95E-05	-8.95E-05	-7.87E-05	-9.66E-05	-0.0001217
8	-4	-9.31E-05	-8.95E-05	-0.000114533	-9.66E-05	-7.52E-05	-0.0001038
9	-3	-0.000136	-0.000114533	-0.0001396	-8.95E-05	-8.95E-05	-8.59E-05
10	-2	-9.66E-05	-0.0001002	-0.000110967	-0.0001181	-8.23E-05	-9.30E-05
11	-1	-9.66E-05	-0.0001253	-0.000178967	-0.000107367	-0.000103767	-8.95E-05
12	0	-7.87E-05	-9.31E-05	-0.000121667	-9.66E-05	-0.0001074	-0.000110967
13	1	-0.000125267	-9.31E-05	-0.000110933	-0.000132467	-8.95E-05	-8.59E-05
14	2	-9.31E-05	-0.000128867	-0.000128867	-0.000128867	-0.000114533	-0.000114533
15	3	-0.0001181	-9.66E-05	-3.94E-05	-0.000100233	-0.0001324	-8.95E-05
16	4	-0.0001396	-9.66E-05	-0.000110967	-0.000118133	-0.000114533	-8.95E-05
17	5	-9.31E-05	-0.000136	-0.000196867	-9.31E-05	-8.95E-05	-0.000121733
18	6	-0.000268467	-0.000128867	-0.000125267	-0.000118133	-9.67E-05	-0.0001217
19	7	2.15E-05	-0.000136033	-0.000136033	-0.000110967	-0.000128867	-0.000132433
20	8	-0.0003615	-7.88E-05	-0.000204033	-0.0001253	-0.000128867	-0.0001253
21	9	0.000293533	-9.66E-05	-7.88E-05	-7.52E-05	-9.66E-05	-9.30E-05
22	10	-0.000286367	-9.31E-05	-6.44E-05	-0.000128867	-8.59E-05	-7.87E-05
23							

รูปที่ 4.30 Save ค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเป็นไฟล์ XLS



รูปที่ 4.31 Save กราฟเป็นไฟล์ PNG

4.2.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสองชิ้นที่ทราบค่าแล้ว

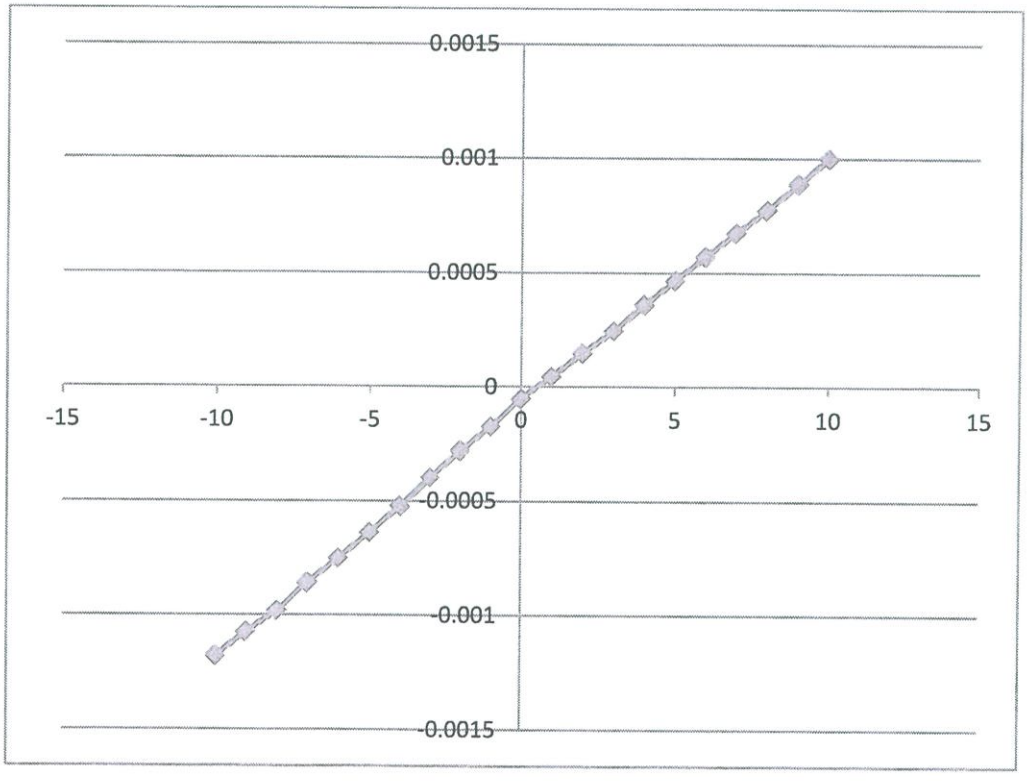
Si wafer	Doping	Type	Resistivity (Ω.cm)	ความหนา (μm)	Bulk carrier concentration (cm^{-3})
ชิ้นที่ 1	Antimony(Sb)	N	0.01-0.05	470	$1x10^{16}$- $1x10^{17}$
ชิ้นที่ 2	Boron(B)	P	30-50	500	$1x10^{14}$- $1x10^{15}$

ตารางที่ 2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR1-MeasR4 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

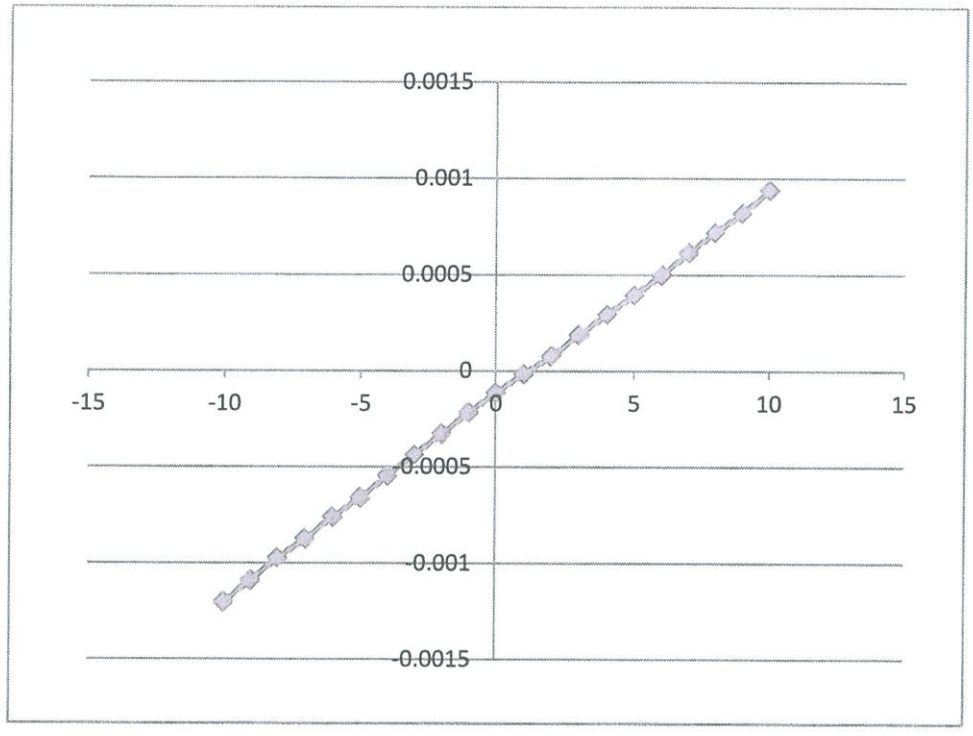
I(mA)	V(Volts) of R1,V43,I12	V(Volts) of R2,V12,I43	V(Volts) of R3,V23,I14	V(Volts) of R4,V14,I23
-10	-0.001178467	-0.001202733	-0.000533767	-0.0005407
-9	-0.001074467	-0.001088333	-0.0005095	-0.0004991
-8	-0.0009809	-0.000973967	-0.000471367	-0.000464433
-7	-0.000859633	-0.0008735	-0.0004367	-0.0004263
-6	-0.000752167	-0.0007591	-0.000402033	-0.000388167
-5	-0.000637767	-0.000658567	-0.000370833	-0.000346567
-4	-0.000523367	-0.000547633	-0.000318933	-0.000305067
-3	-0.000398567	-0.0004367	-0.000287733	-0.000273867
-2	-0.0002808	-0.0003293	-0.0002496	-0.000232267
-1	-0.000173333	-0.0002184	-0.000211467	-0.000204533
0	-5.20E-05	-0.0001144	-0.000169867	-0.000173333
1	4.51E-05	-1.73E-05	-0.000152533	-0.000173333
2	0.000149067	7.63E-05	-0.000131733	-0.000149067
3	0.000246133	0.0001872	-0.000100533	-0.000131733
4	0.000360433	0.000294667	-6.93E-05	-9.71E-05

ตารางที่ 2 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR1-MeasR4 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1(ต่อ)

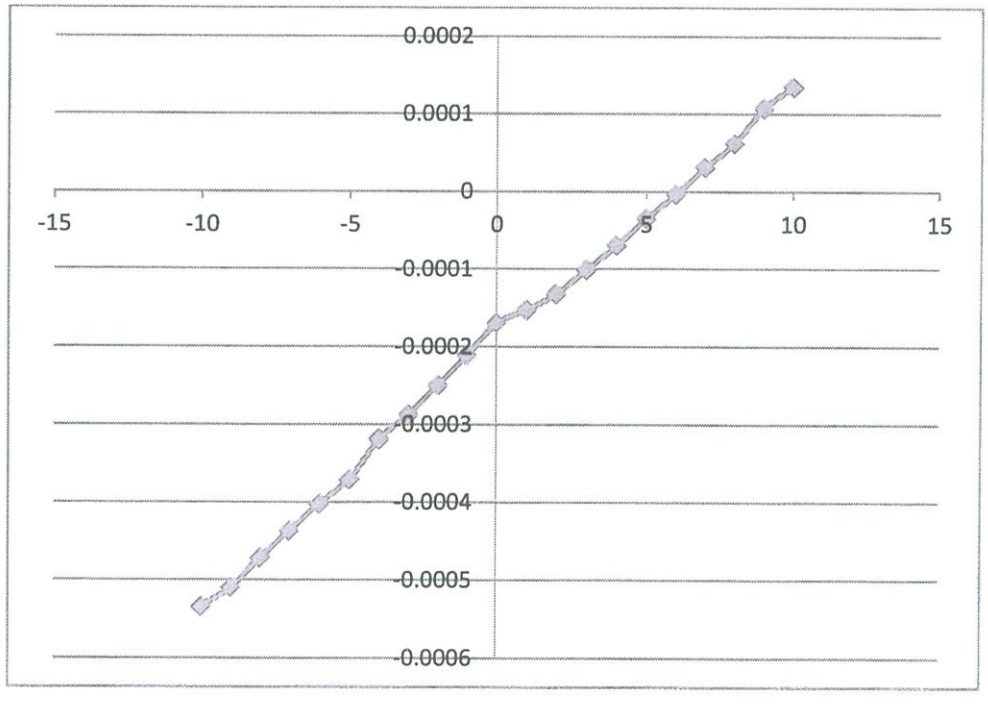
I(mA)	V(Volts) of R1,V43,I12	V(Volts) of R2,V12,I43	V(Volts) of R3,V23,I14	V(Volts) of R4,V14,I23
5	0.0004679	0.0003951	-3.47E-05	-7.97E-05
6	0.0005719	0.0004991	-3.47E-06	-3.81E-05
7	0.0006759	0.0006135	3.12E-05	-3.47E-06
8	0.000776433	0.000720967	6.24E-05	3.12E-05
9	0.000890833	0.0008215	0.000107467	5.89E-05
10	0.001001667	0.000939367	0.0001352	8.67E-05



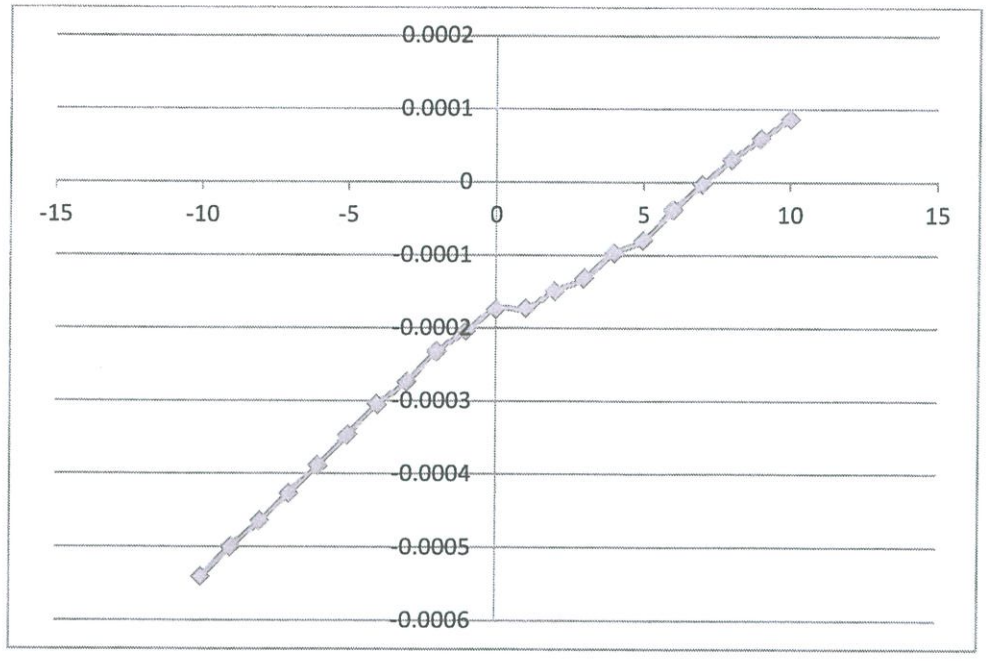
รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I12(A) กับแกนY V43 (V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 1



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I43(A) กับแกนY V12(V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 1



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I14(A) กับแกนY V23(V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 1



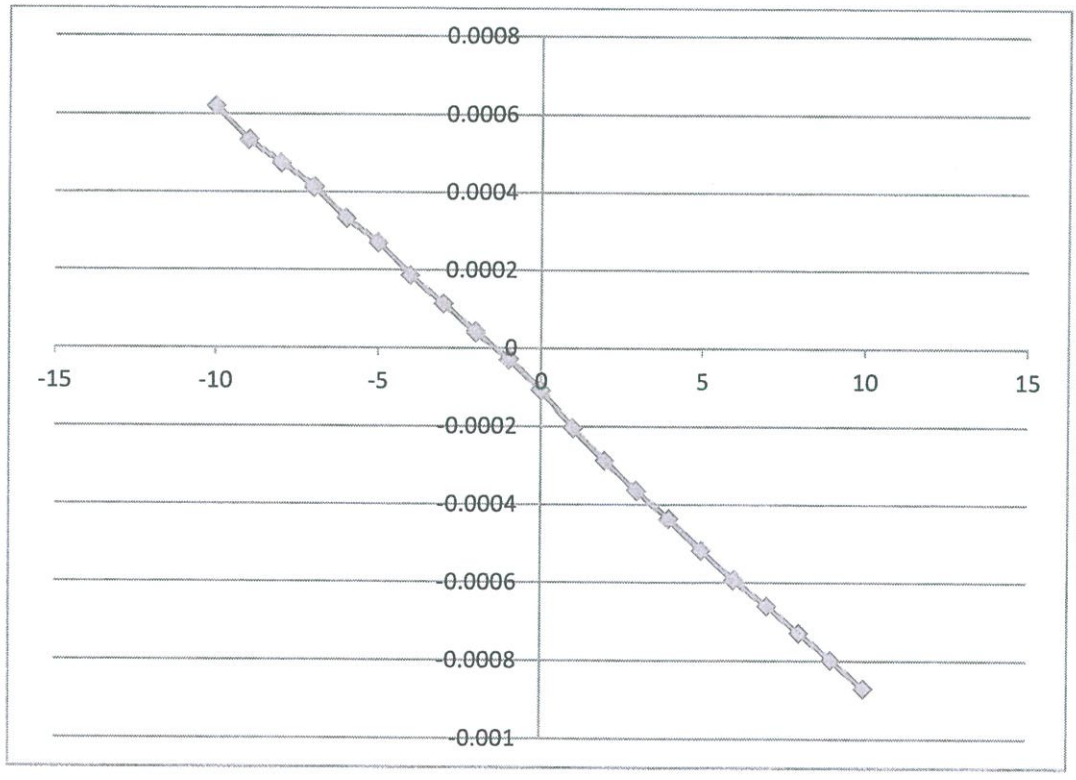
รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I23 (A) กับแกนY V14(V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 1

ตารางที่ 3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR5 และMeasR6 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

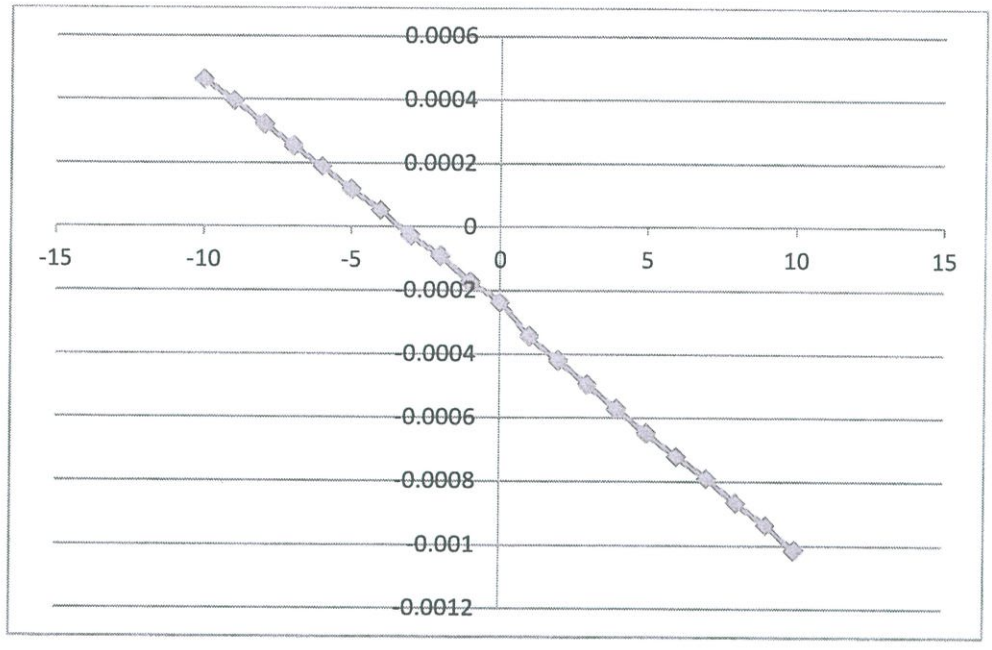
I(mA)	V(Volts) of R5,V24,I13	V(Volts) of R6,V13,I24
-10	0.000620433	0.000461
-9	0.000533767	0.000395
-8	0.000474833	0.000322
-7	0.000412433	0.000253
-6	0.000332733	0.000187
-5	0.0002704	0.000118
-4	0.0001872	5.20E-05
-3	0.0001144	-2.77E-05
-2	4.16E-05	-9.01E-05
-1	-2.77E-05	-0.00017
0	-0.000107467	-0.00024
1	-0.000204533	-0.00034
2	-0.000287733	-0.00042

ตารางที่ 3 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR5และMeasR6 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1(ต่อ)

I(mA)	V(Volts) of R5,V24,I13	V(Volts) of R6,V13,I24
3	-0.0003639	-0.0005
4	-0.0004367	-0.00057
5	-0.000516433	-0.00065
6	-0.0005927	-0.00072
7	-0.000658567	-0.00079
8	-0.0007279	-0.00087
9	-0.000797233	-0.00094
10	-0.000870033	-0.00102



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I13 (A) กับแกนY V24(V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 1



รูปที่ 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I24(A) กับแกนY V13(V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 1

ตารางที่ 4 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 1

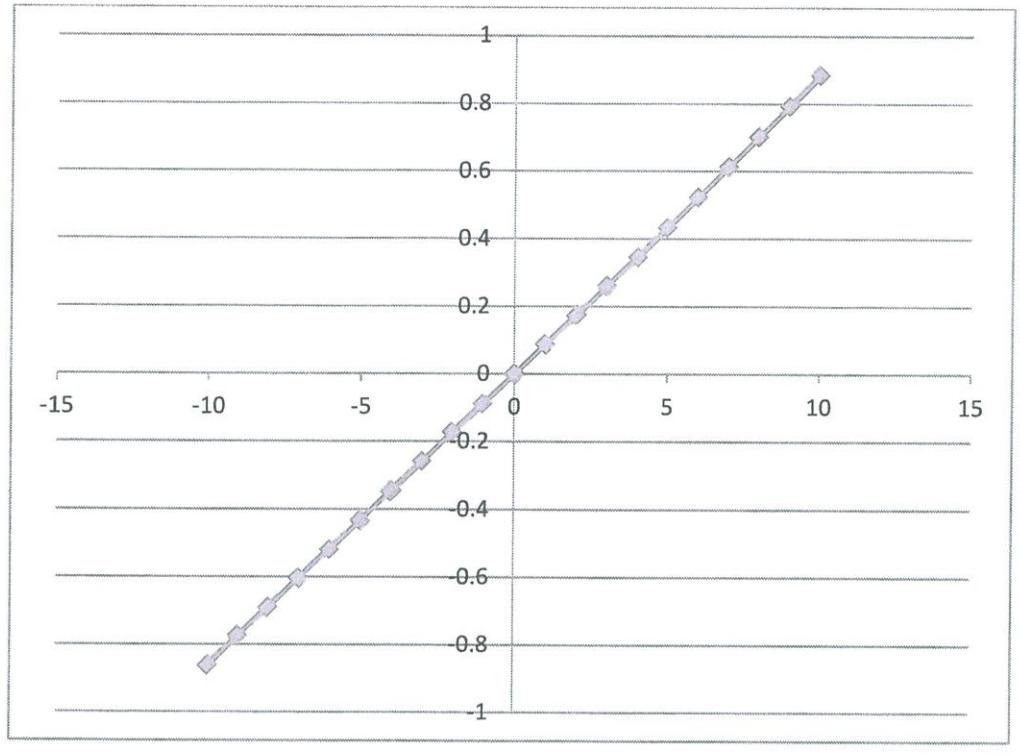
Sheet resistance	0.309 Ω
Resistivity	0.014 Ω.cm
Sheet carrier concentration	2.39 x 10^{15} cm^{-2}
Majority mobility	8729 cm^2 / V.s
Bulk carrier concentration	5.08 x 10^{16} cm^{-3}
Conductivity	68.80 1/Ω.cm
Type	N

ตารางที่ 5 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชิ้นที่ 2 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR1-MeasR4 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

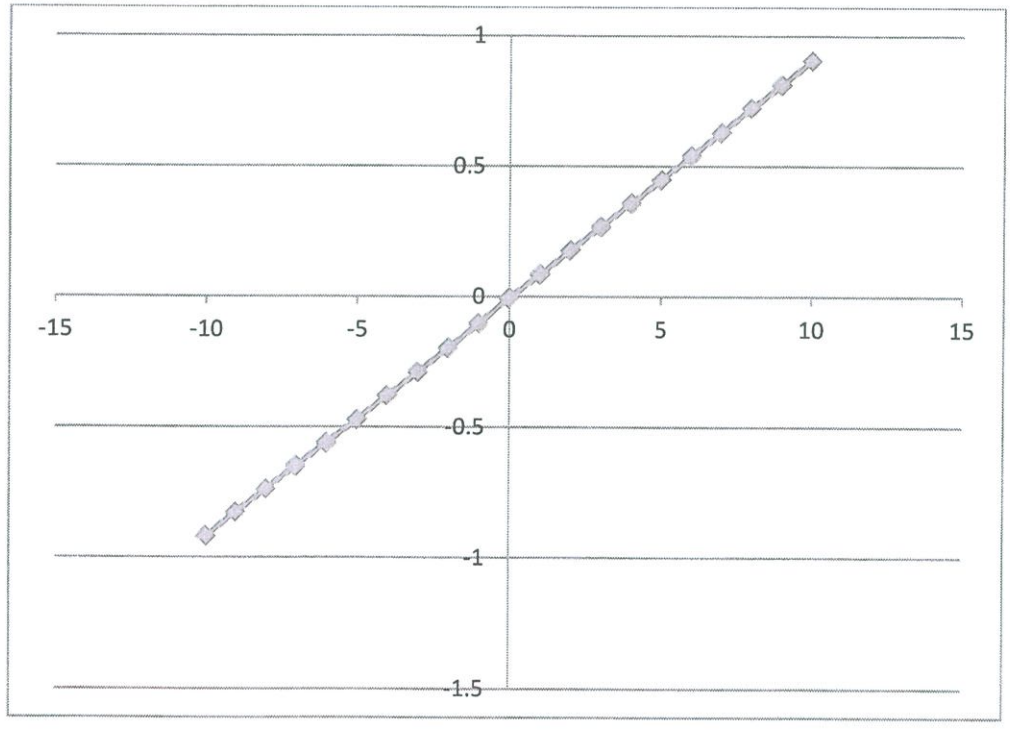
I(mA)	V(Volts) of R1,V43,I12	V(Volts) of R2,V12,I43	V(Volts) of R3,V23,I14	V(Volts) of R4,V14,I23
-10	-0.8619027	-0.918442233	-2.237704033	-2.3050612
-9	-0.775432967	-0.827608633	-2.011937633	-2.0811181
-8	-0.690495433	-0.738515233	-1.786781067	-1.853795233

ตารางที่ 5 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบแวนเดอร์พาวของ Si wafer ชิ้นที่ 2 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR1-MeasR4 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1(ต่อ)

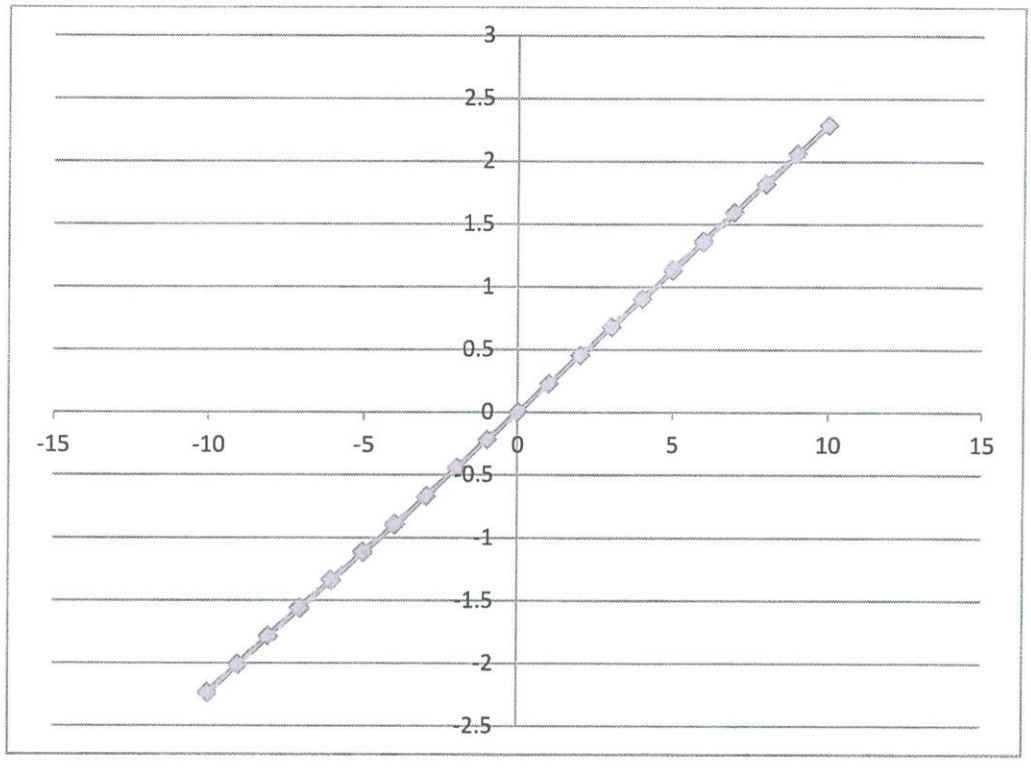
I(mA)	V(Volts) of R1,V43,I12	V(Volts) of R2,V12,I43	V(Volts) of R3,V23,I14	V(Volts) of R4,V14,I23
-7	-0.60465	-0.65026	-1.56355	-1.62437
-6	-0.51877	-0.56107	-1.33976	-1.39401
-5	-0.43258	-0.47065	-1.11637	-1.16314
-4	-0.34621	-0.38026	-0.89301	-0.93149
-3	-0.25969	-0.28911	-0.66954	-0.69863
-2	-0.17366	-0.19742	-0.44566	-0.46609
-1	-0.08753	-0.10355	-0.22113	-0.23323
0	-0.00038	-0.00583	-3.81E-05	0.000267
1	0.088061	0.085	0.226824	0.229999
2	0.174125	0.177809	0.454216	0.460746
3	0.259988	0.26797	0.679879	0.693144
4	0.346166	0.358259	0.905084	0.925638
5	0.434054	0.448098	1.131138	1.159214
6	0.522648	0.539535	1.360586	1.392225
7	0.612213	0.63015	1.589594	1.626532
8	0.70184	0.722474	1.821801	1.86102
9	0.792084	0.813054	2.057446	2.096752
10	0.883375	0.906241	2.290762	2.333246



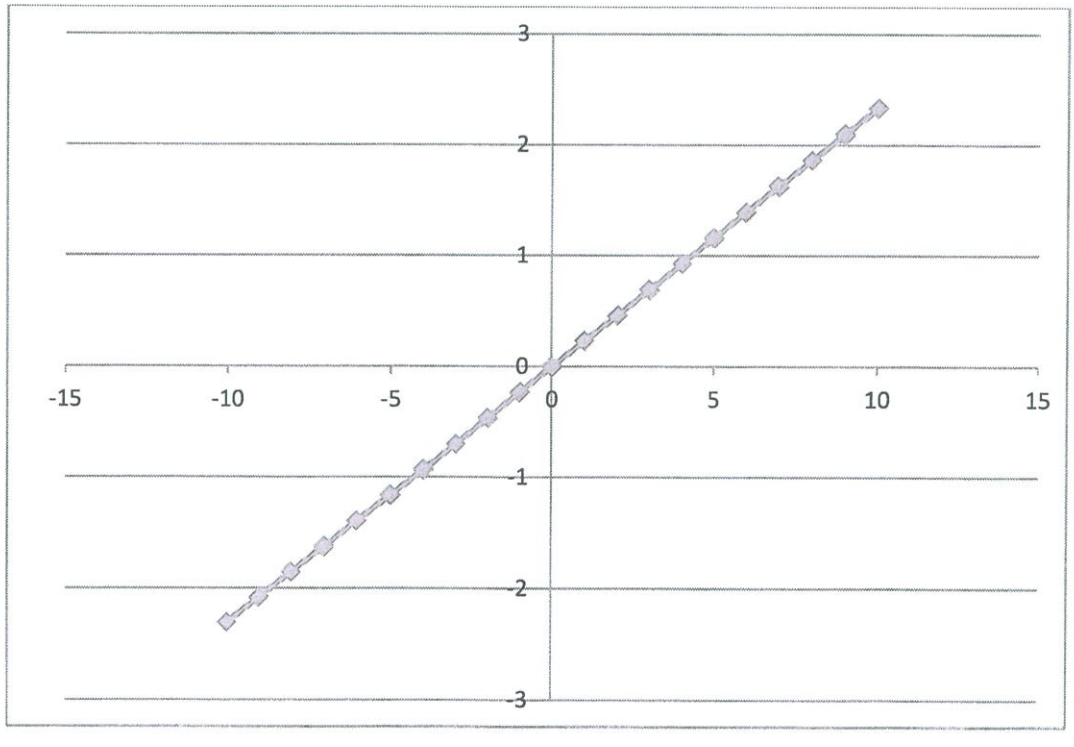
รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I12(A) กับแกนY V43 (V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 2



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I43(A) กับแกนY V12 (V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 2



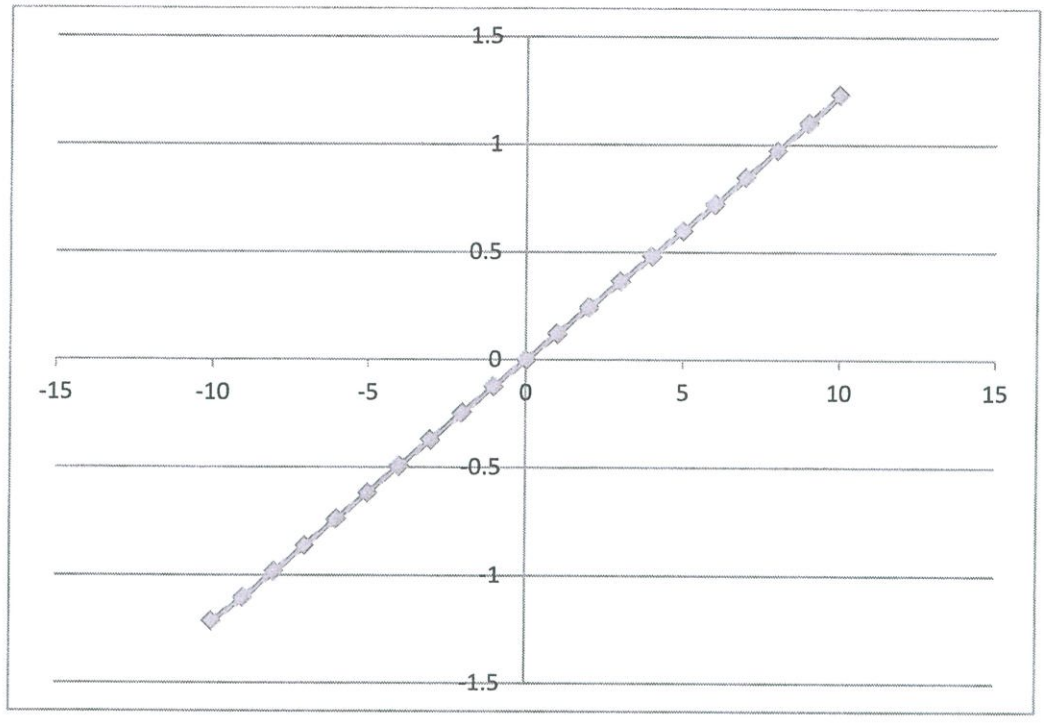
รูปที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I14(A) กับแกนY V23 (V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 2



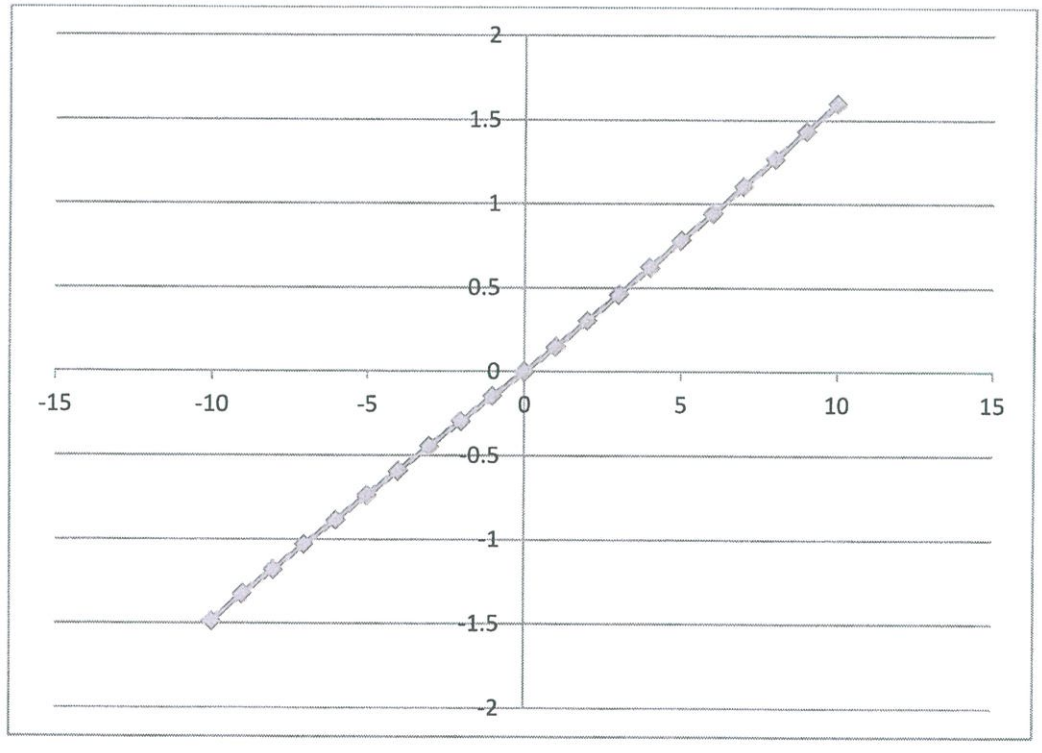
รูปที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I23(A) กับแกนY V14(V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 2

ตารางที่ 6 ผลจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรากฏการณ์ฮอลล์ของ Si wafer ชิ้นที่ 1 ซึ่งอยู่ในแท็บ MeasR5และMeasR6 ของโปรแกรม HallEffectMeasurementSystem1

I(mA)	V(Volts) of R5,V24,I13	V(Volts) of R6,V13,I24
-10	-1.21444	-1.48722
-9	-1.10502	-1.32555
-8	-0.98397	-1.17806
-7	-0.86249	-1.03093
-6	-0.7399	-0.88526
-5	-0.61756	-0.73849
-4	-0.49511	-0.59142
-3	-0.37209	-0.44324
-2	-0.24823	-0.29548
-1	-0.12306	-0.14792
0	0.000419	6.93E-05
1	0.121159	0.148531
2	0.242941	0.30312
3	0.363195	0.461419
4	0.480843	0.621856
5	0.600996	0.782649
6	0.722419	0.944542
7	0.846399	1.106043
8	0.97181	1.271031
9	1.098588	1.435091
10	1.230588	1.599704



รูปที่ 4.42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I13(A) กับแกนY V24 (V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 2



รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนX I24(A) กับแกนY V13 (V) ของ Si wafer ชิ้นที่ 2

ตารางที่ 7 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 2

Sheet resistance	721.3 Ω
Resistivity	36.06 Ω.cm
Sheet carrier concentration	1.253 x 10^{13} cm^{-2}
Majority mobility	680.2 cm^2 / V.s
Bulk carrier concentration	2.506 x 10^{14} cm^{-3}
Conductivity	0.027 1/Ω.cm
Type	P

3.4 สอบเทียบเครื่องมือ

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

ตารางที่ 8 ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service

Si wafer	Doping	Type	Resistivity (Ω.cm)	ความหนา (μm)	Bulk carrier concentration (cm^{-3})
ชิ้นที่ 1	Antimony(Sb)	N	0.01-0.05	470	$1x10^{16}$- $1x10^{17}$
ชิ้นที่ 2	Boron(B)	P	30-50	500	$1x10^{14}$- $1x10^{15}$

ตารางที่ 9 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 1

สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	ค่าจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้น	ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service
Sheet resistance (Ω)	0.309	-
Resistivity (Ω.cm)	0.014	0.01-0.05
Sheet carrier concentration (cm^{-2})	2.39 x 10^{15}	-
Majority mobility (cm^2 / V.s)	8729	-
Bulk carrier concentration (cm^{-3})	5.08 x 10^{16}	$1x10^{16}$- $1x10^{17}$
Conductivity (1 / Ω.cm)	68.80	-
Type	N	N

ตารางที่ 10 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 2

สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	ค่าจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้น	ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service
Sheet resistance (Ω)	721.3	-
Resistivity (Ω.cm)	36.06	30-50
Sheet carrier concentration (cm^{-2})	1.253 x 10^{13}	-
Majority mobility (cm^2 / V.s)	680.2	-

ตารางที่ 10 ผลจากการคำนวณหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของ Si wafer ชิ้นที่ 2(ต่อ)

สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	ค่าจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้น	ค่าจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Service
Bulk carrier concentration (cm^{-3})	2.506 x 10^{14}	$1x10^{14}$- $1x10^{15}$
Conductivity (1 / Ω.cm)	0.027	-
Type	P	P

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการทดลอง

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

ค่า Sheet resistance ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 0.309 โอห์ม และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Sheet resistance ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 721.3 โอห์ม และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Resistivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 0.014 โอห์ม.ซม. และ 0.01-0.05 โอห์ม.ซม.

ค่า Resistivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 36.06 โอห์ม.ซม. และ 30 - 50 โอห์ม.ซม.

ค่า Sheet carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 2.39 x 10^{15} ซม.$^{-2}$ และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

ค่า Sheet carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 1.253 x 10^{13} ซม.$^{-2}$และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Bulk carrier concentration

ค่า Majority mobility ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 8729 ซม.^{2} / โวลต์.วินาที และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Sheet resistance และค่า Sheet carrier concentration

ค่า Majority mobility ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 680.2 ซม.^{2} / โวลต์.วินาที และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Sheet resistance และค่า Sheet carrier concentration

ค่า Bulk carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 5.08 x 10^{16} ซม.$^{-3}$และ 1x10^{16}- 1x10^{17} ซม.$^{-3}$

ค่า Bulk carrier concentration ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 2.506 x 10^{14} ซม.$^{-3}$และ 1x10^{14}- 1x10^{15} ซม.$^{-3}$

ค่า Conductivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่หนึ่งจากเครื่องมือที่สร้างขึ้น และจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling

Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 68.80150 1 / โอห์ม.ซม. และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

ค่า Conductivity ของชิ้นงาน Si wafer ชิ้นที่สองจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นและจากค่าที่น่าเชื่อถือจาก American Society for Testing and Materials Licensed by Information Handling Services ได้ผลตามลำดับดังนี้ 0.02773 1 / โอห์ม.ซม. และค่าที่น่าเชื่อถือสามารถอ้างอิงจากค่า Resistivity

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

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

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

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียม Sample ที่ใช้ในการทดลองผลทำการทดลองต้องมีความชำนาญในการเตรียมสาร ทำความสะอาดชิ้นงานตัวอย่างและต้องต่อขั้วไฟฟ้าให้ถูกต้องตามระเบียบของแวนเดอร์พาวถึงจะได้ค่าที่แม่นยำ ควรเลือกใช้แผ่นวาง Sample ที่มีเข็มสัมผัสกับ Sample ได้โดยตรง

2. ควรมีภาคจ่ายไฟกระแสตรงในตัวเครื่อง สามารถต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V ได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีตัวแปลงกระแสไฟฟ้าภายนอกตัวเครื่อง

3.ควรเลือกใช้ Current source ที่สามารถกำหนดค่าจำกัดแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่านี้

4.ควรเลือกใช้ Digital multimeter ที่สามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ละเอียดมากกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

- "Hall effect"[Online].Available:

  http://en.wikipedia.org/wiki/hall_effect

- "Van der pauw method"[Online].Available:

  http://en.wikipedia.org/wiki/Van_der_Pauw_method

- "Edwin Hall"[Online].Available:

  http://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hall

- "The Hall effect#vanderpauw "[Online].Available:

  http://www.nist.gov/pml/div683/hall_effect.cfm

- "PC5180-1.4 "[Online].Available:

  http://fwbell.com/downloads/downloads.aspx

- "Using IVI with Visual C# and Visual basic.NET"[Online].Available:

  http://www.ivifoundation.org/download/ivi_gsg_v_1.0.pdf

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่ใช้

- Visual basic สำหรับ user interface ระบบวัดสนามแม่เหล็ก

- Visual basic สำหรับ user interface ระบบวัดหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

- C สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

```
Public Class Form1
    Public iommc As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488
    Public mmc As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488


    Dim stop1 As Boolean = False
    Dim data(,) As Object
    Dim axisy As Double
    Dim axisx As Double



    Private Sub connectGaussmeter_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles connectGaussmeter.Click
        '----------------------- Connect Gauss meter -----------------------------
        Dim connector As PC5180Lib.PC5180Connector = Nothing

        Try
            connector = New PC5180Lib.PC5180Connector
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect to PC5180: (" & ex.Message & ")")
            MsgBox("Auto exit program ", MsgBoxStyle.Exclamation)
            Environment.Exit(0)
        End Try

        '----------------------- Meas from gauss meter ---------------------------

        MessageBox.Show(connector.executeScpiCommand("*IDN?"))


        Dim goy, gox As String
        Dim value() As String
        Dim backy As String
        Dim backx As String
        Dim mmr As Object

        Try
            linkExcell.Enabled = False
            connectGaussmeter.Enabled = False
            stx.Enabled = False
            sty.Enabled = False
            mm.Enabled = False
            timey.Enabled = False
            timex.Enabled = False
            modeBox.Enabled = False
            GoBox.Enabled = False
            reset.Enabled = False
            FowardToolStripMenuItem.Enabled = False
            StatusLabel1.Text = "     Scannig.....     "
            StatusLabel1.Visible = True
            Bar.Visible = True
            Bar.Minimum = 0

            If (scanx.Checked = False And scany.Checked = False) Then
'--Scan not select
                MsgBox("Please select scan mode", MsgBoxStyle.Exclamation)
                linkExcell.Enabled = True
                connectGaussmeter.Enabled = True
                stx.Enabled = True
```

```
                sty.Enabled = True
                mm.Enabled = True
                timey.Enabled = True
                timex.Enabled = True
                linkExcell.Enabled = True
                modeBox.Enabled = True
                GoBox.Enabled = True
                reset.Enabled = True
                StatusLabel1.Visible = False
                Bar.Visible = False
                FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
                Bar.Value = 0
                connector.Close()
                Exit Sub
            End If


            mmr = 500 * mm.Text

            axisy = sty.Text
            axisx = stx.Text
            goy = "A:WP0P" + mmr.ToString
            backy = "A:WP0P" + (-1 * mmr).ToString
            backx = "A:WP" + (-1 * mmr).ToString + "P0"
            gox = "A:WP" + mmr.ToString + "P0"


            ReDim data(0 To axisx, 0 To axisy)

            If scany.Checked Then
'--Scan y axis

                Bar.Maximum = axisx
                For i As Integer = 0 To axisx

                    If (i Mod 2 = 0) Then
                        For j As Integer = 0 To axisy
                            ReDim Preserve value(0 To j)
                            value(j) =
(connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                            data(i, j) = value(j)
                            If (j <> axisy) Then
                                mmc.WriteString("P:14P0")
                                mmc.WriteString("P:15P0")
                                mmc.WriteString(goy)
                                Delay(timey.Text)
                            End If
                            If (stop1 = True) Then
'--stop scan
                                stx.Enabled = True
                                sty.Enabled = True
                                connectGaussmeter.Enabled = True
                                mm.Enabled = True
                                timey.Enabled = True
                                timex.Enabled = True
                                linkExcell.Enabled = True
                                modeBox.Enabled = True
                                GoBox.Enabled = True
                                reset.Enabled = True
                                StatusLabel1.Visible = False
                                Bar.Visible = False
                                FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
```

```
                    connector.Close()
                    stop1 = False
                    Exit Sub
                End If
            Next
        Else
            For j As Integer = axisy To 0 Step -1
                ReDim Preserve value(0 To j)
                value(j) =
(connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                data(i, j) = value(j)
                If (j <> 0) Then
                    mmc.WriteString("P:14P0")
                    mmc.WriteString("P:15P0")
                    mmc.WriteString(backy)
                    Delay(timey.Text)
                End If
                If (stop1 = True) Then
                    stx.Enabled = True
                    sty.Enabled = True
                    connectGaussmeter.Enabled = True
                    mm.Enabled = True
                    timey.Enabled = True
                    timex.Enabled = True
                    linkExcell.Enabled = True
                    modeBox.Enabled = True
                    GoBox.Enabled = True
                    reset.Enabled = True
                    StatusLabel1.Visible = False
                    Bar.Visible = False
                    FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
                    connector.Close()
                    stop1 = False
                    Exit Sub
                End If
            Next
        End If

        If (i <> axisx) Then
            Delay(timex.Text)
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
            mmc.WriteString(gox)
            Delay(timex.Text)
        End If

        If (stop1 = True) Then
            stx.Enabled = True
            sty.Enabled = True
            connectGaussmeter.Enabled = True
            mm.Enabled = True
            timey.Enabled = True
            timex.Enabled = True
            linkExcell.Enabled = True
            modeBox.Enabled = True
            GoBox.Enabled = True
            reset.Enabled = True
            StatusLabel1.Visible = False
            Bar.Visible = False
            FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
            connector.Close()
            stop1 = False
```

```
                    Exit Sub
                End If

                Bar.Style = ProgressBarStyle.Continuous
                Bar.Value = i

            Next
        End If

        If scanx.Checked Then                                   '--Scan x axis

            Bar.Maximum = axisy
            For i As Integer = 0 To axisy

                If (i Mod 2 = 0) Then
                    For j As Integer = 0 To axisx
                        ReDim Preserve value(0 To j)
                        value(j) =
(connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                        data(j, i) = value(j)
                        If (j <> axisx) Then
                            mmc.WriteString("P:14P0")
                            mmc.WriteString("P:15P0")
                            mmc.WriteString(gox)
                            Delay(timex.Text)
                        End If
                        If (stop1 = True) Then
                            stx.Enabled = True
                            sty.Enabled = True
                            connectGaussmeter.Enabled = True
                            mm.Enabled = True
                            timey.Enabled = True
                            timex.Enabled = True
                            linkExcell.Enabled = True
                            modeBox.Enabled = True
                            GoBox.Enabled = True
                            reset.Enabled = True
                            StatusLabel1.Visible = False
                            Bar.Visible = False
                            FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
                            connector.Close()
                            stop1 = False
                            Exit Sub
                        End If
                    Next
                Else
                    For j As Integer = axisx To 0 Step -1
                        ReDim Preserve value(0 To j)
                        value(j) =
(connector.executeScpiCommand(":MEASURE:FLUX?"))
                        data(j, i) = value(j)
                        If (j <> 0) Then
                            mmc.WriteString("P:14P0")
                            mmc.WriteString("P:15P0")
                            mmc.WriteString(backx)
                            Delay(timex.Text)
                        End If
                        If (stop1 = True) Then
                            stx.Enabled = True
                            sty.Enabled = True
                            connectGaussmeter.Enabled = True
                            mm.Enabled = True
```

```
                    timey.Enabled = True
                    timex.Enabled = True
                    linkExcell.Enabled = True
                    modeBox.Enabled = True
                    GoBox.Enabled = True
                    reset.Enabled = True
                    StatusLabel1.Visible = False
                    Bar.Visible = False
                    FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
                    connector.Close()
                    stop1 = False
                    Exit Sub
                End If
            Next
        End If

        If (i <> axisy) Then
            Delay(timey.Text)
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
            mmc.WriteString(goy)
            Delay(timey.Text)
        End If

        If (stop1 = True) Then
            stx.Enabled = True
            sty.Enabled = True
            connectGaussmeter.Enabled = True
            mm.Enabled = True
            timey.Enabled = True
            timex.Enabled = True
            linkExcell.Enabled = True
            modeBox.Enabled = True
            GoBox.Enabled = True
            reset.Enabled = True
            StatusLabel1.Visible = False
            Bar.Visible = False
            FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
            connector.Close()
            stop1 = False
            Exit Sub
        End If

        Bar.Style = ProgressBarStyle.Continuous
        Bar.Value = i

    Next
End If


MessageBox.Show("Finish scan ! ")
linkExcell.Enabled = True
connectGaussmeter.Enabled = True
stx.Enabled = True
sty.Enabled = True
mm.Enabled = True
timey.Enabled = True
timex.Enabled = True
modeBox.Enabled = True
GoBox.Enabled = True
reset.Enabled = True
FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
```

```
            StatusLabel1.Visible = False
            Bar.Visible = False
            Bar.Value = 0

            connector.Close()

        Catch ex As Exception
            MsgBox("Can not Scan", MsgBoxStyle.Exclamation)
            linkExcell.Enabled = True
            connectGaussmeter.Enabled = True
            stx.Enabled = True
            sty.Enabled = True
            mm.Enabled = True
            timey.Enabled = True
            timex.Enabled = True
            modeBox.Enabled = True
            GoBox.Enabled = True
            reset.Enabled = True
            FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
            StatusLabel1.Visible = False
            Bar.Visible = False
            Bar.Value = 0

            connector.Close()
        End Try
    End Sub



    Private Sub linkExcel_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles linkExcell.Click
        Try
            StatusLabel1.Text = "     Linking to Excel.....     "
            StatusLabel1.Visible = True
            Bar.Visible = True

            Dim oExcel As Object
            Dim oBook As Object
            Dim oSheet As Object

            'Start a new workbook in Excel
            oExcel = CreateObject("Excel.Application")
            oBook = oExcel.Workbooks.Add


            'Add data to cells of the first worksheet in the new workbook
            oSheet = oBook.Worksheets(1)
            '------------------------ sheet 1-------------------------
            oSheet = oBook.Worksheets(1)
            oSheet.Range("A1").Value = "Y / X"
            oSheet.Range("B1").Value = "X0"
            oSheet.Range("C1").Value = "X1"
            oSheet.Range("D1").Value = "X2"
            oSheet.Range("E1").Value = "X3"
            oSheet.Range("F1").Value = "X4"
            oSheet.Range("G1").Value = "X5"
            oSheet.Range("H1").Value = "X6"
            oSheet.Range("I1").Value = "X7"
            oSheet.Range("J1").Value = "X8"
            oSheet.Range("K1").Value = "X9"
            oSheet.Range("L1").Value = "X10"
            oSheet.Range("M1").Value = "X11"
```

```
oSheet.Range("N1").Value = "X12"
oSheet.Range("O1").Value = "X13"
oSheet.Range("P1").Value = "X14"
oSheet.Range("Q1").Value = "X15"
oSheet.Range("R1").Value = "X16"
oSheet.Range("S1").Value = "X17"
oSheet.Range("T1").Value = "X18"
oSheet.Range("U1").Value = "X19"
oSheet.Range("V1").Value = "X20"
oSheet.Range("W1").Value = "X21"
oSheet.Range("X1").Value = "X22"
oSheet.Range("Y1").Value = "X23"
oSheet.Range("Z1").Value = "X24"
oSheet.Range("AA1").Value = "X25"
oSheet.Range("AB1").Value = "X26"
oSheet.Range("AC1").Value = "X27"
oSheet.Range("AD1").Value = "X28"
oSheet.Range("AE1").Value = "X29"
oSheet.Range("AF1").Value = "X30"
oSheet.Range("AG1").Value = "X31"
oSheet.Range("AH1").Value = "X32"
oSheet.Range("AI1").Value = "X33"
oSheet.Range("AJ1").Value = "X34"
oSheet.Range("AK1").Value = "X35"
oSheet.Range("AL1").Value = "X36"
oSheet.Range("AM1").Value = "X37"
oSheet.Range("AN1").Value = "X38"
oSheet.Range("AO1").Value = "X39"
oSheet.Range("AP1").Value = "X40"
oSheet.Range("AQ1").Value = "X41"
oSheet.Range("AR1").Value = "X42"
oSheet.Range("AS1").Value = "X43"
oSheet.Range("AT1").Value = "X44"
oSheet.Range("AU1").Value = "X45"
oSheet.Range("AV1").Value = "X46"
oSheet.Range("AW1").Value = "X47"
oSheet.Range("AX1").Value = "X48"
oSheet.Range("AY1").Value = "X49"
oSheet.Range("AZ1").Value = "X50"

oSheet.Range("A2").Value = "Y0"
oSheet.Range("A3").Value = "Y1"
oSheet.Range("A4").Value = "Y2"
oSheet.Range("A5").Value = "Y3"
oSheet.Range("A6").Value = "Y4"
oSheet.Range("A7").Value = "Y5"
oSheet.Range("A8").Value = "Y6"
oSheet.Range("A9").Value = "Y7"
oSheet.Range("A10").Value = "Y8"
oSheet.Range("A11").Value = "Y9"
oSheet.Range("A12").Value = "Y10"
oSheet.Range("A13").Value = "Y11"
oSheet.Range("A14").Value = "Y12"
oSheet.Range("A15").Value = "Y13"
oSheet.Range("A16").Value = "Y14"
oSheet.Range("A17").Value = "Y15"
oSheet.Range("A18").Value = "Y16"
oSheet.Range("A19").Value = "Y17"
oSheet.Range("A20").Value = "Y18"
oSheet.Range("A21").Value = "Y19"
oSheet.Range("A22").Value = "Y20"
oSheet.Range("A23").Value = "Y21"
```

```
            oSheet.Range("A24").Value = "Y22"
            oSheet.Range("A25").Value = "Y23"
            oSheet.Range("A26").Value = "Y24"
            oSheet.Range("A27").Value = "Y25"
            oSheet.Range("A28").Value = "Y26"
            oSheet.Range("A29").Value = "Y27"
            oSheet.Range("A30").Value = "Y28"
            oSheet.Range("A31").Value = "Y29"
            oSheet.Range("A32").Value = "Y30"
            oSheet.Range("A33").Value = "Y31"
            oSheet.Range("A34").Value = "Y32"
            oSheet.Range("A35").Value = "Y33"
            oSheet.Range("A36").Value = "Y34"
            oSheet.Range("A37").Value = "Y35"
            oSheet.Range("A38").Value = "Y36"
            oSheet.Range("A39").Value = "Y37"
            oSheet.Range("A40").Value = "Y38"
            oSheet.Range("A41").Value = "Y39"
            oSheet.Range("A42").Value = "Y40"
            oSheet.Range("A43").Value = "Y41"
            oSheet.Range("A44").Value = "Y42"
            oSheet.Range("A45").Value = "Y43"
            oSheet.Range("A46").Value = "Y44"
            oSheet.Range("A47").Value = "Y45"
            oSheet.Range("A48").Value = "Y46"
            oSheet.Range("A49").Value = "Y47"
            oSheet.Range("A50").Value = "Y48"
            oSheet.Range("A51").Value = "Y49"
            oSheet.Range("A52").Value = "Y50"

            Dim colum() As String = {"B", "C", "D", "E", "F", "G", "H", "I", "J", "K",
"L", "M", "N", "O", "P", "Q", "R", "S", "T", "U", "V", "W", "X", "Y", "Z", "AA", "AB",
"AC", "AD", "AE", "AF", "AG", "AH", "AI", "AJ", "AK", "AL", "AM", "AN", "AO", "AP",
"AQ", "AR", "AS", "AT", "AU", "AV", "AW", "AX", "AY", "AZ", "BA", "BB", "BC", "BD",
"BE", "BF", "BG", "BH", "BI", "BJ", "BK", "BL", "BM", "BN", "BO", "BP", "BQ", "BR",
"BS", "BT", "BU", "BV", "BW", "BX", "BY", "BZ", "CA", "CB", "CC", "CD", "CE", "CF",
"CG", "CH", "CI", "CJ", "CK", "CL", "CM", "CN", "CO", "CP", "CQ", "CR", "CS", "CT",
"CU", "CV", "CW", "CX", "CY", "CZ", "DA", "DB", "DC", "DD", "DE", "DF", "DG", "DF",
"DI", "DJ", "DK", "DL", "DM", "DN", "DO", "DP", "DQ", "DR", "DS", "DT", "DU", "DV",
"DW", "DX", "DY", "DZ", "EA", "EB", "EC", "ED", "EE", "EF", "EG", "EH", "EI", "EJ",
"EK", "EL", "EM", "EN", "EO", "EP", "EQ", "ER", "ES", "ET", "EU", "EV", "EW", "EX",
"EY", "EZ", "FA", "FB", "FC", "FD", "FE", "FF", "FG", "FH", "FI", "FJ", "FK", "FL",
"FM", "FN", "FO", "FP", "FQ", "FR", "FS", "FT", "FU", "FV", "FW", "FX", "FY", "FZ",
"GA", "GB", "GC", "GD", "GE", "GF", "GG", "GH", "GI", "GJ", "GK", "GL", "GM", "GN",
"GO", "GP", "GQ", "GR", "GS", "GT", "GU", "GV", "GW", "GX", "GY", "GZ", "HA", "HB",
"HC", "HD", "HE", "HF", "HG", "HH", "HI", "HJ", "HK", "HL", "HM", "HN", "HO", "HP",
"HQ", "HR", "HS", "HT", "HU", "HV", "HW", "HX", "HY", "HZ", "IA", "IB", "IC", "ID",
"IE", "IF", "IG", "IH", "II", "IJ", "IK", "IL", "IM", "IN", "IO", "IP", "IQ", "IR",
"IS", "IT", "IU", "IV", "IW", "IX", "IY", "IZ", "JA", "JB", "JC", "JD", "JE", "JF",
"JG", "JH", "JI", "JJ", "JK", "JL", "JM", "JN", "JO", "JP", "JQ", "JR", "JS", "JT",
"JU", "JV", "JW", "JX", "JY", "JZ", "KA", "KB", "KC", "KD", "KE", "KF", "KG", "KH",
"KI", "KJ", "KK", "KL", "KM", "KN", "KO", "KP", "KQ", "KR", "KS", "KT", "KU", "KV",
"KW", "KX", "KY", "KZ", "LA", "LB", "LC", "LD", "LE", "LF", "LG", "LH", "LI", "LJ",
"LK", "LL", "LM", "LN", "LO", "LP", "LQ", "LR", "LS", "LT", "LU", "LV", "LW", "LX",
"LY", "LZ", "MA", "MB", "MC", "MD", "ME", "MF", "MG", "MH", "MI", "MJ", "MK", "ML",
"MM", "MN", "MO", "MP", "MQ", "MR", "MS", "MT", "MU", "MV", "MW", "MX", "MY", "MZ",
"NA", "NB", "NC", "ND", "NE", "NF", "NG", "NH", "NI", "NJ", "NK", "NL", "NM", "NN",
"NO", "NP", "NQ", "NR", "NS", "NT", "NU", "NV", "NW", "NX", "NY", "NZ", "OA", "OB",
"OC", "OD", "OE", "OF", "OG", "OH", "OI", "OJ", "OK", "OL", "OM", "ON", "OO", "OP",
"OQ", "OR", "OS", "OT", "OU", "OV", "OW", "OX", "OY", "OZ", "PA", "PB", "PC", "PD",
"PE", "PF", "PG", "PH", "PI", "PJ", "PK", "PL", "PM", "PN", "PO", "PP", "PQ", "PR",
"PS", "PT", "PU", "PV", "PW", "PX", "PY", "PZ", "QA", "QB", "QC", "QD", "QE", "QF",
```

```
"QG", "QH", "QI", "QJ", "QK", "QL", "QM", "QN", "QO", "QP", "QQ", "QR", "QS", "QT",
"QU", "QV", "QW", "QX", "QY", "QZ", "RA", "RB", "RC", "RD", "RE", "RF", "RG", "RH",
"RI", "RJ", "RK", "RL", "RM", "RN", "RO", "RP", "RQ", "RR", "RS", "RT", "RU", "RV",
"RW", "RX", "RY", "RZ", "SA", "SB", "SC", "SD", "SE", "SF", "SG", "SH", "SI", "SJ",
"SK", "SL", "SM", "SN", "SO", "SP", "SQ", "SR", "SS", "ST", "SU", "SV", "SW", "SX",
"SY", "SZ", "TA", "TB", "TC", "TD", "TE", "TF", "TG", "TH", "TI", "TJ", "TK", "TL",
"TM", "TN", "TO", "TP", "TQ", "TR", "TS", "TT", "TU", "TV", "TW", "TX", "TY", "TZ",
"UA", "UB", "UC", "UD", "UE", "UF", "UG", "UH", "UI", "UJ", "UK", "UL", "UM", "UN",
"UO", "UP", "UQ", "UR", "US", "UT", "UU", "UV", "UW", "UX", "UY", "UZ", "VA", "VB",
"VC", "VD", "VE", "VF", "VG", "VH", "VI", "VJ", "VK", "VL", "VM", "VN", "VO", "VP",
"VQ", "VR", "VS", "VT", "VU", "VV", "VW", "VX", "VY", "VZ", "WA", "WB", "WC", "WD",
"WE", "WF", "WG", "WH", "WI", "WJ", "WK", "WL", "WM", "WN", "WO", "WP", "WQ", "WR",
"WS", "WT", "WU", "WV", "WW", "WX", "WY", "WZ", "XA", "XB", "XC", "XD", "XE", "XF",
"XG", "XH", "XI", "XJ", "XK", "XL", "XM", "XN", "XO", "XP", "XQ", "XR", "XS", "XT",
"XU", "XV", "XW", "XX", "XY", "XZ", "YA", "YB", "YC", "YD", "YE", "YF", "YG", "YH",
"YI", "YJ", "YK", "YL", "YM", "YN", "YO", "YP", "YQ", "YR", "YS", "YT", "YU", "YV",
"YW", "YX", "YY", "YZ", "ZA", "ZB", "ZC", "ZD", "ZE", "ZF", "ZG", "ZH", "ZI", "ZJ",
"ZK", "ZL", "ZM", "ZN", "ZO", "ZP", "ZQ", "ZR", "ZS", "ZT", "ZU", "ZV", "ZW", "ZX",
"ZY", "ZZ"}
            Dim ncolum As Object
            Dim xcel As String

            Bar.Minimum = 0
            Bar.Maximum = axisx
            For x As Integer = 0 To axisx
                ncolum = 2
                For y As Integer = 0 To axisy
                    xcel = colum(x) + ncolum.ToString
                    oSheet.Range(xcel).value = data(x, y)
                    ncolum = ncolum + 1
                Next
                Bar.Style = ProgressBarStyle.Continuous
                Bar.Value = x

            Next


            '------------------------ Link to excel --------------------------------
            MessageBox.Show(" Link to Disk ' C:\Value from Gauss meter.xls ' ")


            'Save the Workbook and Quit Excel
            oBook.SaveAs("C:\Value from Gauss meter.xls")
            oExcel.Quit()
            MessageBox.Show("Link to excel complete ")
            StatusLabel1.Visible = False
            stx.Enabled = True
            sty.Enabled = True
            mm.Enabled = True
            timey.Enabled = True
            timex.Enabled = True
            modeBox.Enabled = True
            GoBox.Enabled = True
            Bar.Visible = False
            FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
            Bar.Value = 0


        Catch ex As Exception
            MsgBox("Can not link", MsgBoxStyle.Exclamation)
        End Try
```

```
    End Sub

    Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles MyBase.Load
        linkExcell.Enabled = False
        connectGaussmeter.Enabled = False
        GoBox.Enabled = False
        stx.Enabled = False
        sty.Enabled = False
        mm.Enabled = False
        timey.Enabled = False
        timex.Enabled = False
        modeBox.Enabled = False
        StatusLabel1.Visible = False
        Bar.Visible = False
        FowardToolStripMenuItem.Enabled = False
        reset.Enabled = False
    End Sub

    Private Sub connectMMC2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles connectMMC2.Click
        Dim ioAddress As String
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        Try                                                    '--ถ้าเกิด error จะข้าม
ไปทำงานที่ Catch
            ioAddress = "GPIB::" + NumericUpDown1.Value.ToString()
            mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
            mmc = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
            mmc.IO() = mgr.Open(ioAddress)
            mmc.IO.Timeout = 7000

            connectGaussmeter.Enabled = True
            connectMMC2.BackColor = Color.LightGreen
            connectMMC2.Text = "Connected...!"
            NumericUpDown1.Enabled = False
            GoBox.Enabled = True
            stx.Enabled = True
            sty.Enabled = True
            mm.Enabled = True
            timey.Enabled = True
            timex.Enabled = True
            modeBox.Enabled = True
            Bar.Visible = False
            FowardToolStripMenuItem.Enabled = True
            reset.Enabled = True
        Catch ex As Exception
            MsgBox("Unable to connect MMC-2", MsgBoxStyle.Exclamation)
        End Try


    End Sub

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

    End Sub

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

```
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP-30000P0")

    End Sub

    Private Sub firstpy_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles firstpy.Click

        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP0P30000")


    End Sub

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

    End Sub


    Private Sub exitp_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles exitp.Click

        Dim r As DialogResult = MessageBox.Show("Exit program", "Exit",
MessageBoxButtons.OKCancel, MessageBoxIcon.Question)
        If r = DialogResult.OK Then
            Environment.Exit(0)
        Else

        End If

    End Sub

    Private Sub ExitScan_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ExitScan.Click
        stop1 = True
    End Sub


    Private Sub FowardToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles FowardToolStripMenuItem.Click
        Form2.Show()

    End Sub

    Private Sub ReadToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ReadToolStripMenuItem.Click
        MessageBox.Show("^If not connect MMC-2 can not select value for scan." +
vbNewLine + "^Select Reset in select position button for x=0,y=0." + vbNewLine +
"^mm/step minus for reverse scan." + vbNewLine + "^Can using with FW BELL 5180 and
MMC-2 only." + vbNewLine + "^Time delay is milliseconds." + vbNewLine + "^Excel file
in disk C.", "Help", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information)
    End Sub

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

```
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP30000P30000")

    End Sub

    Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button2.Click
        mmc.WriteString("P:14P0")
        mmc.WriteString("P:15P0")
        mmc.WriteString("A:WP-30000P-30000")

    End Sub

    Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles reset.Click
        Dim r As DialogResult = MessageBox.Show("Give you X=0,Y=0 ", "Reset",
MessageBoxButtons.OKCancel, MessageBoxIcon.Question)
        If r = DialogResult.OK Then
            mmc.WriteString("P:14P0")
            mmc.WriteString("P:15P0")
        Else

        End If

    End Sub
End Class
```

```
'' อิมพอร์ตไลบรารี่ที่จำเป็นต้องใช้ในการเขียนโปรแกรมทั้งหมด
Imports System.Windows.Forms.TabPage
Imports System.IO
Imports System.IO.Ports
Imports System.Threading
Imports System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting
Imports System.Math
Imports Microsoft.Office.Interop


Public Class Form1
    Private iodmm As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488
    Private dmm As Ivi.Visa.Interop.IFormattedIO488

    Public Vtotal As Double
    Public I As Double

    'ตัวแปรค่าความหนา
    Public Thickness As Double
    'ตัวแปรค่าสนามแม่เหล็ก
    Public Magnet As Double
    'ตัวแปรค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ
    Public Rs As Double
    Public p As Double
    Public ns As Double
    Public NB As Double
    Public um As Double
    Public conduct As Double

    '.....'

    Public GPIBVOLTNUM As String = 22

    Public Va As Double
    Public Vb As Double
    Public Vc As Double


    'ตัวแปรค่า I12 เพื่อหา R1
    Public I1201 As Double = -0.01
    Public I1202 As Double = -0.009
    Public I1203 As Double = -0.008
    Public I1204 As Double = -0.007
    Public I1205 As Double = -0.006
    Public I1206 As Double = -0.005
    Public I1207 As Double = -0.004
    Public I1208 As Double = -0.003
    Public I1209 As Double = -0.002
    Public I1210 As Double = -0.001
    Public I1211 As Double = 0.0
    Public I1212 As Double = +0.001
    Public I1213 As Double = +0.002
    Public I1214 As Double = +0.003
    Public I1215 As Double = +0.004
    Public I1216 As Double = +0.005
    Public I1217 As Double = +0.006
    Public I1218 As Double = +0.007
    Public I1219 As Double = +0.008
    Public I1220 As Double = +0.009
    Public I1221 As Double = +0.01
    'ตัวแปรค่า V43 เพื่อหาค่า R1
```

```
Public V4301 As Double
Public V4302 As Double
Public V4303 As Double
Public V4304 As Double
Public V4305 As Double
Public V4306 As Double
Public V4307 As Double
Public V4308 As Double
Public V4309 As Double
Public V4310 As Double
Public V4311 As Double
Public V4312 As Double
Public V4313 As Double
Public V4314 As Double
Public V4315 As Double
Public V4316 As Double
Public V4317 As Double
Public V4318 As Double
Public V4319 As Double
Public V4320 As Double
Public V4321 As Double
'ตัวแปรค่า R1
Public R1 As Double

'.....'

'ตัวแปรค่า I43 เพื่อหาค่า R2
Public I4301 As Double = -0.01
Public I4302 As Double = -0.009
Public I4303 As Double = -0.008
Public I4304 As Double = -0.007
Public I4305 As Double = -0.006
Public I4306 As Double = -0.005
Public I4307 As Double = -0.004
Public I4308 As Double = -0.003
Public I4309 As Double = -0.002
Public I4310 As Double = -0.001
Public I4311 As Double = 0.0
Public I4312 As Double = +0.001
Public I4313 As Double = +0.002
Public I4314 As Double = +0.003
Public I4315 As Double = +0.004
Public I4316 As Double = +0.005
Public I4317 As Double = +0.006
Public I4318 As Double = +0.007
Public I4319 As Double = +0.008
Public I4320 As Double = +0.009
Public I4321 As Double = +0.01
'ตัวแปรค่า V12 เพื่อหาค่า R2
Public V1201 As Double
Public V1202 As Double
Public V1203 As Double
Public V1204 As Double
Public V1205 As Double
Public V1206 As Double
Public V1207 As Double
Public V1208 As Double
Public V1209 As Double
Public V1210 As Double
Public V1211 As Double
Public V1212 As Double
Public V1213 As Double
```

```
Public V1214 As Double
Public V1215 As Double
Public V1216 As Double
Public V1217 As Double
Public V1218 As Double
Public V1219 As Double
Public V1220 As Double
Public V1221 As Double
'ตัวแปรค่า R2
Public R2 As Double

'.....'

'ตัวแปรค่า I14 เพื่อหาค่า R3
Public I1401 As Double = -0.01
Public I1402 As Double = -0.009
Public I1403 As Double = -0.008
Public I1404 As Double = -0.007
Public I1405 As Double = -0.006
Public I1406 As Double = -0.005
Public I1407 As Double = -0.004
Public I1408 As Double = -0.003
Public I1409 As Double = -0.002
Public I1410 As Double = -0.001
Public I1411 As Double = 0.0
Public I1412 As Double = +0.001
Public I1413 As Double = +0.002
Public I1414 As Double = +0.003
Public I1415 As Double = +0.004
Public I1416 As Double = +0.005
Public I1417 As Double = +0.006
Public I1418 As Double = +0.007
Public I1419 As Double = +0.008
Public I1420 As Double = +0.009
Public I1421 As Double = +0.01
'ตัวแปรค่า V23 เพื่อหาค่า R3
Public V2301 As Double
Public V2302 As Double
Public V2303 As Double
Public V2304 As Double
Public V2305 As Double
Public V2306 As Double
Public V2307 As Double
Public V2308 As Double
Public V2309 As Double
Public V2310 As Double
Public V2311 As Double
Public V2312 As Double
Public V2313 As Double
Public V2314 As Double
Public V2315 As Double
Public V2316 As Double
Public V2317 As Double
Public V2318 As Double
Public V2319 As Double
Public V2320 As Double
Public V2321 As Double
'ตัวแปรค่า R3
Public R3 As Double

'.....'
```

```
'ตัวแปรค่า I23 เพื่อหาค่า R4
Public I2301 As Double = -0.01
Public I2302 As Double = -0.009
Public I2303 As Double = -0.008
Public I2304 As Double = -0.007
Public I2305 As Double = -0.006
Public I2306 As Double = -0.005
Public I2307 As Double = -0.004
Public I2308 As Double = -0.003
Public I2309 As Double = -0.002
Public I2310 As Double = -0.001
Public I2311 As Double = 0.0
Public I2312 As Double = +0.001
Public I2313 As Double = +0.002
Public I2314 As Double = +0.003
Public I2315 As Double = +0.004
Public I2316 As Double = +0.005
Public I2317 As Double = +0.006
Public I2318 As Double = +0.007
Public I2319 As Double = +0.008
Public I2320 As Double = +0.009
Public I2321 As Double = +0.01
'ตัวแปรค่า V14 เพื่อหาค่า R4
Public V1401 As Double
Public V1402 As Double
Public V1403 As Double
Public V1404 As Double
Public V1405 As Double
Public V1406 As Double
Public V1407 As Double
Public V1408 As Double
Public V1409 As Double
Public V1410 As Double
Public V1411 As Double
Public V1412 As Double
Public V1413 As Double
Public V1414 As Double
Public V1415 As Double
Public V1416 As Double
Public V1417 As Double
Public V1418 As Double
Public V1419 As Double
Public V1420 As Double
Public V1421 As Double
'ตัวแปรค่า R4
Public R4 As Double

'.....'

'ตัวแปรค่า I13 เพื่อหาค่า R5
Public I1301 As Double = -0.01
Public I1302 As Double = -0.009
Public I1303 As Double = -0.008
Public I1304 As Double = -0.007
Public I1305 As Double = -0.006
Public I1306 As Double = -0.005
Public I1307 As Double = -0.004
Public I1308 As Double = -0.003
Public I1309 As Double = -0.002
Public I1310 As Double = -0.001
Public I1311 As Double = 0.0
Public I1312 As Double = +0.001
```

```
Public I1313 As Double = +0.002
Public I1314 As Double = +0.003
Public I1315 As Double = +0.004
Public I1316 As Double = +0.005
Public I1317 As Double = +0.006
Public I1318 As Double = +0.007
Public I1319 As Double = +0.008
Public I1320 As Double = +0.009
Public I1321 As Double = +0.01
'ตัวแปรค่า V24 เพื่อหาค่า R5
Public V2401 As Double
Public V2402 As Double
Public V2403 As Double
Public V2404 As Double
Public V2405 As Double
Public V2406 As Double
Public V2407 As Double
Public V2408 As Double
Public V2409 As Double
Public V2410 As Double
Public V2411 As Double
Public V2412 As Double
Public V2413 As Double
Public V2414 As Double
Public V2415 As Double
Public V2416 As Double
Public V2417 As Double
Public V2418 As Double
Public V2419 As Double
Public V2420 As Double
Public V2421 As Double


'.............................................................'

'ตัวแปรค่า I24 เพื่อหาค่า R6
Public I2401 As Double = -0.01
Public I2402 As Double = -0.009
Public I2403 As Double = -0.008
Public I2404 As Double = -0.007
Public I2405 As Double = -0.006
Public I2406 As Double = -0.005
Public I2407 As Double = -0.004
Public I2408 As Double = -0.003
Public I2409 As Double = -0.002
Public I2410 As Double = -0.001
Public I2411 As Double = 0.0
Public I2412 As Double = +0.001
Public I2413 As Double = +0.002
Public I2414 As Double = +0.003
Public I2415 As Double = +0.004
Public I2416 As Double = +0.005
Public I2417 As Double = +0.006
Public I2418 As Double = +0.007
Public I2419 As Double = +0.008
Public I2420 As Double = +0.009
Public I2421 As Double = +0.01
'ตัวแปรค่า V13 เพื่อหาค่า R6
Public V1301 As Double
Public V1302 As Double
Public V1303 As Double
Public V1304 As Double
```

```
    Public V1305 As Double
    Public V1306 As Double
    Public V1307 As Double
    Public V1308 As Double
    Public V1309 As Double
    Public V1310 As Double
    Public V1311 As Double
    Public V1312 As Double
    Public V1313 As Double
    Public V1314 As Double
    Public V1315 As Double
    Public V1316 As Double
    Public V1317 As Double
    Public V1318 As Double
    Public V1319 As Double
    Public V1320 As Double
    Public V1321 As Double




    '.....................................................'

    Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles MyBase.Load
        '' =จุดคำสั่งเมื่อเปิดฟอร์มขึ้นมา
        Button11.Enabled = False
        btnGPIBCURRENT.Enabled = False
        btnConnect.Enabled = False

        Button1.Enabled = False
        Button2.Enabled = False
        Button3.Enabled = False
        Button4.Enabled = False
        Button5.Enabled = False
        Button6.Enabled = False
        Button7.Enabled = False

        TPR1.Enabled = False
        TPR2.Enabled = False
        TPR3.Enabled = False
        TPR4.Enabled = False
        TPR5.Enabled = False
        TPR6.Enabled = False
        TabControl1.SelectedIndex = 0
    End Sub


    Public Sub WaitCurrent()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("Current was measured .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitVoltage()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
```

```
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("Voltage was measured .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitR()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("Resistance was calculated .", 1,
"Result")
    End Sub

    Public Sub WaitNextR2()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("The Next Measurement R2 .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitNextR3()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("The Next Measurement R3 .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitNextR4()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("The Next Measurement R4 .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitNextR5()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("The Next Measurement R5 .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitNextR6()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("The Next Measurement R6 .", 1, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitOnMagnet()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
```

```
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("Insert the sample into magnetic field.
Then click MEAS ALL CONTINUE button. .", 5, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitResult()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("Next , Result .", 3, "Result")
    End Sub

    Public Sub WaitCalculate()
        Dim Start, Finish As Double
        Start = Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer
        Finish = Start + 0.5    ' Set end time for 0.5-second duration.
        Do While Microsoft.VisualBasic.DateAndTime.Timer < Finish
        Loop
        CreateObject("WScript.Shell").PopUp("calculating . . . .", 3, "Result")
    End Sub

    Declare Sub Sleep Lib "kernel32" Alias "Sleep" _
(ByVal dwMilliseconds As Long)

    'Tab Input
.....'

    Private Sub Button11_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button11.Click
        Magnet = txbmagnet.Text
        Thickness = txbthickness.Text

        If Thickness = 0 Or Magnet = 0 Then
            CreateObject("WScript.Shell").PopUp("Please enter the value of Magnetic
Field and thickness.", 3, "missing values")
        Else : TabControl1.SelectedTab = TPR1
            Button1.Enabled = True
            Button2.Enabled = True
            Button3.Enabled = True
            Button4.Enabled = True
            Button5.Enabled = True
            Button6.Enabled = True
            Button7.Enabled = True

            TPR1.Enabled = True
            TPR2.Enabled = True
            TPR3.Enabled = True
            TPR4.Enabled = True
            TPR5.Enabled = True
            TPR6.Enabled = True

            Button1.BackColor = Color.Green
            Button2.BackColor = Color.Green
            Button3.BackColor = Color.Green
            Button4.BackColor = Color.Green
            Button5.BackColor = Color.Green
            Button6.BackColor = Color.Green
            Button7.BackColor = Color.Green
```

```
        End If

    End Sub

    'Tab R1.....................................................................'

    Private Sub BTMeasall_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasall.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R all
        BTMeasall.Enabled = False
        BTMeasR1.Enabled = False
        BTNextR1.Enabled = False
        Button1.PerformClick()
        Delay(1.0)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi1201.Text = I1201
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V4301 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv4301.Text = V4301

        Delay(0.05)
        currentNegative9mA()
        txbi1202.Text = I1202
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V4302 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv4302.Text = V4302

        Delay(0.05)
        currentNegative8mA()
        txbi1203.Text = I1203
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V4303 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv4303.Text = V4303

        Delay(0.05)
```

```
currentNegative7mA()
txbi1204.Text = I1204
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4304 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4304.Text = V4304

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi1205.Text = I1205
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4305 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4305.Text = V4305

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi1206.Text = I1206
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4306 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4306.Text = V4306

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi1207.Text = I1207
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4307 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4307.Text = V4307

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi1208.Text = I1208
```

```
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4308 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4308.Text = V4308

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi1209.Text = I1209
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4309 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4309.Text = V4309

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi1210.Text = I1210
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4310 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4310.Text = V4310

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi1211.Text = I1211
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4311 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4311.Text = V4311

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi1212.Text = I1212
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4312 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4312.Text = V4312

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi1213.Text = I1213
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4313 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4313.Text = V4313

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi1214.Text = I1214
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4314 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4314.Text = V4314

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi1215.Text = I1215
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4315 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4315.Text = V4315

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi1216.Text = I1216
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4316 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4316.Text = V4316

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi1217.Text = I1217
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4317 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4317.Text = V4317

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi1218.Text = I1218
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4318 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4318.Text = V4318

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi1219.Text = I1219
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4319 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4319.Text = V4319

Delay(0.05)
currentPositive9mA()
txbi1220.Text = I1220
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
```

```
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V4320 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv4320.Text = V4320

        Delay(0.05)
        currentPositive10mA()
        txbi1221.Text = I1221
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V4321 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv4321.Text = V4321
        DrawLineR1()

        Delay(1)
        R1 = (((V4301 / I1201) + (V4302 / I1202) + (V4303 / I1203) + (V4304 / I1204) +
(V4305 / I1205) + (V4306 / I1206) + (V4307 / I1207) + (V4308 / I1208) + (V4309 /
I1209) + (V4310 / I1210) + (V4312 / I1212) + (V4313 / I1213) + (V4314 / I1214) +
(V4315 / I1215) + (V4316 / I1216) + (V4317 / I1217) + (V4318 / I1218) + (V4319 /
I1219) + (V4320 / I1220) + (V4321 / I1221)) / 20)

        txbr1.Text = R1

        Delay(1)

        BTMeasall.Enabled = True
        BTMeasR1.Enabled = True
        BTNextR1.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

        WaitNextR2()
        BTNextR1.PerformClick()
        BTMeasR2.PerformClick()

        WaitNextR3()
        BTNextR2.PerformClick()
        BTMeasR3.PerformClick()

        WaitNextR4()
        BTNextR3.PerformClick()
        BTMeasR4.PerformClick()

        WaitNextR5()
        BTNextR4.PerformClick()
        WaitOnMagnet()



    End Sub

    Private Sub BTNextR1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTNextR1.Click
        TabControl1.SelectedTab = TPR2
    End Sub
```

```
    ' Tab R2 ..........................................................................'

    Private Sub BTMeasR2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasR2.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R2
        BTMeasR2.Enabled = False
        BTNextR2.Enabled = False
        Button2.PerformClick()
        Delay(1)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi4301.Text = I4301
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1201 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1201.Text = V1201

        Delay(0.05)
        currentNegative9mA()
        txbi4302.Text = I4302
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1202 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1202.Text = V1202

        Delay(0.05)
        currentNegative8mA()
        txbi4303.Text = I4303
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1203 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1203.Text = V1203

        Delay(0.05)
        currentNegative7mA()
        txbi4304.Text = I4304
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1204 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1204.Text = V1204

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi4305.Text = I4305
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1205 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1205.Text = V1205

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi4306.Text = I4306
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1206 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1206.Text = V1206

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi4307.Text = I4307
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1207 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1207.Text = V1207

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi4308.Text = I4308
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1208 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1208.Text = V1208

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi4309.Text = I4309
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1209 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1209.Text = V1209

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi4310.Text = I4310
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1210 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1210.Text = V1210

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi4311.Text = I4311
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1211 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1211.Text = V1211

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi4312.Text = I4312
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
```

```
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1212 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1212.Text = V1212

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi4313.Text = I4313
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1213 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1213.Text = V1213

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi4314.Text = I4314
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1214 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1214.Text = V1214

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi4315.Text = I4315
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1215 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1215.Text = V1215

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi4316.Text = I4316
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Vc = dmm.ReadNumber
V1216 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1216.Text = V1216

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi4317.Text = I4317
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1217 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1217.Text = V1217

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi4318.Text = I4318
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1218 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1218.Text = V1218

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi4319.Text = I4319
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1219 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1219.Text = V1219

Delay(0.05)
currentPositive9mA()
txbi4320.Text = I4320
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1220 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
```

```
        txbv1220.Text = V1220

        Delay(0.05)
        currentPositive10mA()
        txbi4321.Text = I4321
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1221 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1221.Text = V1221
        Delay(1)
        DrawLineR2()

        Delay(1)
        R2 = (((V1201 / I4301) + (V1202 / I4302) + (V1203 / I4303) + (V1204 / I4304) +
(V1205 / I4305) + (V1206 / I4306) + (V1207 / I4307) + (V1208 / I4308) + (V1209 /
I4309) + (V1210 / I4310) + (V1212 / I4312) + (V1213 / I4313) + (V1214 / I4314) +
(V1215 / I4315) + (V1216 / I4316) + (V1217 / I4317) + (V1218 / I4318) + (V1219 /
I4319) + (V1220 / I4320) + (V1221 / I4321)) / 20)
        txbr2.Text = R2

        Delay(1)
        BTMeasR2.Enabled = True
        BTNextR2.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

    End Sub


    Private Sub BTNextR2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTNextR2.Click
        TabControl1.SelectedTab = TPR3
    End Sub

    ' Tab R3 ..........................................................................'


    Private Sub BTMeasR3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasR3.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R3
        BTMeasR3.Enabled = False
        BTNextR3.Enabled = False
        Button3.PerformClick()
        Delay(1)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi1401.Text = I1401
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2301 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2301.Text = V2301

Delay(0.05)
currentNegative9mA()
txbi1402.Text = I1402
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2302 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2302.Text = V2302

Delay(0.05)
currentNegative8mA()
txbi1403.Text = I1403
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2303 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2303.Text = V2303

Delay(0.05)
currentNegative7mA()
txbi1404.Text = I1404
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2304 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2304.Text = V2304

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi1405.Text = I1405
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
```

```
V2305 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2305.Text = V2305

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi1406.Text = I1406
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2306 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2306.Text = V2306

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi1407.Text = I1407
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2307 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2307.Text = V2307

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi1408.Text = I1408
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2308 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2308.Text = V2308

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi1409.Text = I1409
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2309 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2309.Text = V2309
```

```
Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi1410.Text = I1410
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2310 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2310.Text = V2310

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi1411.Text = I1411
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2311 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2311.Text = V2311

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi1412.Text = I1412
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2312 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2312.Text = V2312

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi1413.Text = I1413
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2313 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2313.Text = V2313

Delay(0.05)
```

```
currentPositive3mA()
txbi1414.Text = I1414
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2314 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2314.Text = V2314

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi1415.Text = I1415
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2315 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2315.Text = V2315

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi1416.Text = I1416
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2316 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2316.Text = V2316

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi1417.Text = I1417
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2317 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2317.Text = V2317

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi1418.Text = I1418
```

```
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2318 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2318.Text = V2318

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi1419.Text = I1419
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2319 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2319.Text = V2319

Delay(0.05)
currentPositive9mA()
txbi1420.Text = I1420
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2320 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2320.Text = V2320

Delay(0.05)
currentPositive10mA()
txbi1421.Text = I1421
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2321 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2321.Text = V2321

Delay(1)
DrawLineR3()

Delay(1)
```

```
        R3 = (((V2301 / I1401) + (V2302 / I1402) + (V2303 / I1403) + (V2304 / I1404) +
(V2305 / I1405) + (V2306 / I1406) + (V2307 / I1407) + (V2308 / I1408) + (V2309 /
I1409) + (V2310 / I1410) + (V2312 / I1412) + (V2313 / I1413) + (V2314 / I1414) +
(V2315 / I1415) + (V2316 / I1416) + (V2317 / I1417) + (V2318 / I1418) + (V2319 /
I1419) + (V2320 / I1420) + (V2321 / I1421)) / 20)
        txbr3.Text = R3

        Delay(1)
        BTMeasR3.Enabled = True
        BTNextR3.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

    End Sub

    Private Sub BTNextR3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTNextR3.Click
        TabControl1.SelectedTab = TPR4
    End Sub

    ' Tab R4 ..........................................................................'


    Private Sub BTMeasR4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasR4.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R4
        BTMeasR4.Enabled = False
        BTNextR4.Enabled = False
        Button4.PerformClick()
        Delay(1)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi2301.Text = I2301
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1401 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1401.Text = V1401

        Delay(0.05)
        currentNegative9mA()
        txbi2302.Text = I2302
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1402 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1402.Text = V1402

        Delay(0.05)
```

```
currentNegative8mA()
txbi2303.Text = I2303
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1403 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1403.Text = V1403

Delay(0.05)
currentNegative7mA()
txbi2304.Text = I2304
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1404 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1404.Text = V1404

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi2305.Text = I2305
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1405 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1405.Text = V1405

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi2306.Text = I2306
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1406 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1406.Text = V1406

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi2307.Text = I2307
```

```
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1407 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1407.Text = V1407

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi2308.Text = I2308
Delay(0.205)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1408 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1408.Text = V1408

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi2309.Text = I2309
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1409 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1409.Text = V1409

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi2310.Text = I2310
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1410 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1410.Text = V1410

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi2311.Text = I2311
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1411 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1411.Text = V1411

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi2312.Text = I2312
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1412 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1412.Text = V1412

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi2313.Text = I2313
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1413 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1413.Text = V1413

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi2314.Text = I2314
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1414 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1414.Text = V1414

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi2315.Text = I2315
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1415 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1415.Text = V1415

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi2316.Text = I2316
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1416 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1416.Text = V1416

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi2317.Text = I2317
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1417 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1417.Text = V1417

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi2318.Text = I2318
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1418 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1418.Text = V1418

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi2319.Text = I2319
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
```

```
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1419 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1419.Text = V1419

        Delay(0.05)
        currentPositive9mA()
        txbi2320.Text = I2320
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1420 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1420.Text = V1420

        Delay(0.05)
        currentPositive10mA()
        txbi2321.Text = I2321
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V1421 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv1421.Text = V1421
        Delay(1)
        DrawLineR4()

        Delay(1)
        R4 = (((V1401 / I2301) + (V1402 / I2302) + (V1403 / I2303) + (V1404 / I2304) +
(V1405 / I2305) + (V1406 / I2306) + (V1407 / I2307) + (V1408 / I2308) + (V1409 /
I2309) + (V1410 / I2310) + (V1412 / I2312) + (V1413 / I2313) + (V1414 / I2314) +
(V1415 / I2315) + (V1416 / I2316) + (V1417 / I2317) + (V1418 / I2318) + (V1419 /
I2319) + (V1420 / I2320) + (V1421 / I2321)) / 20)
        txbr4.Text = R4

        Delay(1)
        BTMeasR4.Enabled = True
        BTNextR4.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

    End Sub


    Private Sub BTNextR4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTNextR4.Click
        TabControl1.SelectedTab = TPR5
    End Sub

    ' Tab R5 ..........................................................................'
```

```
    Private Sub BTMeasallcontinue_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasallcontinue.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R all continue

        BTMeasallcontinue.Enabled = False
        BTMeasR5.Enabled = False
        BTNextR5.Enabled = False
        Button5.PerformClick()
        Delay(1)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi1301.Text = I1301
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2401 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2401.Text = V2401

        Delay(0.05)
        currentNegative9mA()
        txbi1302.Text = I1302
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2402 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2402.Text = V2402

        Delay(0.05)
        currentNegative8mA()
        txbi1303.Text = I1303
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2403 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2403.Text = V2403

        Delay(0.05)
        currentNegative7mA()
        txbi1304.Text = I1304
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
```

```
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2404 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2404.Text = V2404

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi1305.Text = I1305
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2405 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2405.Text = V2405

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi1306.Text = I1306
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2406 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2406.Text = V2406

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi1307.Text = I1307
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2407 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2407.Text = V2407

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi1308.Text = I1308
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2408 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2408.Text = V2408

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi1309.Text = I1309
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2409 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2409.Text = V2409

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi1310.Text = I1310
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2410 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2410.Text = V2410

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi1311.Text = I1311
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2411 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2411.Text = V2411

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi1312.Text = I1312
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2412 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2412.Text = V2412

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi1313.Text = I1313
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2413 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2413.Text = V2413

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi1314.Text = I1314
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2414 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2414.Text = V2414

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi1315.Text = I1315
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2415 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2415.Text = V2415

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi1316.Text = I1316
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
```

```
V2416 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2416.Text = V2416

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi1317.Text = I1317
Delay(0.25)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2417 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2417.Text = V2417

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi1318.Text = I1318
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2418 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2418.Text = V2418

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi1319.Text = I1319
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2419 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2419.Text = V2419

Delay(0.05)
currentPositive9mA()
txbi1320.Text = I1320
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2420 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2420.Text = V2420
```

```
        Delay(0.05)
        currentPositive10mA()
        txbi1321.Text = I1321
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2421 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2421.Text = V2421
        Delay(1)
        DrawLineR5()

        Delay(1)


        Delay(1)
        BTMeasallcontinue.Enabled = True
        BTMeasR5.Enabled = True
        BTNextR5.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

        WaitNextR6()
        BTNextR5.PerformClick()
        BTMeasR6.PerformClick()

        WaitResult()
        BTNextR6.PerformClick()
        WaitCalculate()
        BTCalculate.PerformClick()



    End Sub


    Private Sub BTNextR5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTNextR5.Click
        TabControl1.SelectedTab = TPR6
    End Sub

    ' Tab R6 ..........................................................................'

    Private Sub BTMeasR6_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasR6.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R6
        BTMeasR6.Enabled = False
        BTNextR6.Enabled = False
        Button6.PerformClick()
        Delay(1)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi2401.Text = I2401
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1301 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1301.Text = V1301

Delay(0.05)
currentNegative9mA()
txbi2402.Text = I2402
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1302 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1302.Text = V1302

Delay(0.05)
currentNegative8mA()
txbi2403.Text = I2403
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1303 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1303.Text = V1303

Delay(0.05)
currentNegative7mA()
txbi2404.Text = I2404
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1304 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1304.Text = V1304

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi2405.Text = I2405
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1305 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1305.Text = V1305

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi2406.Text = I2406
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1306 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1306.Text = V1306

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi2407.Text = I2407
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1307 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1307.Text = V1307

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi2408.Text = I2408
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1308 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1308.Text = V1308

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi2409.Text = I2409
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
```

```
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1309 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1309.Text = V1309

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi2410.Text = I2410
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1310 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1310.Text = V1310

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi2411.Text = I2411
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1311 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1311.Text = V1311

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi2412.Text = I2412
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1312 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1312.Text = V1312

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi2413.Text = I2413
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Vc = dmm.ReadNumber
V1313 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1313.Text = V1313

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi2414.Text = I2414
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1314 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1314.Text = V1314

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi2415.Text = I2415
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1315 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1315.Text = V1315

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi2416.Text = I2416
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1316 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1316.Text = V1316

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi2417.Text = I2417
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1317 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
```

```
txbv1317.Text = V1317

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi2418.Text = I2418
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1318 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1318.Text = V1318

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi2419.Text = I2419
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1319 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1319.Text = V1319

Delay(0.05)
currentPositive9mA()
txbi2420.Text = I2420
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1320 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1320.Text = V1320

Delay(0.05)
currentPositive10mA()
txbi2421.Text = I2421
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V1321 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv1321.Text = V1321
Delay(1)
```

```
        DrawLineR6()

        Delay(1)
        WaitR()

        Delay(1)
        BTMeasR6.Enabled = True
        BTNextR6.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

    End Sub

    Private Sub BTNextR6_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTNextR6.Click
        TabControl1.SelectedTab = TPResult
    End Sub




    Private Sub BTExit_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTExit.Click
        '' คำสั่งในปุ่มกดปิดการทำงาน
        Try
            SerialPort1.Open()
            SerialPort1.Write("9")
            SerialPort1.Close()
            iodmm.WriteString("D1 X")
            Delay(0.5)
            iodmm.WriteString("V0.00E+00 X")
            Delay(1)
            iodmm.WriteString("D0 X")
            Delay(0.5)
            iodmm.WriteString("I+0.0000E-03 X")
            iodmm.WriteString("F0 X")
            Delay(0.5)
            Me.Close()
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "Serial_port", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error)
        End Try
    End Sub

    Shared _continue As Boolean
    Shared _serialPort As SerialPort

    Private Sub btnConnect_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnConnect.Click
        '' ชุดคำสั่งในการเชื่อมต่อกับ usb port
        Try
            SerialPort1.Close()
            SerialPort1.PortName = "COM" + numCom.Value.ToString()
            SerialPort1.BaudRate = 9600
            SerialPort1.DataBits = 8
            SerialPort1.Parity = Parity.None
            SerialPort1.StopBits = StopBits.One
            SerialPort1.Handshake = Handshake.None
            SerialPort1.Encoding = System.Text.Encoding.Default 'very important!
            Delay(1.5)

            Dim u As Integer
            While (u <= 5)
```

```
                SerialPort1.Open()
                SerialPort1.Write("9")
                SerialPort1.Close()
                Delay(1)
                u = u + 1
            End While


            Button11.Enabled = True
            Button11.BackColor = Color.Green
            btnConnect.Text = "Connected."
            btnConnect.Enabled = False
            numCom.Enabled = False
            btnConnect.BackColor = Color.Yellow

        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "Serial_port", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error)
        End Try

    End Sub

    Private Sub Button1_Click_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ขั่วให้เปิดโหมด 1
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("1")
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Red
        Button2.BackColor = Color.Green
        Button3.BackColor = Color.Green
        Button4.BackColor = Color.Green
        Button5.BackColor = Color.Green
        Button6.BackColor = Color.Green
        Button7.BackColor = Color.Green

    End Sub


    Private Sub Button2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button2.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ขั่วให้เปิดโหมด 2
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("2")
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Green
        Button2.BackColor = Color.Red
        Button3.BackColor = Color.Green
        Button4.BackColor = Color.Green
        Button5.BackColor = Color.Green
        Button6.BackColor = Color.Green
        Button7.BackColor = Color.Green

    End Sub

    Private Sub Button3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button3.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ขั่วให้เปิดโหมด 3
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("3")
```

```
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Green
        Button2.BackColor = Color.Green
        Button3.BackColor = Color.Red
        Button4.BackColor = Color.Green
        Button5.BackColor = Color.Green
        Button6.BackColor = Color.Green
        Button7.BackColor = Color.Green

    End Sub

    Private Sub Button4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button4.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ชั่วให้เปิดโหมด 4
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("4")
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Green
        Button2.BackColor = Color.Green
        Button3.BackColor = Color.Green
        Button4.BackColor = Color.Red
        Button5.BackColor = Color.Green
        Button6.BackColor = Color.Green
        Button7.BackColor = Color.Green

    End Sub

    Private Sub Button5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button5.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ชั่วให้เปิดโหมด 5
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("5")
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Green
        Button2.BackColor = Color.Green
        Button3.BackColor = Color.Green
        Button4.BackColor = Color.Green
        Button5.BackColor = Color.Red
        Button6.BackColor = Color.Green
        Button7.BackColor = Color.Green

    End Sub

    Private Sub Button6_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button6.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ชั่วให้เปิดโหมด 6
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("6")
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Green
        Button2.BackColor = Color.Green
        Button3.BackColor = Color.Green
        Button4.BackColor = Color.Green
        Button5.BackColor = Color.Green
        Button6.BackColor = Color.Red
        Button7.BackColor = Color.Green

    End Sub
```

```
    Private Sub Button7_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button7.Click
        '' ชุดคำสั่งสวิตช์ขั้วให้ปิดทั้งหมด
        SerialPort1.Open()
        SerialPort1.Write("0")
        SerialPort1.Close()

        Button1.BackColor = Color.Green
        Button2.BackColor = Color.Green
        Button3.BackColor = Color.Green
        Button4.BackColor = Color.Green
        Button5.BackColor = Color.Green
        Button6.BackColor = Color.Green
        Button7.BackColor = Color.Red

    End Sub



    '' กำหนดในการจ่ายกระแสตั้งแต่ -10 mA ถึง +10 mA

    Sub currentNegative10mA()
        iodmm.WriteString("I-1.0000E-02 X")
    End Sub

    Sub currentNegative9mA()
        iodmm.WriteString("I-9.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative8mA()
        iodmm.WriteString("I-8.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative7mA()
        iodmm.WriteString("I-7.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative6mA()
        iodmm.WriteString("I-6.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative5mA()
        iodmm.WriteString("I-5.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative4mA()
        iodmm.WriteString("I-4.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative3mA()
        iodmm.WriteString("I-3.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative2mA()
        iodmm.WriteString("I-2.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentNegative1mA()
        iodmm.WriteString("I-1.0000E-03 X")
    End Sub
```

```
    Sub currentPositive0mA()
        iodmm.WriteString("I+0.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive1mA()
        iodmm.WriteString("I+1.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive2mA()
        iodmm.WriteString("I+2.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive3mA()
        iodmm.WriteString("I+3.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive4mA()
        iodmm.WriteString("I+4.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive5mA()
        iodmm.WriteString("I+5.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive6mA()
        iodmm.WriteString("I+6.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive7mA()
        iodmm.WriteString("I+7.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive8mA()
        iodmm.WriteString("I+8.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive9mA()
        iodmm.WriteString("I+9.0000E-03 X")
    End Sub

    Sub currentPositive10mA()
        iodmm.WriteString("I+1.0000E-02 X")
    End Sub

    Private Sub BTCalculate_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTCalculate.Click
        '' ชุดคำสั่งในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ
        Dim Rave As Double = ((R1 + R2 + R3 + R4) / (4))

        Dim pi As Double = (22 / 7)
        Dim q As Double = (1.626 * (1.0E-19))
        Dim ns2 As Double
        Dim NB2 As Double
        Dim Vhall As Double

        I = CDbl(txbi1321.Text)
        Magnet = txbmagnet.Text
        Thickness = txbthickness.Text
        Vtotal = CDbl(txbv1321.Text) + CDbl(txbv2421.Text)

        Vhall = (Vtotal) / 2
```

```
        Rs = (pi * Rave) / (0.6931471806)
        p = (Rs * Thickness)
        ns = Abs(((0.00000002) * I * Magnet) / q * Vtotal)
        NB = (ns / Thickness)

        ns2 = ns / (1.0E+15)
        NB2 = NB / (1.0E+16)

        um = Abs(1 / (q * ns2 * (1.0E+15) * Rs))
        conduct = (1 / p)



        TextBox1.Text = Format(Rs, "#0.00000")
        Delay(0.25)
        TextBox2.Text = Format(p, "#0.00000")
        Delay(0.25)
        TextBox3.Text = Format(ns2, "#0.00000000") + "  E+15"
        Delay(0.25)
        TextBox4.Text = Format(NB2, "#0.00000000") + "  E+16"
        Delay(0.25)
        TextBox5.Text = Format(um, "#0.00000")
        Delay(0.25)
        TextBox6.Text = Format(conduct, "#0.00000")

    End Sub
    Private Sub btnGPIBVOLT_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnGPIBVOLT.Click
        '' ชุดคำสั่งในการติดต่อกับเครื่องวัดแรงดัน
        Dim ioAddress2 As String
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        Try
            ioAddress2 = "GPIB::" + NumCom2.Value.ToString()
            mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
            dmm = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
            dmm.IO() = mgr.Open(ioAddress2)
            dmm.IO.Timeout = 7000

            btnGPIBVOLT.Enabled = False
            Delay(1)
            NumCom2.Enabled = False
            btnGPIBVOLT.BackColor = Color.Yellow
            btnGPIBVOLT.Text = "Connected."
            Delay(0.25)
            btnGPIBCURRENT.Enabled = True
            btnGPIBCURRENT.BackColor = Color.Green
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "DMM", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error)
        End Try
    End Sub

    Private Sub btnGPIBCURRENT_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btnGPIBCURRENT.Click
        '' ชุดคำสั่งในการติดต่อกับเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า
        Dim mgr As Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
        Dim ioAddress As String
        Try
            ioAddress = "GPIB::" + NumCom3.Value.ToString()
            mgr = New Ivi.Visa.Interop.ResourceManager
            iodmm = New Ivi.Visa.Interop.FormattedIO488
            iodmm.IO() = mgr.Open(ioAddress)
```

```
            iodmm.IO.Timeout = 7000
            btnGPIBCURRENT.Enabled = False
            NumCom3.Enabled = False
            NumVoltLimit.Enabled = False
            iodmm.WriteString("REN X")
            Delay(1.5)
            iodmm.WriteString("D1 X")
            Delay(0.5)
            iodmm.WriteString("V" + NumVoltLimit.Value.ToString() + ".00E+00 X")
            Delay(1)
            iodmm.WriteString("D0 X")
            Delay(0.25)
            btnGPIBCURRENT.BackColor = Color.Yellow
            btnGPIBCURRENT.Text = "Connected."
            Delay(0.25)
            btnConnect.Enabled = True
            btnConnect.BackColor = Color.Green
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "Current source",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        End Try

    End Sub

    Public Sub DrawLineR1()
        '' ชุดคำสั่งพล็อตกราฟ R1
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1201, V4301)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1202, V4302)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1203, V4303)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1204, V4304)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1205, V4305)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1206, V4306)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1207, V4307)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1208, V4308)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1209, V4309)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1210, V4310)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1211, V4311)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1212, V4312)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1213, V4313)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1214, V4314)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1215, V4315)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1216, V4316)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1217, V4317)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1218, V4318)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1219, V4319)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1220, V4320)
        Chart1.Series(0).Points.AddXY(I1221, V4321)

        Chart1.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart1.Series(0).IsVisibleInLegend = False
    End Sub

    Public Sub DrawLineR2()
        '' ชุดคำสั่งพล็อตกราฟ R2
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4301, V1201)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4302, V1202)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4303, V1203)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4304, V1204)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4305, V1205)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4306, V1206)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4307, V1207)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4308, V1208)
```

```
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4309, V1209)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4310, V1210)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4311, V1211)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4312, V1212)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4313, V1213)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4314, V1214)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4315, V1215)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4316, V1216)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4317, V1217)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4318, V1218)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4319, V1219)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4320, V1220)
        Chart2.Series(0).Points.AddXY(I4321, V1221)

        Chart2.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart2.Series(0).IsVisibleInLegend = False

    End Sub

    Public Sub DrawLineR3()
        '' ชุดคำสั่งพล็อตกราฟ R3
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1401, V2301)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1402, V2302)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1403, V2303)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1404, V2304)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1405, V2305)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1406, V2306)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1407, V2307)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1408, V2308)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1409, V2309)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1410, V2310)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1411, V2311)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1412, V2312)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1413, V2313)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1414, V2314)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1415, V2315)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1416, V2316)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1417, V2317)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1418, V2318)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1419, V2319)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1420, V2320)
        Chart7.Series(0).Points.AddXY(I1421, V2321)

        Chart7.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart7.Series(0).IsVisibleInLegend = False

    End Sub

    Public Sub DrawLineR4()
        '' ชุดคำสั่งพล็อตกราฟ R4
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2301, V1401)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2302, V1402)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2303, V1403)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2304, V1404)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2305, V1405)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2306, V1406)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2307, V1407)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2308, V1408)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2309, V1409)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2310, V1410)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2311, V1411)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2312, V1412)
```

```
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2313, V1413)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2314, V1414)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2315, V1415)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2316, V1416)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2317, V1417)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2318, V1418)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2319, V1419)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2320, V1420)
        Chart4.Series(0).Points.AddXY(I2321, V1421)

        Chart4.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart4.Series(0).IsVisibleInLegend = False

    End Sub

    Public Sub DrawLineR5()
        '' ชุดคำสั่งพล็อตกราฟ R5
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1301, V2401)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1302, V2402)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1303, V2403)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1304, V2404)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1305, V2405)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1306, V2406)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1307, V2407)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1308, V2408)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1309, V2409)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1310, V2410)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1311, V2411)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1312, V2412)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1313, V2413)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1314, V2414)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1315, V2415)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1316, V2416)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1317, V2417)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1318, V2418)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1319, V2419)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1320, V2420)
        Chart5.Series(0).Points.AddXY(I1321, V2421)

        Chart5.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart5.Series(0).IsVisibleInLegend = False

    End Sub

    Public Sub DrawLineR6()
        '' ชุดคำสั่ง พล็อตกราฟ R6
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2401, V1301)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2402, V1302)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2403, V1303)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2404, V1304)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2405, V1305)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2406, V1306)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2407, V1307)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2408, V1308)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2409, V1309)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2410, V1310)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2411, V1311)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2412, V1312)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2413, V1313)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2414, V1314)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2415, V1315)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2416, V1316)
```

```
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2417, V1317)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2418, V1318)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2419, V1319)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2420, V1320)
        Chart6.Series(0).Points.AddXY(I2421, V1321)

        Chart6.Series(0).ChartType = SeriesChartType.FastLine
        Chart6.Series(0).IsVisibleInLegend = False

    End Sub

    Private Sub BTSave_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTSave.Click
        '' กดปุ่ม save เพื่อทำงานในชุดคำสั่ง SaveFileDialog1
        SaveFileDialog1.ShowDialog()
        Try
            Try
                Chart1.SaveImage("D:\ChartR1.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart2.SaveImage("D:\ChartR2.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart7.SaveImage("D:\ChartR3.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart4.SaveImage("D:\ChartR4.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart5.SaveImage("D:\ChartR5.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart6.SaveImage("D:\ChartR6.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)

                Dim oExcel As Object
                Dim oBook As Object
                Dim oSheet As Object

                'Start a new workbook in Excel
                oExcel = CreateObject("Excel.Application")
                oBook = oExcel.Workbooks.Add


                'Add data to cells of the first worksheet in the new workbook
                oSheet = oBook.Worksheets(1)
                '------------------------ sheet 1-------------------------
                oSheet.Range("A1").Value = "I(mA)"
                oSheet.Range("B1").Value = "V(Volts) of R1,V43,I12"
                oSheet.Range("C1").Value = "V(Volts) of R2,V12,I43"
                oSheet.Range("D1").Value = "V(Volts) of R3,V23,I14"
                oSheet.Range("E1").Value = "V(Volts) of R4,V14,I23"
                oSheet.Range("F1").Value = "V(Volts) of R5,V24,I13"
                oSheet.Range("G1").Value = "V(Volts) of R6,V13,I24"

                oSheet.Range("A2").Value = "-10"
                oSheet.Range("A3").Value = "-9"
                oSheet.Range("A4").Value = "-8"
                oSheet.Range("A5").Value = "-7"
                oSheet.Range("A6").Value = "-6"
                oSheet.Range("A7").Value = "-5"
                oSheet.Range("A8").Value = "-4"
                oSheet.Range("A9").Value = "-3"
                oSheet.Range("A10").Value = "-2"
                oSheet.Range("A11").Value = "-1"
                oSheet.Range("A12").Value = "0"
                oSheet.Range("A13").Value = "1"
```

```
oSheet.Range("A14").Value = "2"
oSheet.Range("A15").Value = "3"
oSheet.Range("A16").Value = "4"
oSheet.Range("A17").Value = "5"
oSheet.Range("A18").Value = "6"
oSheet.Range("A19").Value = "7"
oSheet.Range("A20").Value = "8"
oSheet.Range("A21").Value = "9"
oSheet.Range("A22").Value = "10"

oSheet.Range("B2").Value = txbv4301.Text
oSheet.Range("B3").Value = txbv4302.Text
oSheet.Range("B4").Value = txbv4303.Text
oSheet.Range("B5").Value = txbv4304.Text
oSheet.Range("B6").Value = txbv4305.Text
oSheet.Range("B7").Value = txbv4306.Text
oSheet.Range("B8").Value = txbv4307.Text
oSheet.Range("B9").Value = txbv4308.Text
oSheet.Range("B10").Value = txbv4309.Text
oSheet.Range("B11").Value = txbv4310.Text
oSheet.Range("B12").Value = txbv4311.Text
oSheet.Range("B13").Value = txbv4312.Text
oSheet.Range("B14").Value = txbv4313.Text
oSheet.Range("B15").Value = txbv4314.Text
oSheet.Range("B16").Value = txbv4315.Text
oSheet.Range("B17").Value = txbv4316.Text
oSheet.Range("B18").Value = txbv4317.Text
oSheet.Range("B19").Value = txbv4318.Text
oSheet.Range("B20").Value = txbv4319.Text
oSheet.Range("B21").Value = txbv4320.Text
oSheet.Range("B22").Value = txbv4321.Text

oSheet.Range("C2").Value = txbv1201.Text
oSheet.Range("C3").Value = txbv1202.Text
oSheet.Range("C4").Value = txbv1203.Text
oSheet.Range("C5").Value = txbv1204.Text
oSheet.Range("C6").Value = txbv1205.Text
oSheet.Range("C7").Value = txbv1206.Text
oSheet.Range("C8").Value = txbv1207.Text
oSheet.Range("C9").Value = txbv1208.Text
oSheet.Range("C10").Value = txbv1209.Text
oSheet.Range("C11").Value = txbv1210.Text
oSheet.Range("C12").Value = txbv1211.Text
oSheet.Range("C13").Value = txbv1212.Text
oSheet.Range("C14").Value = txbv1213.Text
oSheet.Range("C15").Value = txbv1214.Text
oSheet.Range("C16").Value = txbv1215.Text
oSheet.Range("C17").Value = txbv1216.Text
oSheet.Range("C18").Value = txbv1217.Text
oSheet.Range("C19").Value = txbv1218.Text
oSheet.Range("C20").Value = txbv1219.Text
oSheet.Range("C21").Value = txbv1220.Text
oSheet.Range("C22").Value = txbv1221.Text

oSheet.Range("D2").Value = txbv2301.Text
oSheet.Range("D3").Value = txbv2302.Text
oSheet.Range("D4").Value = txbv2303.Text
oSheet.Range("D5").Value = txbv2304.Text
oSheet.Range("D6").Value = txbv2305.Text
oSheet.Range("D7").Value = txbv2306.Text
oSheet.Range("D8").Value = txbv2307.Text
oSheet.Range("D9").Value = txbv2308.Text
```

```
oSheet.Range("D10").Value = txbv2309.Text
oSheet.Range("D11").Value = txbv2310.Text
oSheet.Range("D12").Value = txbv2311.Text
oSheet.Range("D13").Value = txbv2312.Text
oSheet.Range("D14").Value = txbv2313.Text
oSheet.Range("D15").Value = txbv2314.Text
oSheet.Range("D16").Value = txbv2315.Text
oSheet.Range("D17").Value = txbv2316.Text
oSheet.Range("D18").Value = txbv2317.Text
oSheet.Range("D19").Value = txbv2318.Text
oSheet.Range("D20").Value = txbv2319.Text
oSheet.Range("D21").Value = txbv2320.Text
oSheet.Range("D22").Value = txbv2321.Text

oSheet.Range("E2").Value = txbv1401.Text
oSheet.Range("E3").Value = txbv1402.Text
oSheet.Range("E4").Value = txbv1403.Text
oSheet.Range("E5").Value = txbv1404.Text
oSheet.Range("E6").Value = txbv1405.Text
oSheet.Range("E7").Value = txbv1406.Text
oSheet.Range("E8").Value = txbv1407.Text
oSheet.Range("E9").Value = txbv1408.Text
oSheet.Range("E10").Value = txbv1409.Text
oSheet.Range("E11").Value = txbv1410.Text
oSheet.Range("E12").Value = txbv1411.Text
oSheet.Range("E13").Value = txbv1412.Text
oSheet.Range("E14").Value = txbv1413.Text
oSheet.Range("E15").Value = txbv1414.Text
oSheet.Range("E16").Value = txbv1415.Text
oSheet.Range("E17").Value = txbv1416.Text
oSheet.Range("E18").Value = txbv1417.Text
oSheet.Range("E19").Value = txbv1418.Text
oSheet.Range("E20").Value = txbv1419.Text
oSheet.Range("E21").Value = txbv1420.Text
oSheet.Range("E22").Value = txbv1421.Text

oSheet.Range("F2").Value = txbv2401.Text
oSheet.Range("F3").Value = txbv2402.Text
oSheet.Range("F4").Value = txbv2403.Text
oSheet.Range("F5").Value = txbv2404.Text
oSheet.Range("F6").Value = txbv2405.Text
oSheet.Range("F7").Value = txbv2406.Text
oSheet.Range("F8").Value = txbv2407.Text
oSheet.Range("F9").Value = txbv2408.Text
oSheet.Range("F10").Value = txbv2409.Text
oSheet.Range("F11").Value = txbv2410.Text
oSheet.Range("F12").Value = txbv2411.Text
oSheet.Range("F13").Value = txbv2412.Text
oSheet.Range("F14").Value = txbv2413.Text
oSheet.Range("F15").Value = txbv2414.Text
oSheet.Range("F16").Value = txbv2415.Text
oSheet.Range("F17").Value = txbv2416.Text
oSheet.Range("F18").Value = txbv2417.Text
oSheet.Range("F19").Value = txbv2418.Text
oSheet.Range("F20").Value = txbv2419.Text
oSheet.Range("F21").Value = txbv2420.Text
oSheet.Range("F22").Value = txbv2421.Text

oSheet.Range("G2").Value = txbv1301.Text
oSheet.Range("G3").Value = txbv1302.Text
oSheet.Range("G4").Value = txbv1303.Text
oSheet.Range("G5").Value = txbv1304.Text
```

```
                oSheet.Range("G6").Value = txbv1305.Text
                oSheet.Range("G7").Value = txbv1306.Text
                oSheet.Range("G8").Value = txbv1307.Text
                oSheet.Range("G9").Value = txbv1308.Text
                oSheet.Range("G10").Value = txbv1309.Text
                oSheet.Range("G11").Value = txbv1310.Text
                oSheet.Range("G12").Value = txbv1311.Text
                oSheet.Range("G13").Value = txbv1312.Text
                oSheet.Range("G14").Value = txbv1313.Text
                oSheet.Range("G15").Value = txbv1314.Text
                oSheet.Range("G16").Value = txbv1315.Text
                oSheet.Range("G17").Value = txbv1316.Text
                oSheet.Range("G18").Value = txbv1317.Text
                oSheet.Range("G19").Value = txbv1318.Text
                oSheet.Range("G20").Value = txbv1319.Text
                oSheet.Range("G21").Value = txbv1320.Text
                oSheet.Range("G22").Value = txbv1321.Text

                'Save the Workbook and Quit Excel
                oBook.SaveAs("C:\Data.xls")
                oExcel.Quit()

                MessageBox.Show("ChartR1-ChartR6 and Data in disk D", "Save...",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information)
            Catch ex As Exception
                Chart1.SaveImage("E:\ChartR1.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart2.SaveImage("E:\ChartR2.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart7.SaveImage("E:\ChartR3.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart4.SaveImage("E:\ChartR4.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart5.SaveImage("E:\ChartR5.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Chart6.SaveImage("E:\ChartR6.png",
System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Png)
                Dim oExcel As Object
                Dim oBook As Object
                Dim oSheet As Object

                'Start a new workbook in Excel
                oExcel = CreateObject("Excel.Application")
                oBook = oExcel.Workbooks.Add


                'Add data to cells of the first worksheet in the new workbook
                oSheet = oBook.Worksheets(1)
                '------------------------ sheet 1-------------------------
                oSheet.Range("A1").Value = "I(mA)"
                oSheet.Range("B1").Value = "V(Volts) of R1,V43,I12"
                oSheet.Range("C1").Value = "V(Volts) of R2,V12,I43"
                oSheet.Range("D1").Value = "V(Volts) of R3,V23,I14"
                oSheet.Range("E1").Value = "V(Volts) of R4,V14,I23"
                oSheet.Range("F1").Value = "V(Volts) of R5,V24,I13"
                oSheet.Range("G1").Value = "V(Volts) of R6,V13,I24"

                oSheet.Range("A2").Value = "-10"
                oSheet.Range("A3").Value = "-9"
                oSheet.Range("A4").Value = "-8"
                oSheet.Range("A5").Value = "-7"
                oSheet.Range("A6").Value = "-6"
```

```
oSheet.Range("A7").Value = "-5"
oSheet.Range("A8").Value = "-4"
oSheet.Range("A9").Value = "-3"
oSheet.Range("A10").Value = "-2"
oSheet.Range("A11").Value = "-1"
oSheet.Range("A12").Value = "0"
oSheet.Range("A13").Value = "1"
oSheet.Range("A14").Value = "2"
oSheet.Range("A15").Value = "3"
oSheet.Range("A16").Value = "4"
oSheet.Range("A17").Value = "5"
oSheet.Range("A18").Value = "6"
oSheet.Range("A19").Value = "7"
oSheet.Range("A20").Value = "8"
oSheet.Range("A21").Value = "9"
oSheet.Range("A22").Value = "10"

oSheet.Range("B2").Value = txbv4301.Text
oSheet.Range("B3").Value = txbv4302.Text
oSheet.Range("B4").Value = txbv4303.Text
oSheet.Range("B5").Value = txbv4304.Text
oSheet.Range("B6").Value = txbv4305.Text
oSheet.Range("B7").Value = txbv4306.Text
oSheet.Range("B8").Value = txbv4307.Text
oSheet.Range("B9").Value = txbv4308.Text
oSheet.Range("B10").Value = txbv4309.Text
oSheet.Range("B11").Value = txbv4310.Text
oSheet.Range("B12").Value = txbv4311.Text
oSheet.Range("B13").Value = txbv4312.Text
oSheet.Range("B14").Value = txbv4313.Text
oSheet.Range("B15").Value = txbv4314.Text
oSheet.Range("B16").Value = txbv4315.Text
oSheet.Range("B17").Value = txbv4316.Text
oSheet.Range("B18").Value = txbv4317.Text
oSheet.Range("B19").Value = txbv4318.Text
oSheet.Range("B20").Value = txbv4319.Text
oSheet.Range("B21").Value = txbv4320.Text
oSheet.Range("B22").Value = txbv4321.Text

oSheet.Range("C2").Value = txbv1201.Text
oSheet.Range("C3").Value = txbv1202.Text
oSheet.Range("C4").Value = txbv1203.Text
oSheet.Range("C5").Value = txbv1204.Text
oSheet.Range("C6").Value = txbv1205.Text
oSheet.Range("C7").Value = txbv1206.Text
oSheet.Range("C8").Value = txbv1207.Text
oSheet.Range("C9").Value = txbv1208.Text
oSheet.Range("C10").Value = txbv1209.Text
oSheet.Range("C11").Value = txbv1210.Text
oSheet.Range("C12").Value = txbv1211.Text
oSheet.Range("C13").Value = txbv1212.Text
oSheet.Range("C14").Value = txbv1213.Text
oSheet.Range("C15").Value = txbv1214.Text
oSheet.Range("C16").Value = txbv1215.Text
oSheet.Range("C17").Value = txbv1216.Text
oSheet.Range("C18").Value = txbv1217.Text
oSheet.Range("C19").Value = txbv1218.Text
oSheet.Range("C20").Value = txbv1219.Text
oSheet.Range("C21").Value = txbv1220.Text
oSheet.Range("C22").Value = txbv1221.Text

oSheet.Range("D2").Value = txbv2301.Text
```

```
oSheet.Range("D3").Value = txbv2302.Text
oSheet.Range("D4").Value = txbv2303.Text
oSheet.Range("D5").Value = txbv2304.Text
oSheet.Range("D6").Value = txbv2305.Text
oSheet.Range("D7").Value = txbv2306.Text
oSheet.Range("D8").Value = txbv2307.Text
oSheet.Range("D9").Value = txbv2308.Text
oSheet.Range("D10").Value = txbv2309.Text
oSheet.Range("D11").Value = txbv2310.Text
oSheet.Range("D12").Value = txbv2311.Text
oSheet.Range("D13").Value = txbv2312.Text
oSheet.Range("D14").Value = txbv2313.Text
oSheet.Range("D15").Value = txbv2314.Text
oSheet.Range("D16").Value = txbv2315.Text
oSheet.Range("D17").Value = txbv2316.Text
oSheet.Range("D18").Value = txbv2317.Text
oSheet.Range("D19").Value = txbv2318.Text
oSheet.Range("D20").Value = txbv2319.Text
oSheet.Range("D21").Value = txbv2320.Text
oSheet.Range("D22").Value = txbv2321.Text

oSheet.Range("E2").Value = txbv1401.Text
oSheet.Range("E3").Value = txbv1402.Text
oSheet.Range("E4").Value = txbv1403.Text
oSheet.Range("E5").Value = txbv1404.Text
oSheet.Range("E6").Value = txbv1405.Text
oSheet.Range("E7").Value = txbv1406.Text
oSheet.Range("E8").Value = txbv1407.Text
oSheet.Range("E9").Value = txbv1408.Text
oSheet.Range("E10").Value = txbv1409.Text
oSheet.Range("E11").Value = txbv1410.Text
oSheet.Range("E12").Value = txbv1411.Text
oSheet.Range("E13").Value = txbv1412.Text
oSheet.Range("E14").Value = txbv1413.Text
oSheet.Range("E15").Value = txbv1414.Text
oSheet.Range("E16").Value = txbv1415.Text
oSheet.Range("E17").Value = txbv1416.Text
oSheet.Range("E18").Value = txbv1417.Text
oSheet.Range("E19").Value = txbv1418.Text
oSheet.Range("E20").Value = txbv1419.Text
oSheet.Range("E21").Value = txbv1420.Text
oSheet.Range("E22").Value = txbv1421.Text

oSheet.Range("F2").Value = txbv2401.Text
oSheet.Range("F3").Value = txbv2402.Text
oSheet.Range("F4").Value = txbv2403.Text
oSheet.Range("F5").Value = txbv2404.Text
oSheet.Range("F6").Value = txbv2405.Text
oSheet.Range("F7").Value = txbv2406.Text
oSheet.Range("F8").Value = txbv2407.Text
oSheet.Range("F9").Value = txbv2408.Text
oSheet.Range("F10").Value = txbv2409.Text
oSheet.Range("F11").Value = txbv2410.Text
oSheet.Range("F12").Value = txbv2411.Text
oSheet.Range("F13").Value = txbv2412.Text
oSheet.Range("F14").Value = txbv2413.Text
oSheet.Range("F15").Value = txbv2414.Text
oSheet.Range("F16").Value = txbv2415.Text
oSheet.Range("F17").Value = txbv2416.Text
oSheet.Range("F18").Value = txbv2417.Text
oSheet.Range("F19").Value = txbv2418.Text
oSheet.Range("F20").Value = txbv2419.Text
```

```
                oSheet.Range("F21").Value = txbv2420.Text
                oSheet.Range("F22").Value = txbv2421.Text

                oSheet.Range("G2").Value = txbv1301.Text
                oSheet.Range("G3").Value = txbv1302.Text
                oSheet.Range("G4").Value = txbv1303.Text
                oSheet.Range("G5").Value = txbv1304.Text
                oSheet.Range("G6").Value = txbv1305.Text
                oSheet.Range("G7").Value = txbv1306.Text
                oSheet.Range("G8").Value = txbv1307.Text
                oSheet.Range("G9").Value = txbv1308.Text
                oSheet.Range("G10").Value = txbv1309.Text
                oSheet.Range("G11").Value = txbv1310.Text
                oSheet.Range("G12").Value = txbv1311.Text
                oSheet.Range("G13").Value = txbv1312.Text
                oSheet.Range("G14").Value = txbv1313.Text
                oSheet.Range("G15").Value = txbv1314.Text
                oSheet.Range("G16").Value = txbv1315.Text
                oSheet.Range("G17").Value = txbv1316.Text
                oSheet.Range("G18").Value = txbv1317.Text
                oSheet.Range("G19").Value = txbv1318.Text
                oSheet.Range("G20").Value = txbv1319.Text
                oSheet.Range("G21").Value = txbv1320.Text
                oSheet.Range("G22").Value = txbv1321.Text

                'Save the Workbook and Quit Excel
                oBook.SaveAs("E:\Data.xls")
                oExcel.Quit()

                MessageBox.Show("ChartR1-ChartR6 and Data in disk E", "Save...",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Information)
            End Try

        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Error,Your computer without disk E or disk D", "Save...",
MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error)
        End Try

    End Sub

    Private Sub SaveFileDialog1_FileOk(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.ComponentModel.CancelEventArgs) Handles SaveFileDialog1.FileOk
        '' ชุดคำสั่งในการ save file ข้อมูลในการจัดเป็นไฟล์ .txt
        Dim FiletosaveAs As String = SaveFileDialog1.FileName
        Dim ObjectWrite As New System.IO.StreamWriter(FiletosaveAs)

        Dim a1 As String =
"************************************************************"
        Dim a2 As String = "************** Hall Effect Measurement System
***************"
        Dim a3 As String =
"************************************************************"
        Dim a4 As String = "                Sheet resistance : " & TextBox1.Text
        Dim a5 As String = "                     Resistivity : " & TextBox2.Text
        Dim a6 As String = "     Sheet carrier concentration : " & TextBox3.Text
        Dim a7 As String = "      Bulk carrier concentration : " & TextBox4.Text
        Dim a8 As String = "               Majority mobility : " & TextBox5.Text
        Dim a9 As String = "                    Conductivity : " & TextBox6.Text
        Dim a10 As String =
"************************************************************"
        Dim a11 As String = "******      Developed by Mr.Narasad Phikun-ngoen
*******"
```

```
        Dim a12 As String = "**     Advisor: Associate prof.Dr. Warawoot Thowladda
**"
        Dim a13 As String = "**           Co-Advisor:Dr. s.Tipawan Khlayboonme
**"
        Dim a14 As String = "***     SUREFACE PHYSICS AND LASER RESEARCH LABORATORY
**"
        Dim a15 As String = "**********     DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS
**********"
        Dim a16 As String = "**    KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
**"
        Dim a17 As String =
"************************************************************"

        ObjectWrite.Write(a1 & vbCrLf & a2 & vbCrLf & a3 & vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf &
a4 & vbCrLf & vbCrLf & a5 & vbCrLf & vbCrLf & a6 & vbCrLf & vbCrLf & a7 & vbCrLf &
vbCrLf & a8 & vbCrLf & vbCrLf & a9 & vbCrLf & vbCrLf & vbCrLf & a10 & vbCrLf & a11 &
vbCrLf & a12 & vbCrLf & a13 & vbCrLf & a14 & vbCrLf & a15 & vbCrLf & a16 & vbCrLf &
a17)
        ObjectWrite.Close()

    End Sub

    Private Sub Form1_FormClosing(ByVal sender As Object, ByVal aaa As
FormClosingEventArgs) Handles Me.FormClosing

        Dim msgResult As DialogResult
        msgResult = MessageBox.Show("Do you want exit program ", "Exit",
MessageBoxButtons.OKCancel, MessageBoxIcon.Question)
        If msgResult = DialogResult.OK Then
            aaa.Cancel = False
        Else
            aaa.Cancel = True
        End If
    End Sub



    Private Sub btReset_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles btReset.Click
        Try
            SerialPort1.Open()
            SerialPort1.Write("9")
            SerialPort1.Close()
            iodmm.WriteString("D1 X")
            Delay(0.5)
            iodmm.WriteString("V0.00E+00 X")
            Delay(1)
            iodmm.WriteString("D0 X")
            Delay(0.5)
            iodmm.WriteString("I+0.0000E-03 X")
            iodmm.WriteString("F0 X")
            Delay(0.5)
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show("Unable to connect ", "Serial_port", MessageBoxButtons.OK,
MessageBoxIcon.Error)
        End Try
    End Sub

    Private Sub BTMeasR1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasR1.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R1
        BTMeasall.Enabled = False
```

```
BTMeasR1.Enabled = False
BTNextR1.Enabled = False
Button1.PerformClick()
Delay(1.0)
iodmm.WriteString("F1 X")

Delay(0.05)
currentNegative10mA()
txbi1201.Text = I1201
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4301 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4301.Text = V4301

Delay(0.05)
currentNegative9mA()
txbi1202.Text = I1202
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4302 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4302.Text = V4302

Delay(0.05)
currentNegative8mA()
txbi1203.Text = I1203
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4303 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4303.Text = V4303

Delay(0.05)
currentNegative7mA()
txbi1204.Text = I1204
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Vc = dmm.ReadNumber
V4304 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4304.Text = V4304

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi1205.Text = I1205
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4305 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4305.Text = V4305

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi1206.Text = I1206
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4306 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4306.Text = V4306

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi1207.Text = I1207
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4307 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4307.Text = V4307

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi1208.Text = I1208
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4308 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
```

```
txbv4308.Text = V4308

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi1209.Text = I1209
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4309 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4309.Text = V4309

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi1210.Text = I1210
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4310 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4310.Text = V4310

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi1211.Text = I1211
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4311 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4311.Text = V4311

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi1212.Text = I1212
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4312 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4312.Text = V4312
```

```
Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi1213.Text = I1213
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4313 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4313.Text = V4313

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi1214.Text = I1214
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4314 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4314.Text = V4314

Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi1215.Text = I1215
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4315 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4315.Text = V4315

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi1216.Text = I1216
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4316 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4316.Text = V4316

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
```

```
txbi1217.Text = I1217
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4317 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4317.Text = V4317

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi1218.Text = I1218
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4318 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4318.Text = V4318

Delay(0.05)
currentPositive8mA()
txbi1219.Text = I1219
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4319 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4319.Text = V4319

Delay(0.05)
currentPositive9mA()
txbi1220.Text = I1220
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V4320 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv4320.Text = V4320

Delay(0.05)
currentPositive10mA()
txbi1221.Text = I1221
Delay(0.05)
```

```
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V4321 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv4321.Text = V4321
        DrawLineR1()

        Delay(1)
        R1 = (((V4301 / I1201) + (V4302 / I1202) + (V4303 / I1203) + (V4304 / I1204) +
(V4305 / I1205) + (V4306 / I1206) + (V4307 / I1207) + (V4308 / I1208) + (V4309 /
I1209) + (V4310 / I1210) + (V4312 / I1212) + (V4313 / I1213) + (V4314 / I1214) +
(V4315 / I1215) + (V4316 / I1216) + (V4317 / I1217) + (V4318 / I1218) + (V4319 /
I1219) + (V4320 / I1220) + (V4321 / I1221)) / 20)

        txbr1.Text = R1

        Delay(1)

        BTMeasall.Enabled = True
        BTMeasR1.Enabled = True
        BTNextR1.Enabled = True
        Button7.PerformClick()
    End Sub

    Private Sub BTMeasR5_Click_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles BTMeasR5.Click
        '' ชุดคำสั่งในการวัดค่า R5
        BTMeasallcontinue.Enabled = False
        BTMeasR5.Enabled = False
        BTNextR5.Enabled = False
        Button5.PerformClick()
        Delay(1)
        iodmm.WriteString("F1 X")

        Delay(0.05)
        currentNegative10mA()
        txbi1301.Text = I1301
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2401 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2401.Text = V2401

        Delay(0.05)
        currentNegative9mA()
        txbi1302.Text = I1302
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
```

```
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2402 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2402.Text = V2402

Delay(0.05)
currentNegative8mA()
txbi1303.Text = I1303
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2403 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2403.Text = V2403

Delay(0.05)
currentNegative7mA()
txbi1304.Text = I1304
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2404 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2404.Text = V2404

Delay(0.05)
currentNegative6mA()
txbi1305.Text = I1305
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2405 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2405.Text = V2405

Delay(0.05)
currentNegative5mA()
txbi1306.Text = I1306
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
```

```
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2406 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2406.Text = V2406

Delay(0.05)
currentNegative4mA()
txbi1307.Text = I1307
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2407 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2407.Text = V2407

Delay(0.05)
currentNegative3mA()
txbi1308.Text = I1308
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2408 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2408.Text = V2408

Delay(0.05)
currentNegative2mA()
txbi1309.Text = I1309
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2409 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2409.Text = V2409

Delay(0.05)
currentNegative1mA()
txbi1310.Text = I1310
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
```

```
V2410 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2410.Text = V2410

Delay(0.05)
currentPositive0mA()
txbi1311.Text = I1311
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2411 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2411.Text = V2411

Delay(0.05)
currentPositive1mA()
txbi1312.Text = I1312
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2412 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2412.Text = V2412

Delay(0.05)
currentPositive2mA()
txbi1313.Text = I1313
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2413 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2413.Text = V2413

Delay(0.05)
currentPositive3mA()
txbi1314.Text = I1314
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2414 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2414.Text = V2414
```

```
Delay(0.05)
currentPositive4mA()
txbi1315.Text = I1315
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2415 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2415.Text = V2415

Delay(0.05)
currentPositive5mA()
txbi1316.Text = I1316
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2416 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2416.Text = V2416

Delay(0.05)
currentPositive6mA()
txbi1317.Text = I1317
Delay(0.25)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2417 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2417.Text = V2417

Delay(0.05)
currentPositive7mA()
txbi1318.Text = I1318
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Va = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vb = dmm.ReadNumber
Delay(0.05)
dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
Vc = dmm.ReadNumber
V2418 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
txbv2418.Text = V2418

Delay(0.05)
```

```
        currentPositive8mA()
        txbi1319.Text = I1319
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2419 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2419.Text = V2419

        Delay(0.05)
        currentPositive9mA()
        txbi1320.Text = I1320
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2420 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2420.Text = V2420

        Delay(0.05)
        currentPositive10mA()
        txbi1321.Text = I1321
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Va = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vb = dmm.ReadNumber
        Delay(0.05)
        dmm.WriteString("Meas:Volt:DC? 10,0.00003")
        Vc = dmm.ReadNumber
        V2421 = ((Va + Vb + Vc) / 3)
        txbv2421.Text = V2421
        Delay(1)
        DrawLineR5()

        Delay(1)


        Delay(1)
        BTMeasallcontinue.Enabled = True
        BTMeasR5.Enabled = True
        BTNextR5.Enabled = True
        Button7.PerformClick()

    End Sub


    Private Sub clearchart2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clearchar2.Click
        Chart2.Series(0).Points.Clear()
```

```
    End Sub

    Private Sub clearchart1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clearchart1.Click
        Chart1.Series(0).Points.Clear()
    End Sub

    Private Sub clearchar7_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clearchar7.Click
        Chart7.Series(0).Points.Clear()
    End Sub

    Private Sub clearchart4_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clearchart4.Click
        Chart4.Series(0).Points.Clear()
    End Sub

    Private Sub clearchar5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clearchar5.Click
        Chart5.Series(0).Points.Clear()
    End Sub

    Private Sub clearchart6_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles clearchart6.Click
        Chart6.Series(0).Points.Clear()
    End Sub
End Class
```

```
int Pin2 = 2; //ประกาศใช้งาน Pinoutput

int Pin3 = 3;

int Pin4 = 4;

int Pin5 = 5;

int Pin6 = 6;

int Pin7 = 7;

int Pin8 = 8;

int Pin9 = 9;

int Pin10 = 10;



void setup()

{

Serial.begin(9600);        // set serial speed

pinMode(Pin10, OUTPUT);    // set output

digitalWrite(Pin10, LOW);  //turn off LED

pinMode(Pin2, OUTPUT);

digitalWrite(Pin2, LOW);

pinMode(Pin3, OUTPUT);

digitalWrite(Pin3, LOW);

pinMode(Pin4, OUTPUT);
```

```
 digitalWrite(Pin4, LOW);
 pinMode(Pin5, OUTPUT);
 digitalWrite(Pin5, LOW);
 pinMode(Pin6, OUTPUT);
 digitalWrite(Pin6, LOW);
 pinMode(Pin7, OUTPUT);
 digitalWrite(Pin7, LOW);
 pinMode(Pin8, OUTPUT);
 digitalWrite(Pin8, LOW);
 pinMode(Pin9, OUTPUT);
 digitalWrite(Pin9, LOW);

}

void loop(){
while (Serial.available() == 0);
int val = Serial.read() - '0';

// สั่งเปิดสวิตซ์ ค่า จาก VB
```

```
if (val == 1) {
Serial.println("LED on"); // ส่งข้อความผ่าน serial port
digitalWrite(Pin2, HIGH);
}
else
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin2, LOW);
}

if (val == 2) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin3, HIGH);
}
else
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin3, LOW);
}
```

```
if (val == 3) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin4, HIGH);
}
else
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin4, LOW);
}

if (val == 4) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin5, HIGH);
}
else
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin5, LOW);
}
```

```
if (val == 5) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin6, HIGH);
}
else
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin6, LOW);
}

if (val == 6) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin7, HIGH);
}
else
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin7, LOW);
}
```

```
// ส่วนบอกสถานะ


if (val == 1 ) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(250);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
}


else if (val==2)
{
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH); // turn on LED
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
```

```
delay(250);

Serial.println("LED on");

digitalWrite(Pin10, HIGH);

}



else if (val==3)

{

Serial.println("LED on");

digitalWrite(Pin10, HIGH); // turn on LED

delay(250);

Serial.println("LED OFF");

digitalWrite(Pin10, LOW);

delay(250);

Serial.println("LED on");

digitalWrite(Pin10, HIGH);

}



else if (val==4)

{

Serial.println("LED on");
```

```
digitalWrite(Pin10, HIGH); // turn on LED
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(250);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
}

else if (val==5)
{
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH); // turn on LED
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(250);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
}
```

```
else if (val==6)
{
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(250);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
}

else if (val==0)
{
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
}

else if (val==9)
```

```
{
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(100);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(100);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(100);
Serial.println("LED on");
```

```
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(100);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(100);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin10, LOW);
delay(100);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin10, HIGH);
delay(100);
```

```
 Serial.println("LED OFF");
 digitalWrite(Pin10, LOW);
 delay(100);
 Serial.println("LED on");
 digitalWrite(Pin10, HIGH);
 delay(100);
 Serial.println("LED OFF");
 digitalWrite(Pin10, LOW);
 delay(100);
 Serial.println("LED on");
 digitalWrite(Pin10, HIGH);
 delay(100);
 Serial.println("LED OFF");
 digitalWrite(Pin10, LOW);
 delay(100);
 Serial.println("LED on");
 digitalWrite(Pin10, HIGH);
 delay(100);
 Serial.println("LED OFF");
 digitalWrite(Pin10, LOW);
```

```
 delay(100);

 Serial.println("LED on");

 digitalWrite(Pin10, HIGH);

 delay(100);

 Serial.println("LED OFF");

 digitalWrite(Pin10, LOW);

 delay(100);

 Serial.println("LED on");

 digitalWrite(Pin10, HIGH);

 delay(100);

Serial.println("LED OFF");

digitalWrite(Pin10, LOW);

delay(100);

}


// สถานะ sample

//นอกสนามแม่เหล็กขา 8 ทำงาน

//ในสนามแม่เหล็กขา 9 ทำงาน
```

```
if (val == 1 ) {
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin8, HIGH);
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin8, LOW);
delay(250);
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin8, HIGH);
}

else if (val==2)
{
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin8, HIGH); // turn on LED
delay(250);
Serial.println("LED OFF");
digitalWrite(Pin8, LOW);
delay(250);
Serial.println("LED on");
```

```
 digitalWrite(Pin8, HIGH);
 }

 else if (val==3)
 {
 Serial.println("LED on");
 digitalWrite(Pin8, HIGH); // turn on LED
 delay(250);
 Serial.println("LED OFF");
 digitalWrite(Pin8, LOW);
 delay(250);
 Serial.println("LED on");
 digitalWrite(Pin8, HIGH);
 }

else if (val==4)
{
Serial.println("LED on");
digitalWrite(Pin8, HIGH); // turn on LED
delay(250);
```

```
Serial.println("LED OFF");

digitalWrite(Pin8, LOW);

delay(250);

Serial.println("LED on");

digitalWrite(Pin8, HIGH);

}



else

{

Serial.println("LED OFF");

digitalWrite(Pin8, LOW);

}



//*************************************//



if (val == 5 )

{

Serial.println("LED on");

digitalWrite(Pin9, HIGH);

delay(250);
```

```
 Serial.println("LED OFF");

 digitalWrite(Pin9, LOW);

 delay(250);

 Serial.println("LED on");

 digitalWrite(Pin9, HIGH);

 }


 else if (val==6)

 {

 Serial.println("LED on");

 digitalWrite(Pin9, HIGH); // turn on LED

 delay(250);

 Serial.println("LED OFF");

 digitalWrite(Pin9, LOW);

 delay(250);

 Serial.println("LED on");

 digitalWrite(Pin9, HIGH);

 }


 else
```

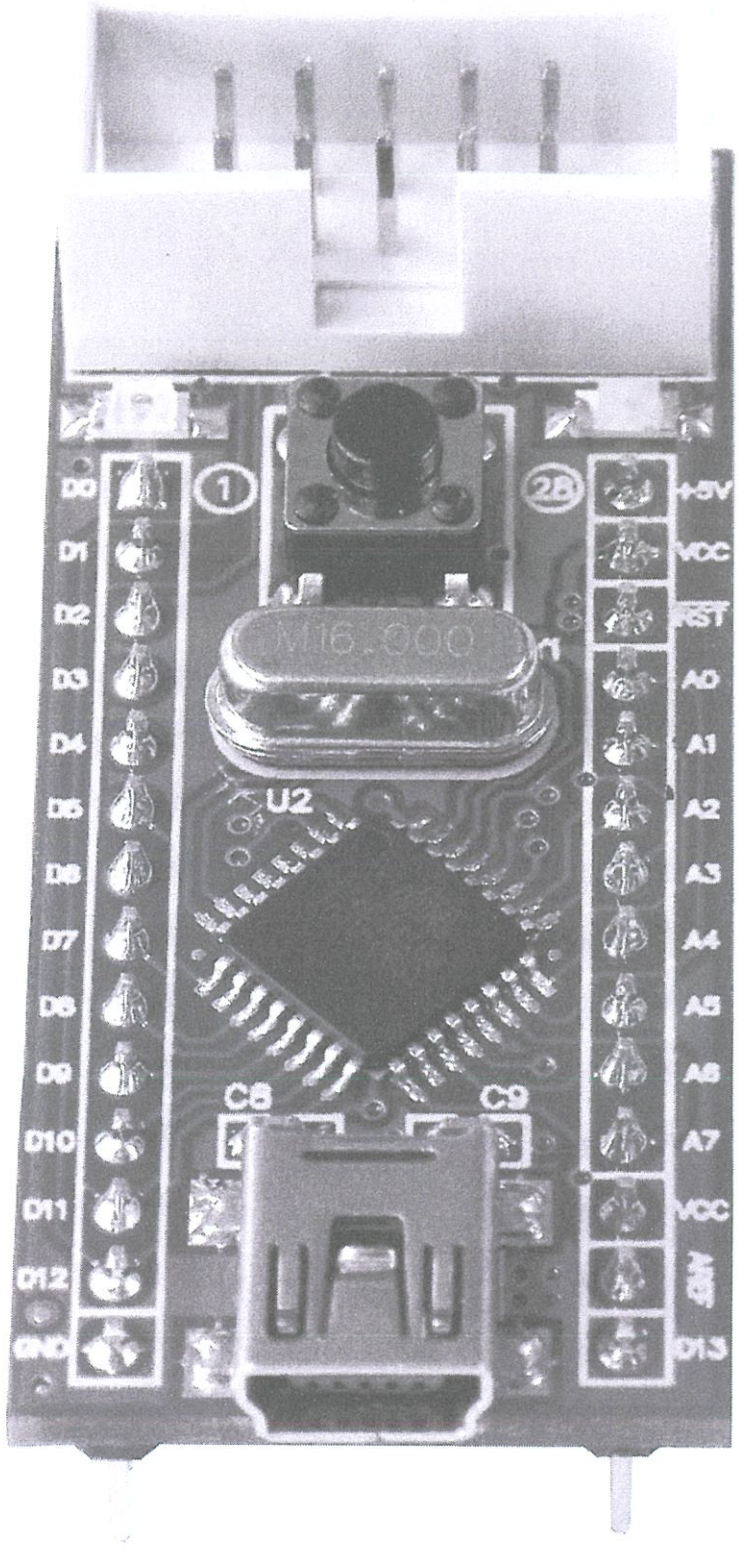
```
{

Serial.println("LED OFF");

digitalWrite(Pin9, LOW);

}




//*************************************//



Serial.println(val);

Serial.flush(); // clear serial port

}
```

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์ที่ใช้

- บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
- รีเลย์
- ทรานซิสเตอร์
- ไดโอด

ET-EASY168 STAMP



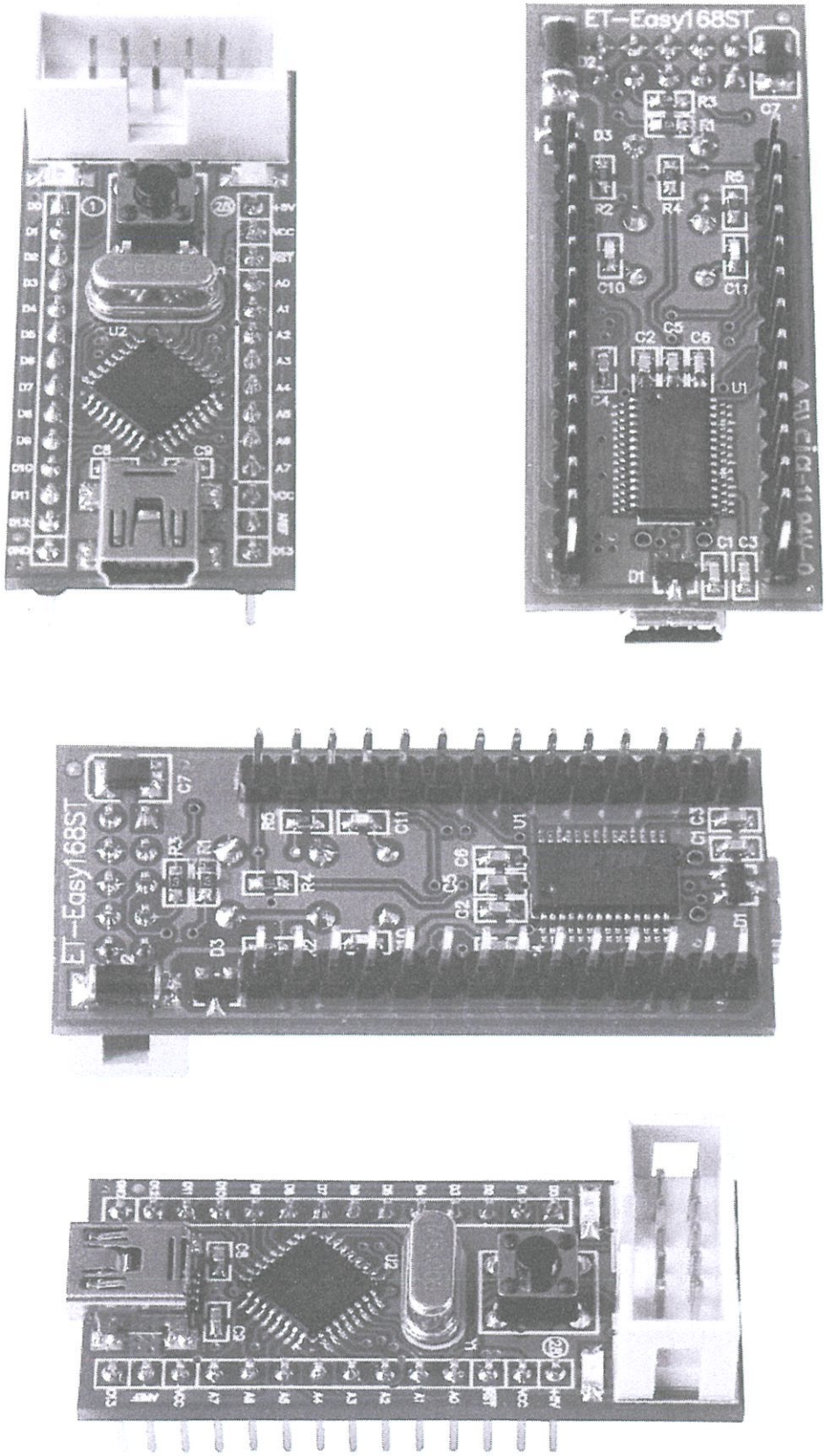
รูปแสดงโครงสร้างของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

ET-EASY168 STAMP เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ในตระกูล AVR8 ขนาดเล็กจิ๋ว โดยมีขนาดของบอร์ดเพียง 2cm x 5cm เท่านั้น ซึ่งขนาดบอร์ด ประมาณเท่ากับตัวถังของไอซี 28 DIP 300 โดยเลือกใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR8 เบอร์ ATmega168 ของ ATMEL เป็น MCU ประจำบอร์ด โดยเลือกใช้ MCU ที่มีรูปร่างตัวถังแบบ 32 TQFP พร้อมวงจรรอบนอกที่จำเป็นอย่าง Oscillator และ Reset รวมไว้ด้วยภายในบอร์ด นอกจากนี้แล้วภายในตัวบอร์ดยังได้รวมเอาไอซี USB Bridge ของ FTDI เบอร์ FT232R เพื่อใช้ติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมด้วย RS232 กับคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ต USB ได้โดยตรง

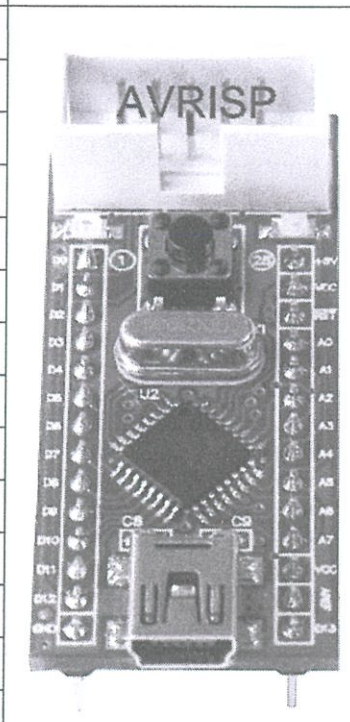
ทำให้บอร์ด ET-EASY168 STAMP เป็นบอร์ดทดลองขนาดเล็กที่เพียบพร้อมไปด้วยวงจรพื้นฐานที่จำเป็นต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR8 อย่างแท้จริง เพียงแต่เสียบสาย USB จากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ PC เข้ากับขั้ว USB ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ก็สามารถทำการเขียนโปรแกรม และ Download Code ให้กับ MCU เพื่อทำการทดลองได้ทันที

คุณสมบัติของบอร์ด

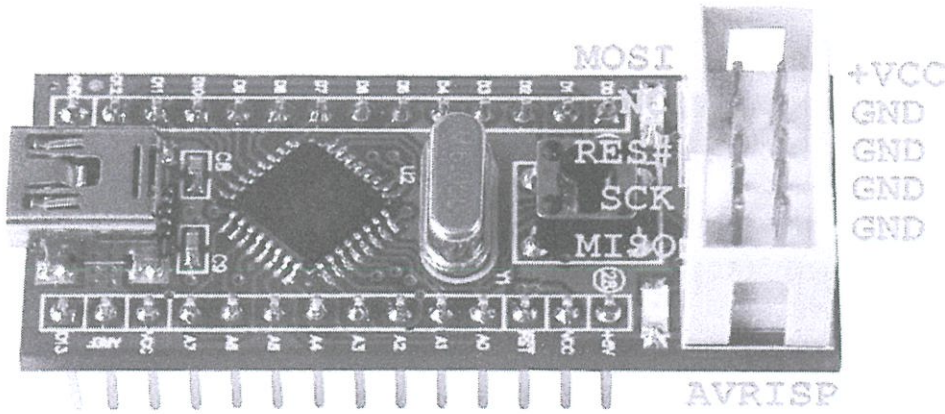
- เลือกใช้ MCU ตระกูล AVR8 เบอร์ ATmega168 ของ ATMEL Run ความถี่ 16.00 MHz
  - มีหน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรม 16KByte ถ้าใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านระบบ AVRISP หรือ 14Kbyte เมื่อใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านระบบ Boot Loader RS232
  - มี SRAM ใช้งานขนาด 1KByte และ EEPROM ใช้งานขนาด 512 Byte
  - มี GPIO ใช้งานจำนวน 22 บิต
    - Digital GPIO จำนวน 14 บิต
    - Analog Input (ADC) ขนาดความละเอียด 10บิต จำนวน 8 ช่อง
- ใช้งานกับแรงดันไฟตรงขนาด +5VDC โดยใช้ได้ทั้งกับแหล่งจ่าย +5VDC/500mA จากพอร์ต USB และจากแหล่งจ่าย +5VDC จากภายนอกได้ด้วย พร้อม LED Power แสดงสถานะของแหล่งจ่าย
- มีวงจร External Reset แบบ RC Reset และ Switch Reset พร้อมภายในบอร์ด
- ขั้วต่อใช้งานวางตัวบน Pin Header ระยะห่าง 2.54mm(100mil) ขนาด 28 Pin (ด้านละ14Pin) ระยะห่าง 600mil(1.5cm) ง่ายต่อการนำไปต่อประยุกต์ใช้งาน และ ขยายวงจร I/O สามารถใช้กับ Project Board และ PCB เอนกประสงค์ได้โดยง่าย
- มีขั้วต่อ USB สำหรับเชื่อมต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ PC ผ่าน USB Bridge ของ FTDI ในรูปแบบของการสื่อสารอนุกรม RS232 สำหรับใช้งานสื่อสารและ Download Code ให้กับ MCU ในบอร์ด
- มีขั้ว AVRISP แบบ IDE 10PIN สำหรับใช้ Download โปรแกรมให้กับ MCU ภายในบอร์ดในกรณีไม่ต้องการใช้การพัฒนาโปรแกรมผ่านทาง Boot Loader
- มี LED แสดงสถานะ โดยต่อกับ PB5 ของ AVR (Digital-13 ของ Arduino Project) สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ทดลองการทำงานอย่างง่าย

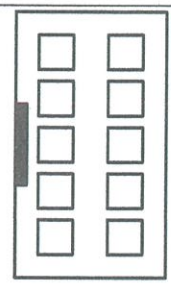


รูปแสดง ลักษณะของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

AVR	Arduino	Pin	ET-EASY168 STAMP	Pin	Arduino	AVR
PD0	Digital-0	1		28	+5V(+Vin)	+5V(+Vin)
PD1	Digital-1	2		27	+VCC(+5V)	+VCC(+5V)
PD2	Digital-2	3		26	RESET#	RESET(PC6)
PD3	Digital-3	4		25	Analog-0	PC0/ADC0
PD4	Digital-4	5		24	Analog-1	PC1/ADC1
PD5	Digital-5	6		23	Analog-2	PC2/ADC2
PD6	Digital-6	7		22	Analog-3	PC3/ADC3
PD7	Digital-7	8		21	Analog-4	PC4/ADC4
PB0	Digital-8	9		20	Analog-5	PC5/ADC5
PB1	Digital-9	10		19	Analog-6	ADC6
PB2	Digital-10	11		18	Analog-7	ADC7
PB3	Digital-11	12		17	+VCC(+5V)	+VCC(+5V)
PB4	Digital-12	13		16	+AREF	+AREF
GND	GND	14		15	Digital-13	PB5

ตารางแสดง การจัดสรรขาสัญญาณของบอร์ด ET-EASY168 STAMP



AVR	Arduino	Pin	AVRISP	Pin	Arduino	AVR
PB3	Digital-11	MOSI		+VCC	+VCC	+VCC
-	-	NC		GND	GND	GND
RES#	RES#	RES#		GND	GND	GND
PB5	Digital-13	SCK		GND	GND	GND
PB4	Digital-12	MISO		GND	GND	GND

หน้าที่ของขาสัญญาณในการใช้งานแบบ "Arduino Project"

- +5V(+Vin) เป็นขาสำหรับใช้เป็นจุดรับแรงดันขนาด +5VDC จากภายนอกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด
- +VCC(+5V) เป็นขาแหล่งจ่ายไฟจุดเดียวกันกับที่ป้อนให้กับ +VCC ของ MCU ซึ่งจุดนี้จะรับแรงดันมาจาก 2 แหล่ง ด้วยกันคือ ขารับแรงดัน +5V(+Vin) จากขา 28 ของบอร์ด และ จากขา +VUSB(+5V) จากขั้ว USB ของบอร์ด โดยมี Diode ป้องกันการย้อนกลับของแรงดันไว้แล้ว
- +AREF เป็นขาสำหรับรับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (Analog Reference) ให้กับวงจร Analog Input ในกรณีต้องการใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก
- RESET# เป็นขาสัญญาณ RESET ของ CPU ทำงานที่ Logic "0"
- Digital[0..13] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V) ต่างๆ
- Analog[0..7] เป็นขา Input แบบ Analog สามารถรับ Input แบบ Analog 0..+5V

หน้าที่ของขาสัญญาณในการใช้งานแบบ "AVR Micro Controller"

- +5V(+Vin) เป็นขาสำหรับใช้เป็นจุดรับแรงดันขนาด +5VDC จากภายนอกเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด
- +VCC(+5V) เป็นขาแหล่งจ่ายไฟจุดเดียวกันกับที่ป้อนให้กับ +VCC ของ MCU ซึ่งจุดนี้จะรับแรงดันมาจาก 2 แหล่ง ด้วยกันคือ ขารับแรงดัน +5V(+Vin) จากขา 28 ของบอร์ด และ จากขา +VUSB(+5V) จากขั้ว USB ของบอร์ด โดยมี Diode ป้องกันการย้อนกลับของแรงดันไว้แล้ว
- +AREF เป็นขาสำหรับรับสัญญาณแรงดันอ้างอิง (Analog Reference) ให้กับวงจร Analog Input ในกรณีต้องการใช้แรงดันอ้างอิงจากภายนอก
- RESET# เป็นขาสัญญาณ RESET ของ CPU ทำงานที่ Logic "0"
- PB[0..5] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V) ต่างๆ
- PD[0..7] เป็นขา I/O แบบ Digital สามารถใช้งานเชื่อมต่อกับสัญญาณ Logic TTL (5V) ต่างๆ
- PC[0..5] เป็นขา I/O ซึ่งสามารถกำหนดให้เป็นได้ทั้ง Digital และ Analog Input
- ADC6,ADC7 เป็นขา Input แบบ Analog สามารถรับ Input แบบ Analog 0..+5V

การพัฒนาโปรแกรมของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

ในการพัฒนาโปรแกรมของบอร์ด ET-EASY168 STAMP นั้น ผู้ใช้สามารถเลือกใช้วิธีการพัฒนาโปรแกรมได้ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ

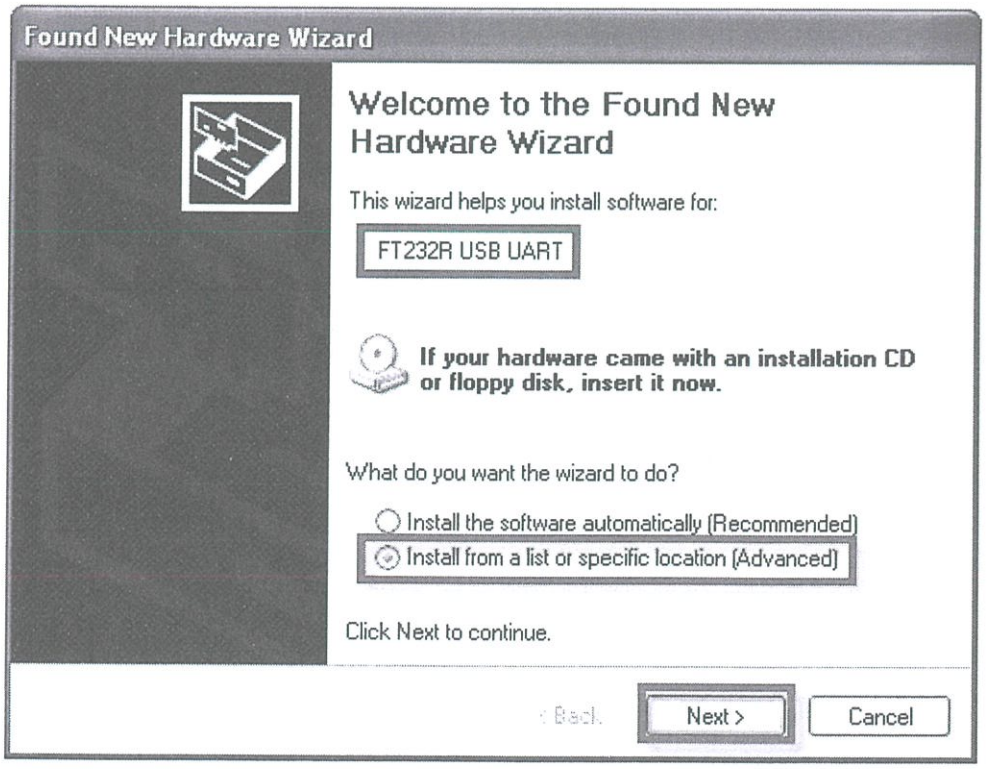
- **AVR Micro Controller** เป็นการพัฒนาโปรแกรมตามรูปแบบของ AVR Micro Controller ปรกติ ซึ่งสามารถเลือกใช้โปรแกรมภาษาใดๆก็ได้ที่รองรับการใช้งานร่วมกับ AVR เบอร์ ATmega168 ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกใช้โปรแกรมในการพัฒนาได้ตามความถนัด เช่น ภาษาเบสิก BASCOM-AVR หรือ ภาษาซี เช่น Code Vision และ WinAVR เป็นต้น
- **Arduino Project** เป็นการพัฒนาโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมและชุดคำสั่งในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซี (C++) ของ “Arduino Project” ซึ่งเป็นโครงการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR แบบ Open Source ซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโครงการที่เปิดเผยทั้ง Source Code ในการพัฒนาให้ทั้งหมดและยังมีตัวอย่างโครงงานพร้อมตัวอย่างโปรแกรมการทดลองต่างๆแจกจ่ายให้ผู้สนใจนำมาใช้ศึกษา เรียนรู้และทดลอง ได้ฟรี โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายใดๆ ผู้สนใจสามารถเข้าไปค้นหารายละเอียดต่างๆของ Arduino Project นี้ได้ http://www.arduino.cc/

****

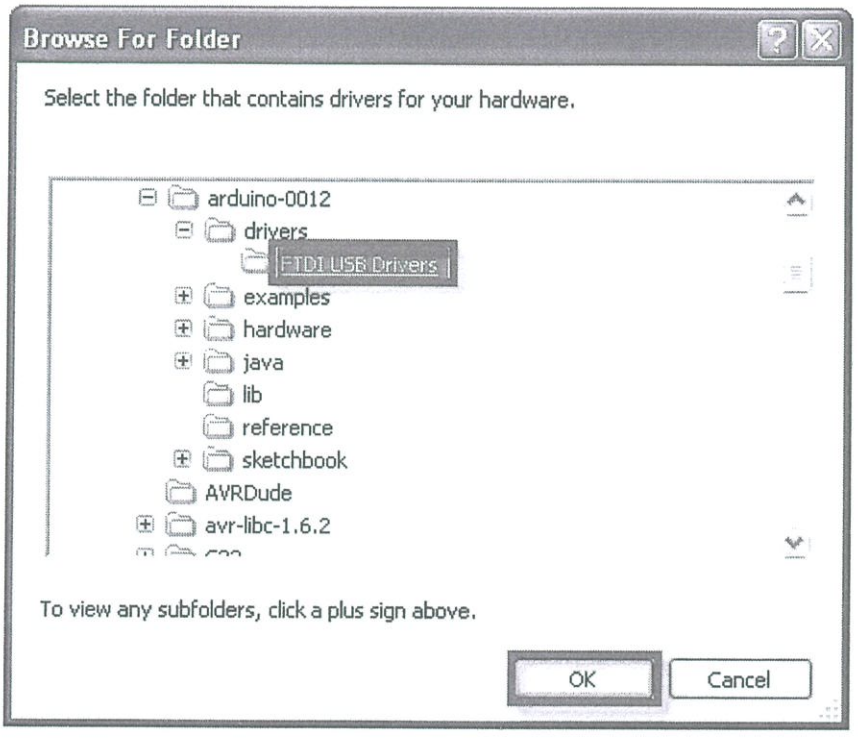
การติดตั้ง Driver ของ USB Bridge ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP

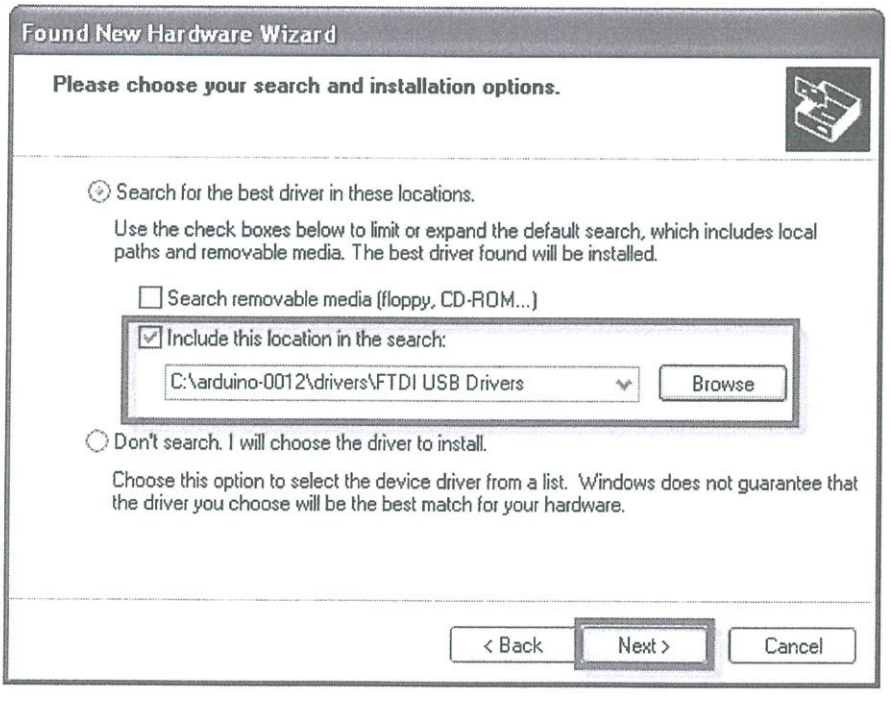
บอร์ด ET-EASY168 STAMP จะใช้ชิพ USB Bridge ของ FTDI เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ PC โดย USB Bridge ของ FTDI จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อและติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ PC กับ MCU ATmega168 ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ในรูปแบบของพอร์ตอนุกรม (Visual Com Port) โดยโปรแกรม Application ต่างๆที่ทำงานอยู่บนคอมพิวเตอร์ PC รวมทั้งโปรแกรม Arduino จะมองเห็น พอร์ต USB ที่เชื่อมต่อกับบอร์ด ET-EASY168 STAMP เป็นพอร์ตสื่อสารอนุกรม (Com Port) ช่องหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้เคยทำการติดตั้ง Driver สำหรับ USB Bridge ของ FTDI ไว้ก่อนแล้ว เมื่อทำการเชื่อมต่อสาย USB ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP เข้ากับ USB HUB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ PC แล้ว Windows จะทำการติดตั้ง Driver ให้เองโดยอัตโนมัติ แต่ถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ยังไม่เคยติดตั้ง Driver ของ FTDI ไว้ก่อนก็จะต้องทำการติดตั้ง Driver ให้กับบอร์ดให้เรียบร้อยเสียก่อนซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมแผ่น CD ROM ที่บรรจุ Driver ของ FTDI ไว้ให้พร้อม หรือ ในกรณีที่ผู้ใช้ได้ทำการติดตั้งโปรแกรมของ Arduino ไว้เรียบร้อยแล้ว ภายในโฟล์เดอร์ของโปรแกรม Arduino ก็จะมี Driver ของ FTDI จัดเตรียมไว้ให้เรียบร้อบแล้ว โดยจะอยู่ที่ "C:\arduino-0012\drivers\FTDI USB Drivers\"
2. ทำการเสียบสาย USB ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP เข้ากับพอร์ต USB HUB ของเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ซึ่ง Windows จะตรวจพบอุปกรณ์ใหม่ โดยเป็น "FT232R USB UART" และแจ้งให้ผู้ใช้ทำการติดตั้ง Driver ให้กับอุปกรณ์ ดังรูป

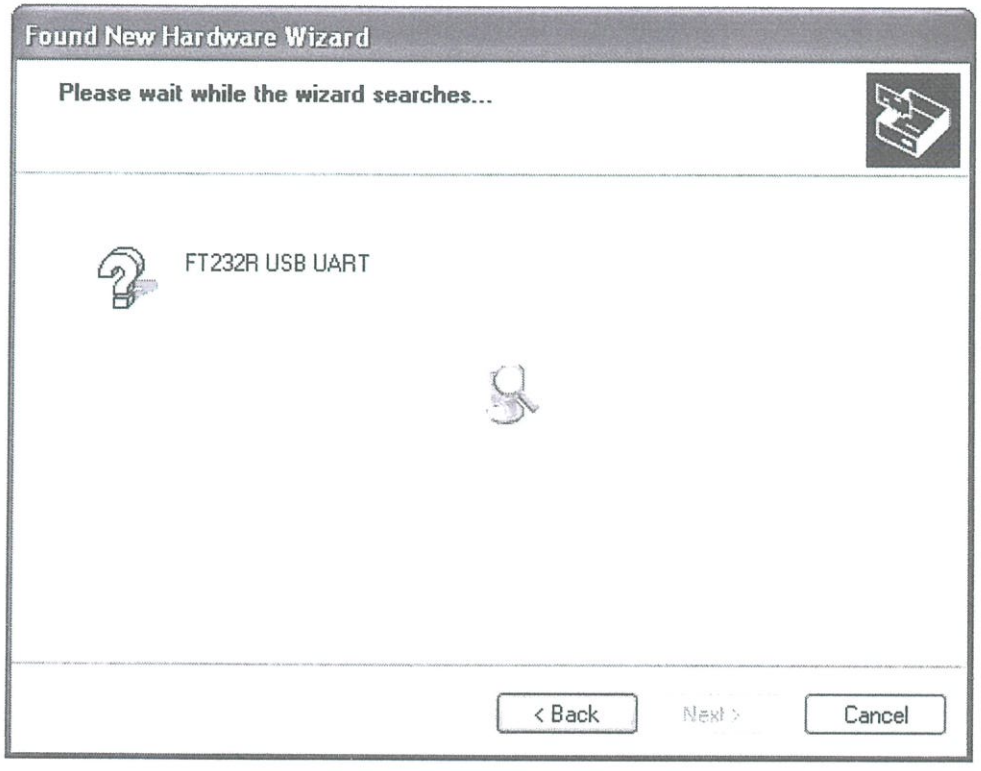


3. ให้เลือก Install from list or specific location(Advanced) แล้วเลือก Next ซึ่ง Windows ก็จะแจ้งให้ผู้ใช้ระบุตำแหน่งโฟลเดอร์ที่บรรจุไฟล์ Driver ของ FTDI ไว้ ก็ให้เลือกที่ Browse และเลือกไปยัง Drive และ โฟลเดอร์ที่เก็บไฟล์ Driver ไว้ ซึ่งถ้าผู้ใช้ได้ทำการติดตั้งโปรแกรมของ Arduino ไว้แล้ว ก็ให้เลือกไปที่ "C:\arduino-0012\drivers\FTDI USB Drivers" แล้วเลือก Next ดังรูป

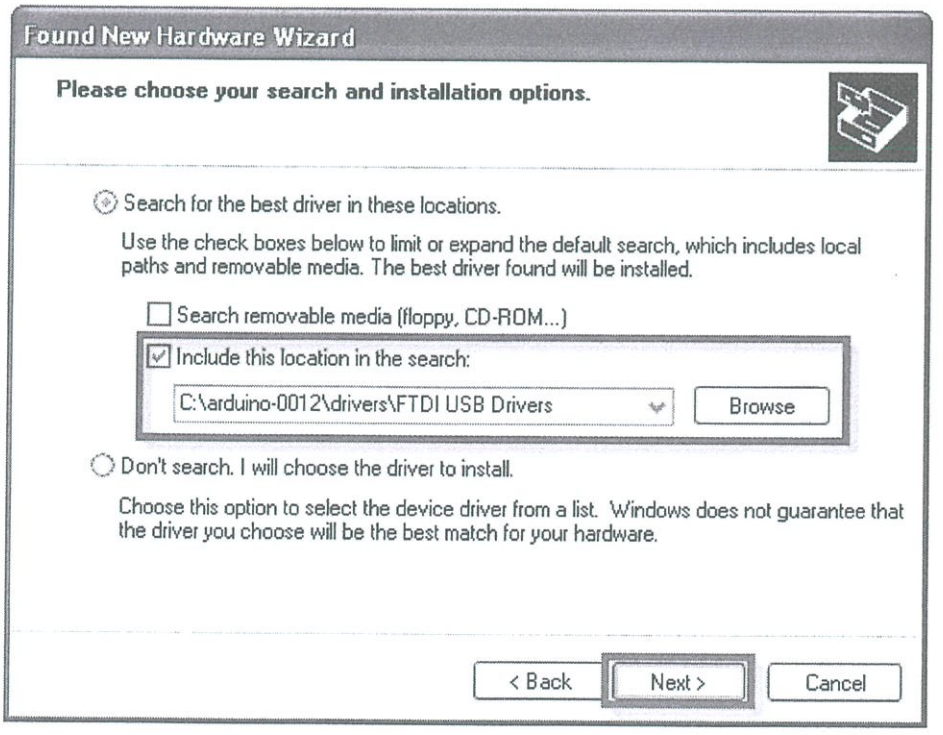




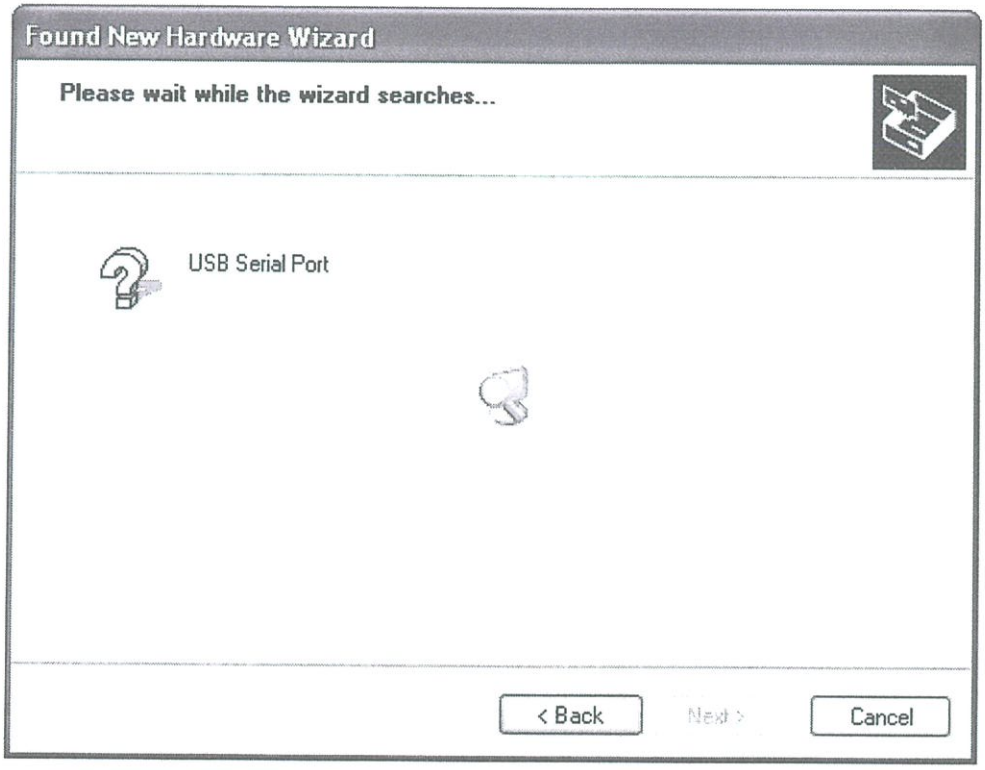
4. ในขั้นตอนนี้โปรแกรม Windows จะทำการค้นหาและติดตั้ง Driver ให้กับอุปกรณ์ ให้รอสักครู่จนการทำงานเสร็จเรียบร้อย แล้วเลือก Finish ดังรูป



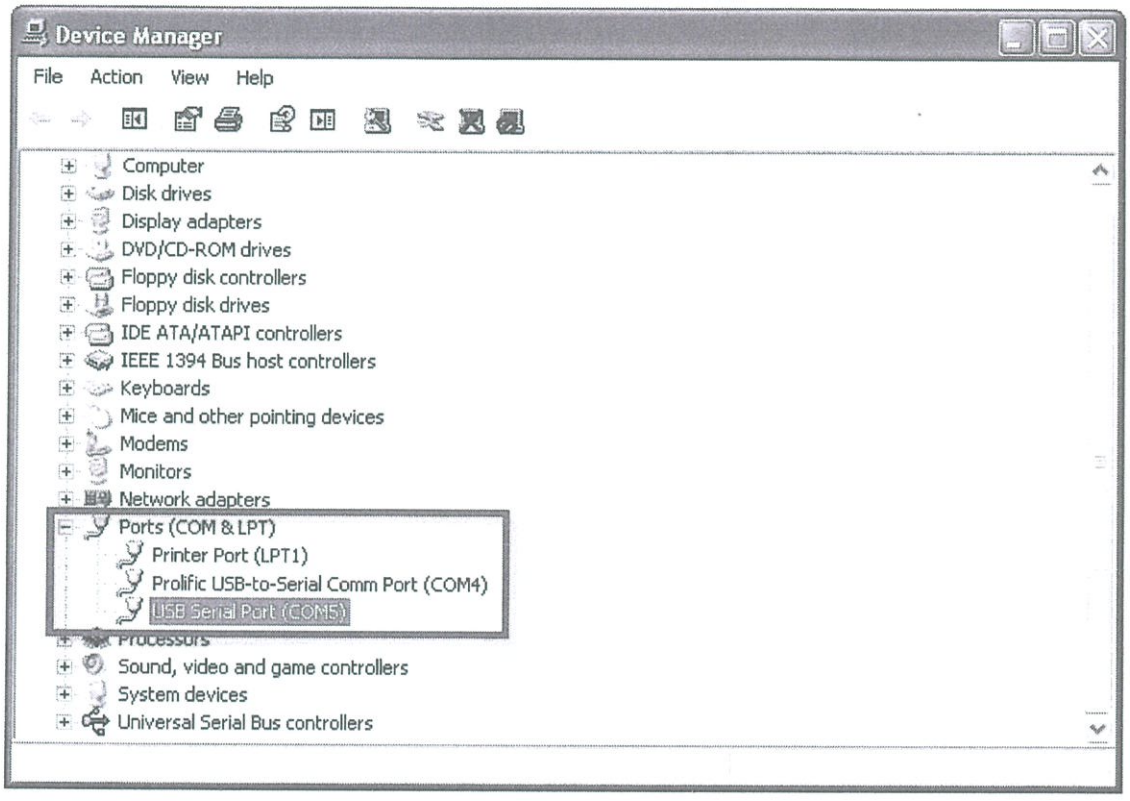
5. หลังจากทำการติดตั้ง Driver ของฮาร์ดแวร์เรียบร้อยแล้ว Windows ก็จะตรวจพบว่ามีอุปกรณ์ใหม่ถูกเชื่อมต่ออยู่ โดยเป็นอุปกรณ์ประเภท "USB Serial Port" และแจ้งให้ผู้ใช้ทำการติดตั้ง Driver ให้กับอุปกรณ์ใหม่ที่ระบุเป็น "USB Serial Port" อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งก็ให้เลือกระบุตำแหน่งโฟลเดอร์ที่เก็บไฟล์ Driver ไว้ ซึ่งให้เลือกเหมือนขั้นตอนในหัวข้อที่ 3 ดังรูป



6. ในขั้นตอนนี้โปรแกรม Windows จะทำการค้นหาและติดตั้ง Driver ให้กับอุปกรณ์ ให้รอสักครู่จนการทำงานเสร็จเรียบร้อย แล้วเลือก Finish ดังรูป

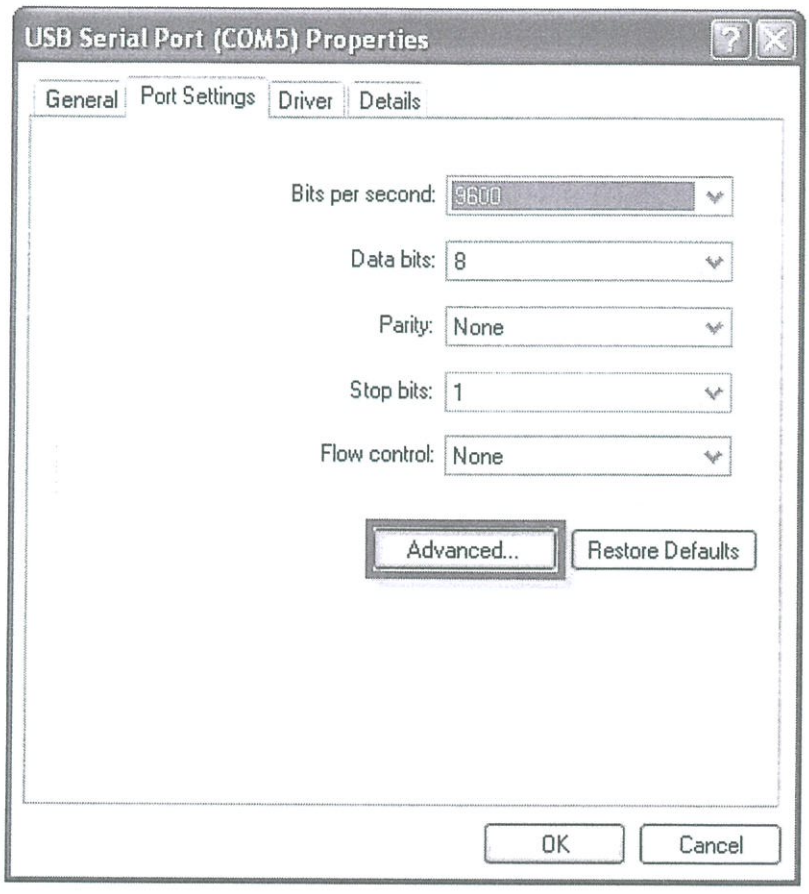


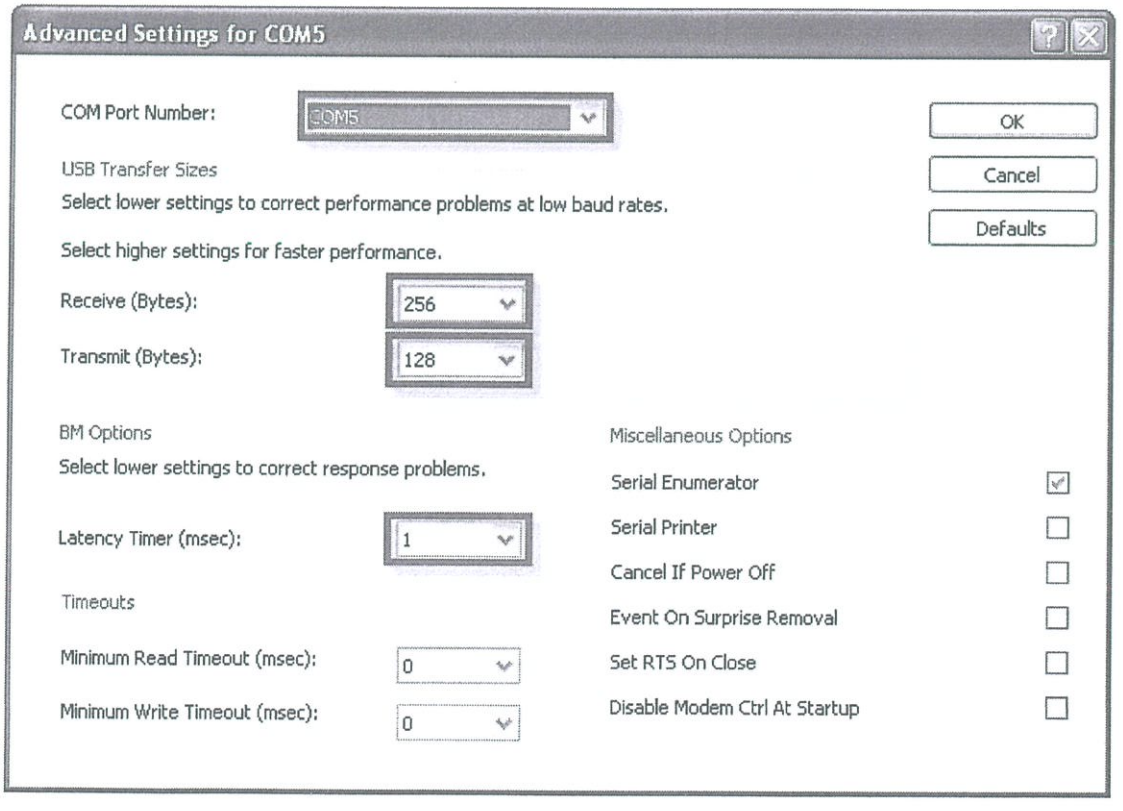
7. หลังจากทำการติดตั้ง Driver เรียบร้อยแล้ว ก็สามารถใช้งานอุปกรณ์ได้แล้ว แต่เพื่อความถูกต้องในครั้งแรกนี้ควรต้องเข้าไปทำการตรวจสอบและปรับแต่งค่าให้กับอุปกรณ์ก่อน โดยในขั้นตอนนี้ให้ไปที่ "My Computer → Control Panel → System → Hardware → Device Manager" แล้วทำการตรวจสอบที่ Ports (COM&LPT) แล้วดูที่ชื่อของ "USB Serial Port" ซึ่งให้ผู้ใช้จดจำหมายเลขของ Com Port ของอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ เพื่อใช้อ้างอิงถึงในการเรียกใช้งาน ดังรูป



8. ในขั้นตอนนี้ให้คลิกเมาส์ที่เครื่องหมาย (+) หน้าหัวข้อ Ports(COM&LPT) แล้วมองหาอุปกรณ์ที่ชื่อ "USB Serial Port" ตามที่เราได้ทำการติดตั้ง Driver ไว้เรียบร้อยแล้ว หรือ ถ้าไม่แน่ใจว่าอุปกรณ์ดังกล่าวใช่อุปกรณ์ที่เป็นของบอร์ด "ET-EASY168 STAMP" หรือไม่ ให้ทดสอบด้วยการถอดสาย USB ออก รายชื่ออุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องหายไป แต่เมื่อเสียบสาย USB กลับเข้ามาใหม่ รายชื่อของอุปกรณ์ดังกล่าวก็จะต้องปรากฏให้เห็นอีกครั้ง ถ้าทุกอย่างถูกต้อง ก็ให้ทำการคลิกเมาส์ที่ Tab รายชื่อของอุปกรณ์ดังกล่าว เมื่อปรากฏหน้าต่าง USB Serial Port Properties ขึ้นมาแล้วให้เลือกที่ Port Setting แล้วเลือก Advance เพื่อเข้าไปกำหนดค่าให้กับอุปกรณ์ให้เรียบร้อย ดังนี้

   a. USB Transfer Size → Receive (Bytes) ให้กำหนดเป็น 256
   b. USB Transfer Size → Transmit (Bytes) ให้กำหนดเป็น 128
   c. BM Option → Latency Timer (mSec) ให้กำหนดเป็น 1


USB Serial Port (COM5) Properties
General
Port Settings
Driver
Details
Bits per second: 9600
Data bits: 8
Parity: None
Stop bits: 1
Flow control: None
Advanced...
Restore Defaults
OK
Cancel


Advanced Settings for COM5
COM Port Number: COM5
OK
Cancel
Defaults
USB Transfer Sizes
Select lower settings to correct performance problems at low baud rates.
Select higher settings for faster performance.
Receive (Bytes): 256
Transmit (Bytes): 128
BM Options
Select lower settings to correct response problems.
Latency Timer (msec): 1
Timeouts
Minimum Read Timeout (msec): 0
Minimum Write Timeout (msec): 0
Miscellaneous Options
Serial Enumerator
Serial Printer
Cancel If Power Off
Event On Surprise Removal
Set RTS On Close
Disable Modem Ctrl At Startup

การพัฒนาโปรแกรมของ ET-EASY168 STAMP แบบ Arduino Project

ตามปรกติแล้วบอร์ด ET-EASY168 STAMP จะทำการ ติดตั้งโปรแกรม Bootloader ไว้ให้เรียบร้อยแล้ว โดยใช้ Bootloader ชื่อ "BOOT_EASY168_AUTO_16MHZ.HEX" ซึ่งเป็น Bootloader ที่ทางทีมงาน อีทีที ได้นำต้นฉบับจาก Arduino มาปรับปรุงเงื่อนไขการทำงานใหม่ เพื่อให้การทำงานสอดคล้องกับระบบฮาร์ดแวร์ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ได้ดียิ่งขึ้น โดยโปรแกรม Bootloader นี้จะใช้สำหรับติดต่อสื่อสารเพื่อสั่ง Upload Code จากคอมพิวเตอร์ PC ให้กับ MCU ในบอร์ดทำงาน โดยไม่ต้องใช้เครื่องโปรแกรมภายนอกให้ยุ่งยาก ซึ่ง คุณสมบัติของ Bootloader ที่ทาง อีทีที ปรับปรุงเพิ่มเติมขึ้น มีคุณสมบัติการทำงานเป็นดังนี้

- สื่อสารกับโปรแกรมภายนอกด้วย Protocol แบบ STK500 (STK500V1)
- ใช้ความเร็ว Baudrate 19200 โดยใช้ความถี่ XTAL 16 MHz
- โปรแกรม Bootloader มีขนาด 2KByte ทำงานที่ตำแหน่ง 0x3800-0x3FFF
- ใช้ LED ที่ต่อกับขา Digital-13(PB5) เป็นตัวแสดงสถานะในขณะที่ Bootloader ทำงาน
- โปรแกรมใน Bootloader จะทำงานโดยอัตโนมัติทุกครั้งหลังการรีเซ็ต โดย MCU จะเริ่มต้นทำงานใน Bootloader นี้ก่อนเสมอ ซึ่งถ้าไม่มีการติดต่อสื่อสารจากโปรแกรม Arduino ภายในเวลาประมาณ 3 วินาที MCU ก็จะออกจากการทำงานใน Bootloader เพื่อไปเริ่มต้นทำงานตามคำสั่งที่เป็นของผู้ใช้ โดยอัตโนมัติ โดยในขณะที่ Bootloader ทำงาน ตอนเริ่มต้นจะเห็น LED ที่ต่อไว้กับขาสัญญาณ Digital-13(PB5) กระพริบ 3 ครั้ง แล้วติดค้าง เพื่อรอการติดต่อสื่อสารจากโปรแกรมสำหรับสั่งให้ทำการ Upload Code ให้กับ MCU ซึ่งถ้าไม่มีการติดต่อสื่อสารจากโปรแกรมของ Arduino ภายในระยะเวลาประมาณ 3 วินาที โปรแกรมก็จะกระโดดไปทำงานในตำแหน่งเริ่มต้นที่เป็นส่วนของโปรแกรมที่ผู้ใช้เขียนขึ้นทันที

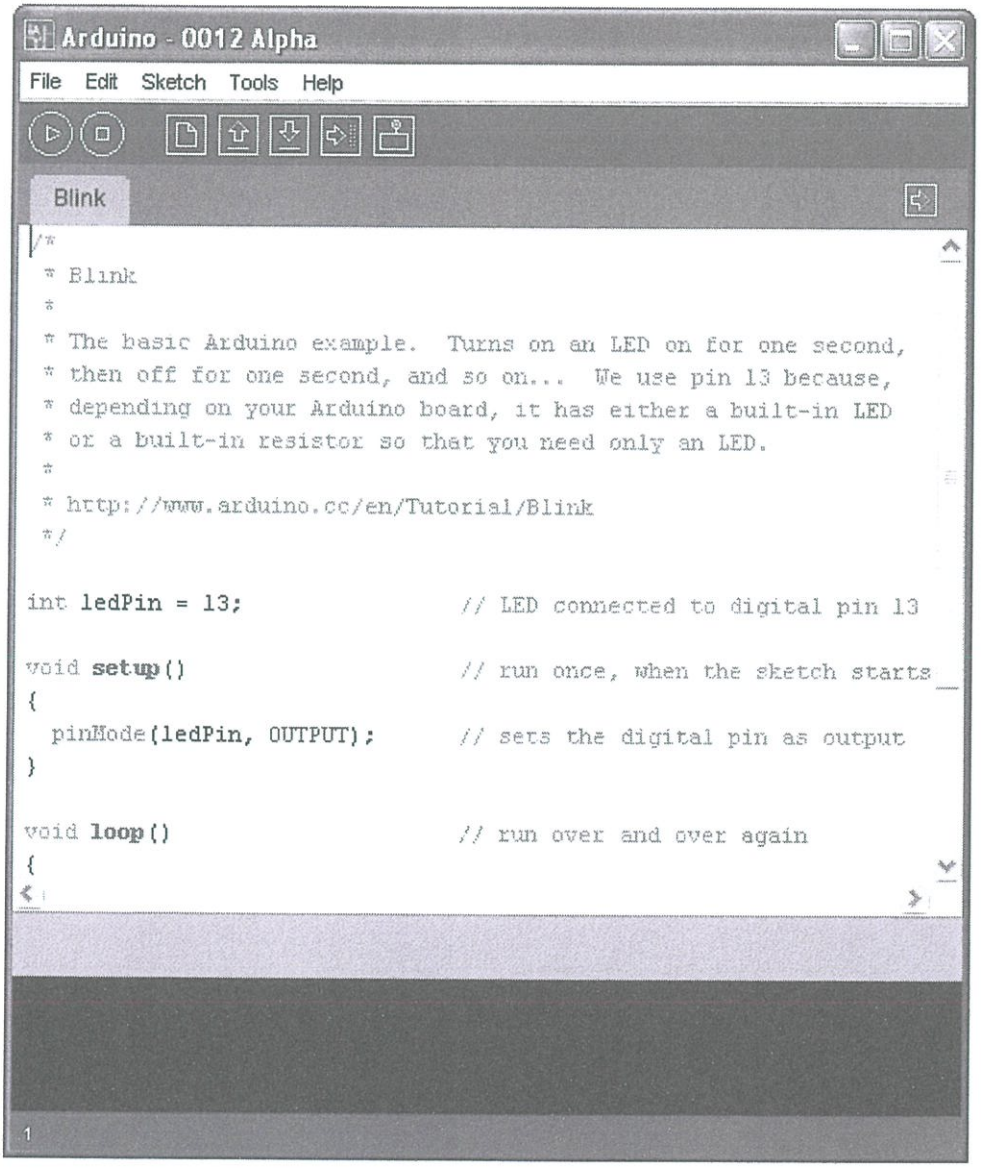
นอกจากนี้แล้วผู้ใช้ยังสามารถเปลี่ยนไปใช้โปรแกรม Bootloader รุ่นมาตรฐาน ตามแบบโปรแกรม ของ Arduino ได้อีกด้วย โดยใช้โปแกรม Bootloader ที่ชื่อ "ATmegaBOOT_168_diecimila.hex" โดยไฟล์ดังกล่าวจะถูกบรรจุไว้ใน Drive และโฟลเดอร์เดียวกันกับที่ผู้ใช้ได้ทำการติดตั้งโปรแกรมของ Arduino ไว้แล้วคือ "C:\arduino-0012\hardware\bootloaders\atmega168\ATmegaBOOT_168_diecimila.hex"

แต่อย่างไรก็ตามในการที่จะสามารถทำการติดตั้งโปรแกรม Bootloader Code ให้กับ MCU ได้นั้น ผู้ใช้จำเป็นต้องมีเครื่องมือสำหรับทำหน้าที่ Program Code ให้กับ MCU อยู่ด้วย โดยใช้เครื่องโปรแกรมที่มีขั้วต่อตามมาตรฐานของ "AVRISP" ของ ATMEL แบบ IDE 10 PIN ได้ทันที โดยวิธีการให้ศึกษาเพิ่มเติมจากหัวข้อ "**การโปรแกรม Bootloader ให้กับบอร์ด ET-EASY168 STAMP**" ในตอนท้ายของคู่มือนี้

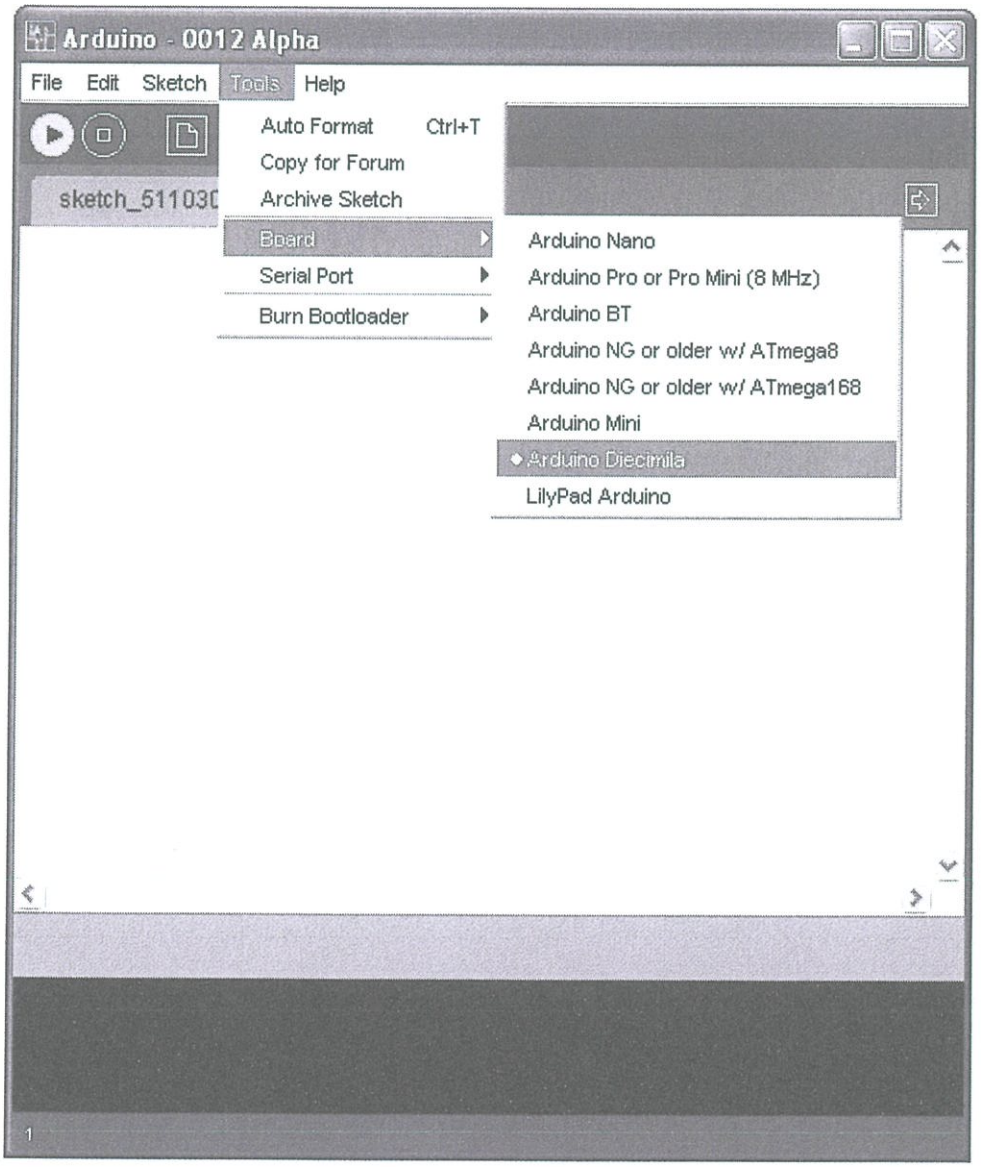
การติดตั้งโปรแกรม Arduino

หลังจากที่เราได้ทำการติดตั้ง USB Driver ให้กับบอร์ดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนของการเตรียมการแล้ว ลำดับขั้นตอนต่อจากนี้เป็นต้นไป ก็เป็นเรื่องของการใช้งาน การเขียนโปรแกรม และการศึกษาเรียนรู้ต่างๆตามความต้องการแล้ว แต่ก่อนอื่นเราจะต้องทำการติดตั้งโปรแกรมของ Arduino เพื่อใช้เป็นโปรแกรมสำหรับศึกษาเรียนรู้ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

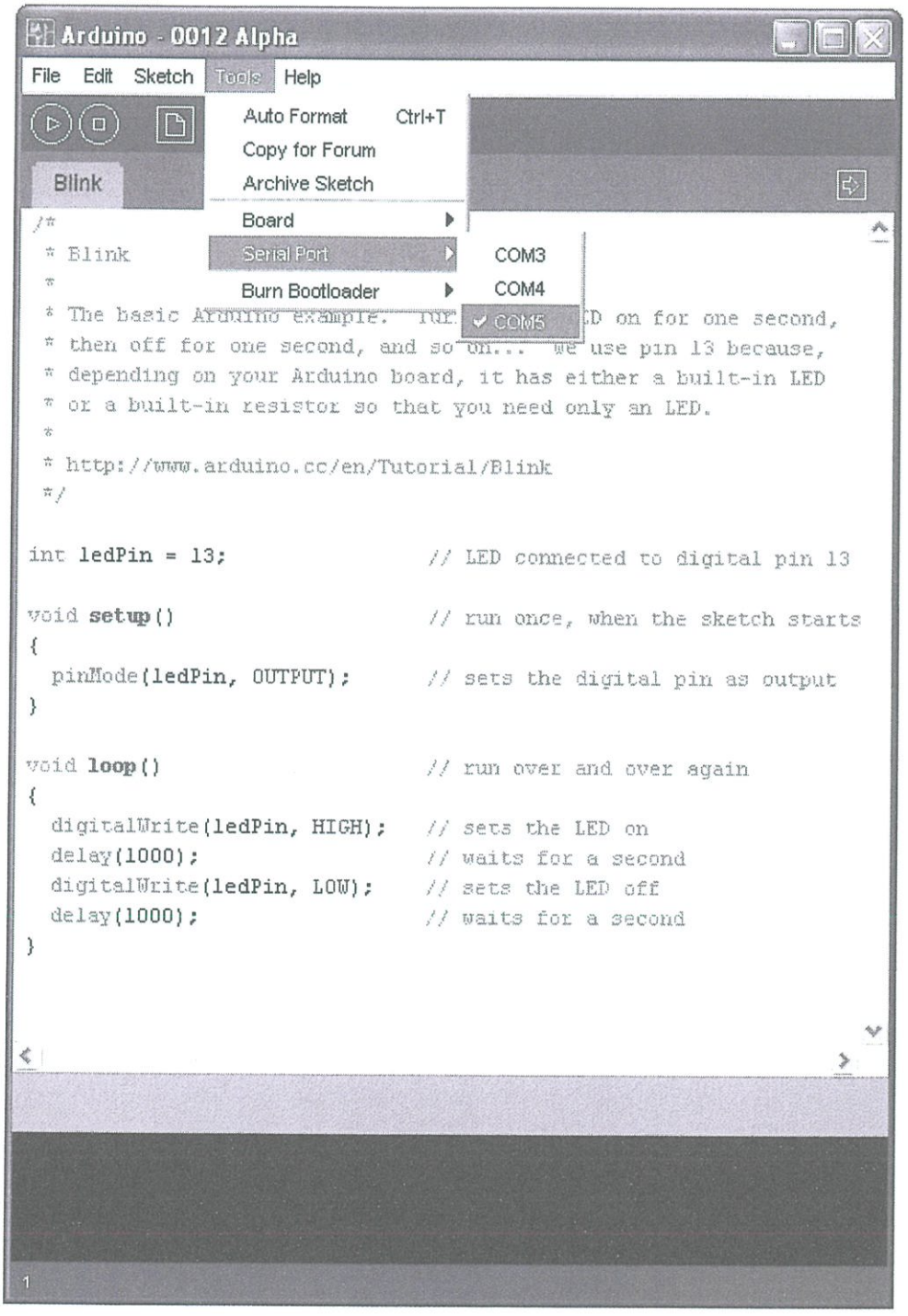
1. ทำการ unzip ไฟล์ชื่อ "arduino-0012-win.zip" ไว้ในฮาร์ดดิสก์ ซึ่งขอแนะนำให้ทำการ unzip ไว้ที่ Root นอกสุดใน Drive C โดยหลังจากทำการ unzip เรียบร้อยแล้วจะได้โปรแกรมอยู่ที่ "c:\arduino-0012"
2. ทำการสั่ง Run โปแกรม "arduino.exe" จะได้ผลดังรูป



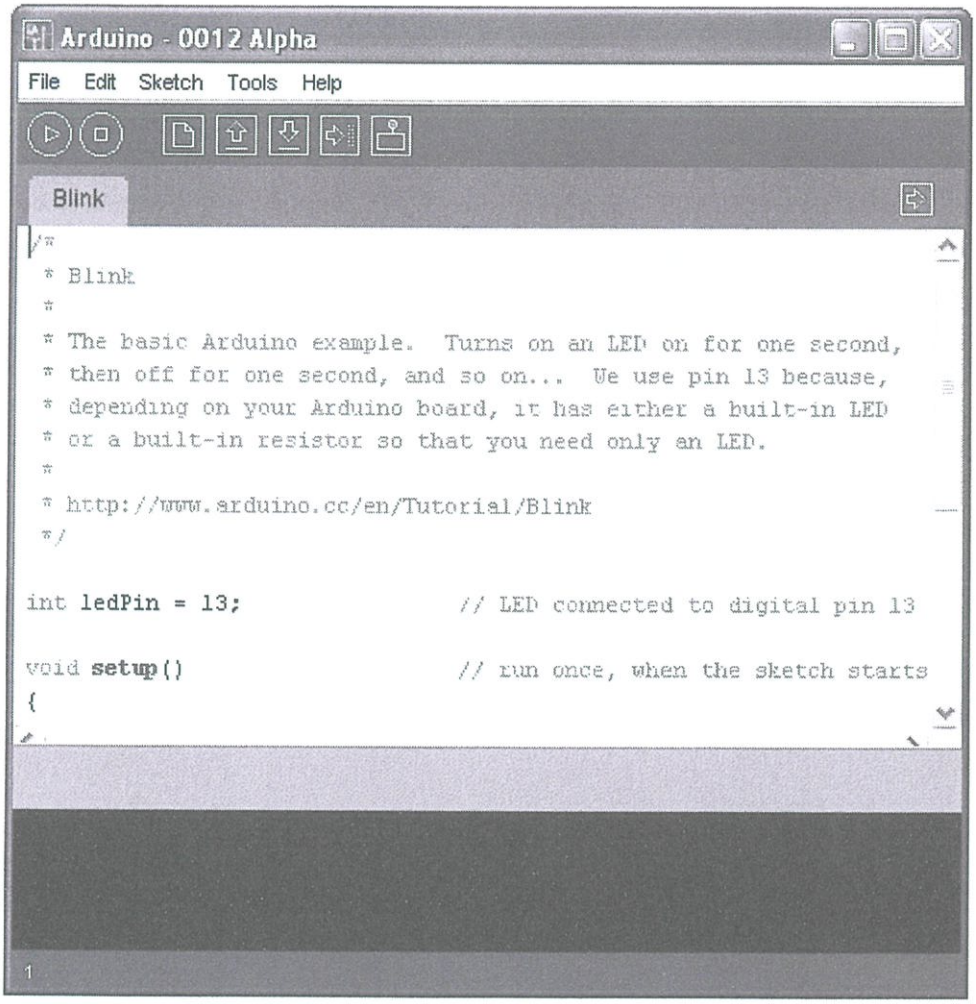
3. ในครั้งแรกของการเรียกใช้งานโปรแกรม ให้ทำการกำหนดระบบฮาร์ดแวร์ที่จะใช้งานกับโปรแกรมของ Arduino ให้เรียบร้อยเสียก่อน เนื่องจากในปัจจุบันนี้ มีการออกแบบวงจรและสร้างฮาร์ดแวร์บอร์ดแบบต่างๆสำหรับนำมาใช้งานร่วมกับโปรแกรมพัฒนาของ Arduino ไว้มากมายหลายรุ่น โดยในกรณีของบอร์ด ET-EASY168 STAMP ให้ทำการเลือกกำหนดชื่อบอร์ดเป็น "Diecimila" โดยคลิกเมาส์ที่ "Tools → Board → Arduino Diecimila" ดังรูป



4. เลือกกำหนดหมายเลขพอร์ต สำหรับติดต่อสื่อสารกับบอร์ด ให้ตรงกับหมายเลข Comport ที่ได้ทำการติดตั้ง Driver ของ USB ไว้ในตอนแรก เช่น ถ้าตอนติดตั้ง Driver ของ USB แล้วได้หมายเลข Comport เป็น COM5 ให้คลิกเมาส์ที่ Tools → Serial Port → COM5 ดังรูป

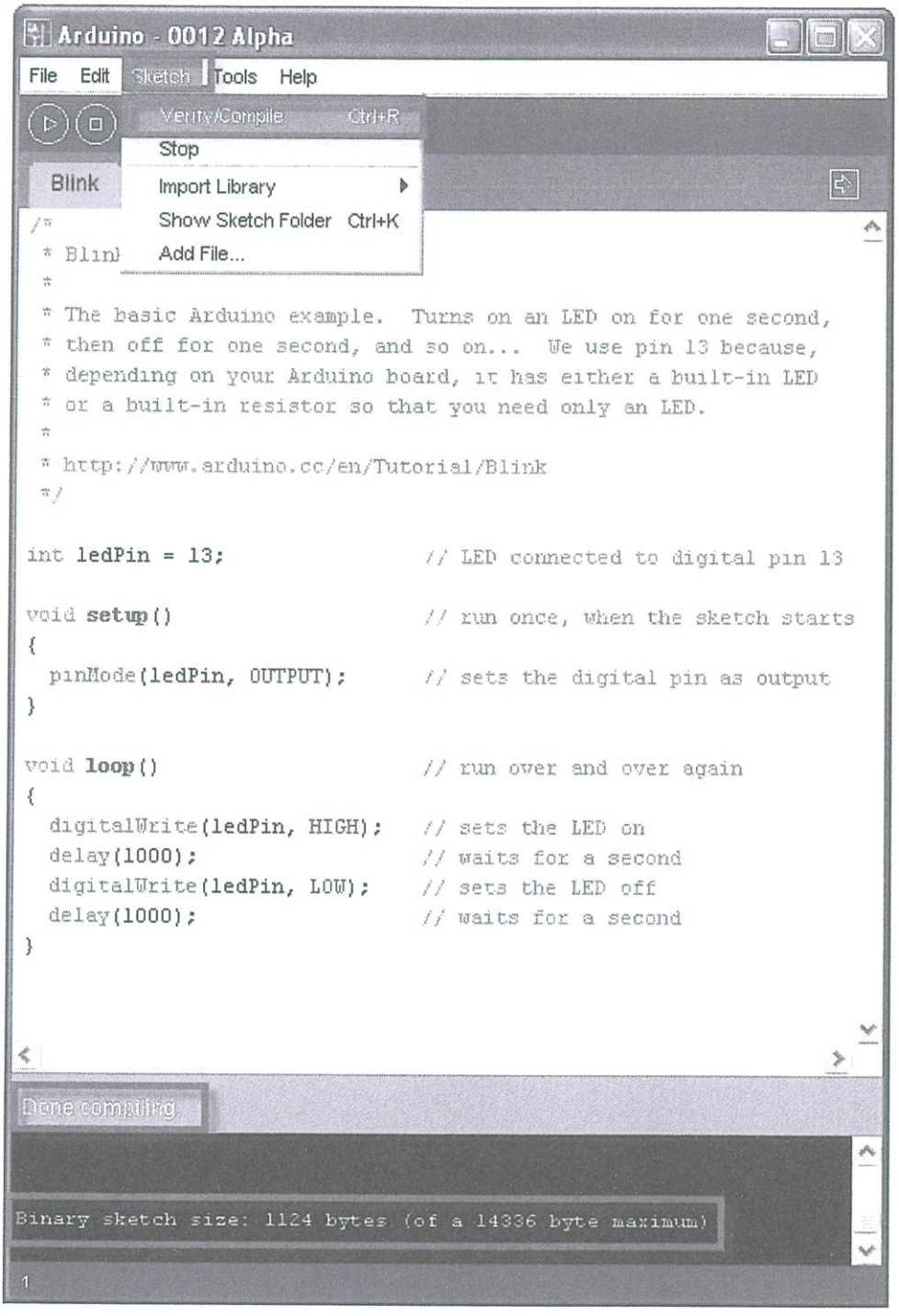


5. ทดสอบเขียนโปรแกรม โดยคลิกเมาส์ที่ File → New แล้วพิมพ์โปรแกรมทดสอบ หรืออาจใช้การสั่งเปิดไฟล์ตัวอย่างที่สร้างไว้แล้วขึ้นมาแทนก็ได้ โดยในที่นี้ขอแนะนำให้ทดสอบด้วยโปรแกรมไฟกระพริบ โดยให้เลือก "File → sketchbook → Examples → Digital → Blink" ซึ่งจะได้ดังรูป

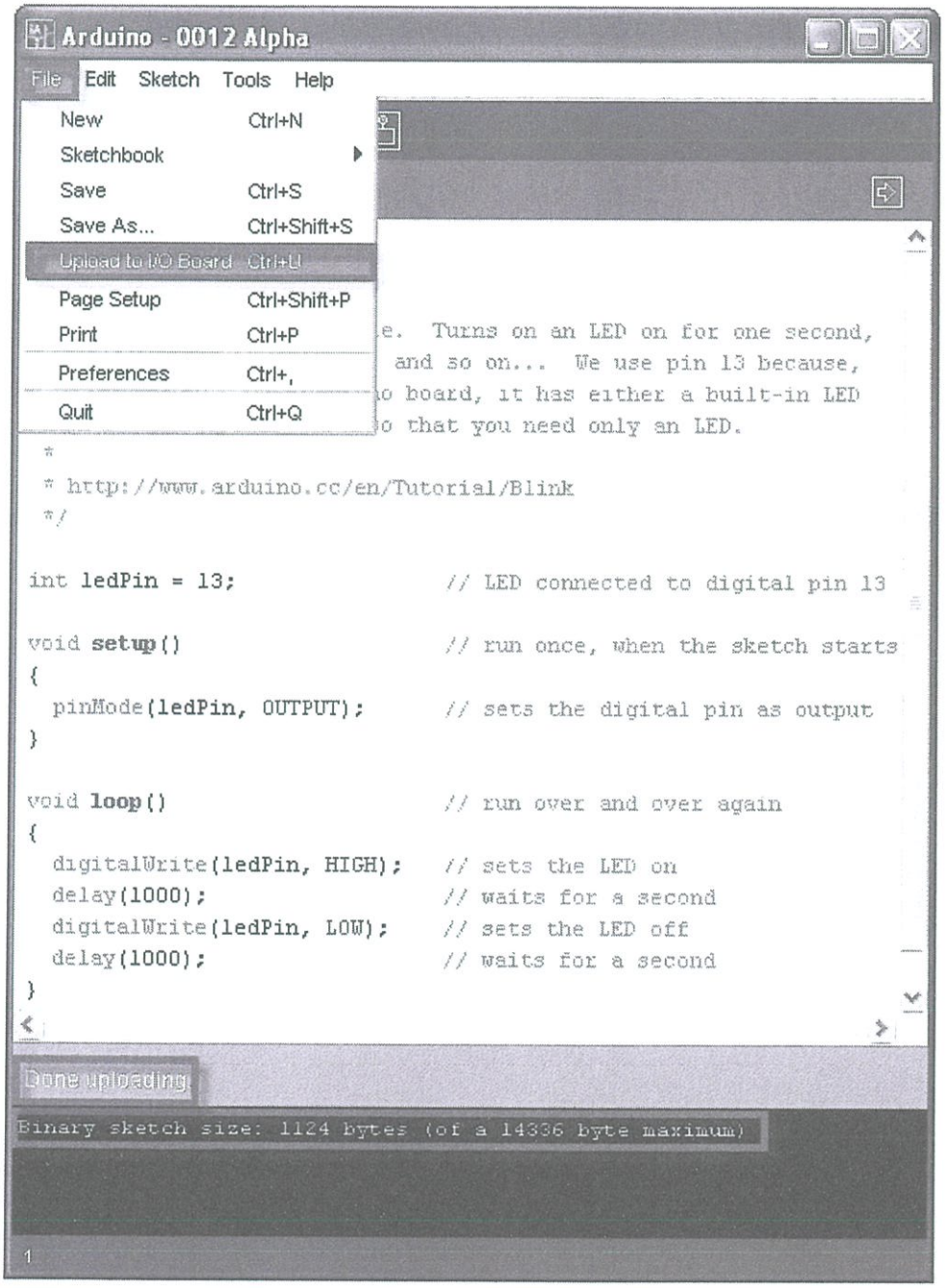



```
int ledPin = 13;

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
}

void loop()
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  delay(1000);
}
```

6. สั่งแปลโปรแกรมโดยคลิกเมาส์ที่ "Sketch → Verify/Compile" ดังตัวอย่าง



7. สั่ง Download Code ให้กับบอร์ด โดยคลิกเมาส์เลือกที่ "File → Upload to I/O Board" แล้วรอสักครู่จนโปรแกรมทำงานเสร็จ ซึ่งควรได้ผลดังรูป

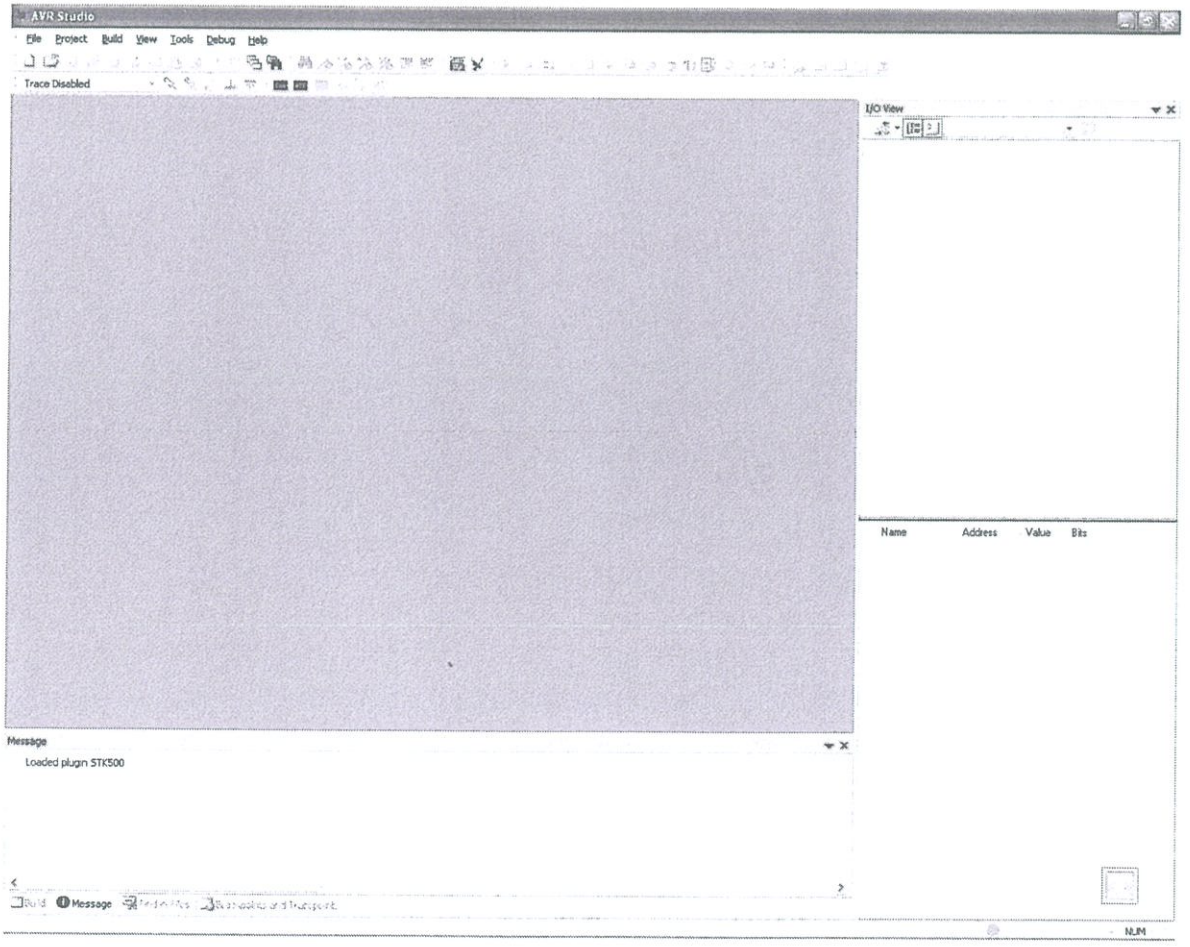


8. หลังจากที่ทำการ Upload Code ให้กับบอร์ดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว บอร์ดก็จะเริ่มต้นทำงานตามคำสั่งที่เขียนไว้ในโปรแกรมทันที โดยจะสังเกตเห็น LED กระพริบ ติด และ ดับ สลับกันไปมา ด้วยความเร็วประมาณ 1 วินาที ตลอดเวลา

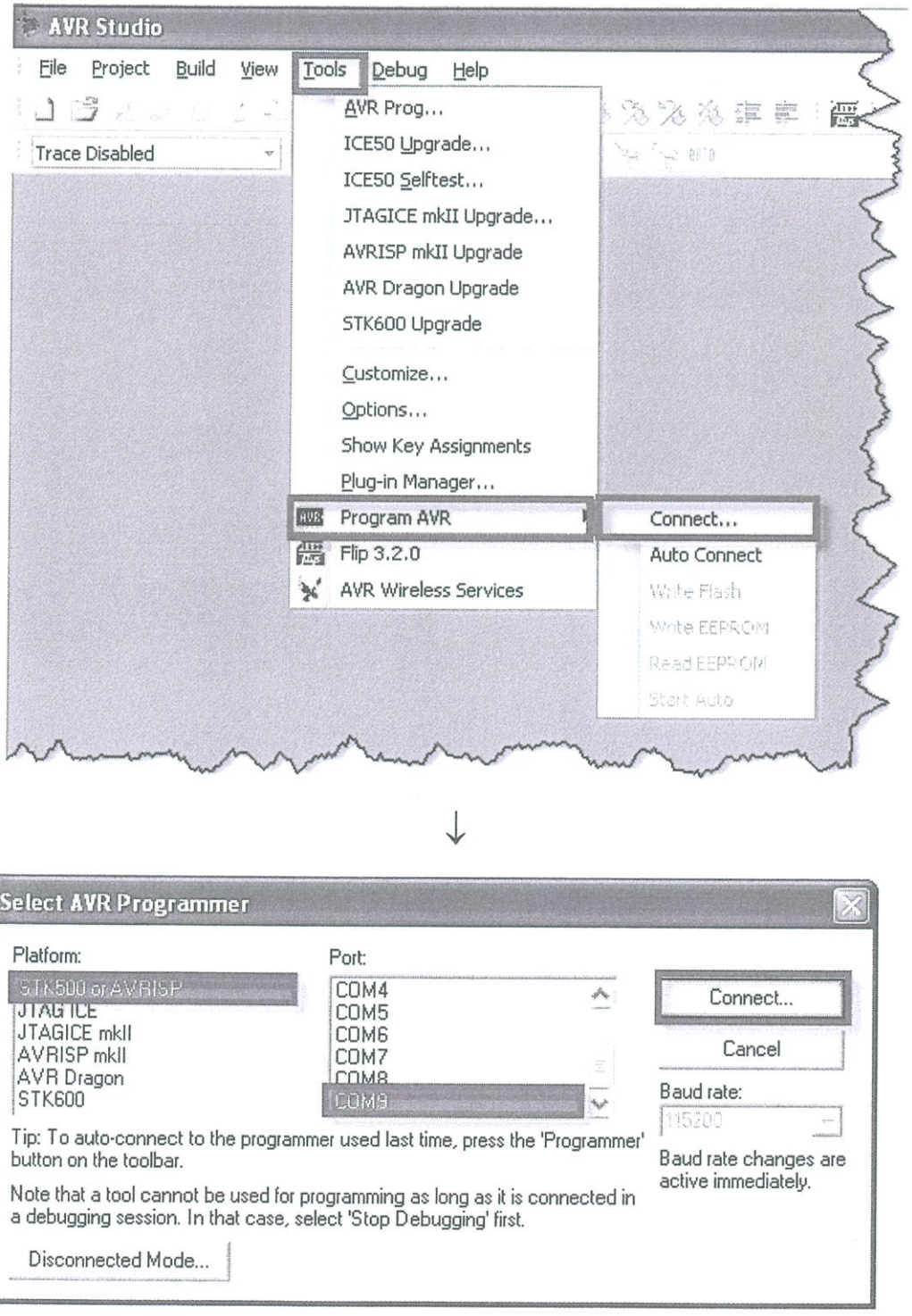
การโปรแกรม Bootloader ให้กับบอร์ด ET-EASY168 STAMP

ตามปรกติแล้วบอร์ด ET-EASY168 STAMP ได้ทำการโปรแกรม Bootloader ไว้ให้เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ทันที่ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนแปลง Bootloader หรือ เกิดความผิดพลาดในการใช้งาน จนทำให้ Bootloader เสียหายไป ผู้ใช้ก็ยังสามารถทำการ โปรแกรม Bootloader ให้กับบอร์ดได้ใหม่ โดยบอร์ด ET-EASY168 STAMP ได้ออกแบบ ให้มีขั้วต่อ AVRISP สำหรับใช้เป็นช่องทางในการโปรแกรม Code ให้กับ MCU ได้โดยตรง ด้วยเครื่องโปรแกรมทุกรุ่นที่มีขั้วต่อ ตรงตามมาตรฐาน AVRISP ของ ATMEL ได้ทันที โดยในที่นี้จะขอแสดงตัวอย่าง วิธีการ โปรแกรม Bootloader โดยใช้เครื่องโปรแกรม ของ อีทีที รุ่น "ET-AVR ISP USB V1.0" โดยใช้โปรแกรม "AVR Studio 4" ของ ATMEL เป็นตัวจัดการ ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

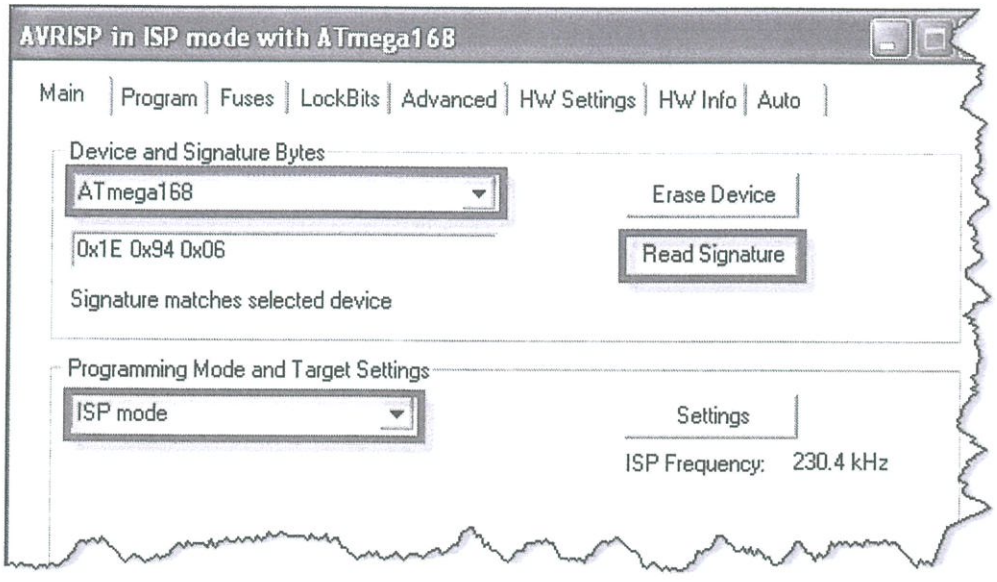
1. ต่อสาย USB ให้กับบอร์ด ET-EASY168 STAMP ในกรณีต้องการใช้ไฟเลี้ยงจากพอร์ต USB หรือจ่ายไฟเลี้ยง +5V ให้กับบอร์ดที่ขา 28(+5V)
2. ต่อสาย USB ให้กับเครื่องโปรแกรม ET-AVR ISP USB V1 พร้อมทั้งต่อสายแพร์ 10 Pin ระหว่างขั้วต่อของ AVRISP ของทั้ง 2 บอร์ดเข้าด้วยกัน
3. สั่ง Run โปรแกรม AVR Studio 4 ดังรูป



4. เลือกคลิกเมาส์ที่ Tools → Program AVR → Connect.. → STK500 or AVRISP จากนั้นก็ให้เลือกหมายเลขของ Comport ที่เป็นของเครื่องโปรแกรม ET-AVR ISP USB V1 ตามที่ลง Driver ไว้พร้อมกับเลือก Connect (จากตัวอย่างเป็น Com9) ดังรูป

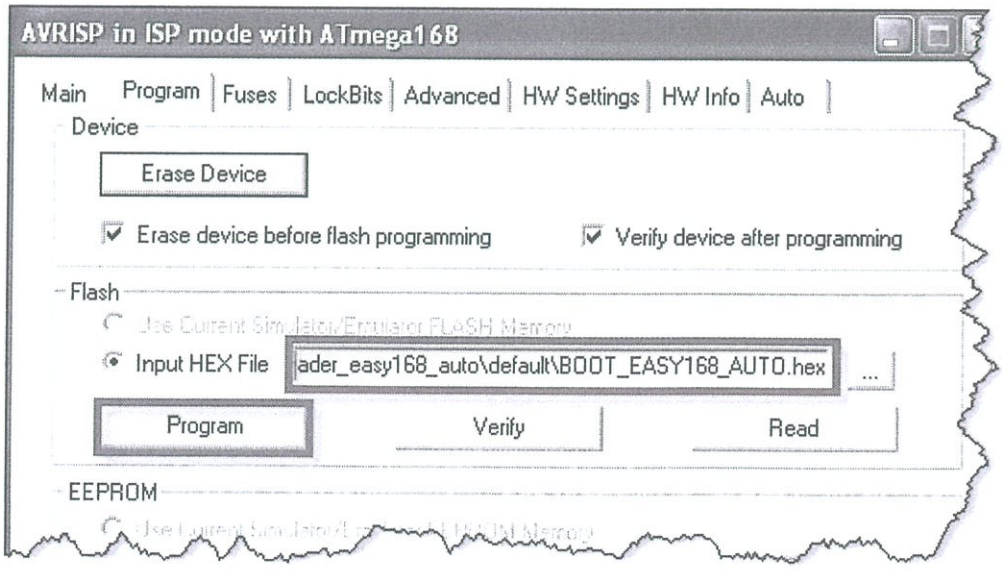


5. หลังจากที่ทำการ Connect เรียบร้อยแล้วให้ทดสอบการเชื่อมต่อโดยเลือกที่ tab ของ Main พร้อมกับเลือกเบอร์ของ MCU เป็น ATmega168 และเลือก Programming Mode and target Settings เป็น ISP mode แล้วทดสอบเลือก Read Signature ดู ซึ่งถ้าทุกอย่างถูกต้องควรได้ผลดังรูป



6. ให้เลือกไปที่ tab ของ Program พร้อมทั้งเลือก ตัวเลือกต่างๆดังนี้

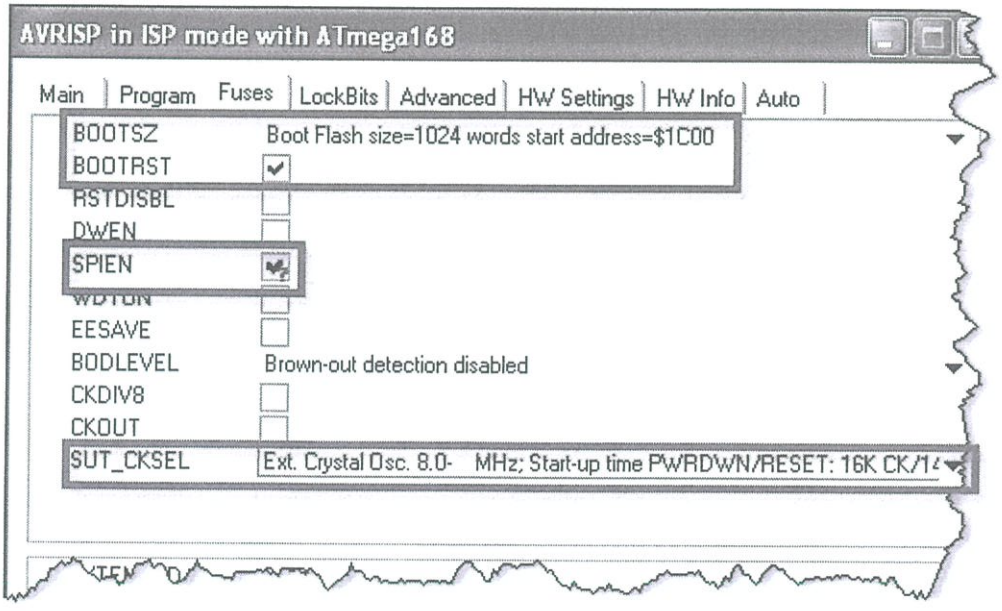
   - Device ให้เลือก Erase device before flash programming และ Verify device after programming
   - Flash ให้เลือก Input HEX File เป็น BOOT_EASY168_AUTO_16MHZ.HEX จากนั้นให้เลือกที่ Program เพื่อสั่ง Program Bootloader ให้กับ MCU ซึ่งจะได้ผลดังรูป



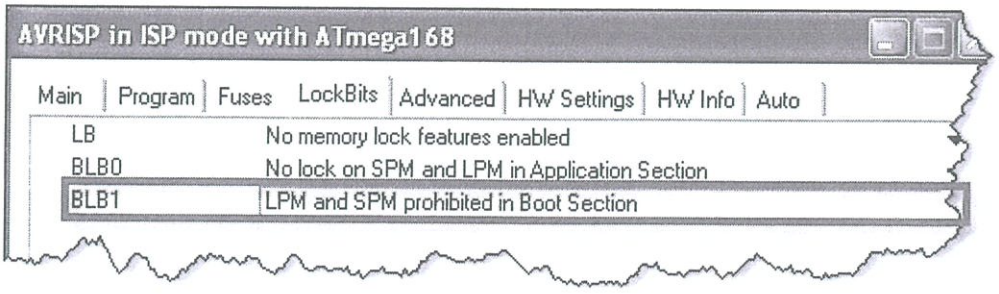
7. หลังจากที่ทำการโปรแกรม Code ให้กับ MCU เรียบร้อยแล้ว ให้เลือกมาที่ Tab ของ Fuses เพื่อทำการสั่งโปรแกรม Fuse Bit ให้กับ MCU โดยให้เลือกกำหนดค่าตัวเลือกดังนี้

   - BOOTSZ ให้เลือกเป็น Boot Flash size = 1024 word start address = $1C00
   - BOOTRST ให้เลือก Enable
   - SPIEN ให้เลือก Enable
   - SUT_CKSEL ให้เลือกเป็น Ext.Crystal Osc 8.0MHz;Start-up time PWRDN/RESET : 16K CK/14 ซึ่งเป็นตัวเลือกด้านล่างสุด

   เมื่อเลือกตัวเลือกต่างๆครบแล้วจึงสั่ง Program ซึ่งควรได้ผลดังรูป



8. หลังจากทำการสั่ง program Fuse Bit เรียบร้อยแล้ว ให้เลือก Tab มาที่ LockBits แล้วเลือกการ Protect เฉพาะ Bootloader โดยเลือก BLB1 เป็น LPM and SPM prohibited in Boot Section แล้วสั่ง program เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ Program Bootloader

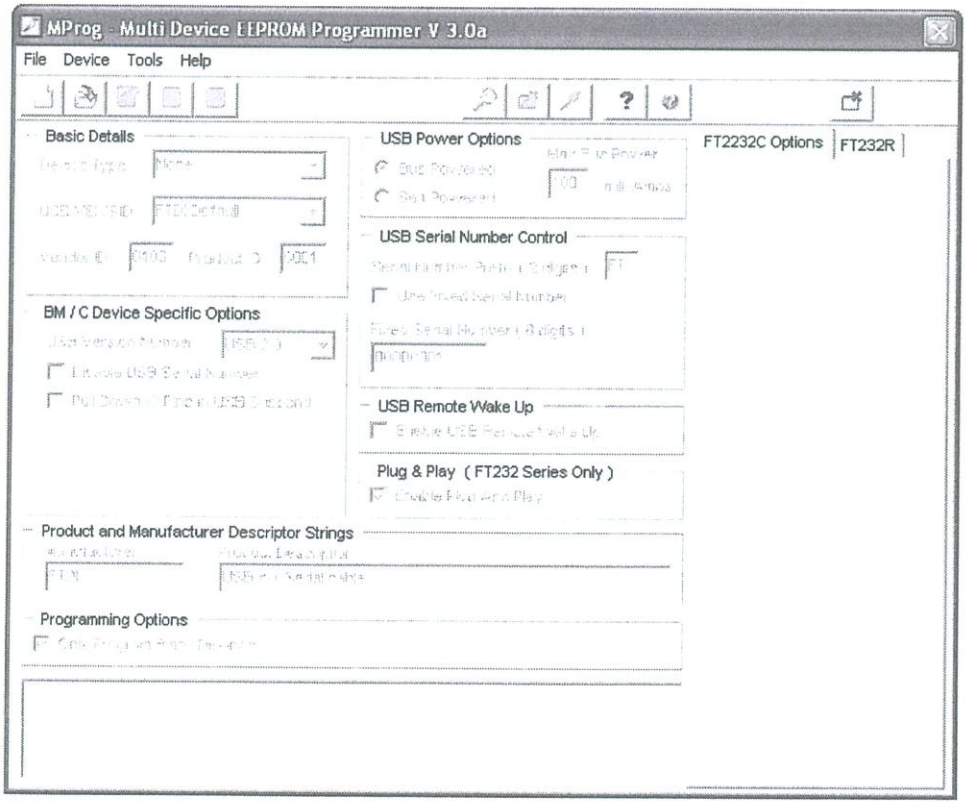


การโปรแกรม USB Bridge ของ FTDI ให้พอร์ต USB จ่ายกระแสได้ 500mA

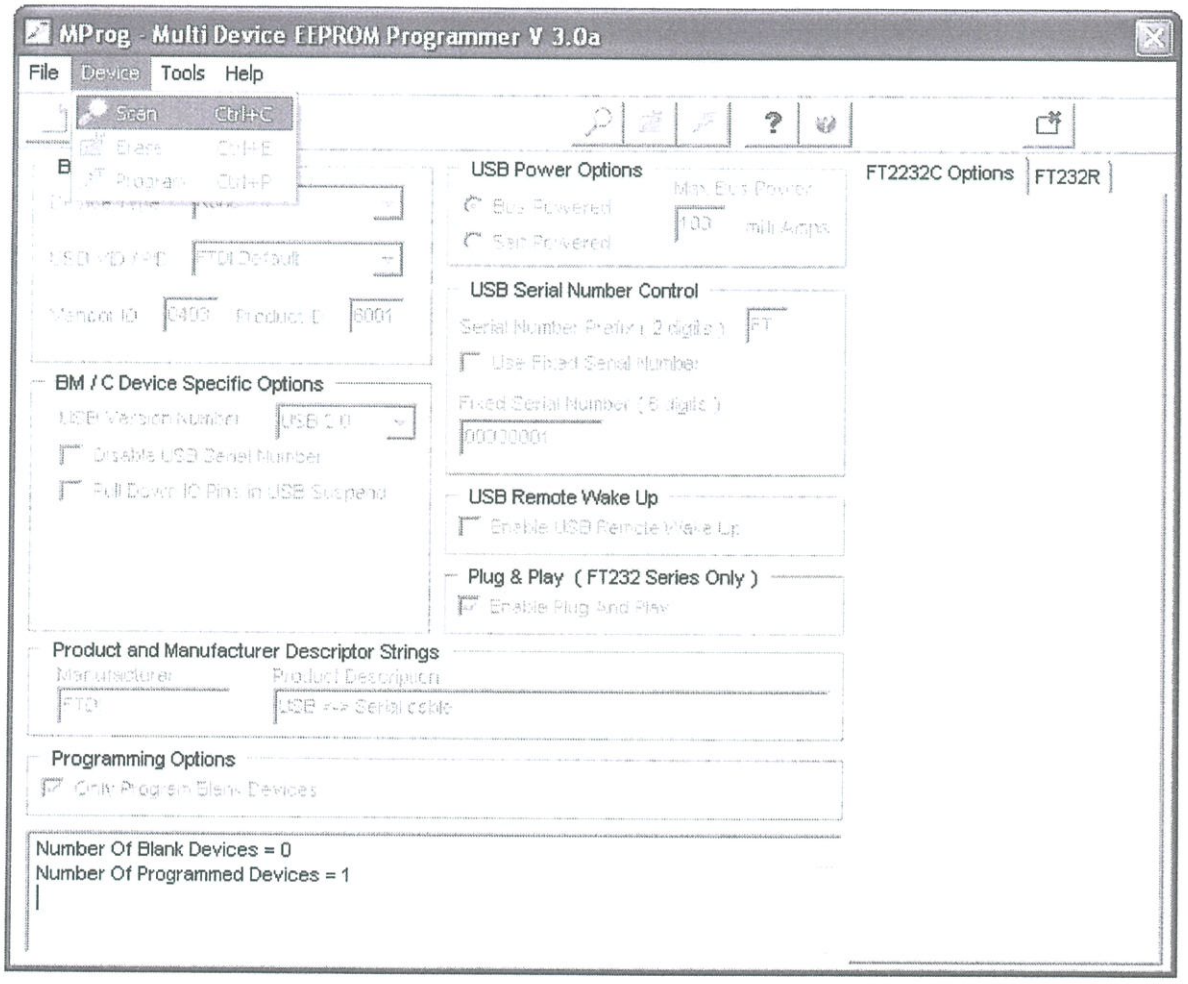
ตามปรกติแล้ว USB Bridge ของ FTDI เบอร์ FT232R จะถูกกำหนด Configuration ค่าให้ใช้แหล่งจ่ายจากพอร์ต USB โดยตามค่ามาตรฐานของ USB Driver ของ FTDI นั้นจะร้องขอกระแสไฟ ไปยัง USB Host เพียงแค่ 90mA เท่านั้น ซึ่งตามมาตรฐานแล้วพอร์ต USB สามารถจ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อด้วยสูงสุดที่ 500mA ซึ่งเพื่อความสะดวกในการทดลองต่างๆ ด้วยบอร์ด ET-EASY168 STAMP ในกรณีที่ยังไม่ได้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกมากมายนัก(ใช้กระแสไม่เกิน 500mA) เราก็สามารถเข้าไปสั่งแก้ไขเปลี่ยนค่า Configuration ของ USB HUB เพื่อให้จ่ายกระแสออกมาให้ครบ 500mA ได้ด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดความสะดวกและคล่องตัวในการทดลองต่างๆมากขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามถ้าหากว่าผู้ใช้ ทำการต่อทดลองกับ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบ Notebook ที่ใช้กระแสไฟจาก Battery หรือมีการเชื่อมต่อบอร์ดทดลองกับอุปกรณ์ที่ใช้กระแสไฟมากๆ ก็ควรจัดหาแหล่งจ่ายไฟภายนอกเพื่อจ่ายให้กับบอร์ดเองจะเหมาะสมกว่า ข้อแนะนำนี้เป็นการแนะนำสำหรับผู้ที่ต้องการทดสอบการทำงานหรือทดลองเขียนโปรแกรมกับบอร์ด แบบที่ไม่ได้เน้นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกมากมายนัก เช่น ทดสอบไฟกระพริบ โดยใช้ LED เป็นอุปกรณ์การทดลอง หรือ การรับส่งข้อมูลกับพอร์ตสื่อสารอนุกรม เป็นต้น

โดยการแก้ไขค่า Configuration ของ USB Bridge ของ FTDI จะใช้โปรแกรม “MProg.exe” เป็นตัวจัดการโดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

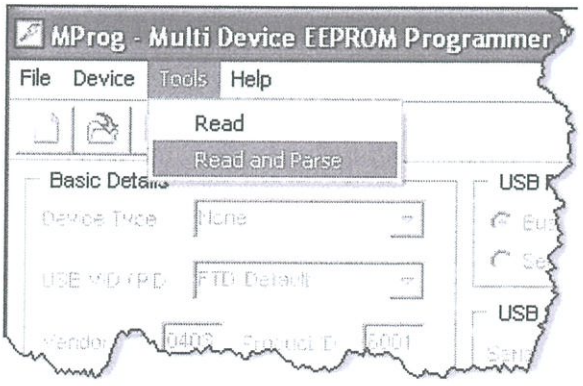
1. ต่อสาย USB ของบอร์ด ET-EASY168 STAMP เข้ากับพอร์ต USB แล้วสั่ง Run Program MProg ซึ่งจะได้ผลดังรูป

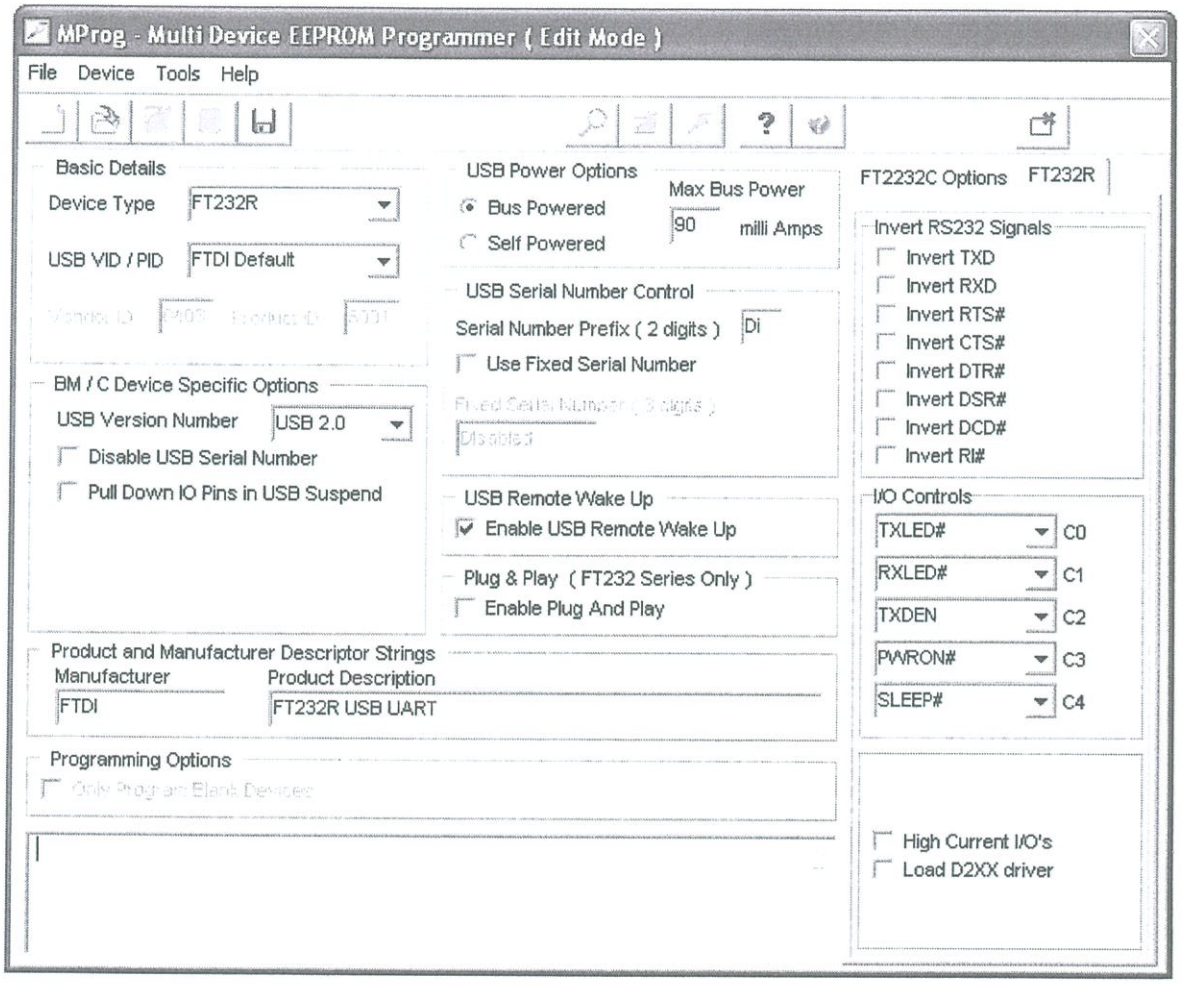


2. สั่งโปรแกรม "mProg" ค้นหา USB Bridge ที่ติดตั้งไว้ในเครื่อง โดยเลือกที่เมนู Device → Scan ซึ่งควรได้ผลดังรูป

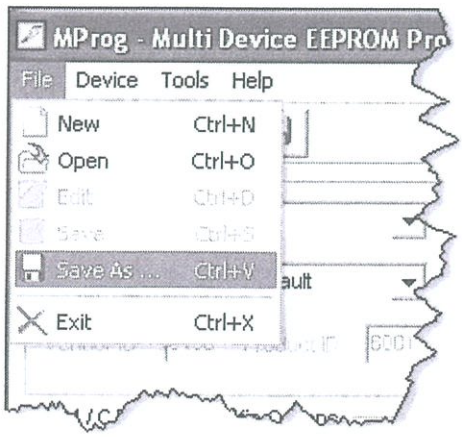


3. สั่งอ่านค่า Configuration เดิมของ FTDI ออกมา โดยเลือกที่ Tools → Read and parse ซึ่งควรได้ผลดังรูป

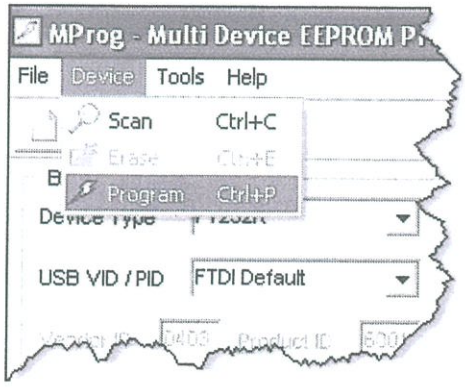


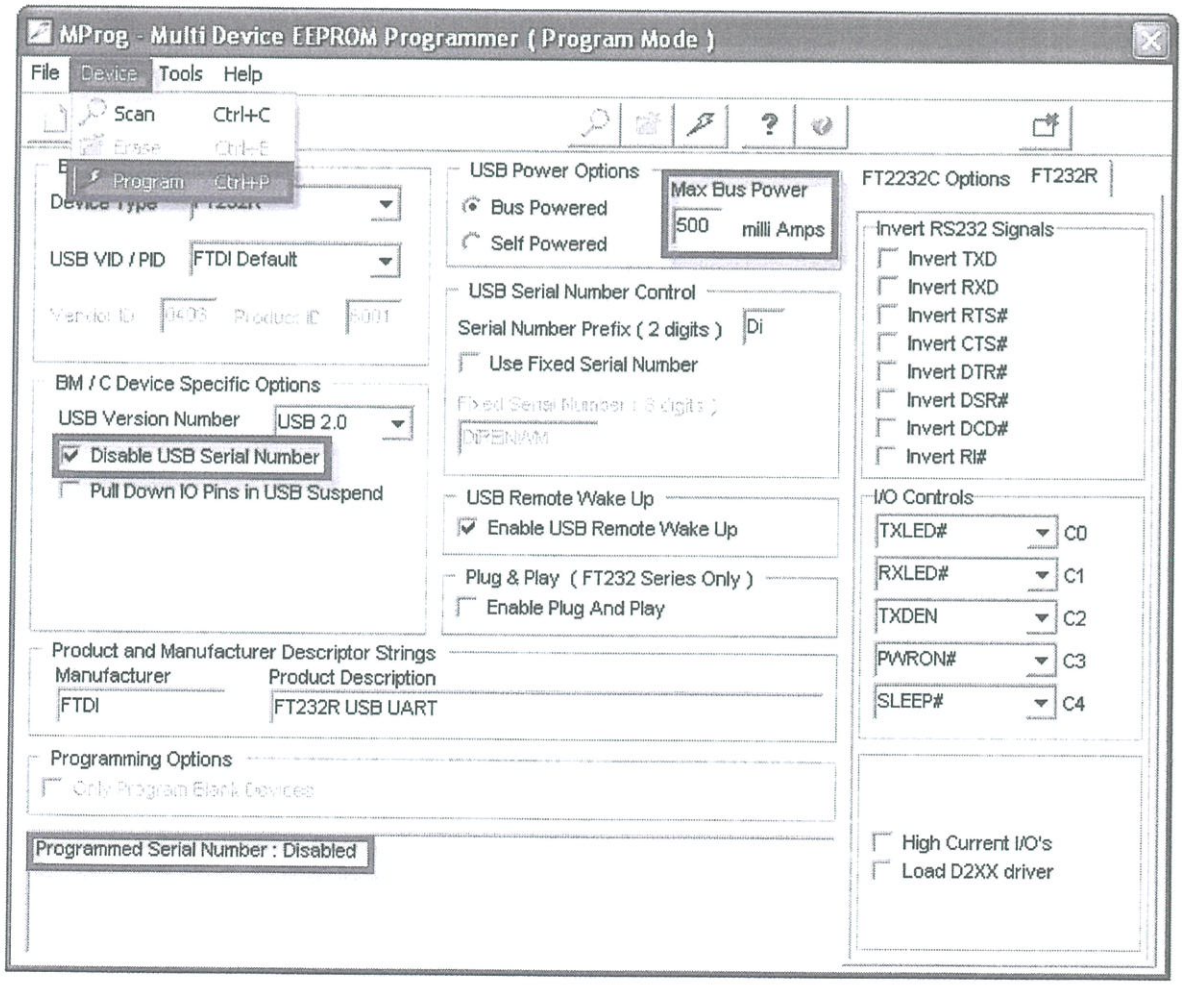


4. ให้ทำการแก้ไขค่า Configuration ในส่วนของ USB Power Options ให้เลือกเป็น Bus Powered และกำหนดค่า Max Bus Power จากเดิมที่กำหนดไว้ที่ 90 milli Amps เป็น 500 milli Amps ส่วนค่า Configuration อื่นๆไม่ต้องเปลี่ยนแปลง จากนั้นให้ทำการบันทึกค่า Configuration ไว้ในเครื่องก่อนโดยให้เลือกที่ File → Save As.. ดังรูป



5. สั่งโปรแกรมค่า Configuration คืนให้กับ FTDI โดยให้เลือกที่ Device → Program แล้วรอจนโปรแกรมทำงานเสร็จ หลังจากนั้นให้ ถอดสาย USB ออกแล้วเสียบกลับเข้าไปใหม่ USB ก็จะทำงานตามค่า Configuration ใหม่ได้แล้ว





การพัฒนาโปรแกรมของ ET-EASY168 STAMP แบบ AVR Microcontroller

ในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการที่จะพัฒนาโปรแกรมให้กับบอร์ด ET-EASY168 STAMP แบบปรกติ ในรูปแบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ก็สามารถทำได้ โดยสามารถเลือกภาษาในการเขียนโปรแกรม ได้เอง ซึ่งในกรณีนี้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ภาษาใดๆก็ได้ที่รองรับการใช้งานกับ MCU ตระกูล AVR เบอร์ ATmega168 โดย ผู้ใช้งานสามารถบริหารจัดการระบบทรัพยากรต่างๆที่อยู่ภายในตัว ATmega168 ได้เองทั้งหมด โดยสามารถทำได้ 2 แนวทางคือ

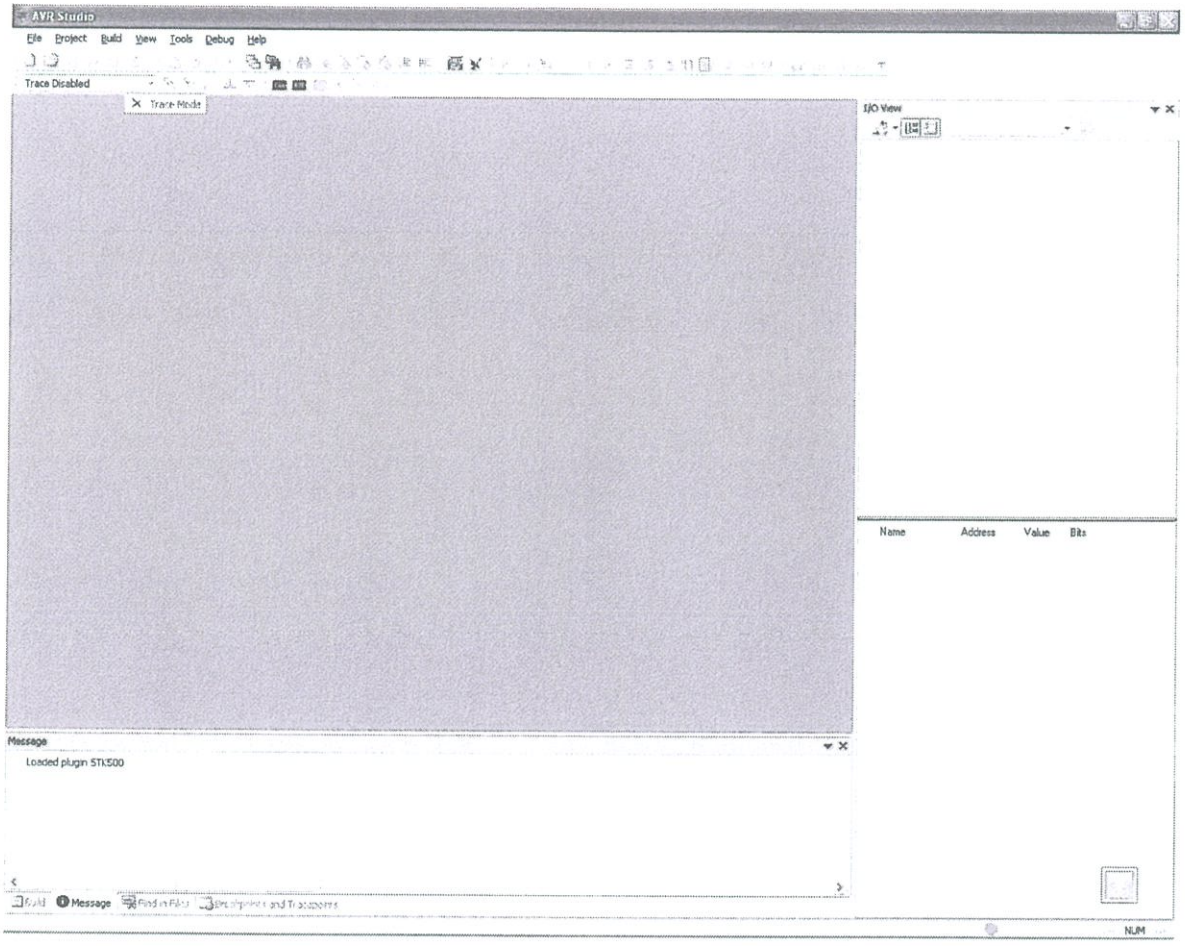
- **การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้เครื่องโปรแกรมภายนอก** ในกรณีนี้จะมีข้อดีคือ ไม่สูญเสียทรัพยากรใดๆเลย ผู้ใช้สามารถใช้งานและกำหนดคุณสมบัติการทำงานของทรัพยากรต่างๆที่มีอยู่ใน MCU ได้เอง ตามต้องการ แต่มีข้อเสียคือ ต้องมีเครื่องโปรแกรมภายนอก สำหรับทำหน้าที่โปรแกรม Code ให้กับ MCU โดยสามารถใช้ได้กับเครื่องโปรแกรมทุกรุ่นที่ รองรับการใช้งานกับ MCU เบอร์ ATmega168 และมีขั้วต่อตามมาตรฐาน AVRISP ของ ATMEL

- **การพัฒนาโปรแกรมโดยใช้งานร่วมกับ Bootloader** ในกรณีนี้จะมีข้อดี คือ เมื่อทำการเขียนโปรแกรมเสร็จแล้วสามารถสั่ง Program Code ให้กับ MCU ผ่านทางโปรแกรม Bootloader ที่ติดตั้งไว้แล้วได้ทันที โดยไม่ต้องใช้เครื่องโปรแกรมภายนอก แต่มีข้อจำกัด คือ ต้องเสียพื้นที่หน่วยความจำ Flash สำหรับเก็บ Code โปรแกรมไป 2KByte (0x3800 -0x3FFF) เพื่อใช้ติดตั้งโปรแกรม Bootloader ซึ่งตามปรกติแล้วบอร์ด ET-EASY168 STAMP จะทำการ ติดตั้งโปรแกรม Bootloader ไปให้เรียบร้อยแล้ว โดยในกรณีนี้ผู้ใช้จะสามารถเขียนโปรแกรมใช้งานได้ทั้งหมดจำนวน 14 Kbyte จากที่มีอยู่ทั้งหมด 16Kbyte โดยต้องเขียนโปรแกรมให้มีตำแหน่งการทำงานของ Code อยู่ระหว่างตำแหน่งแอดเดรส 0x0000 ถึง 0x37FF (0x1C00 - 0x1FFF K Word) ส่วน SRAM,EEPROM และทรัพยากรอื่นๆที่มีอยู่ใน MCU ผู้ใช้ยังสามารถใช้งานได้ครบตามจำนวนที่มีอยู่ในตัว MCU ทุกประการ

ตัวอย่างการพัฒนาโปรแกรมด้วย WinAVR โดยใช้งานร่วมกับ Bootloader

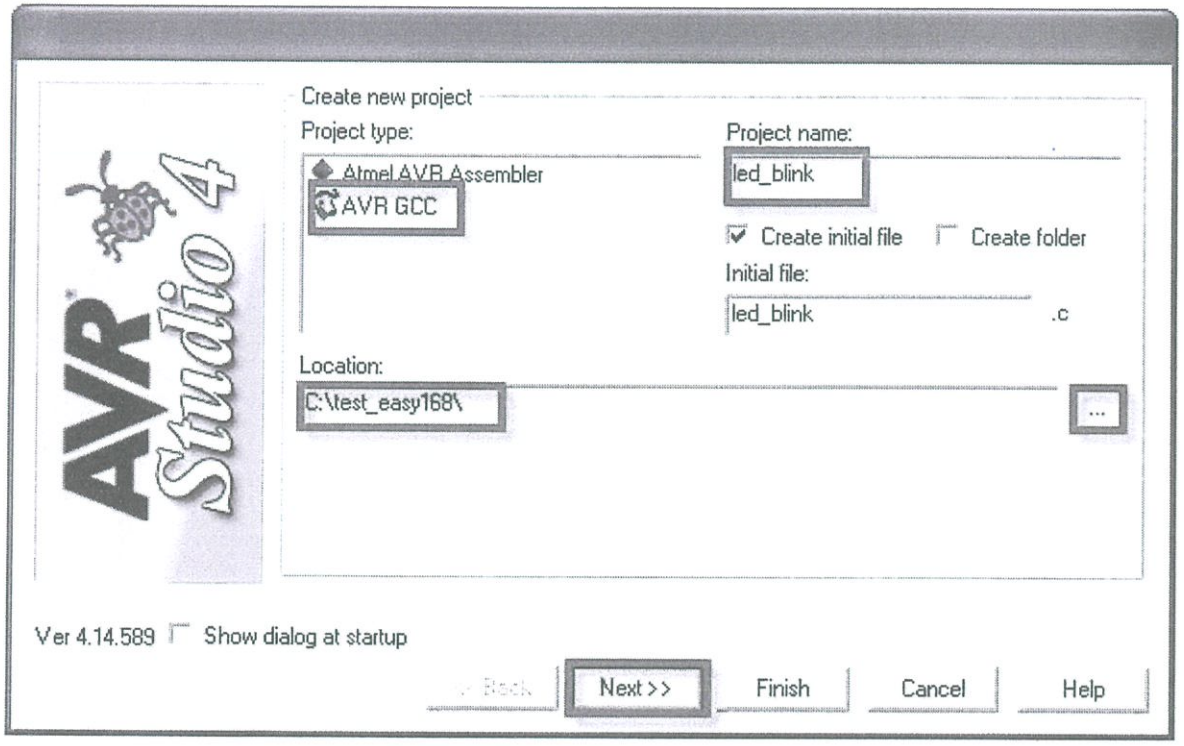
ตัวอย่างที่จะแสดงต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นวิธีการพัฒนาโปรแกรมให้กับ ATmega168 ด้วยภาษาซี โดยใช้โปรแกรม AVR Studio4 ของ ATMEL ร่วมกับ Compiler ภาษาซีของ WinAVR

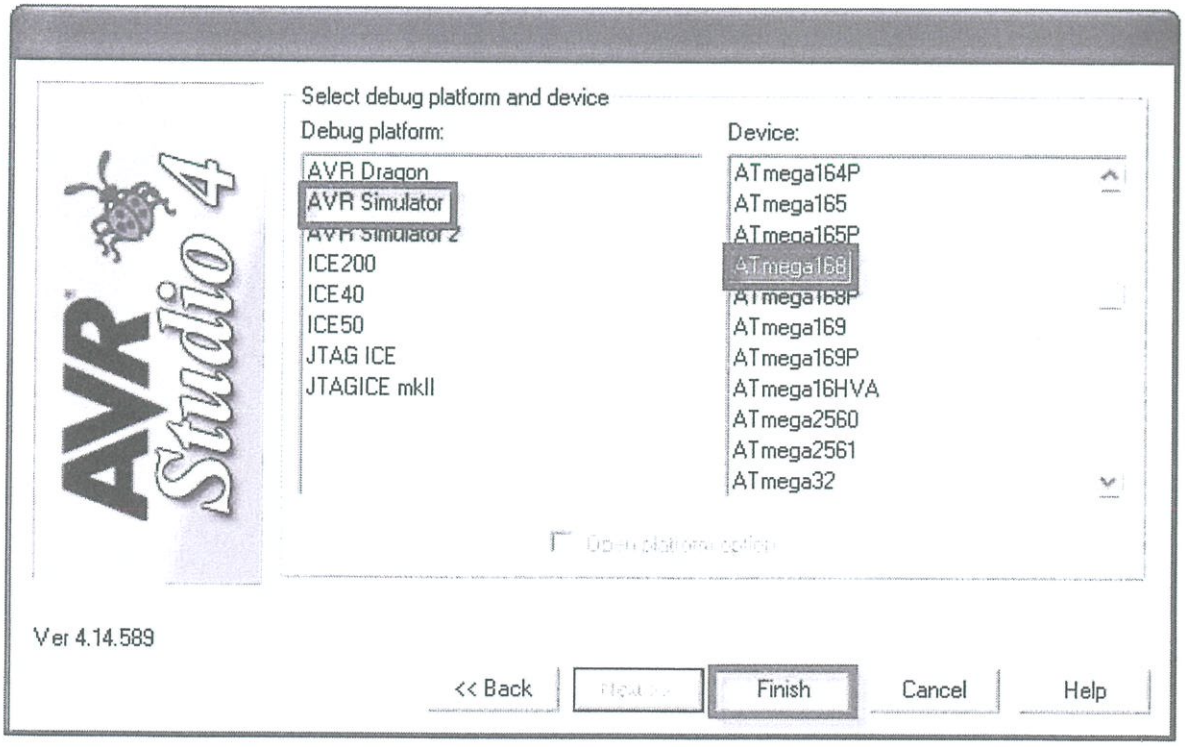
1. สั่ง Run Program AVR Studio4



2. สั่งสร้าง project ใหม่ โดยเลือกที่ project → New project จากนั้นเลือกกำหนดตัวเลือกต่างๆ ให้กับโปรแกรมดังนี้
   - Project type เลือกกำหนดเป็น AVR GCC
   - Location สำหรับบันทึก project ให้ระบุตำแหน่ง Folder ที่ต้องการใช้บันทึกไฟล์ และ Code ต่างของ project ในตัวอย่างกำหนดไว้ที่ "C:\test_easy168\"
   - Poject name ให้กำหนดชื่อ project ตามต้องการในตัวอย่างกำหนดเป็น "led_blink" และให้เลือก Create initial file ไว้ด้วย ซึ่งเมื่อเราทำการกำหนดชื่อ project name เสร็จแล้ว โปรแกรมจะสร้างไฟล์ ที่มีชื่อเดียวกันกับ project name ให้เองโดยอัตโนมัติ

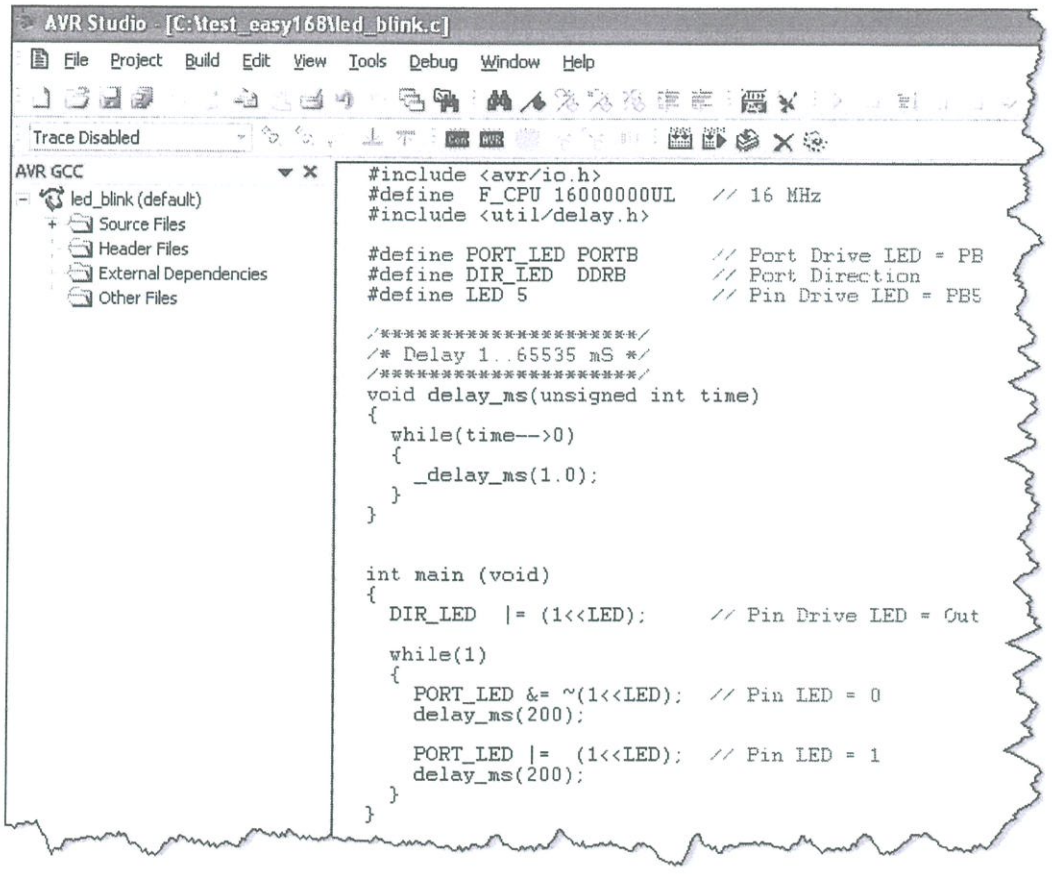
3. เมื่อกำหนดค่าตัวเลือกต่างๆ ให้กับโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกที่ Next แล้วกำหนดค่าใน Debug platform เป็น AVR Simulator และเลือก Device เป็น ATmega168 ดังรูป



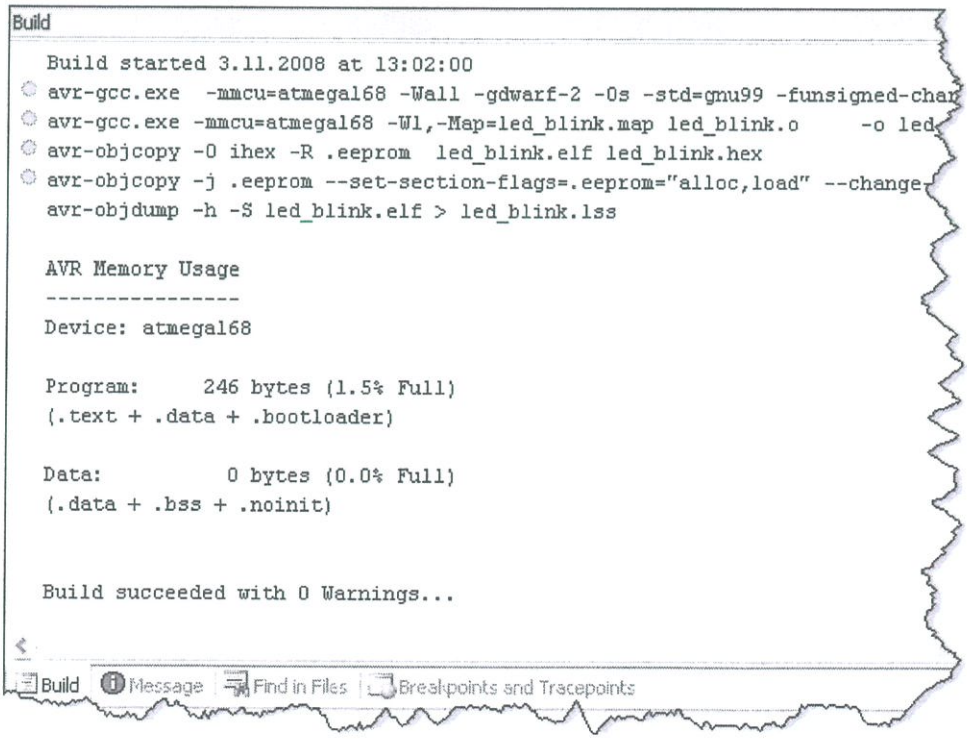


4. ให้พิมพ์คำสั่งของโปรแกรมสำหรับทดสอบการทำงาน ในหน้าต่าง Text Editor ของโปรแกรม โดยในที่นี้จะทดสอบด้วย Codeโปรแกรม สำหรับทำหน้าที่เป็นไฟกระพริบที่ PB5 ซึ่งเป็น LED ที่ติดตั้งไว้บนบอร์ด ET-EASY168 STAMP อยู่แล้ว ดังตัวอย่าง

```
/*******************************/
/* Program Test LED Blinking  */
/* Board : ET-EASY168 STAMP   */
/* MCU   : ATmega168          */
/* X-TAL : 16.00MHz           */
/*******************************/

#include <avr/io.h>
#define  F_CPU 16000000UL      // X-TAL = 16 MHz
#include <util/delay.h>

#define PORT_LED PORTB         // Port Drive LED = PB
#define DIR_LED  DDRB          // Port Direction
#define LED 5                  // Pin Drive LED = PB5

/********************/
/*Delay 1..65535 mS */
/********************/
void delay_ms(unsigned int time)
{
  while(time-->0)
  {
    _delay_ms(1.0);
  }
}


int main (void)
{
  DIR_LED  |= (1<<LED);        // Pin Drive LED = Out

  while(1)
  {
    PORT_LED &= ~(1<<LED);     // Pin LED = 0
     delay_ms(200);

    PORT_LED |=  (1<<LED);     // Pin LED = 1
     delay_ms(200);
  }
}
```



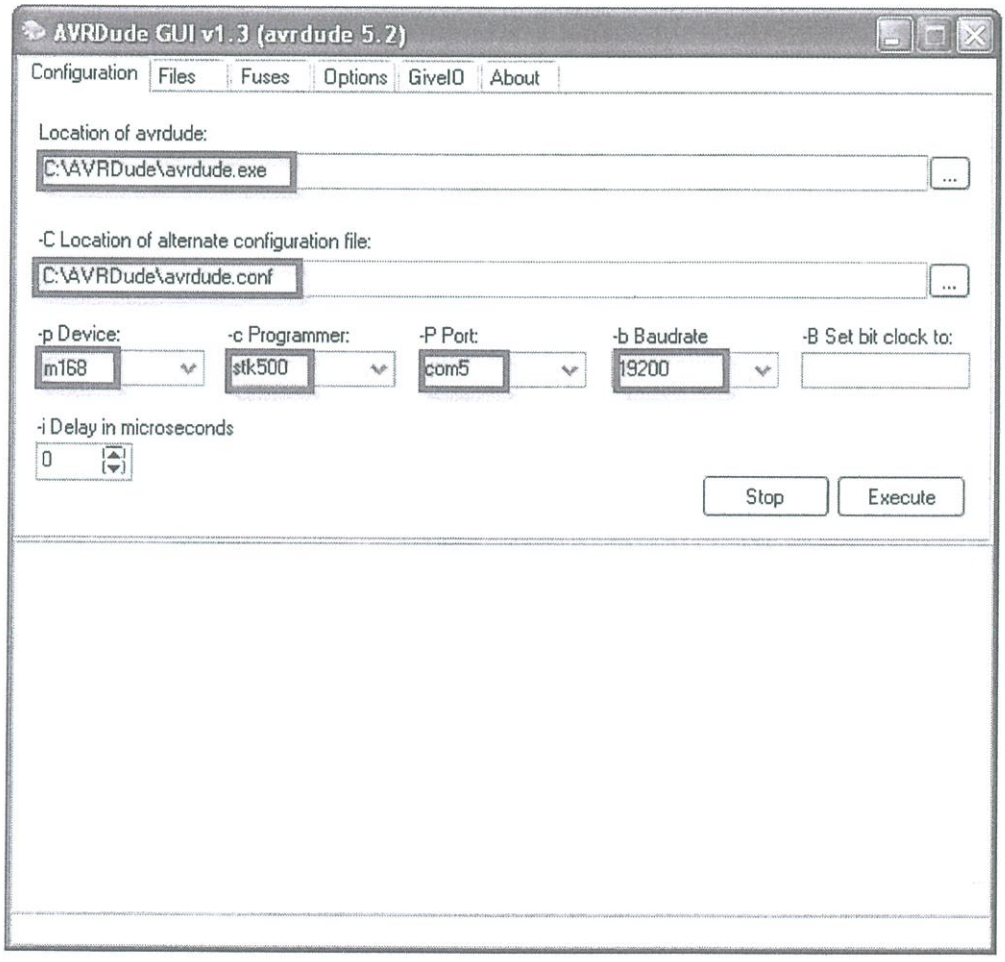
5. หลังจากพิมพ์ Code โปรแกรมเสร็จแล้วให้สั่งแปลโปรแกรม โดยเลือกที่ build →rebuild all ซึ่งผลจากการแปลคำสั่งจะได้เป็น HEX File ที่มีชื่อเดียวกันกับ project ที่สร้างไว้ ดังรูป



การสั่งโปรแกรม Hex Code ให้กับบอร์ด ET-EASY168 STAMP ผ่าน Bootloader

ในการพัฒนาโปรแกรมของ บอร์ด ET-EASY168 STAMP ในรูปแบบของ AVR Microcontroller นั้น หลังจากที่ทำการเขียนโปรแกรม และสั่งแปลคำสั่งจนได้ HEX File เรียบร้อยแล้วในการสั่ง Program HEX Code ที่ได้จากการแปลคำสั่งของโปรแกรมนี้ ผ่านทางโปรแกรม Bootloader ของบอร์ดนั้น ขอแนะนำให้ใช้โปรแกรม AVRDude โดยใช้งานผ่าน AVRDudeGUI ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการสร้างโฟลเดอร์ชื่อ AVRDUDE ไว้ใน Drive C ("C:\AVRDUDE\") จากนั้นให้ทำการ Copy โปรแกรมของ avrdude และ avrdudeGUI ไว้ใน "C:\AVRDUDE\" โดยจะมีทั้งหมด 3 ไฟล์ด้วยกัน คือ avrdude.exe, avrdude.conf และ avrdudegui.exe
2. สั่ง Run Program AVRDude.EXE แล้วเลือกที่ Tab ของ Configuration ให้เลือกกำหนดค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

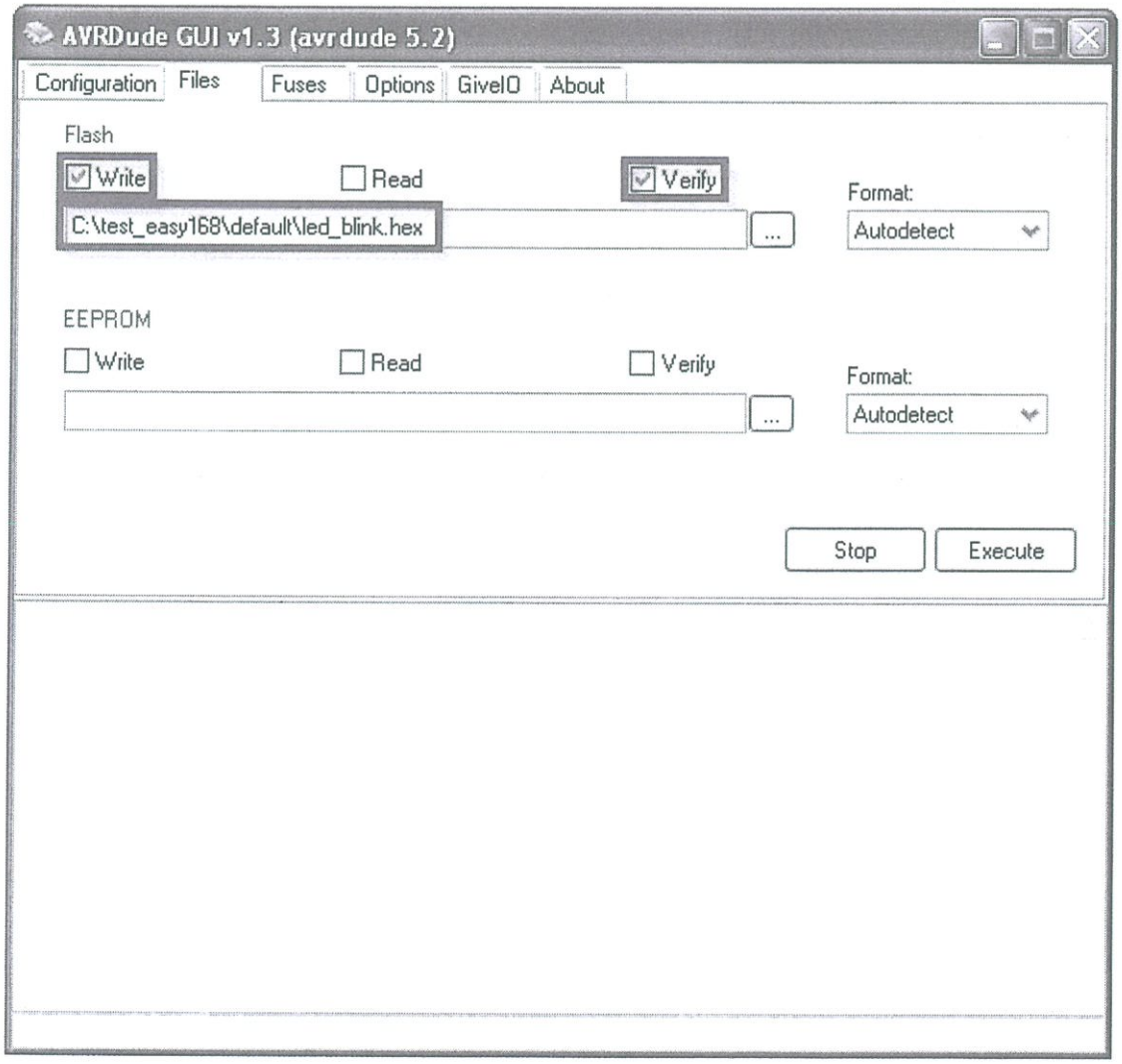


หมายเหตุ ถ้าหมายเลข Comport มากกว่า com8 ให้พิมพ์หมายเลข Comport ลงไปในช่องรับค่าของ –P Port ได้เอง เช่น com9 แต่ถ้าหมายเลข Comport มีค่าเป็น 2 หลักให้ เพิ่มเครื่องหมาย "\\.\" นำหน้าชื่อหมายเลข Comport ลงไปด้วย เช่น ถ้าใช้กับ Com13 ก็ให้กำหนดเป็น "\\.\com13" เป็นต้น

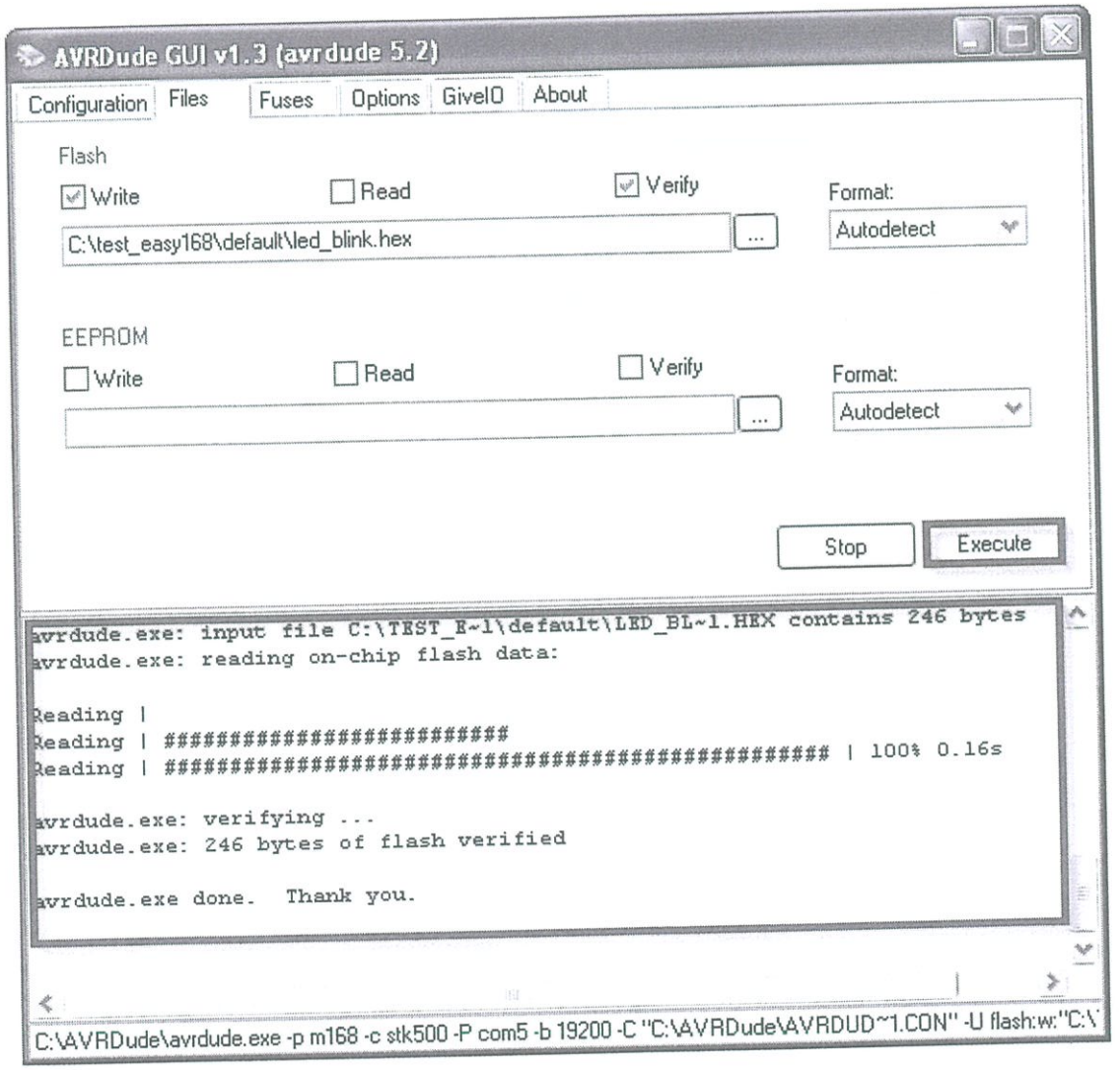
ให้ทำการกำหนดค่า Configuration ให้กับโปรแกรม AVRDudeGUI ดังนี้

- Location of avrdude ให้เลือกไปที่ชื่อและที่อยู่ของไฟล์ avrdude.exe ที่ได้ติดตั้งไว้ตามขั้นตอนที่ 1 ซึ่งก็คือ "C:\AVRDude\avrdude.exe"
- -C Location of alternate configuration file ให้เลือกไปที่ชื่อและที่อยู่ของไฟล์ avrdude.conf ที่ได้ติดตั้งไว้ตามขั้นตอนที่ 1 ซึ่งก็คือ "C:\AVRDude\avrdude.conf"
- -p Device ให้เลือกเป็น m168
- -c Programmer ให้เลือกเป็น stk500
- -p Port ให้เลือกเป็นหมายเลข Comport ตามที่ได้ติดตั้ง Drive ของ USB(FTDI) ไว้
- -b Baudrate ให้เลือกกำหนดเป็น 19200

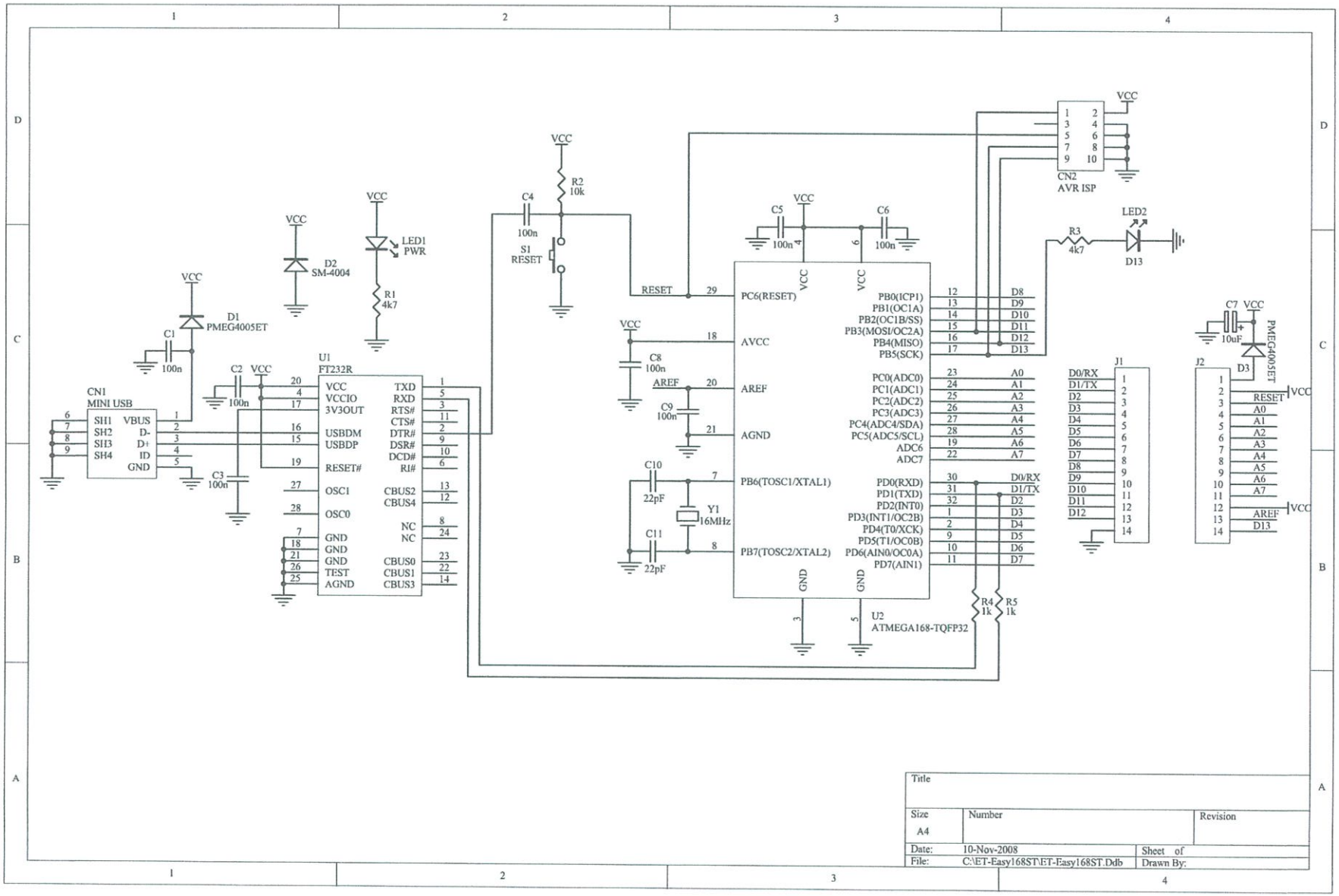
3. เปลี่ยน Tab ไปที่ File แล้วเลือกกำหนดส่วนของ Flash โดยให้เลือก Write และ Verify พร้อมทำกำหนดชื่อ HEX File ไฟล์ที่ต้องการจะโปรแกรม ซึ่งในที่นี้จะใช้ HEX File ที่ได้จากตัวอย่างที่เขียนด้วยภาษาซีของ WinAVR ซึ่งจะอยู่ใน "C:\test_easy\default\led_blink.hex" ดังรูป



4. เมื่อกำหนดค่าต่างๆให้กับโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกที่ Execute ที่อยู่ใน Tab ของ Files ซึ่งโปรแกรม avrdude จะเริ่มต้นทำการ โปรแกรม HEX File ให้กับบอร์ดทันที ให้รอจนเสร็จดังรูป



5. หลังจากสั่งโปแกรมเสร็จให้รอสักครู่ประมาณ 3 วินาที บอร์ดจะเริ่มต้นทำงานทันที โดยจะเห็น LED กระพริบ ติด และ ดับ สลับกันไปมาไม่รู้จบ ซึ่งถ้าต้องการทดสอบการทำงานใหม่ ก็ให้ลอง กดสวิตช์ Reset ที่บอร์ด ซึ่งตอนเริ่มต้นจะเห็น LED กระพริบอย่างเร็วจำนวน 3 ครั้งแล้วติดค้าง ซึ่งช่วงนี้เป็นการทำงานของ MCU ตามโปรแกรมใน Bootloader ซึ่งเมื่อไม่มีการติดต่อสื่อสารเพื่อสั่งให้โปรแกรมเข้าทำงานในโหมด Program Code ของ Bootloader ภายในเวลา 3 วินาที MCU ก็จะจบการทำงานจากส่วนของ Bootloader แล้วกระโดดไปทำงานในส่วนที่เป็น Code ของผู้ใช้เองทันที ซึ่งหลังการรีเซ็ตทุกครั้งจะเป็นเช่นนี้ไปตลอด โดยโปรแกรมที่เป็นส่วนของผู้ใช้จะเริ่มต้นทำงานหลังจากพ้นสภาวะรีเซ็ตไปแล้วประมาณ 3 วินาที


CN1
MINI USB
SH1
SH2
SH3
SH4
VBUS
D-
D+
ID
GND
D1
PMEG4005ET
C1
100n
C2
100n
C3
100n
U1
FT232R
VCC
VCCIO
3V3OUT
USBDM
USBDP
RESET#
OSC1
OSC0
GND
GND
GND
TEST
AGND
TXD
RXD
RTS#
CTS#
DTR#
DSR#
DCD#
RI#
CBUS2
CBUS4
NC
NC
CBUS0
CBUS1
CBUS3
D2
SM-4004
LED1
PWR
R1
4k7
R2
10k
C4
100n
S1
RESET
C5
100n
C6
100n
C7
10uF
D3
PMEG4005ET
CN2
AVR ISP
LED2
R3
4k7
D13
C8
100n
C9
100n
C10
22pF
C11
22pF
Y1
16MHz
U2
ATMEGA168-TQFP32
PC6(RESET)
AVCC
AREF
AGND
PB6(TOSC1/XTAL1)
PB7(TOSC2/XTAL2)
PB0(ICP1)
PB1(OC1A)
PB2(OC1B/SS)
PB3(MOSI/OC2A)
PB4(MISO)
PB5(SCK)
PC0(ADC0)
PC1(ADC1)
PC2(ADC2)
PC3(ADC3)
PC4(ADC4/SDA)
PC5(ADC5/SCL)
ADC6
ADC7
PD0(RXD)
PD1(TXD)
PD2(INT0)
PD3(INT1/OC2B)
PD4(T0/XCK)
PD5(T1/OC0B)
PD6(AIN0/OC0A)
PD7(AIN1)
R4
1k
R5
1k
J1
J2
D0/RX
D1/TX
RESET
AREF
Title
Size
A4
Number
Revision
Date:
10-Nov-2008
Sheet of
File:
C:\ET-Easy168ST\ET-Easy168ST.Ddb
Drawn By:

HRS2(H) Relay

1.COIL DATA

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

2.CONTACT DATA

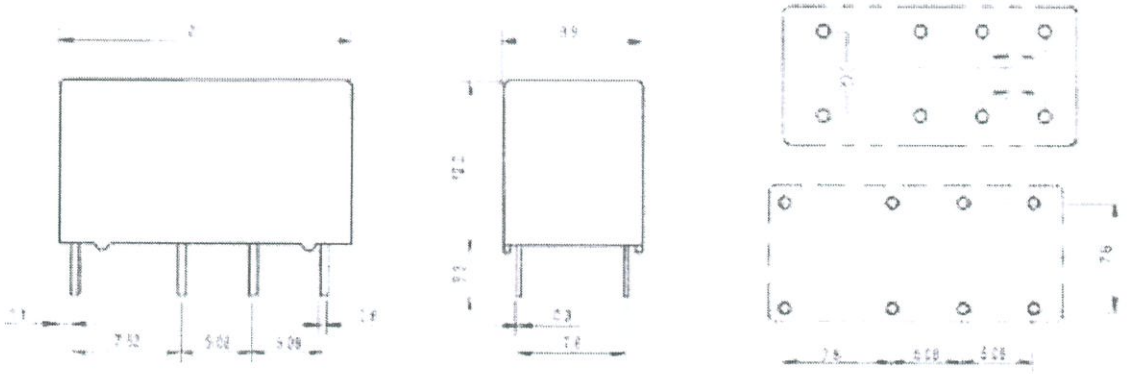
2-1.Contact Arrangement		2 Form C
2-2.Contact Material		AuAg
2-3.Contact Rating		1A 24 VDC / 120VAC
2-4.Max. Switching Voltage		60 VDC / 120 VAC
2-5.Max. Switching Current		2A
2-6.Max. Switching Power		60 VA , 24W
2-7.Contact Resistance (Initial)		100 mΩ. at 6 VDC 1A
2-8.Life Expectancy	Electrical	100,000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

HRS2(H) Relay

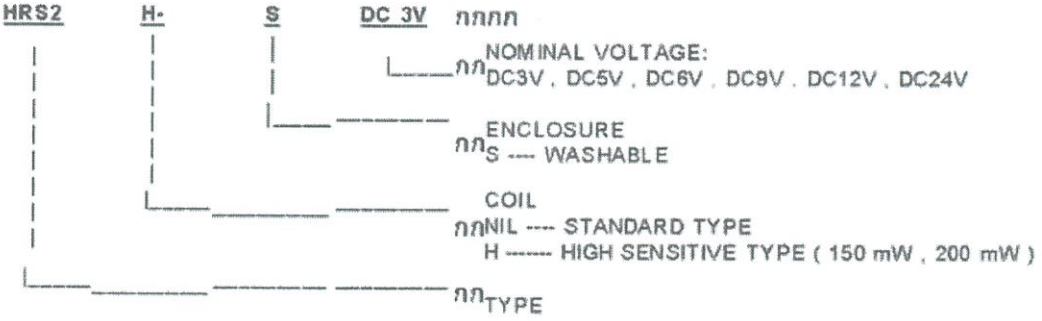
3.GENERAL DATA

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

4.DIMENSIONS (in mm)



5.ORDERING CODE



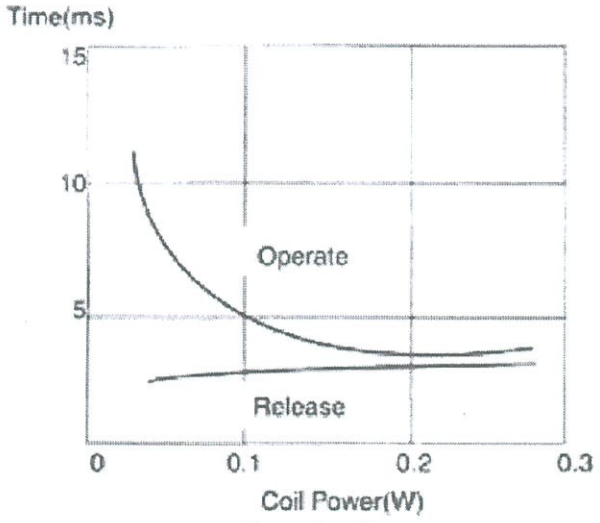
6.COIL DATA CHART

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

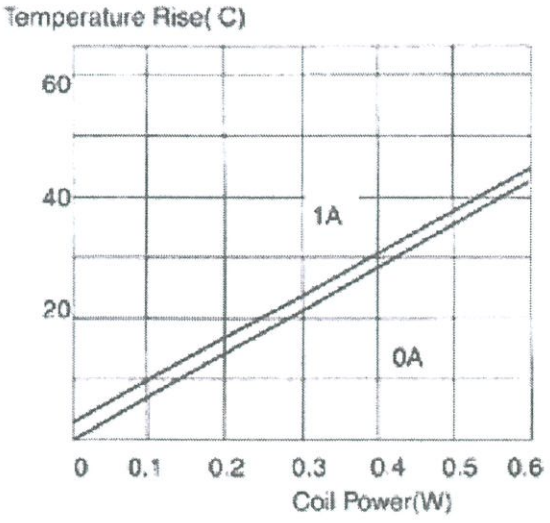
Table 1

7.HRS2(H) CHARACTERISTIC DATA

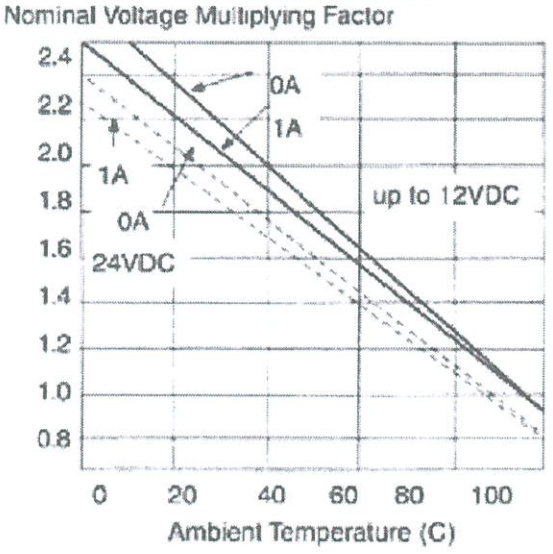
Timing



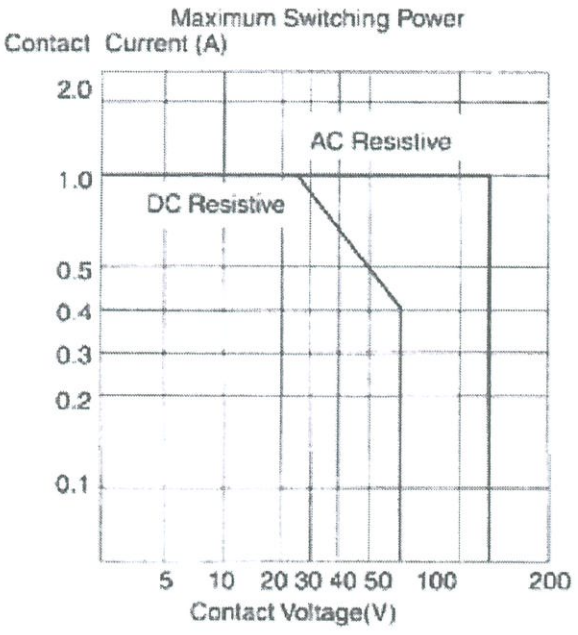
Coil Temperature Rise



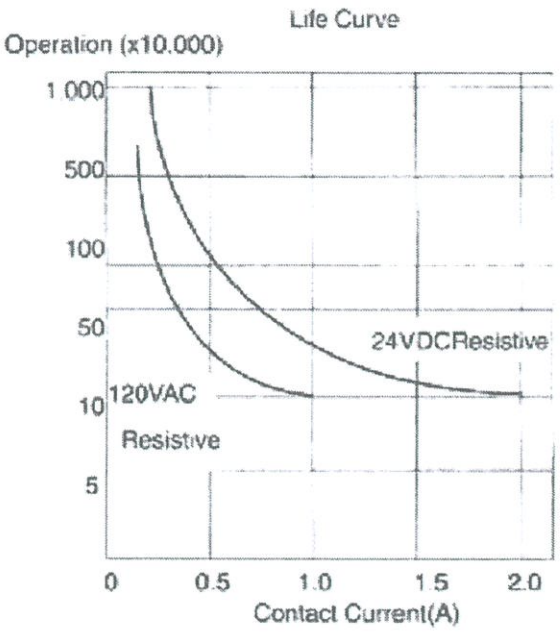
Operating Range



Maximum Switching Power



Life Curve



2N3903, 2N3904

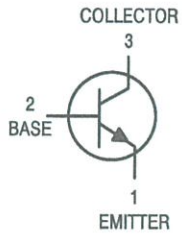
2N3903 is a Preferred Device

General Purpose Transistors

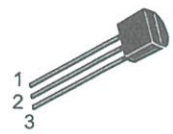
NPN Silicon

ON Semiconductor™

http://onsemi.com



STYLE 1



TO–92
CASE 29
STYLE 1

MAXIMUM RATINGS

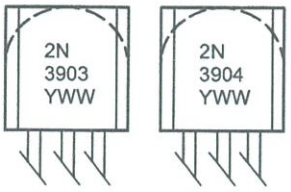
Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	40	Vdc
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	60	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EBO}	6.0	Vdc
Collector Current – Continuous	I_C	200	mAdc
Total Device Dissipation @ T_A = 25°C Derate above 25°C	P_D	625 5.0	mW mW/°C
Total Device Dissipation @ T_C = 25°C Derate above 25°C	P_D	1.5 12	Watts mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	–55 to +150	°C

THERMAL CHARACTERISTICS (Note 1.)

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

1. Indicates Data in addition to JEDEC Requirements.

MARKING DIAGRAMS



Y = Year
WW = Work Week

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
2N3903	TO–92	5000 Units/Box
2N3903RLRM	TO–92	2000/Ammo Pack
2N3904	TO–92	5000 Units/Box
2N3904RLRA	TO–92	2000/Tape & Reel
2N3904RLRE	TO–92	2000/Tape & Reel
2N3904RLRM	TO–92	2000/Ammo Pack
2N3904RLRP	TO–92	2000/Ammo Pack
2N3904RL1	TO–92	2000/Tape & Reel
2N3904ZL1	TO–92	2000/Ammo Pack

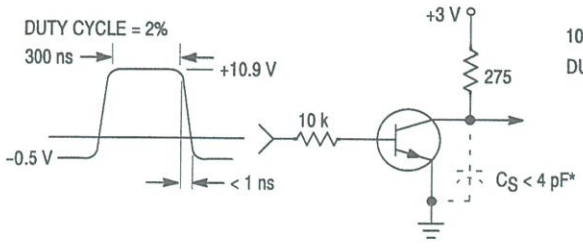
Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

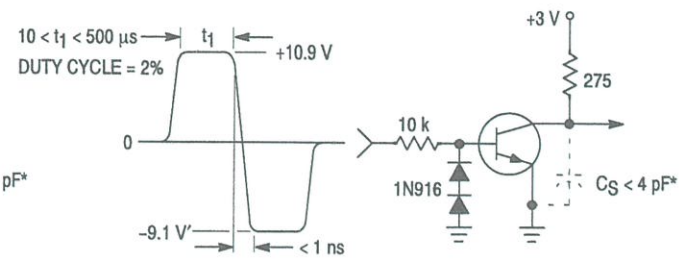
© Semiconductor Components Industries, LLC, 2001

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic		Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS					
Collector–Emitter Breakdown Voltage (Note 2.) (I_C = 1.0 mAdc, I_B = 0)		$V_{(BR)CEO}$	40	–	Vdc
Collector–Base Breakdown Voltage (I_C = 10 μAdc, I_E = 0)		$V_{(BR)CBO}$	60	–	Vdc
Emitter–Base Breakdown Voltage (I_E = 10 μAdc, I_C = 0)		$V_{(BR)EBO}$	6.0	–	Vdc
Base Cutoff Current (V_{CE} = 30 Vdc, V_{EB} = 3.0 Vdc)		I_{BL}	–	50	nAdc
Collector Cutoff Current (V_{CE} = 30 Vdc, V_{EB} = 3.0 Vdc)		I_{CEX}	–	50	nAdc
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain (Note 2.)		h_{FE}			–
(I_C = 0.1 mAdc, V_{CE} = 1.0 Vdc)	2N3903		20	–	
	2N3904		40	–	
(I_C = 1.0 mAdc, V_{CE} = 1.0 Vdc)	2N3903		35	–	
	2N3904		70	–	
(I_C = 10 mAdc, V_{CE} = 1.0 Vdc)	2N3903		50	150	
	2N3904		100	300	
(I_C = 50 mAdc, V_{CE} = 1.0 Vdc)	2N3903		30	–	
	2N3904		60	–	
(I_C = 100 mAdc, V_{CE} = 1.0 Vdc)	2N3903		15	–	
	2N3904		30	–	
Collector–Emitter Saturation Voltage (Note 2.)		$V_{CE(sat)}$			Vdc
(I_C = 10 mAdc, I_B = 1.0 mAdc)			–	0.2	
(I_C = 50 mAdc, I_B = 5.0 mAdc			–	0.3	
Base–Emitter Saturation Voltage (Note 2.)		$V_{BE(sat)}$			Vdc
(I_C = 10 mAdc, I_B = 1.0 mAdc)			0.65	0.85	
(I_C = 50 mAdc, I_B = 5.0 mAdc)			–	0.95	
SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS					
Current–Gain – Bandwidth Product		f_T			MHz
(I_C = 10 mAdc, V_{CE} = 20 Vdc, f = 100 MHz)	2N3903		250	–	
	2N3904		300	–	
Output Capacitance (V_{CB} = 5.0 Vdc, I_E = 0, f = 1.0 MHz)		C_{obo}	–	4.0	pF
Input Capacitance (V_{EB} = 0.5 Vdc, I_C = 0, f = 1.0 MHz)		C_{ibo}	–	8.0	pF
Input Impedance		h_{ie}			k Ω
(I_C = 1.0 mAdc, V_{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	2N3903		1.0	8.0	
	2N3904		1.0	10	
Voltage Feedback Ratio		h_{re}			X 10^{-4}
(I_C = 1.0 mAdc, V_{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	2N3903		0.1	5.0	
	2N3904		0.5	8.0	
Small–Signal Current Gain		h_{fe}			–
(I_C = 1.0 mAdc, V_{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)	2N3903		50	200	
	2N3904		100	400	
Output Admittance (I_C = 1.0 mAdc, V_{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz)		h_{oe}	1.0	40	μmhos
Noise Figure		NF			dB
(I_C = 100 μAdc, V_{CE} = 5.0 Vdc, R_S = 1.0 k Ω, f = 1.0 kHz)	2N3903		–	6.0	
	2N3904		–	5.0	
SWITCHING CHARACTERISTICS					
Delay Time	(V_{CC} = 3.0 Vdc, V_{BE} = 0.5 Vdc,	t_d	–	35	ns
Rise Time	I_C = 10 mAdc, I_{B1} = 1.0 mAdc)	t_r	–	35	ns
Storage Time	(V_{CC} = 3.0 Vdc, I_C = 10 mAdc, 2N3903	t_s	–	175	ns
	I_{B1} = I_{B2} = 1.0 mAdc) 2N3904		–	200	
Fall Time		t_f	–	50	ns

2. Pulse Test: Pulse Width ≤ 300 μs; Duty Cycle ≤ 2%.





* Total shunt capacitance of test jig and connectors

Figure 1. Delay and Rise Time Equivalent Test Circuit

Figure 2. Storage and Fall Time Equivalent Test Circuit

TYPICAL TRANSIENT CHARACTERISTICS

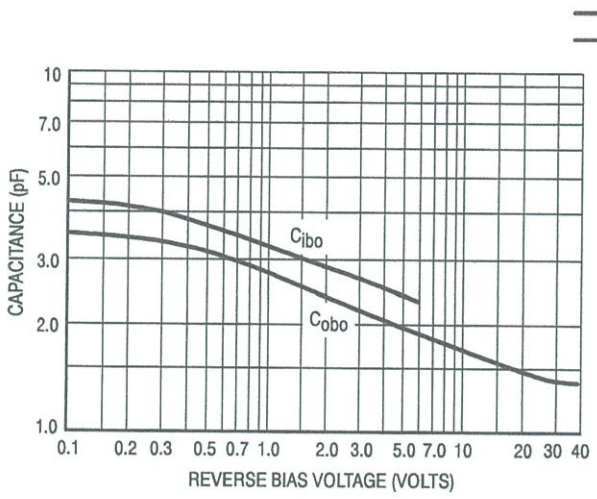


Figure 3. Capacitance

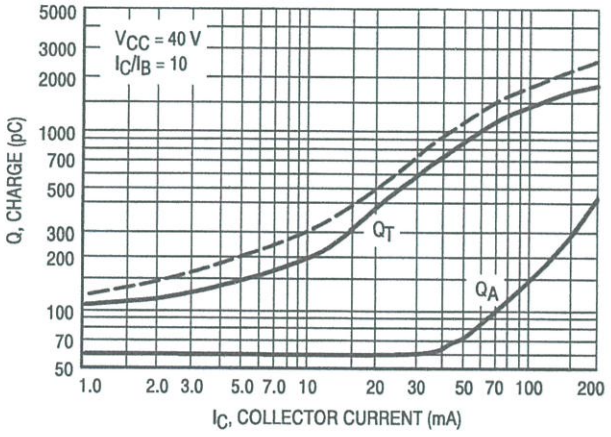


Figure 4. Charge Data

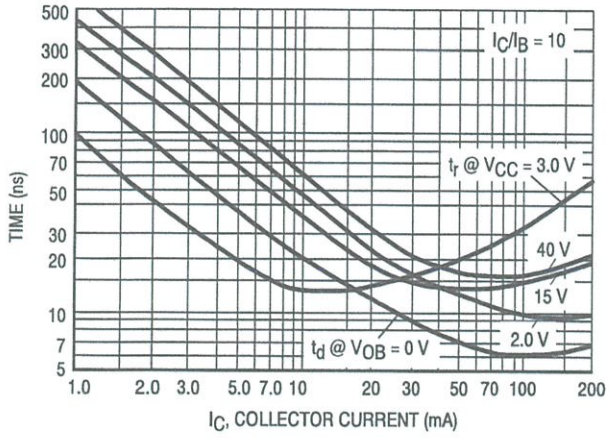


Figure 5. Turn–On Time

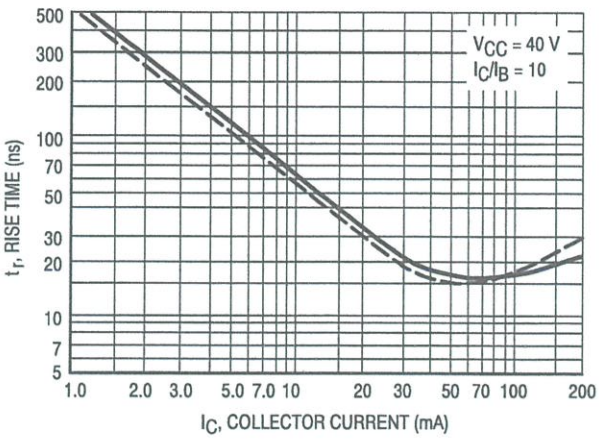


Figure 6. Rise Time

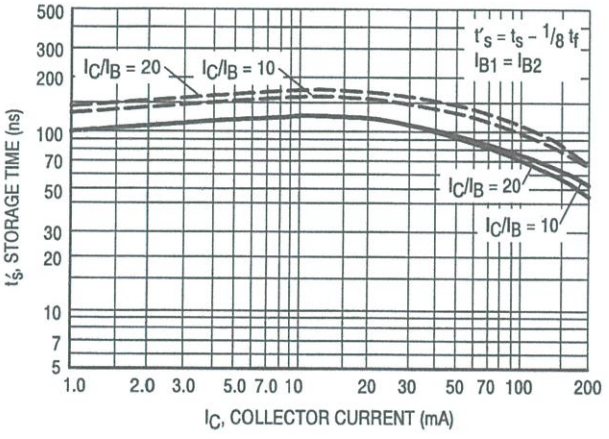


Figure 7. Storage Time

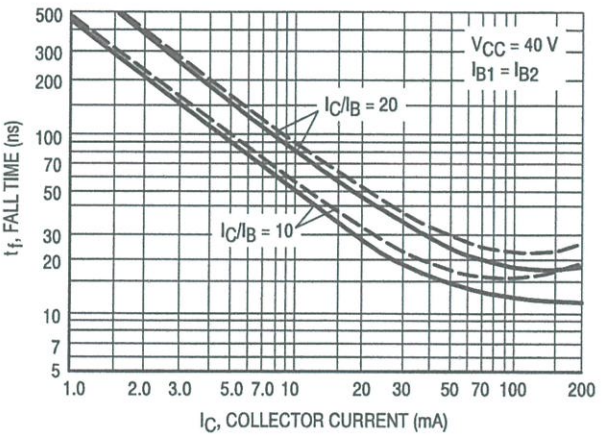


Figure 8. Fall Time

TYPICAL AUDIO SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS
NOISE FIGURE VARIATIONS

(V_{CE} = 5.0 Vdc, T_A = 25°C, Bandwidth = 1.0 Hz)

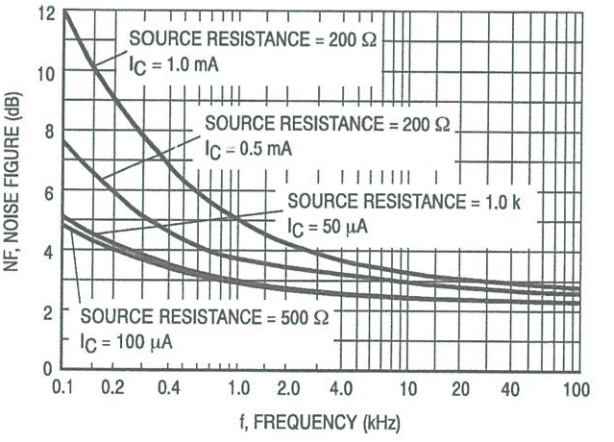


Figure 9.

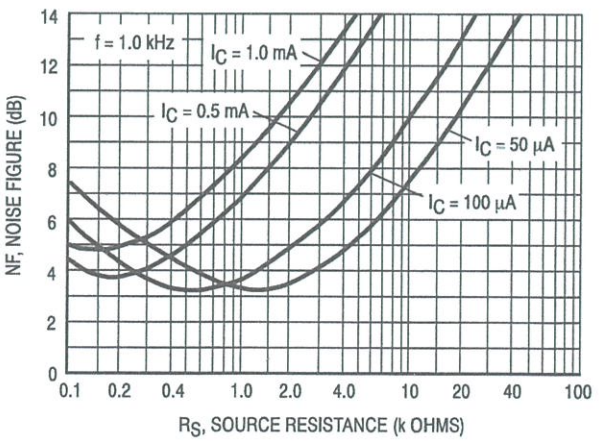


Figure 10.

h PARAMETERS

(V_{CE} = 10 Vdc, f = 1.0 kHz, T_A = 25°C)

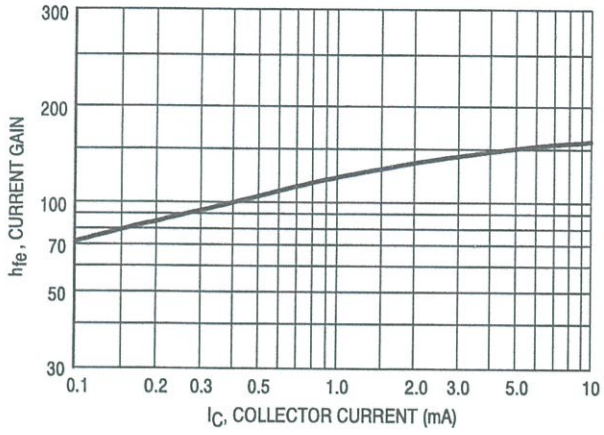


Figure 11. Current Gain

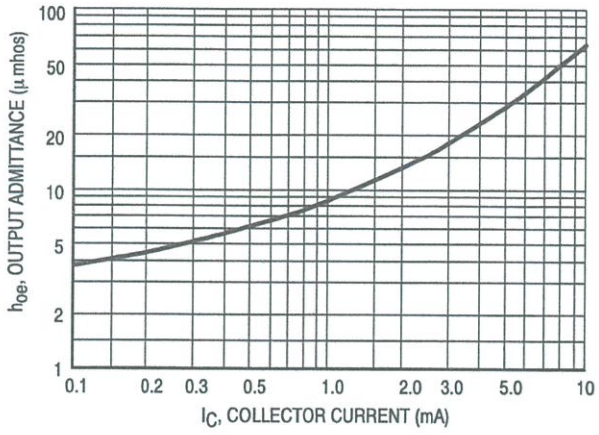


Figure 12. Output Admittance

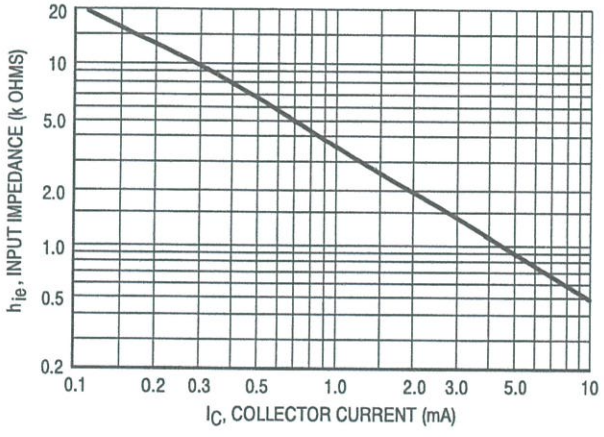


Figure 13. Input Impedance

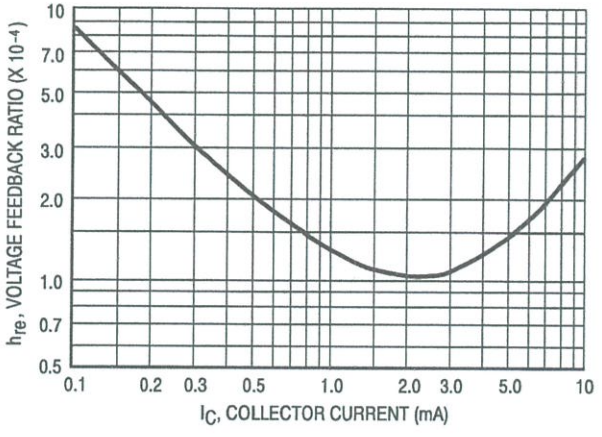


Figure 14. Voltage Feedback Ratio

TYPICAL STATIC CHARACTERISTICS

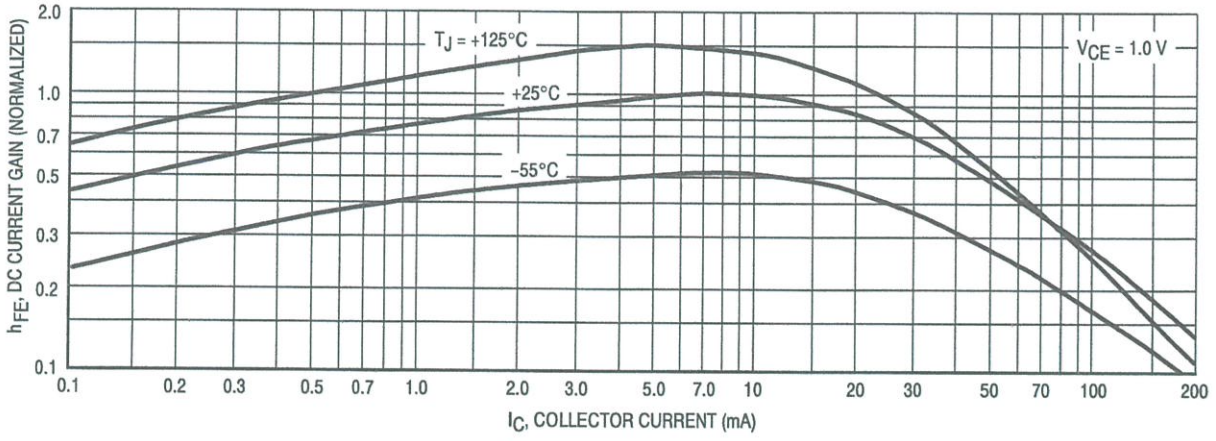


Figure 15. DC Current Gain

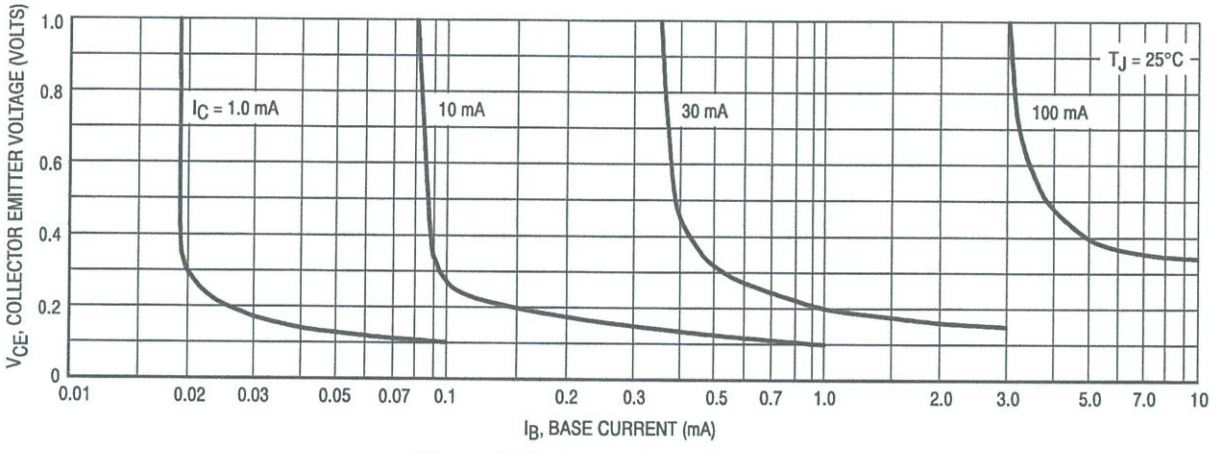


Figure 16. Collector Saturation Region

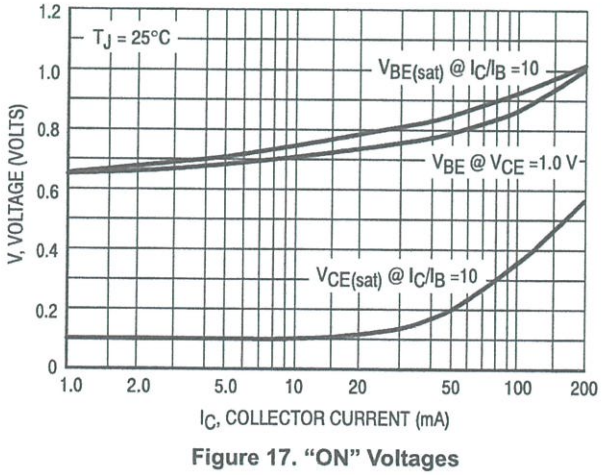


Figure 17. "ON" Voltages

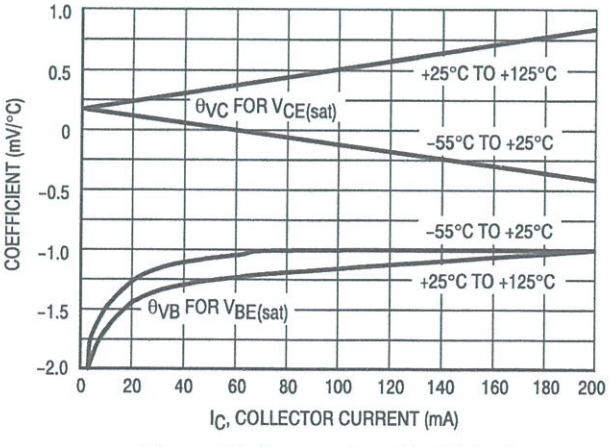
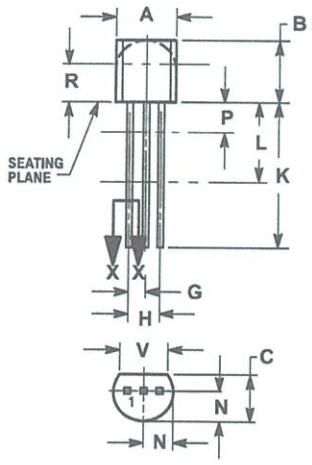
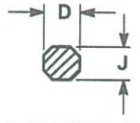


Figure 18. Temperature Coefficients

PACKAGE DIMENSIONS

TO–92
TO–226AA
CASE 29–11
ISSUE AL





SECTION X–X

NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. CONTOUR OF PACKAGE BEYOND DIMENSION R IS UNCONTROLLED.
4. LEAD DIMENSION IS UNCONTROLLED IN P AND BEYOND DIMENSION K MINIMUM.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.175	0.205	4.45	5.20
B	0.170	0.210	4.32	5.33
C	0.125	0.165	3.18	4.19
D	0.016	0.021	0.407	0.533
G	0.045	0.055	1.15	1.39
H	0.095	0.105	2.42	2.66
J	0.015	0.020	0.39	0.50
K	0.500	---	12.70	---
L	0.250	---	6.35	---
N	0.080	0.105	2.04	2.66
P	---	0.100	---	2.54
R	0.115	---	2.93	---
V	0.135	---	3.43	---

STYLE 1:
PIN 1. EMITTER
2. BASE
3. COLLECTOR

STYLE 14:
PIN 1. EMITTER
2. COLLECTOR
3. BASE

ON Semiconductor and are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

Literature Fulfillment:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303–675–2175 or 800–344–3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303–675–2176 or 800–344–3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com

N. American Technical Support: 800–282–9855 Toll Free USA/Canada

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4–32–1 Nishi–Gotanda, Shinagawa–ku, Tokyo, Japan 141–0031
Phone: 81–3–5740–2700
Email: r14525@onsemi.com

ON Semiconductor Website: http://onsemi.com

For additional information, please contact your local Sales Representative.

2N3903/D

1N4001 - 1N4007

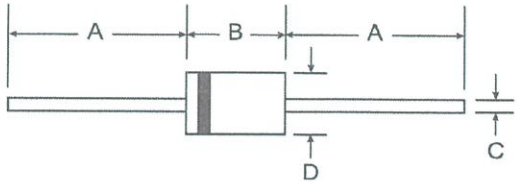
1.0A RECTIFIER

Features

- Diffused Junction
- High Current Capability and Low Forward Voltage Drop
- Surge Overload Rating to 30A Peak
- Low Reverse Leakage Current
- **Lead Free Finish, RoHS Compliant (Note 3)**

Mechanical Data

- Case: DO-41
- Case Material: Molded Plastic. UL Flammability Classification Rating 94V-0
- Moisture Sensitivity: Level 1 per J-STD-020D
- Terminals: Finish - Bright Tin. Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Mounting Position: Any
- Ordering Information: See Page 2
- Marking: Type Number
- Weight: 0.30 grams (approximate)



Dim	DO-41 Plastic	
	Min	Max
A	25.40	—
B	4.06	5.21
C	0.71	0.864
D	2.00	2.72
All Dimensions in mm		

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @T_A = 25°C unless otherwise specified

Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristic	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ T_A = 75°C	I_O	1.0							A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}	30							A
Forward Voltage @ I_F = 1.0A	V_{FM}	1.0							V
Peak Reverse Current @T_A = 25°C at Rated DC Blocking Voltage @ T_A = 100°C	I_{RM}	5.0 50							μA
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C_j	15				8			pF
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	100							K/W
Maximum DC Blocking Voltage Temperature	T_A	+150							°C
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}	-65 to +150							°C

Notes:
1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case.
2. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC.
3. EU Directive 2002/95/EC (RoHS). All applicable RoHS exemptions applied, see EU Directive 2002/95/EC Annex Notes.

© Diodes Incorporated

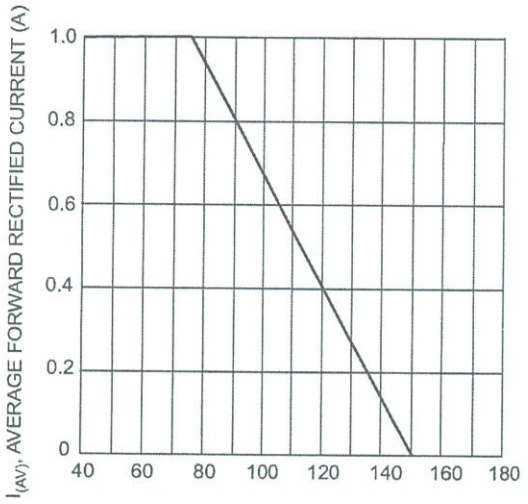


Fig. 1 Forward Current Derating Curve

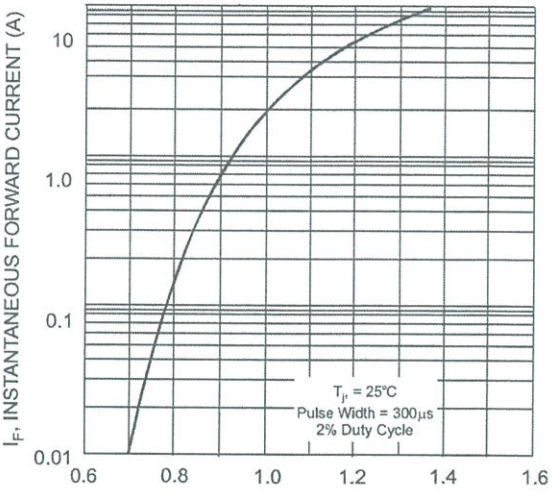


Fig. 2 Typical Forward Characteristics

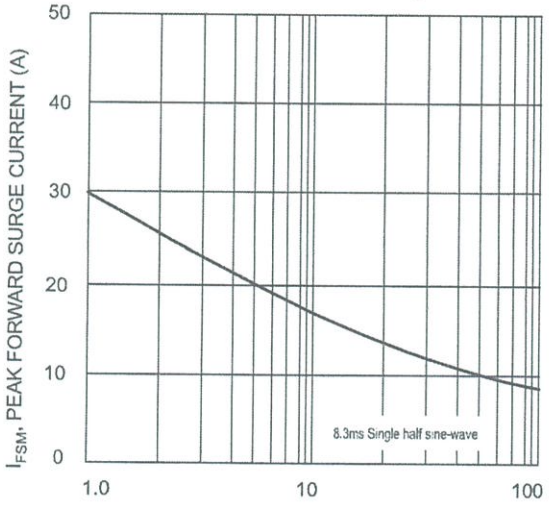


Fig. 3 Max Non-Repetitive Peak Fwd Surge Current

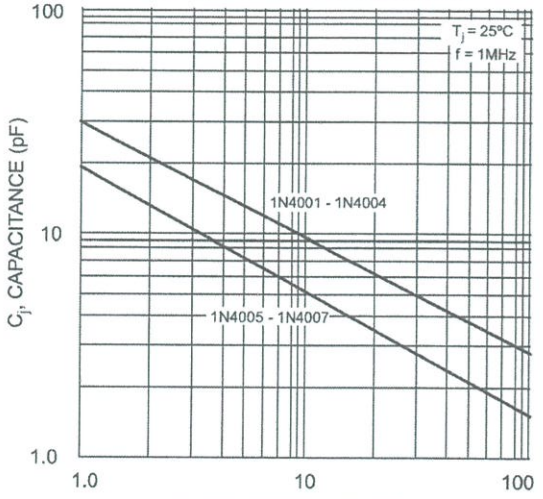


Fig. 4 Typical Junction Capacitance

Ordering Information (Note 4)

Device	Packaging	Shipping
1N4001-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4001-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4002-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4002-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4003-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4003-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4004-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4004-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4005-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4005-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4006-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4006-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch
1N4007-B	DO-41 Plastic	1K/Bulk
1N4007-T	DO-41 Plastic	5K/Tape & Reel, 13-inch

Notes: 4. For packaging details, visit our website at http://www.diodes.com/datasheets/ap02008.pdf.

© Diodes Incorporated

IMPORTANT NOTICE

Diodes Incorporated and its subsidiaries reserve the right to make modifications, enhancements, improvements, corrections or other changes without further notice to any product herein. Diodes Incorporated does not assume any liability arising out of the application or use of any product described herein; neither does it convey any license under its patent rights, nor the rights of others. The user of products in such applications shall assume all risks of such use and will agree to hold Diodes Incorporated and all the companies whose products are represented on our website, harmless against all damages.

LIFE SUPPORT

Diodes Incorporated products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without the expressed written approval of the President of Diodes Incorporated.

© Diodes Incorporated

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายนรเศรษฐ์ พิกุลเงิน
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 16 สิงหาคม 2535 (พิจิตร)
ที่อยู่	59 หมู่ 8 บ้านตำแย ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอวาปีปทุม จังหวัดมหาสารคาม 44120
ประวัติการศึกษา	2552 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนวาปีปทุม 2556 วิทยาศาสตร์บันฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ – นามสกุล	นายณัฐภัทร เร่งรัด
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 25 มีนาคม 2534 (กาญจนบุรี)
ที่อยู่	239/5 หมู่ที่ 3 ตำบลท่าเสา อำเภอทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี 71150
ประวัติการศึกษา	2552 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสมุทรสาครวุฒิชัย 2556 วิทยาศาสตร์บันฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวเสาวณีย์ ไชยสลี
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 22 มิถุนายน 2534 (น่าน)
ที่อยู่	85 หมู่ 3 ตำบล ริม อำเภอ ท่าวังผา จังหวัด น่าน 55140
ประวัติการศึกษา	2552 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม 2556 วิทยาศาสตร์บันฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง