

เครื่องวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธีโพรบสี่ขั้ว
เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดกระจกนำไฟฟ้า

FOUR-POINT PROBE MACHINE FOR TRANSPARENT
CONDUCTING OXIDE SHEET RESISTANCE MEASUREMENT

นางสาวนาฏนภ ศีลาคุปต์
นายศตพร ประมา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เครื่องวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดกระจกนำไฟฟ้า

**FOUR-POINT PROBE MACHINE FOR TRANSPARENT
CONDUCTING OXIDE SHEET RESISTANCE MEASUREMENT**



นางสาวนาฏนภา สีลาคุปต์

นายศตพร ปะมา

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2556

**FOUR-POINT PROBE MACHINE FOR TRANSPARENT
CONDUCTING OXIDE SHEET RESISTANCE MEASUREMENT**



Miss. NATNAPAR SILAKUP

Mr. SATAPORN PAMA

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

เอกสารนี้เป็น **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** ทรัพย์สินด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธีโพรบที่โพรบเพื่อ
ประยุกต์ใช้ในการวัดกระจกนำไฟฟ้า

FOUR-POINT PROBE MACHINE FOR TRANSPARENT

CONDUCTING OXIDE SHEET RESISTANCE MEASUREMENT

ชื่อนักศึกษา นางสาวนาฎนภา ศิลาคุปต์
นายศตพร ปะมา

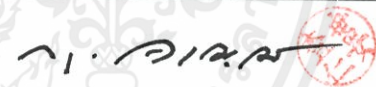

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พิชชานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.วิชาญ เดชดิธีระ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการ
พิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. กฤษกร ไส้เจริญรัตน์	
รศ. วิจิต สิริโชติ	
อ.ชนภรณ์ สิวาว์ฒานานนท์	
รศ.วิชาญ เดชดิธีระ	
ดร.พิชชานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธี โฟร์พอยท์โพรบเพื่อ
ประยุกต์ใช้ในการวัดกระจกนำไฟฟ้า

Four-point-probe machine for transparent conducting oxide sheet
resistance measurement

ชื่อนักศึกษา นางสาวนาฏนภา ศิลาคุปต์

นายศตพร ปะมา

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2556

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.พิชชานันท์ ชีเศรษฐ์โสภณ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.วิชาญ เตชะศิระ

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำความรู้ทางไมโครคอนโทรลเลอร์มาออกแบบและสร้างเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ ตลอดจนเรียนรู้หลักการสอบเทียบเครื่องมือและทดสอบเครื่องด้วยการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าชนิดทินุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$) โดยสร้างหัววัดใน 2 รูปแบบ คือ รูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว (Collinear pattern) และรูปแบบแวนเดอร์พาว (Van der Pauw pattern) ผลการสอบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (FLUKE 45) พบว่าค่ากระแสที่จ่ายจากเครื่องโฟร์พอยท์โพรบมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.0167% เมื่อนำมาวัด $F:SnO_2$ ในหลายช่วงกระแสพบว่าค่าที่ได้จากการหัววัดทั้ง 2 แบบ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถวมีช่วงกระแสที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ $F:SnO_2$ คือ 0.004A-0.008A และรูปแบบแวนเดอร์พาวมีช่วงกระแสที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ $F:SnO_2$ คือ 0.008A-0.010A โดยค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าจากบริษัทโซลาร์รอนิค

เอกสารนี้เป็นของ...
คำสำคัญ: ไมโครคอนโทรลเลอร์, โฟร์พอยท์โพรบ, การสอบเทียบเครื่องมือวัด, ความต้านทานเชิงแผ่น
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Four-point-probe machine for transparent conducting oxide sheet resistance measurement
Students	Miss. Natnapar Silakup Mr. Sataporn Pama
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Dr. Pichanan Teesetsopon
Co-Advisor	Assoc.Prof. Wicharn Techitdheera

ABSTRACT

This special project aimed at utilizing microcontroller knowledge for four-point-probe machine design and construction as well as studying instrumental calibration technique. Finally, the machine was used to measure sheet resistance of transparent conducting oxide film made by fluorine doped tin dioxide on glass substrate (F:SnO₂). Two different probe patterns were built (Collinear and Van der Pauw pattern). 0.0167% error of four-point probe current source was obtained as calibrated by standard meter (FLUKE 45). F:SnO₂ sheet resistance as measured by the Collinear and Van der Pauw pattern at various applied current showed the same trend. . The optimum applied current ranges were 0.004A-0.008A and 0.008A-0.010A for collinear pattern and Van der Pauw pattern, respectively. The measured F:SnO₂ sheet resistance values were consistent with the data provided by Solaronix company

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโทษทางลิขสิทธิ์และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords: Microcontroller, Four-point-probe, Calibration, Sheet resistance

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความกรุณาของหลายๆท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ดร.พิชชานันท์ ธีเศรษฐ์โสภณ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.วิชาญ เดชิตธีระ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนการทำงานและเสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหาทุกขั้นตอนให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.วิจิต สิริโชติ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งของโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วราวุฒิ เกตุศักดิ์ และ ดร.ศ.ทิพวรรณ กล้ายบุญมี ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการให้ยืมอุปกรณ์มาใช้ในการทดลอง เพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ทุกคน ที่มีส่วนช่วยให้โครงการพิเศษฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการอุปกรณ์ต่างๆที่นำมาใช้ในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัวทุกคน รวมไปถึงเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

นางสาวนาฏนภา ศีลาคุปต์

นายศตพร ปะมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
คำย่อและสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สารกึ่งตัวนำ	4
2.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-Type)	4
2.1.2 สารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type)	5
2.1.3 สารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor)	5
2.1.3.1 ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide thin film, TCO)	6
2.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์มด้วยเทคนิคโพรบ	6
2.2.1 ทูโพรบ (Two-probe)	6
2.2.2 โฟร์พอยท์โพรบ (Four-point probe)	7
2.2.2.1 สมการ โฟร์พอยท์โพรบ	7
2.2.2.2 ความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance)	9

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.2.3 เทคนิคโพร์พอยท์โพรบรูปแบบแวนเดอร์พาว (Van Der Pauw mode)	10
2.2.2.4 เทคนิคโพร์พอยท์โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว (Collinear four-point probe technique)	11
2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้า	12
2.3.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์	12
2.3.2 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)	15
2.3.2.1 วงจรเรกกูเลเตอร์โดยใช้ไอซี 3 ขา แบบแรงดันเอาต์พุตคงที่	16
2.3.2.2 วงจรเรกกูเลเตอร์พื้นฐาน โดยใช้ไอซีตระกูล MC78xx และ MC79xx	16
2.3.2.3 วงจรเรกกูเลเตอร์แบบปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้โดยใช้ไอซี 3 ขา	18
2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมอุปกรณ์การวัด	20
2.4.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์	20
2.4.2 ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51, AT89C52	20
2.4.3 คุณสมบัติของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์	21
2.4.4 หน้าที่แต่ละขาของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์	21
2.5 หลักการทำงานของ LCD Module	23
2.6 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล	26
2.7 Junction Field-Effect Transistor, JFET	27
2.7.1 การทำงานของ JFET n-channel	29
2.7.2 การทำงานของ JFET แบบ p-channel	30
2.8 ออปแอมป์ (OP-AMP)	31
2.8.1 คุณสมบัติของ OP-AMP ในอุดมคติ	31
2.8.2 วงจร Differential-Input Amplifier	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	33
3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน	33
3.2 การออกแบบโพร์พอยท์โพรบ	34
3.2.1 องค์ประกอบของเครื่องโพร์พอยท์โพรบ	34
3.2.2 การออกแบบแท่นวางหัววัด	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 วงจรที่ใช้ควบคุม	35
3.3.1 วงจรควบคุมมอเตอร์	36
3.3.2 วงจรควบคุมสวิทช์	37
3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า	38
3.4.1 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)	38
3.4.2 แหล่งจ่ายกระแส (Current Source)	39
3.5 การวัดกระแสและแรงดัน	40
3.5.1 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล	41
3.6 การแสดงผลหน้าจอ LCD	42
3.7 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม	43
3.8 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมและรับข้อมูลจากเครื่องโฟร์พอยท์ โพรบ	43
3.8.1 ขั้นตอนการอัปเดตโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	43
3.8.2 ขั้นตอนการวัดกระแสกนาไฟฟ้าชนิดเคลื่อนด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์ เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO ₂)	46
3.8.3 การแสดงข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์	47
3.9 ตารางการดำเนินงาน	48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	49
4.1 วงจรภายในเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ	49
4.1.1 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)	50
4.1.2 วงจรแหล่งจ่ายกระแส (Current Source)	52
4.1.3 วงจร Analog to Digital เพื่อใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์	53
4.1.4 วงจรควบคุมมอเตอร์	54
4.1.5 วงจรควบคุมสวิทช์ (Switch control circuit)	55
4.1.6 วงจรแสดงผล	56
4.1.7 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 ตารางบันทึกการวัดค่ากระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์, ความต้านทานโดยเครื่องโพรพอยท์โพรบ	58
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
2.1 การใช้งานขาของ LCD Module	23
2.2 คำสั่งการใช้งาน LCD Module	24
3.1 ตารางการดำเนินงาน	48
4.1 ตารางเปรียบเทียบการอ่านค่าความต่างศักย์เครื่องโพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER) โดยใช้แหล่งจ่ายค่าความต่างศักย์มาตรฐาน (PROGRAMMABLE POWER SUPPLY PSM-6003)	59
4.2 ตารางเปรียบเทียบค่ากระแสของเครื่องโพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER)	62
4.3 ผลการทดลองวัดกระแสจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO ₂) ด้วยเครื่องโพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว	64
4.4 ผลการทดลองวัดกระแสจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO ₂) ด้วยเครื่องโพรบรูปแบบแวนเดอร์พาว	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท N	5
2.2 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท P	5
2.3 เทคนิคการวัดแบบทูโพรบ	6
2.4 เทคนิคการวัดแบบโพร์พอยท์โพรบ	7
2.5 ค่าความต่างศักย์ของ 1 หัววัด	7
2.6 ค่าความต่างศักย์ของ 2 หัววัด	8
2.7 ค่าความต่างศักย์สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว	8
2.8 เทคนิคการวัดแบบโพร์พอยท์โพรบ	8
2.9 แผ่นฟิล์มบางที่มีฉนวนกัน	9
2.10 วิธีการหาความต้านทานเชิงแผ่น	10
2.11 ชั้นงานรูปร่างต่างๆ	10
2.12 การต่อขั้วไฟฟ้าชั้นงาน	11
2.13 การกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างสำหรับสารกึ่งตัวนำ	12
2.14 วงจรและแรงดันไฟสลับที่จุดต่างๆของเรียงกระแสแบบบริดจ์	13
2.15 ขณะจ่ายแรงดันไฟสลับไบอัสตรงให้ไดโอด D2, D4	13
2.16 ขณะจ่ายแรงดันไฟสลับไบอัสตรงให้ไดโอด D1, D3	14
2.17 วงจร RC- π ฟิลเตอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ วงจร C ฟิลเตอร์	14
2.18 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดัน	15
2.19 วงจรเรกกูเลเตอร์	16
2.20 วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้ MC78xx	17
2.21 วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้ MC79xx	17
2.22 วงจรแหล่งจ่ายไฟแบบ บวก ลบ และกราวนด์ โดยใช้ MC78xx และ MC79xx	18
2.23 วงจรเรกกูเลเตอร์ปรับค่าโดยใช้ไอซี LM317	19
2.24 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์	20
2.25 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์	21
2.26 LCD Module	23
2.27 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) และวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ในระบบการประมวลสัญญาณ	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) ในระบบการประมวลสัญญาณ	26
2.29 วงจร DAC แบบอะซิงโครนัส (asynchronous) และซิงโครนัส (synchronous)	27
2.30 โครงสร้างของวงจร DAC	27
2.31 โครงสร้าง JFET แบบ n-channel และ p-channel	28
2.32 สัญลักษณ์ทั่วไปของ JFET แบบ n-channel และ p-channel	28
2.33 การไหลของกระแส ID ผ่าน Channel โดยเปรียบเทียบการควบคุมการไหลของน้ำผ่านท่อ	28
2.34 การทำงานของ JFET n-channel	29
2.35 การทำงานของ JFET n-channel เมื่อ $I_G = 0$ และ $I_D = I_S$	29
2.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{DS} เมื่อ $V_{GS} = 0$	30
2.37 JFET แบบ p-channel	30
2.38 กราฟแสดงลักษณะของ JFET แบบ p-channel เมื่อ $I_{DSS} = 6 \text{ mA}$ และ $V_p = +6 \text{ V}$	31
2.39 กราฟแสดงลักษณะลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ JFET เป็นไปตามสมการชอคเลย์ (Shockley's Equation)	31
2.40 Op-Amp ในอุดมคติ	32
2.41 Differential-Input Amplifier	32
3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน	33
3.2 แผนภาพโครงสร้างการทำงานของเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ	34
3.3 แสดงการทำงานของหัววัดโพร์พอยท์โพรบ	35
3.4 วงจรที่ใช้ควบคุมเครื่องโพร์พอยท์โพรบ	36
3.5 วงจรการส่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ (ULN2002A)	36
3.6 วงจรควบคุมมอเตอร์เลื่อนขึ้นและลง	37
3.7 วงจรสวิตช์	37
3.8 แผนภาพส่วนประกอบแหล่งจ่ายไฟ	38
3.9 ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ภายในเครื่องโพร์พอยท์โพรบ	38
3.10 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)	39
3.11 วงจรแหล่งจ่ายกระแสโดยใช้ช้อปแอมป์	39
3.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสของเครื่องโพร์พอยท์โพรบที่สร้างขึ้น	40
3.13 กราฟแสดงการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.14	กราฟแสดงการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล	41
3.15	การวัดค่าผลต่างโดยใช้วงจร Differential-Input Amplifier	42
3.16	วงจรแสดงผล	42
3.17	วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม	43
3.18	การตั้งค่าการอัปเดตโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Flash Magic	44
3.19	การตั้งค่าการอัปเดตโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Flash Magic (ต่อ)	45
3.20	การตั้งค่าการอัปเดตโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Flash Magic (ต่อ)	46
3.21	แสดงวิธีการวัดกระแสจําหน่ายไฟฟ้ํา	46
3.22	การใช้โปรแกรม Putty แสดงข้อมูลการวัดบนคอมพิวเตอร์	47
3.23	ข้อมูลการวัดที่แสดงบนคอมพิวเตอร์	48
4.1	เครื่องโพร์พอยท์โพรบ	49
4.2	วงจรรักษาระดับแรงดันจําลองโดยโปรแกรม Proteus (วงจรที่ 1)	50
4.3	วงจรรักษาระดับแรงดัน (วงจรที่ 1)	50
4.4	วงจรรักษาระดับแรงดันจําลองโดยโปรแกรม Proteus (วงจรที่ 2)	51
4.5	วงจรรักษาระดับแรงดัน (วงจรที่ 2)	51
4.6	วงจรแหล่งจ่ายกระแสจําลองโดยโปรแกรม Proteus	52
4.7	วงจรแหล่งจ่ายกระแส	52
4.8	วงจรวัดความต่างศักย์ไฟฟ้ําจําลองโดยโปรแกรม Proteus	53
4.9	วงจร Analog to Digital เพื่อใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้ําและความต่างศักย์	53
4.10	วงจรควบคุมมอเตอร์จําลองโดยโปรแกรม Proteus	54
4.11	วงจรควบคุมมอเตอร์	54
4.12	วงจรควบคุมสวิทช์จําลองโดยโปรแกรม OrCAD	55
4.13	วงจรควบคุมสวิทช์	55
4.14	วงจรแสดงผลจําลองโดยโปรแกรม Proteus	56
4.15	วงจรแสดงผล	56
4.16	วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมจําลองโดยโปรแกรม Proteus	57
4.17	วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม	57
4.18	แสดงการสอบเทียบเครื่องมือวัด	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟเปรียบเทียบการอ่านค่าความต่างศักย์เครื่อง โฟร์พอยท์ โพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน โดยใช้แหล่งจ่ายค่าความต่างศักย์มาตรฐาน	61
4.20 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสของเครื่อง โฟร์พอยท์ โพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน	63
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้า ชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทิน ไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$) ด้วยเครื่อง โฟร์พอยท์ โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว	65
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้า ชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทิน ไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$) ด้วยเครื่อง โฟร์พอยท์ โพรบรูปแบบแวนเดอร์พาว	68
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้า ชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทิน ไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$) ด้วยเครื่อง โฟร์พอยท์ โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถวและแวนเดอร์พาว	69
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต้านทานเชิงแผ่นในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทิน ไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$) ด้วย เครื่อง โฟร์พอยท์ โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถวและแวนเดอร์พาว	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย	
V	volt	ความต่างศักย์
I	electric current	กระแสไฟฟ้า
R	resistance	ความต้านทาน
T	temperature	อุณหภูมิ
ρ	rho	โรห์
r	radius	รัศมี
π	pi	พาย
J	current density	ความหนาแน่นกระแส
W	width	กว้าง
L	long	ยาว
t	thick	หนา
C	capacitor	ตัวเก็บประจุ
D	diode	ไดโอด
A	ampere	แอมป์แปร์
Ω	ohm	โอห์ม
$^{\circ}\text{C}$	degree Celsius	องศาเซลเซียส
K	kelvin	เคลวิน
S	siemens	ซีเมนส์
cm	centimeter	เซนติเมตร
m	metre	เมตร
m^2	square metres	ตารางเมตร
mA	milliampere	มิลลิแอมป์แปร์
eV	electron volt / electronvolt	อิเล็กตรอน โวลต์
μ	micro	ไมโคร
μA	micro-ampere meter	ไมโครแอมป์แปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

bit	binary digit / binary unit	บิต
μF	microfarad	ไมโครฟารัด
mHz	millihertz	มิลลิเฮิร์ต
KHz	kilohertz	กิโลเฮิร์ต
MHz	megahertz	เมกะเฮิร์ต
DAC Converter	Digital to Analog Converter	ดิจิทัลเป็นอะนาลอก
ADC Converter	Analog to Digital Converter	อะนาลอกเป็นดิจิทัล
BCD	Binary Coded Decimal	รหัสไบนารี
LCD	Liquid Crystal Display	หน้าจอแสดงผล
Se	selenium	ธาตุซีลีเนียม
Si	silicon	ธาตุซิลิกอน
Ge	germanium	ธาตุเจอร์เมเนียม
Pb-Te	Lead- Telluride	ตะกั่วเทลลูไรด์
TiO ₂	Titanium Dioxide	ไทเทเนียมไดออกไซด์
SnO ₂	Tin Dioxide	ทินไดออกไซด์
ZnO	Zinc Oxide	ซิงค์ออกไซด์
Eg	band gap energy	พลังงานของช่องว่าง
TCO Oxide	Transparent Conducting Oxide	ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง
ITO	Indium Tin Oxide	อินเดียมทินออกไซด์
OCL	Output Capacitor Less	วงจรขยายขั้วโหลดแบบไม่ใช้หม้อแปลง
GND	ground	กราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์และการวัดสมบัติของสารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นมานั้นมีสมบัติถูกต้องตามความต้องการหรือไม่ ถึงแม้ว่าจะมีการคำนวณและการควบคุมเป็นอย่างดีในกระบวนการปลูกผลึกและการเติมสารเจือก็ตาม

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่น (Sheet Resistivity : R_{Sheet}) โดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) หรือ “เข็ม 4 จุด” เป็นเทคนิคที่ไม่ยุ่งยาก วัดได้ง่ายและสะดวกสามารถวัดบนแผ่นผลึกกระจกนำไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกได้โดยไม่ต้องตัดแยกออกมา จึงเป็นการวัดแบบไม่ทำลาย เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทำรอยสัมผัสโอห์มมิกจึงไม่สิ้นเปลืองเวลาและวัสดุอีกด้วย

โครงการพิเศษนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเกี่ยวกับการสร้างระบบการวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบแบบอัตโนมัติ เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการในงบประมาณที่ไม่มากจนเกินไป โดยประยุกต์จากการวัดมือเข้ากับวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยการเขียน โปรแกรมขึ้นมาควบคุมการทำงานให้สามารถใช้วัดและประมวลผลได้แม่นยำเหมาะสมสำหรับกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้กับการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO_2)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ
2. เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบแวนเดอร์พาวและสี่หัววัดแบบเรียงแถว
3. เพื่อประยุกต์ใช้กับการวัดค่าความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของ

ทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO_2) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานพื้นฐานของระบบการวัดของเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ
2. ออกแบบและสร้างเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโดยเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ
3. ทดลองวัดค่าความต้านทานของกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$)
4. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองของเครื่องวัดความต้านทานของสารกึ่งตัวนำโดยเทคนิคโพร์พอยท์โพรบที่สร้างขึ้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
พฤษภาคม – มิถุนายน พ.ศ. 2556	1. ศึกษาหลักการทำงานของเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ
กรกฎาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2556	2. ออกแบบเครื่องวัดให้เหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์กระจกนำไฟฟ้า 3. เขียนโปรแกรมและวางแผนการทดลอง 4. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
กันยายน – พฤษภาคม พ.ศ. 2556	5. สร้างเครื่องวัดความต้านทานแบบสี่หัววัดตามแบบที่ได้ 6. ทดลองใช้ระบบที่สร้างขึ้นมาว่าใช้งานได้ดีหรือไม่
ธันวาคม พ.ศ. 2556 – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557	7. สอบเทียบเครื่องมือที่สร้างด้วยตัวอย่างที่ทราบค่ามาตรฐาน 8. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลไปใช้

	9. วิเคราะห์และทำรายงานสรุปผลเพื่อทำการปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น
--	---

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ความเข้าใจในหลักการและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคโพร์พอยท์โพรบ
2. ความสามารถในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ต้องการศึกษา
3. ความสามารถในการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของกระจกนำไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ [1]

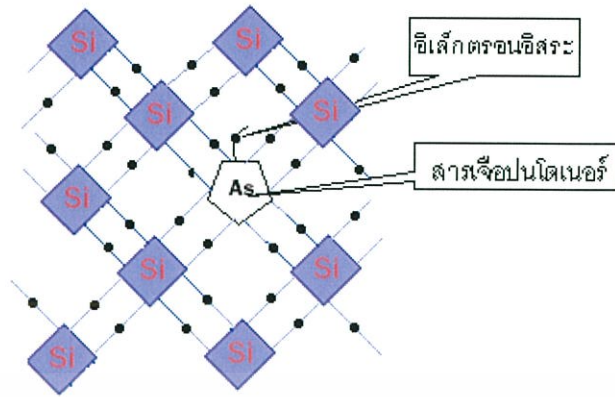
สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เป็นวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความเป็นตัวนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสิ่งไม่บริสุทธิ์ที่มีเจือปนอยู่ในวัสดุพวกนี้มักมีตัวประกอบของธาตุเจอร์เมเนียม (germanium : Ge), ซิลิคอน (silicon : Si), ซีลีเนียม (selenium : Se) เป็นต้น หรือเป็นสารประกอบก็มี เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs), ตะกั่วเทลลูไรด์ (Pb-Te), แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น วัสดุกึ่งตัวนำพวกนี้มีความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะตรงข้ามกับโลหะที่อุณหภูมิ (T) 0 K วัสดุกึ่งตัวนำนี้จะไม่ยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านเลย เพราะเนื้อวัสดุเป็นผลึกโควาเลนต์ ซึ่งอิเล็กตรอนทั้งหลายจะถูกตรึงอยู่ในพันธะโควาเลนต์หมด (พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม) แต่ในอุณหภูมิธรรมดาอิเล็กตรอนบางส่วนมีพลังงานจากความร้อนมากพอที่จะหลุดไปจากพันธะทำให้เกิดที่ว่างขึ้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นสาเหตุให้สารกึ่งตัวนำนำไฟฟ้าได้เมื่อมีสนามไฟฟ้ามาต่อเข้ากับสารนี้

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไปในสารกึ่งตัวนำแท้ เช่น ซิลิคอนหรือเจอร์เมเนียม เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-Type) และสารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type)

2.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (N-Type)

สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น ได้แก่ สารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารหนู ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระในก้อนผลึกนั้น จึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้เช่นเดียวกับตัวนำทั่วไป

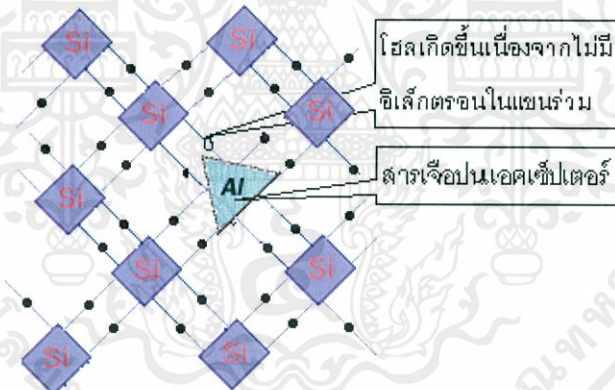
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท N

2.1.2 สารกึ่งตัวนำประเภทพี (P-Type)

ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทพี ได้แก่ สารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของอะลูมิเนียม ทำให้เกิดที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นในแขนร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮล ทำให้ดูคล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้



รูปที่ 2.2 ผลึกสารกึ่งตัวนำประเภท P [1]

2.1.3 สารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง (wide band gap semiconductor) และมักถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นรูพรุนสูง (high porous) ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ที่พบบ่อย ได้แก่ TiO_2 , ZnO_2 และ SnO_2 เป็นต้น [2]

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide thin film, TCO)

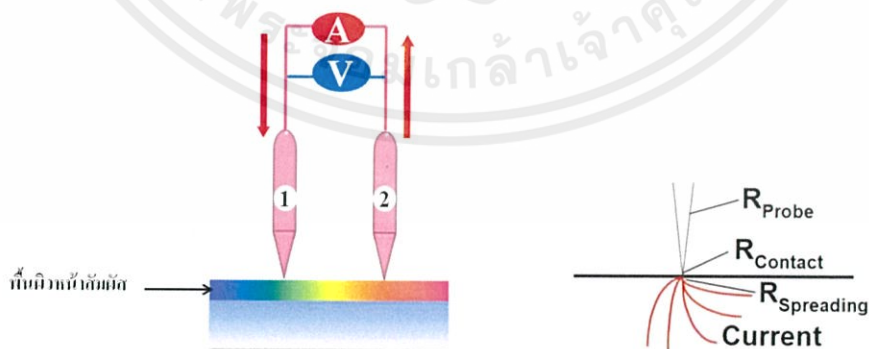
ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงเป็นฟิล์มบางที่นำไปใช้กันมากในอุปกรณ์ Optoelectronic device เช่น Flat display Solar cell และอื่นๆ ซึ่งฟิล์มชนิดนี้เป็นฟิล์มที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงที่ดีควบคู่กัน โดยฟิล์มต้องมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและแสงสามารถทะลุผ่านได้มาก ดังนั้นการเลือกสารตั้งต้นเพื่อนำมาเตรียมฟิล์มต้องพิจารณาคุณสมบัติทั้งสองข้อนี้เป็นสำคัญ โดยทั่วไปสารที่จะนำมาใช้ควรเป็นสารที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูงสภาพด้านทานต่ำและแสงสามารถทะลุผ่านได้ดี จึงมักทำจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงที่สำคัญในปัจจุบัน ได้แก่ ดีบุกออกไซด์เจือด้วยอินเดียม (Indium dope tin dioxide, ITO) ดีบุกออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine Dope Tin Dioxide, FTO) และซิงค์ออกไซด์เจือด้วย F หรือ Al (Fluorine dope zinc oxide, FZO or Aluminium dope zinc oxide, AlZO) [3]

2.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์ม

2.2.1 ทูโพรบ (Two-probe)

การวัดโดยเทคนิคทูโพรบจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก เนื่องจากปล่อยกระแส (I) และวัดความต่างศักย์ (V) ที่ขาเดียวกัน จึงทำให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าความต้านทานของขาของหัววัด (R_{Probe}) และค่าความต้านทานที่หน้าสัมผัส (R_{Contact}) รวมอยู่ด้วย โดยมีความต้านทานทุกตัวเป็น 2 เท่า เพราะมีหัววัด 2 หัว



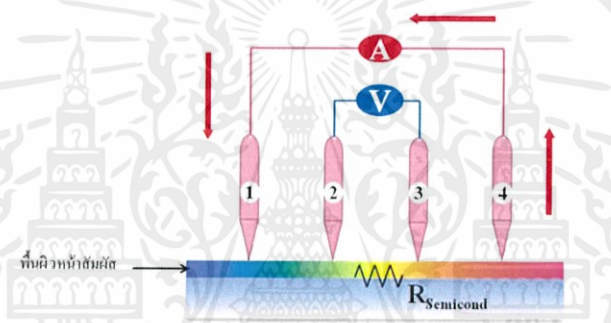
รูปที่ 2.3 เทคนิคการวัดแบบทูโพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า มีอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ $2R_{\text{Probe}} + 2R_{\text{Contact}} + 2R_{\text{Spreading}}$ มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $2R_{\text{Probe}}$ คือ ความต้านทานหัววัด
- $2R_{\text{Contact}}$ คือ ความต้านทานหน้าสัมผัส
- $2R_{\text{Spreading}}$ คือ ความต้านทานเมื่อกระแสทะลุผ่านสารตัวอย่าง แล้วเกิดการกระจายของกระแส

2.2.2 โฟร์พอยท์โพรบ (Four-point probe)

การวัดโดยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่าแบบทูโพรบ เนื่องจากหัววัดมี 4 หัว จะปล่อยกระแส (I) เข้าที่ขาคู่แรกและวัดความต่างศักย์ (V) ที่ขาคู่ใน เนื่องจากความต้านทานของโวลต์มิเตอร์สูงมากกระแสจึงไม่ไหลเข้าหัววัด ผลกระทบจากชนิดของวัสดุที่ทำหัววัดและความต้านทานที่หน้าสัมผัสต่อค่าที่วัดได้นั้นน้อย ค่าที่วัดออกมาจึงเป็นได้ค่า R_{Semicond} อย่างเดียว



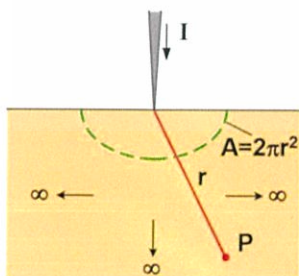
รูปที่ 2.4 เทคนิคการวัดแบบโฟร์พอยท์โพรบ

- R_{Semicond} คือ ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ (สารตัวอย่างที่นำมาวัด)

2.2.2.1 สมการโฟร์พอยท์โพรบ

สมมติว่า กระแสไหลออกมาจากปลายแนวรัศมีหัววัดน้อยมาก

1) ค่าความต่างศักย์ของ 1 หัววัด



$$V = IR \tag{2.1}$$

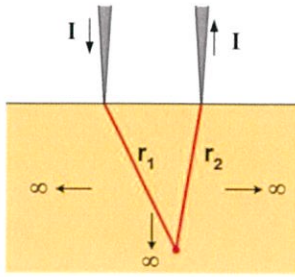
$$J\rho = -\frac{dV}{dr} \tag{2.2}$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{I}{2\pi r^2} \tag{2.3}$$

$$\int_0^V dV = -\frac{I\rho}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} \tag{2.4}$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในพิธีการครั้งเดียว ไม่อนุญาตให้นำไปประยชน์ใช้สอยด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

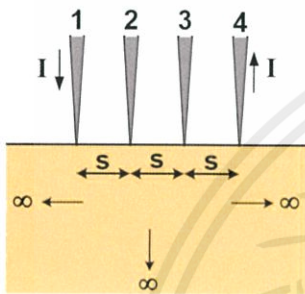


รูปที่ 2.6 ค่าความต่างศักย์ของ 2 หัววัด

2) ค่าความต่างศักย์ของ 2 หัววัด

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2} \quad (2.6)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.7 ค่าความต่างศักย์สำหรับ หัววัดแบบเรียงแถว

3) ค่าความต่างศักย์สำหรับหัววัดแบบเรียงแถว

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} \right) ; V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2s} - \frac{1}{s} \right) \quad (2.8)$$

$$V = V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} - \frac{1}{2s} + \frac{1}{s} \right) \quad (2.9)$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi s} \quad (2.10)$$

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} ; \Omega\text{-cm} \quad (2.11)$$

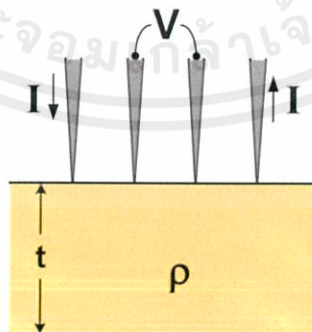
J คือ ความหนาแน่นกระแส

I คือ กระแสไฟฟ้า

ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า

4) ค่าความต้านทานที่คำนวณได้ตามสมการ (2.11) จะถูกต้องเมื่อตัวอย่างที่นำมาวัด

– ไม่มีขอบเขตสิ้นสุดและมีการนำไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจนถึงขอบล่าง



รูปที่ 2.8 เทคนิคการวัดแบบโพร์พอยท์โพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) สำหรับตัวอย่างที่ไม่สอดคล้องกับสมมติฐานในข้อ 4) และฐานของฟิล์มไม่นำไฟฟ้าจะต้องมีการแก้ไขการคำนวณให้ถูกต้องโดยอาศัย Correction factor ดังต่อไปนี้

$$\rho = 2\pi s F \frac{V}{I} : \Omega \cdot \text{cm} \quad (2.12)$$

$$F = F_1 F_2 F_3$$

- F_1 คือ แก้ไขความผิดพลาดจากความหนาของตัวอย่าง

$$F_1 = \frac{t/s}{2 \ln[\sinh(t/s) / \sinh(t/2s)]} \quad (2.13)$$

- F_2 คือ แก้ไขความผิดพลาดจากขนาดของตัวอย่าง ($F_2 \sim 1$ ถ้าสารตัวอย่างมีขนาด ~ 40 เท่าของระยะห่างระหว่างหัววัด)
- F_3 คือ แก้ไขความผิดพลาดจากระยะห่างระหว่างหัววัดถึงขอบของตัวอย่าง

- 6) Correction factor สำหรับฟิล์มบาง

พิจารณาฟิล์มบางบนฉนวน เช่น ยางของฟิล์มของโลหะบนฉนวน

- ฟิล์มบางของ Si บนฉนวน

$$F_1 = \frac{t/s}{2 \ln[\sinh(t/s) / \sinh(t/2s)]}$$

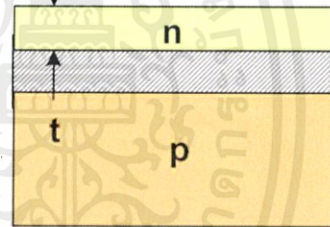
ปกติ $t \ll s$

ให้ $\sinh x \cong x$ สำหรับ $x \ll 1$

$$\therefore F_1 \approx \frac{t/s}{2 \ln(2)}$$

ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางบนฉนวน สามารถหาได้จาก

$$\rho = 2\pi s \frac{t/s}{2 \ln 2} \frac{V}{I} = \frac{\pi}{\ln 2} t \frac{V}{I} = 4.532 t \frac{V}{I} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.9 แผ่นฟิล์มบางที่มีฉนวนกั้น

2.2.2.2 ความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance)

ความต้านทานหาได้จาก

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho L}{t W} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohms: Ω) คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

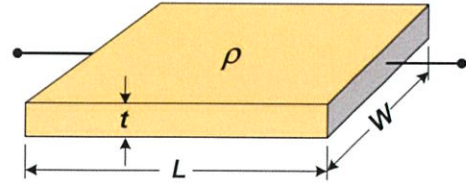
t คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

ρ คือ สภาพความต้านทาน

A คือ พื้นที่ตัดขวางของชั้นสารตัวอย่าง

L คือ ความยาวของชั้นสารตัวอย่าง

W คือ ความกว้างของชั้นสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.10 วิธีการหาความต้านทานเชิงแผ่น

ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงแผ่น

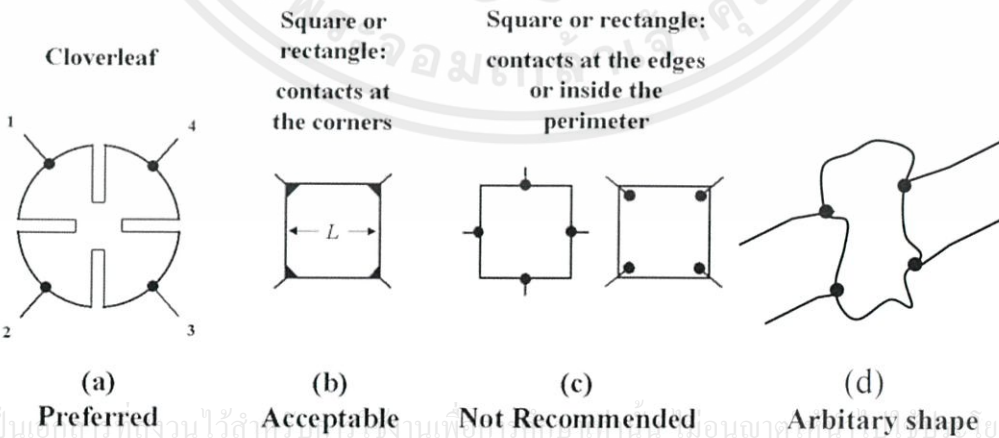
$$R_{\text{Sheet}} = \frac{\rho}{t} = \frac{R}{(L/W)} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (2.16)$$

มีหน่วยเป็น Ohms/sq. ($\Omega/\text{sq.}$) [4]

2.2.2.3 เทคนิค โฟร์พอยท์ โพรบรูปร่างแบบแวนเดอร์พาว (Van der Pauw mode)

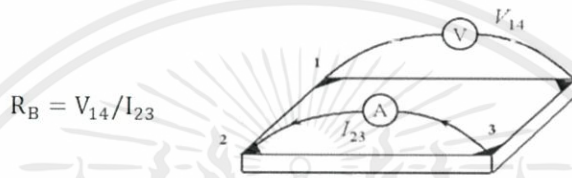
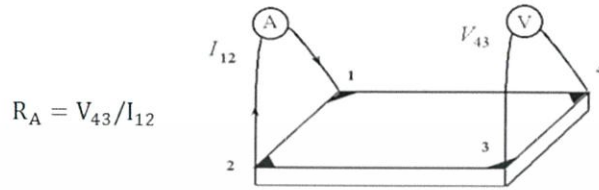
แวนเดอร์พาวได้เสนอวิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่มีรูปร่างใดๆ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 ได้เป็นผลสำเร็จในปี ค.ศ. 1958 โดยทำขั้วไฟฟ้าเล็กๆที่ขอบของวัสดุที่จุดการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าสามารถวัดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงรูปแบบของการไหลของกระแสไฟฟ้า ถ้าชิ้นงานมีลักษณะดังนี้

1. จะต้องต่อขั้วไฟฟ้าที่ขอบของชิ้นงาน
2. ขั้วไฟฟ้าจะต้องมีขนาดเล็ก
3. ชิ้นงานจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอ
4. ผิวของตัวอย่างต้องมีความต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก รูปที่ 2.11 ชิ้นงานรูปร่างต่างๆ [5] ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 2.12 นิยามให้ R_A คือความต้านทานไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชิ้นงานผ่านขั้ว 1 ไปขั้ว 2 และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าคร่อมจุด 3 และ 4 และ R_B คือความต้านทานไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านจุด 2 ไป 3 และวัดความต่างศักย์คร่อมจุด 1 และ 4



รูปที่ 2.12 การต่อขั้วไฟฟ้าชิ้นงาน

จากค่าความต้านทาน R_A, R_B สามารถคำนวณค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการของแวนเดอร์พาว

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} F \left(\frac{R_A + R_B}{2} \right) \tag{2.17}$$

โดยที่ $F=1$ สำหรับชิ้นงานที่มีครบสมมาตร

ดังนั้น $R_{\text{Sheet}} = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{R_A + R_B}{2} \right) \tag{2.18}$

หรือ $R_{\text{Sheet}} = \frac{\pi}{\ln 2} R_A = \frac{\pi}{\ln 2} R_B \tag{2.19}$

โดย ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้า

d คือ ความหนาของชิ้นงาน

2.2.2.4 เทคนิค โพรบอยท์โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว (Collinear four-point probe technique)

หลักการของเทคนิคสี่หัววัดแบบเรียงแถว แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปทั้งข้างนอกและโวลต์คร่อมสามารถวัดได้ระหว่างคู่ขาในโดยใช้โวลต์มิเตอร์ที่ความต้านทานภายในสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงได้ดังนี้

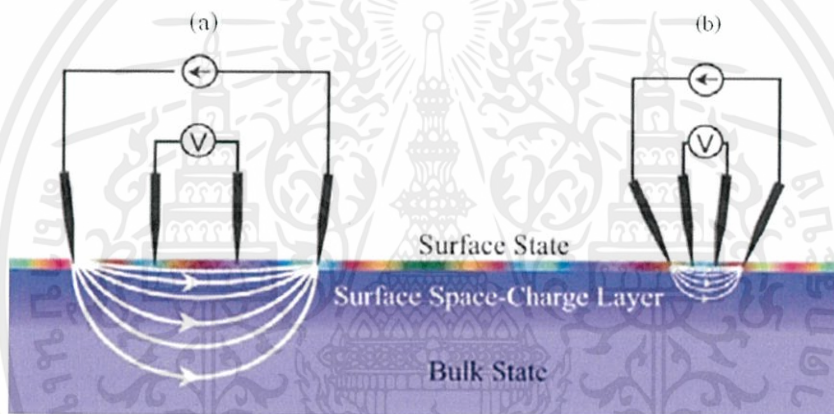
$$R_{\text{Sheet}} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (2.20)$$

V คือ โวลต์ตกคร่อมที่ผิวสารกึ่งตัวนำ

I คือ กระแสที่ไหลผ่าน

R_{Sheet} คือ ความต้านทานของเทคนิคสี่หัววัด

สำหรับการวัดที่ผลึกสารกึ่งตัวนำหรือแผ่นฟิล์มบาง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ 3 ส่วน คือ ที่ผิว (Surface state) ช่องว่างที่ผิวกับระนาบประจุ (Surface space – charge layer) และ เนื้อสาร (Bulk state) ดังรูปที่ 2.13 จากการศึกษาคพบว่าถ้าลดช่องว่างของโพรบจะสามารถลดการรั่วไหลของกระแสและเพิ่มความไวที่ผิวได้



รูปที่ 2.13 การกระจายกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวอย่างสำหรับสารกึ่งตัวนำ (a) วิธีการวัดรูปแบบสี่หัววัดขนาดใหญ่ (b) วิธีการวัดรูปแบบสี่หัววัดขนาดเล็ก [6]

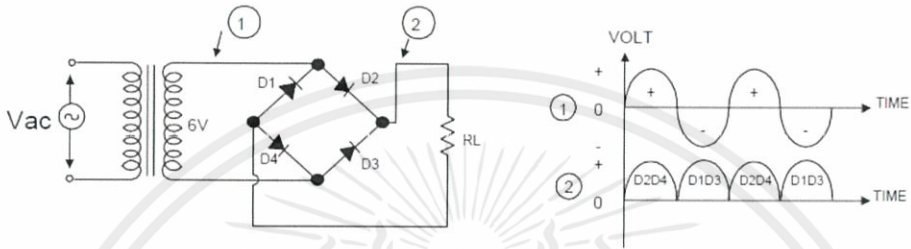
2.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

2.3.1 วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ คือ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นนั่นเองโดยที่แรงดันไฟสลับที่ถูกเรียงกระแสแล้วออกเอาท์พุททั้งช่วงบวก และช่วงลบของแรงดันไฟสลับเหมือนกันความแตกต่างระหว่างเรียงกระแสแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นต่างกันตรงการต่อวงจรเรียงกระแสแบบเอกสารที่เต็มคลื่นใช้ไดโอด 2 ตัว ทหรานฟอর্মเมอร์ที่จะนำมาใช้งานจะเป็นชนิด 3 ขั้ว ส่วนแบบบริดจ์ใช้จำนวนการคำนวณว่ากรไดโอด 4 ตัว ทหรานฟอর্মเมอร์ที่จะนำมาใช้งานจะเป็นชนิด 2 ขั้ว เข้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ คือ สามารถที่จะทำเป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 3 ขั้วไฟออกเอาท์พุทได้ คือ ขั้วบวก (+), ขั้วลบ (-), และขั้วกราวด์ (GND) นำไปใช้งานในการจ่ายไฟให้วงจรขยายเสียงแบบ OCL (Output Capacitor Less) วงจรออปแอมป์และวงจรอื่นๆที่ใช้ไฟชนิด 3 ขั้ว

การทำงานของบริดจ์เรียงกระแสแต่ละครึ่งสัญญาณของแรงดันไฟสลับไดโอดจะทำงานครั้งละ 2 ตัว สลับกันอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา วงจรและการทำงานอธิบายได้ดังนี้

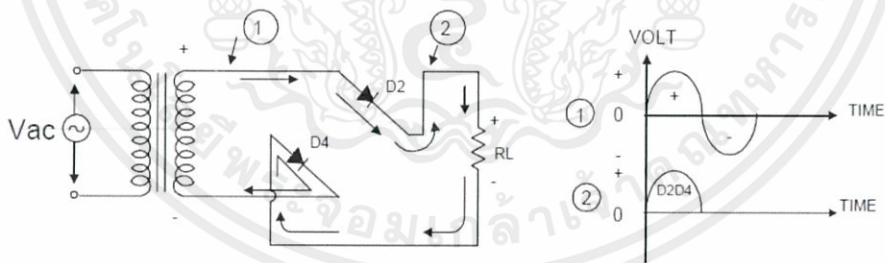


(ก) แรงดันไฟสลับช่วงบวกป้อนเข้ามา

(ข) ไดโอด D2, D4 นำกระแส

รูปที่ 2.14 วงจรและแรงดันไฟสลับที่จุดต่างๆของเรียงกระแสแบบบริดจ์

แสดงวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์และแรงดันไฟสลับที่จุดต่างๆของวงจรซึ่งจะได้แรงดันไฟสลับแต่ละจุดเหมือนกับเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทุกประการเพียงแต่ในจุดที่ 2 แรงดันไฟสลับช่วงบวกที่ได้ จะต้องผ่านไดโอดทำหน้าที่เรียงกระแสครั้งละ 2 ตัว D2, D4, ทำงานครั้งหนึ่ง และ D1, D3 ทำงานอีกครั้งหนึ่งสลับกันไปสามารถอธิบายการทำงานแต่ละครั้งได้ดังนี้



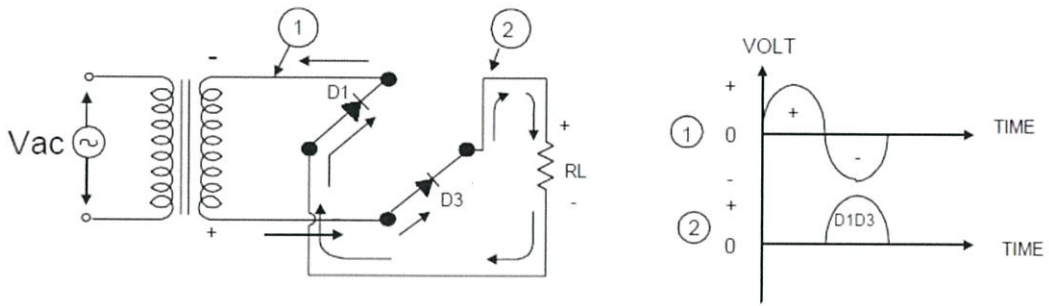
(ก) วงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์

(ข) แรงดันไฟสลับแต่ละจุด

รูปที่ 2.15 ขณะจ่ายแรงดันไฟสลับไปอัสตรงให้ไดโอด D2, D4

จากรูปที่ 2.15 เมื่อจ่ายแรงดันไฟสลับเข้ามาที่ขดทุติยภูมิด้านบนบวกด้านล่างลบจ่ายไปอัสให้ไดโอดทั้ง 4 ตัว ไดโอดตัวที่ได้รับไปอัสตรง คือ ไดโอด D2, D4 มีกระแสไหลจากขั้วบวก

ด้านบน ผ่านไดโอด D2 ผ่านโหลด RL ผ่านไดโอด D4 ครบวงจรที่ขั้วลบด้านล่าง มีศักย์ต่ำกว่าด้านกราวด์ ไม่ว่ากระแสไหล RL บนบวกด้านล่าง ได้แรงดันไฟสลับช่วงบวกออกเอาท์พุทของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

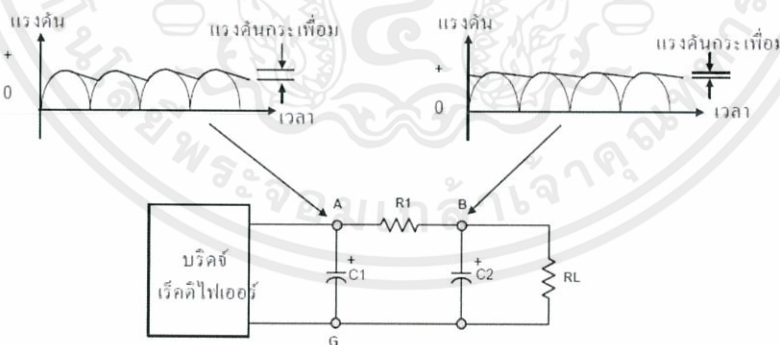


รูปที่ 2.16 ขณะจ่ายแรงดันไฟสลับไบอัสตรงให้ไดโอด D1, D3

จากรูปที่ 2.16 เมื่อจ่ายแรงดันไฟสลับเข้ามาที่ขดทุติยภูมิ ด้านบนลบ ด้านล่างบวก จ่ายเป็นไบอัสให้ไดโอดทั้ง 4 ตัว ไดโอดตัวที่ได้รับไบอัสตรง คือ ไดโอด D1, D3 มีกระแสไหลจากขดด้านล่าง ผ่านไดโอด D3 ผ่านโหลด RL ผ่านไดโอด D1 ครบวงจรที่ขั้วลบด้านบน มีสัปดาห์คร่อมโหลด RL บนขดด้านล่าง ได้แรงดันไฟสลับช่วงบวกออกเอาที่พุด

การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์จะทำงานทุกครั้งของแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามา ไดโอด D2, D4 และไดโอด D1, D3 จะทำงานสลับกันครึ่งละครึ่งสัญญาณ ไดโอด D2, D4 จะทำงานเมื่อจ่ายบวกเข้าด้านบน จ่ายลบเข้าด้านล่างขดทุติยภูมิ ไดโอด D1, D3 จะทำงานเมื่อจ่ายลบเข้าด้านบน จ่ายบวกเข้าด้านล่าง ได้แรงดันไฟฟ้าออกเอาที่พุดเป็นแรงดันไฟตรงกระแสเพื่อแบบเต็มคลื่น แสดงดังรูปที่ 2.14 (ข) ตำแหน่งที่ 2

การจะทำให้แรงดันไฟตรงกระแสเพื่อเสียบใกล้เคียงแรงดันไฟตรงจากแบตเตอรี่จะต้องใส่วงจรฟิลเตอร์เข้าไป วงจรฟิลเตอร์แบบหนึ่งที่นิยมใช้งานคือ RC- π ฟิลเตอร์



รูปที่ 2.17 วงจร RC- π ฟิลเตอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ วงจร C ฟิลเตอร์

ประกอบด้วย C₁ ตัวเดียวและวงจร RC ฟิลเตอร์ ประกอบด้วย R₁ และ C₂ ส่วน R₁ เป็นโหลดของวงจร การเพิ่ม RC ฟิลเตอร์เข้าไปเพื่อช่วยลดแรงดันไฟกระแสเพื่อลงเพิ่มแรงดันไฟตรงบริสุทธิ์มากขึ้นทำให้แรงดันที่ออกเอาที่พุด มีคุณสมบัติเหมือนกับแรงดันไฟตรงจากแบตเตอรี่หรือถ่านไฟฉาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่ง A, G จะผ่าน C ฟิลเตอร์เพียง C_1 ตัวเดียว ทำให้ช่วงแรงดันไฟกระเพื่อมยังมากอยู่ และช่วงแรงดันไฟตรงยังน้อย จะมีผลต่อรีเฟรช แฟกเตอร์มีค่าสูงทำให้คุณภาพของวงจรไม่ดี

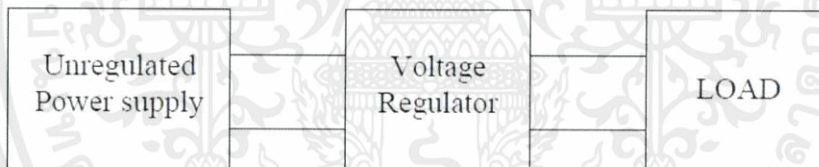
ที่ตำแหน่ง A, G จะผ่าน C ฟิลเตอร์เพียง C_1 ตัวเดียวทำให้ช่วงแรงดันไฟกระเพื่อมยังมากอยู่ และช่วงแรงดันไฟตรงยังน้อย จะมีผลต่อรีเฟรช แฟกเตอร์ มีค่าสูงทำให้คุณภาพของวงจรไม่ดี

ที่ตำแหน่ง B, G แรงดันไฟตรงกระเพื่อม จะผ่าน RC ฟิลเตอร์อีกชุดหนึ่ง มี R_1 ช่วงหน่วงเวลาการคายประจุของ C_1 ให้ช้าลงมี C_2 ช่วยเสริมแรงดันในการคายประจุช่วย C_1 ทำให้ค่าแรงดันไฟกระเพื่อมลดน้อยลงไปอีก เพิ่มส่วนของแรงดันไฟตรงมากขึ้นลดค่ารีเฟรช แฟกเตอร์ให้ต่ำลงส่งผลให้แรงดันไฟตรงที่ได้ใกล้เคียงแรงดันจากแบตเตอรี่มากขึ้น [7]

2.3.2 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)

วงจรรักษาระดับแรงดัน คือ วงจรที่ต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟตรงไม่คงค่า (Unregulated Power Supply) กับ โหลดมีหน้าที่จ่ายไฟตรงให้กับ โหลดและสามารถรักษาแรงดันให้คงตัวขณะที่

1. โหลดเปลี่ยน นั่นคือกระแสขาออกเปลี่ยนแปลง
2. แรงดันของแหล่งจ่ายไฟตรงไม่คงค่า เปลี่ยนแปลงทั้งนี้รวมถึงระลอกคลื่นด้วย (ripple)
3. อุณหภูมิของวงจรเปลี่ยนแปลง

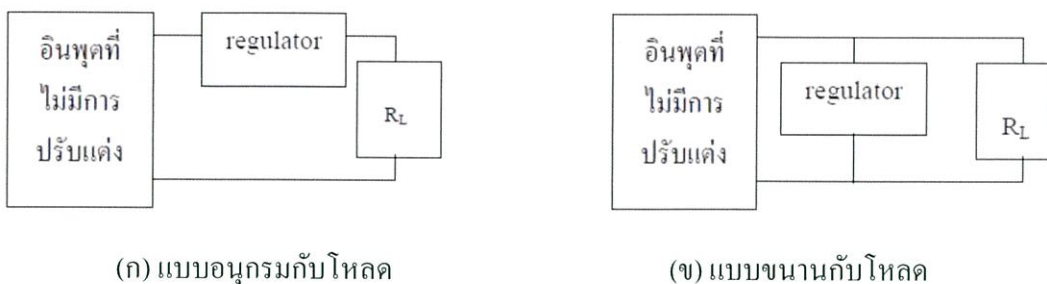


รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายไฟตรงคงค่าแรงดัน

จากบล็อกไดอะแกรมจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ออกมาจากเอาต์พุตของวงจรคงแรงดันคือ บล็อกแรกในรูปที่ 2.18 ซึ่งยังไม่เรียบร้อยเท่าที่ควรยังมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆในลักษณะคล้ายสัญญาณฟันเลื่อยเพราะว่าตัวเก็บประจุจะเก็บและคายประจุอยู่ตลอดเวลาถ้าจะนำวงจรนี้ไปใช้งานเลยก็ได้ แต่ต้องใช้กับงานที่ไม่ต้องการความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟมากนัก

แต่ถ้าเป็นงานที่ต้องการความละเอียดของแหล่งจ่ายไฟวงจรนี้จะใช้งานไม่ได้หนทางที่จะนำมาแก้ไขคือใช้วงจรเรกกูเลเตอร์ซึ่งจะทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณที่ไม่ราบเรียบอยู่นั้นให้เรียบจนเกือบเป็นไฟ DC 100% การสร้างวงจรเรกกูเลเตอร์จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การสร้างแบบอนุกรมกับ โหลดและแบบขนานกับ โหลดดังรูปที่ 2.19 โดยใช้ ซีเนอร์ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และไอซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงจรเรกกูเลเตอร์

2.3.2.1 วงจรเรกกูเลเตอร์โดยใช้ไอซี 3 ขา แบบแรงดันเอาต์พุตคงที่

ไอซี 3 ขาแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่ที่นิยมใช้กันมากคือตระกูล MC78xx และตระกูล MC79xx โดยตระกูล 78xx จะใช้แรงดันแบบบวกที่คงที่ส่วนตระกูล 79xx จะให้แรงดันแบบลบคงที่โดยที่ xx จะบอกขนาดแรงดัน ตัวอย่างเช่น MC7805 คือ ไอซีตระกูล MC78xx ที่ให้แรงดันแบบบวกคงที่ขนาด 5 V และ MC7912 คือไอซีตระกูล MC79xx ที่ให้แรงดันแบบลบคงที่ขนาด 12 V เป็นต้น

IC ตระกูล MC78xx และ MC79xx จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากจะแตกต่างกันเพียงการให้แรงดันคงที่บวกหรือลบเท่านั้นจะนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวเกี่ยวกับการออกแบบไอซี MC78xx เสียเป็นส่วนใหญ่ถ้าต้องการออกแบบไอซีตระกูล MC79xx ก็นำหลักการจากการออกแบบ MC78xx ไปใช้ได้เลย

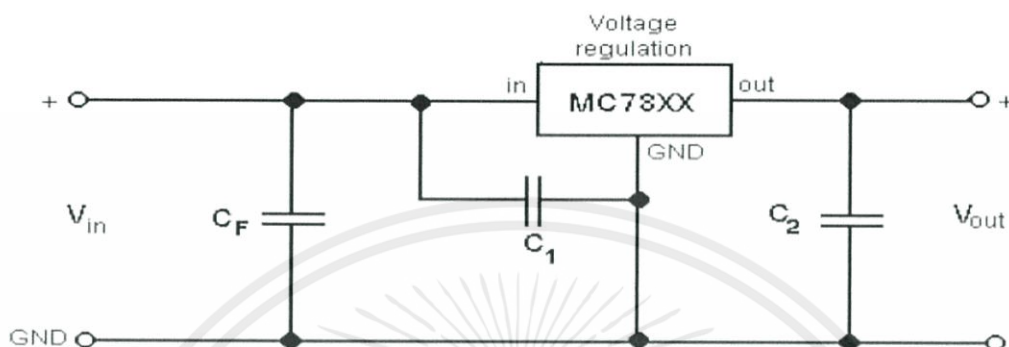
ไอซีของบริษัทเนชั่นแนลตระกูล LM140 – xx / LM340 – xx จะมีลักษณะคล้ายกับตระกูล MC78xx คือให้แรงดันแบบบวกที่คงที่เหมือนกันส่วนตระกูล LM120 – xx / LM320 – xx จะมีลักษณะคล้ายกับตระกูล MC79xx คือให้แรงดันแบบลบที่คงที่เหมือนกัน โดยที่ xx คือขนาดแรงดันเช่นเดียวกัน

2.3.2.2 วงจรเรกกูเลเตอร์พื้นฐานโดยใช้ไอซีตระกูล MC78xx และ MC79xx

ในรูปที่ 2.20 แสดงวงจรมাত্রฐานของแหล่งจ่ายไฟแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่โดยใช้ MC78xx เป็นวงจรเรกกูเลเตอร์จะเห็นได้ว่าขา in ของ MC78xx จะต่อกับไฟบวกส่วนขา GND จะต่อกับไฟลบ C_1 ใส่ไว้เพื่อลดความเหนี่ยวนำภายในไอซีซึ่งมักใช้ค่า 1 μF แบบแทนทาลัมหรือ 0.1 μF แบบเซรามิกส่วน C_2 มีไว้เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนซึ่งมักใช้ค่า 1 μF แบบแทนทาลัมหรือ 0.1 μF แบบเซรามิก

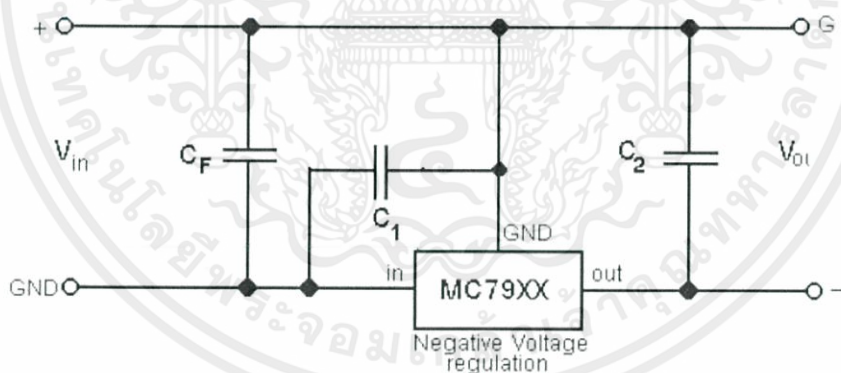
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกันแรงดันที่ขา in และขา out ของ MC78xx จะต้องมีค่าต่างกันพอสมควร โดยดูจากค่า $V_{in} - V_{out}$ ใน Data Sheet เช่น MC7805 ค่า $V_{in} - V_{out} = 2\text{ V}$ ฉะนั้นแรงดันที่ขา in ต้องป้อนมากกว่า 7 V ขึ้นไปแต่ต้องน้อยกว่าค่า $I_{in}(\text{max})\text{ V}$ ซึ่งจาก Data Sheet มีค่าเท่ากับ 35 V



รูปที่ 2.20 วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้ MC78xx

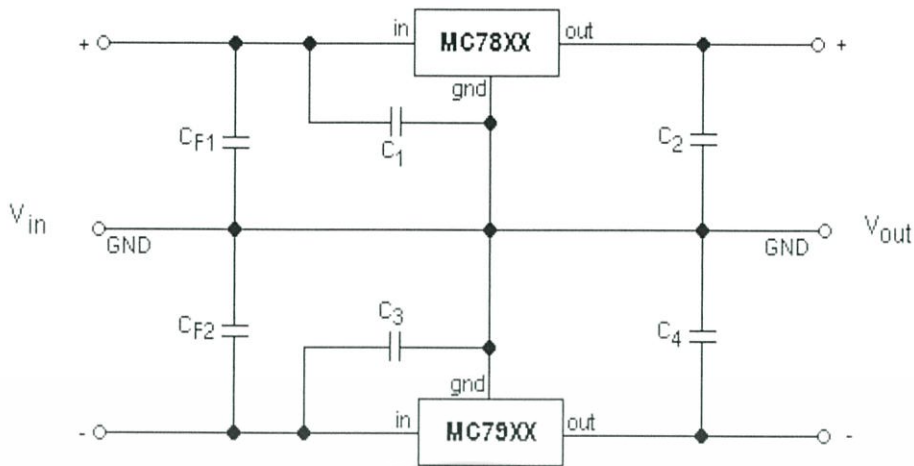
ในรูปที่ 2.21 แสดงวงจรมาตรฐานของวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่ โดยใช้ MC79xx เป็นวงจรเรกกูเลเตอร์ที่ขา in ของ MC79xx จะต่อกับไฟลบและขา out จะให้แรงดันลบ ค่า C_1 และ C_2 จะใช้เท่ากับวงจรในรูปที่ 2.20 ส่วนหลักการต่างๆก็เหมือนกับ MC78xx



รูปที่ 2.21 วงจรแหล่งจ่ายไฟโดยใช้ MC79xx

ในรูปที่ 2.22 แสดงวงจรมาตรฐานของวงจรแหล่งจ่ายไฟแบบแรงดันเอาต์พุตคงที่แบบบวก ลบ และกราวด์ (ขา Common) โดยใช้ไอซีตระกูล MC78xx และ 79xx ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับว่านำวงจรในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 มารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 วงจรแหล่งจ่ายไฟแบบ บวก ลบ และกราวด์ โดยใช้ MC78xx และ MC79xx

2.3.2.3 วงจรเรกกูเลเตอร์แบบปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้โดยใช้ไอซี 3 ขา

ไอซี 3 ขาที่ใช้ทำเป็นวงจรเรกกูเลเตอร์แบบปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้นิยมใช้เบอร์ LM317 ซึ่งผลิตโดยบริษัทเซินแนลซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถปรับแรงดันเอาต์พุตได้ตั้งแต่ 1.2 V ถึง 37 V เหมือนกับ LM723C และสามารถจ่ายกระแสได้ 1.5 A ซึ่งมากกว่า LM723C มากดังนั้นจึงนิยมใช้ LM317 มากกว่า LM723C

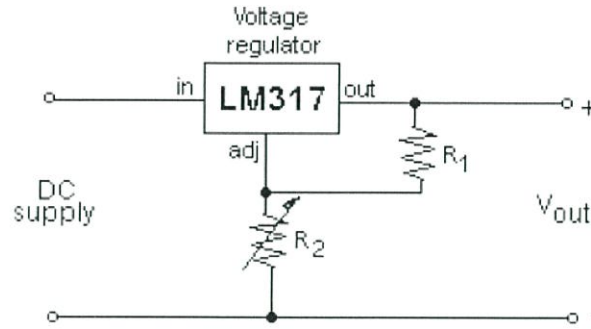
1) วงจรเรกกูเลเตอร์ปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้พื้นฐานโดยใช้ LM317

รูปที่ 2.22 เป็นวงจรเรกกูเลเตอร์ปรับค่าแรงดันเอาต์พุตได้โดยใช้ LM317 ในรูปที่ 2.23 (ก) แสดงวงจรอย่างง่ายซึ่งนิยมใช้กันมากที่สุดในรูปที่ 2.23 (ข) การที่ใส่ C_3 ก็จุดประสงค์เดียวกับ C_1 และ C_2 ที่ใช้ใน MC78xx ซึ่งจะใช้ค่าเท่ากับส่วน C_3 มีไว้เพื่อกำจัดริบเบิลมีค่าใช้ค่า 10 μF แบบแทนทาลัมในรูปที่ 2.23 (ค) จะมีไดโอดเพิ่มเข้าไปเพื่อป้องกันกระแสและแรงดันสูงขณะใช้งาน โดย D_1 จะป้องกันการคายประจุของ C_1 และ D_2 จะป้องกันการคายประจุของ C_3 การออกแบบค่าต่างๆ ทำได้ดังนี้

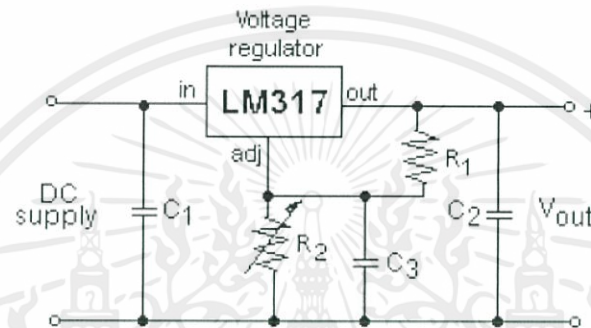
$$V_{\text{out}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{\text{ref}} + I_{\text{adj}} R_2 \quad (2.21)$$

จาก Data Sheet จะใช้ $V_{\text{ref}} = 1.25 \text{ V}$ และ $I_{\text{adj}} = 50 \mu\text{A}$

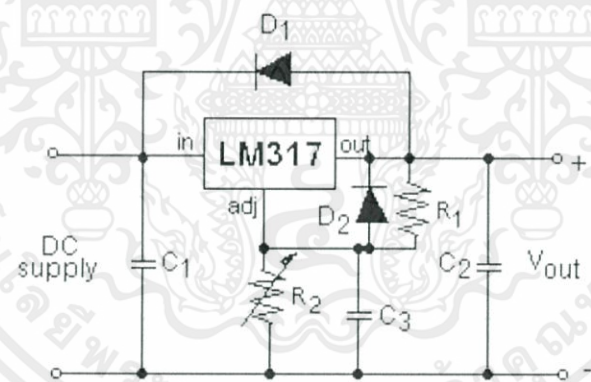
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) วงจรแบบง่าย



(ข) วงจรแบบจำกัดสัญญาณรบกวน โดยการใส่ C



(ค) วงจรแบบมีไดโอดป้องกันกระแสและแรงดันเกิน

รูปที่ 2.23 วงจรเรกกูเลเตอร์ปรับค่าโดยใช้ไอซี LM317

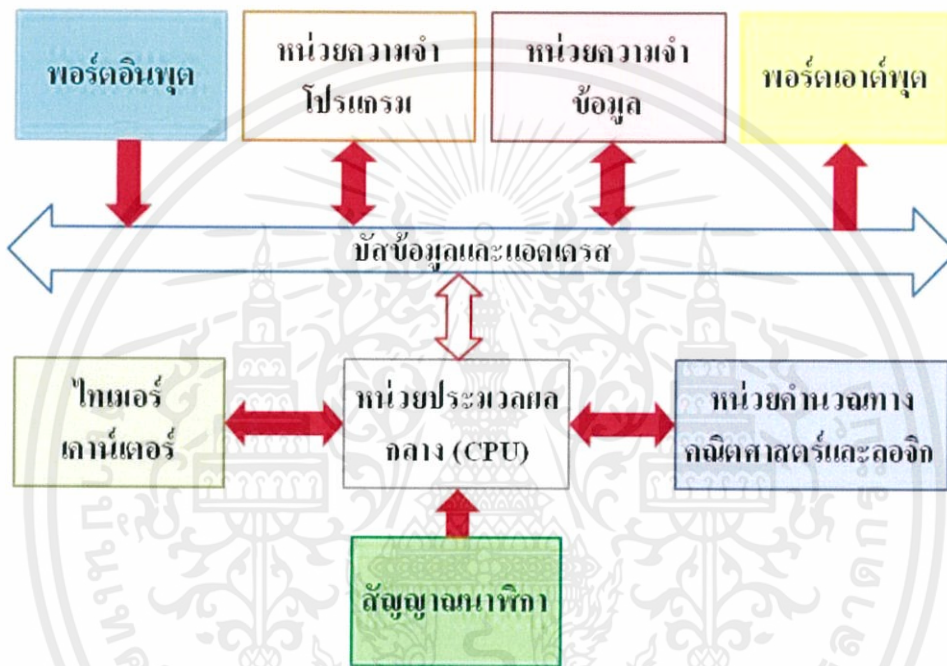
$$R_1 = \frac{V_{ref}}{I_{L(min)}} \quad (2.22) [8]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า . ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมอุปกรณ์การวัด

2.4.1 ความหมายของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือ การรวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก วงจรรับสัญญาณอินพุต วงจรขับสัญญาณเอาต์พุต วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกันทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรรีเลย์ทรานซิสต์ที่ซับซ้อนได้ช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบ



รูปที่ 2.24 โครงสร้างพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง, หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก, ไทม์เมอร์/คาน์เตอร์, บัสข้อมูลและแอดเดรสสำหรับติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก, วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา, หน่วยความจำโปรแกรม, หน่วยความจำข้อมูลและพอร์ตอินพุตเอาต์พุตไว้ภายใน

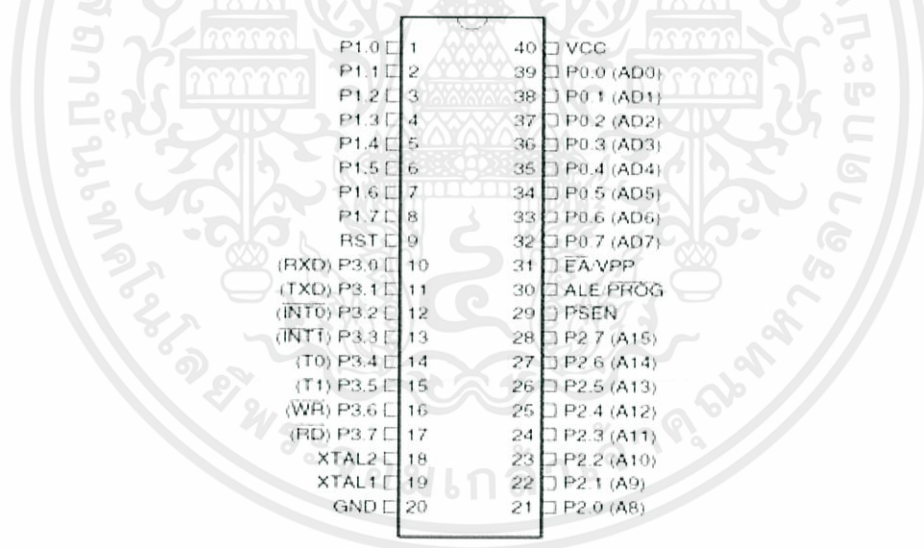
2.4.2 ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C51, AT89C52

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ที่ใช้ในการศึกษาเล่มนี้ซึ่งมีหน่วยความจำภายในเอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นแบบแฟลช (flash memory) ของ Atmel Corporation มีเบอร์ขึ้นต้นด้วย AT89 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆทั้งสงวน อักทงห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 คุณสมบัติของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์

- หน่วยความจำโปรแกรมชนิด Flash Memory ขนาด 4Kbytes, 8Kbytes ซึ่งทนต่อการเขียน/ลบได้ 1000 ครั้ง และคงค่าข้อมูลที่เขียนได้นาน 10 ปี
- หน่วยความจำแบบแรม 8 bit ขนาด 128 byte , 256 byte
- มีอินพุตเอาต์พุตพอร์ต ขนาด 32 bit
- ทำงานที่ความเร็วสัญญาณนาฬิกาได้สูงสุดถึง 24 MHz
- พอร์ตสามารถ SINK กระแสได้ 20 mA
- มีสัญญาณการอินเตอร์รัพท์ได้ 5 แหล่ง , 8 แหล่ง
- มีพอร์ตสื่อสารแบบอนุกรมรับ - ส่งข้อมูลที่สามารถโปรแกรมได้
- มีวงจรตั้งเวลาและวงจรมับขนาด 16 บิต 2 ช่อง
- สามารถ โปรแกรมข้อมูลเพื่อป้องกันการอ่านเขียนหรือคัดลอกโปรแกรมได้ 3 ระดับ

2.4.4 หน้าที่แต่ละขาของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2.25 การจัดขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์

- V_{CC} เป็นขาที่ใช้สำหรับต่อไฟเพื่อเลี้ยงไอซี +5V DC
- GND เป็นขากราวด์สำหรับต่อกับกราวด์ของระบบ
- พอร์ต 1 (P1.0-P1.7), พอร์ต 2 (P2.0 – P2.7 0) มีจำนวน 8 ขา แต่ละขาเรียกได้เป็น 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับ สามารถที่จะกำหนดให้เป็นได้ทั้งพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุตสำหรับใช้งานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั่วไป ถ้าต้องการให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุตก็สามารถทำได้โดยการเขียนข้อมูล ลอจิก "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการติดต่อ

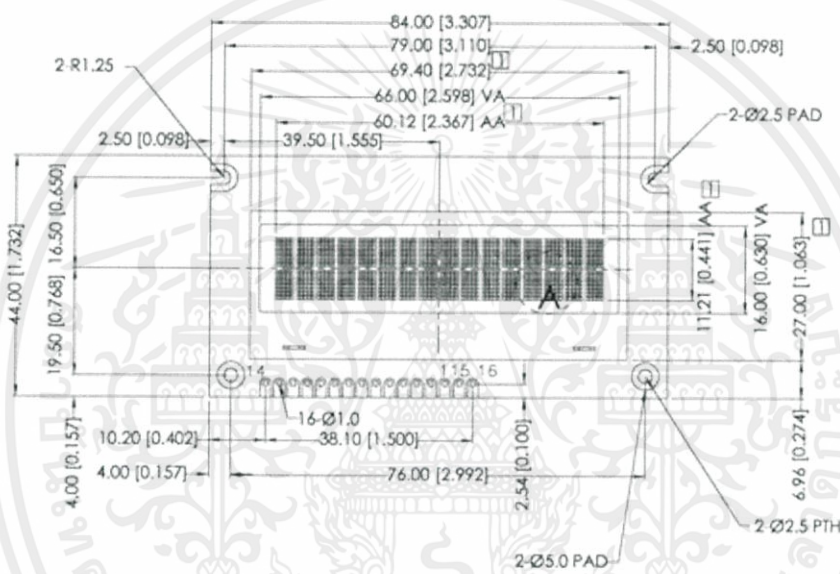
- พอร์ต 3 (P3.0-P3.7) มีจำนวน 7 ขา แต่ละขาเรียกได้เป็น 1 บิต แต่ในส่วนของวงจรภายในไอซีจะมีขาของ พอร์ต 3 อยู่ทั้งหมด 8 ขา เพียงแต่ขา P3.6 จะไม่ได้ต่อออกมาใช้งานภายนอกของตัวไอซี แต่ใช้เป็นขาจับสถานะของผลการเปรียบเทียบสัญญาณ Analog Comparator Input ระหว่างพอร์ต P1.0 และ P1.1 จากภายนอกดังนั้นขาทั้ง 7 ขาที่ต่อใช้งานภายนอกของไอซีสามารถที่จะกำหนดให้เป็นได้ทั้งพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุตสำหรับใช้งานทั่วไปถ้าหากต้องการกำหนดให้ขาพอร์ตใดเป็นอินพุตสามารถที่จะทำได้โดยการเขียนข้อมูลให้เป็น ลอจิก "1" ไปยังแต่ละบิตของพอร์ตที่ต้องการจะติดต่อด้วย นอกจากนั้นขาของ พอร์ต 3 จะยังเป็นขาที่มีหน้าที่การใช้งานพิเศษ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
- P3.0 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา RxD
- P3.1 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับส่งข้อมูลจากการสื่อสารแบบอนุกรมหรือขา TxD
- P3.2 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเทอร์รัพท์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา INT0
- P3.3 ใช้เป็นขาอินพุตรับสัญญาณอินเทอร์รัพท์จากภายนอกช่อง 1 หรือขา INT1
- P3.4 ใช้เป็นขาอินพุตสำหรับรับสัญญาณไทมเมอร์จากภายนอกช่อง 0 หรือขา T0
- ขา รีเซ็ต (Reset) ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในการป้อนสัญญาณเพื่อรีเซ็ตสถานะที่ขานี้ต้องอยู่ในระดับรีเซ็ตอย่างน้อย 2 แมกซีนไซเคิลโดยที่วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกายังคงทำงานต่อเนื่อง
- ขา ALE/PROG (Address Latch Enable/Program pulse input) เป็นขาที่ใช้ในการควบคุมการแลตช์ของขาพอร์ต 0 เมื่อมีการใช้งานหน่วยความจำภายนอก นอกจากนั้นขานี้ยังใช้เป็นขาสำหรับรับพัลส์ของโปรแกรมสำหรับข้อมูลลงไมโครคอนโทรลเลอร์
- ขา PSEN (Program Store Enable) ขานี้ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อขอติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องส่งสัญญาณออกมาที่นี้ 2 ครั้งในแต่ละแมกซีนไซเคิล
- ขา EA/Vpp (External Access enable/Programming voltage input) ใช้สำหรับเลือกติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมจากภายนอกหรือภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ถ้าขาเป็น 0 ติดต่อกับหน่วยความจำภายนอก ถ้าขาเป็น 1 ติดต่อกับหน่วยความจำภายใน นอกจากนี้ยังใช้เป็นขาอินพุตสำหรับแรงดันไฟสูง XTAL1 และ XTAL2 เป็นขาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีโหลดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับต่อคริสตอลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

- ขา XTAL1/XTAL2 เป็นขาสำหรับต่อคริสตอลเพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาในการกำหนดจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ [9]

2.5 หลักการทำงานของ LCD Module

เป็นชนิดตัวอักษร (Alphanumeric LCD) ที่ใช้ Hitachi HD44780 เป็น controller



รูปที่ 2.26 LCD Module

ตารางที่ 2.1 การใช้งานขาของ LCD Module

Pin No.	Symbol	Description	Level	Function	
1	VSS	Ground	-	0 V	Ground
2	VDD	Power supply	-	+5 V	ต่อกับไฟเลี้ยงแรงดัน +5 V
3	VO	LCD Contron	-	-	ต่อกับไฟที่สามารถปรับค่าได้ ปรับความเข้มของหน้าจอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	RS	Register Select	H/L	RS = 0 เป็นการติดต่อกับ Instruction Register = 1 เป็นการติดต่อกับ Data Register
5	R/W	Read/Write	H/L	R/W=0 หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยัง LCD Module = 1 หมายถึงต้องการอ่านข้อมูลจาก LCD Module
6	E	Enable	H, H->L	Enable Signal
7-14	DB0-DB7	Data Bus	H/L	Data Bue Line
15	A	Back Light A	-	ไฟแสงสว่างส่องแสงหน้าจอ +5 V รุ่นที่มี Back Light
16	K	Back Light K	-	ไฟแสงสว่างส่องแสงหน้าจอ 0 V รุ่นที่มี Back Light

ตารางที่ 2.2 คำสั่งการใช้งาน LCD Module

INSTRUCTION	RS	R/W	DATA BIT								
			7	6	5	4	3	2	1	0	
CLEAR DISPLAY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
CURSOR AT HOME	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	*
ENTRY MODE SET	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	
DISPLAY ON/OFF	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	
DISPLAY SHIFT	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	*	*	
FUNCTION SET	0	0	0	0	1	DL	N	F	*	*	

1) CLEAR DISPLAY การ Clear Display โดยจะทำการเขียนตัวอักษร Space ลงไปใน

DDRAM ทั้งหมดและกำหนดค่า DDRAM Address ให้เป็น 0 พร้อมทั้ง Cursor จะกลับ

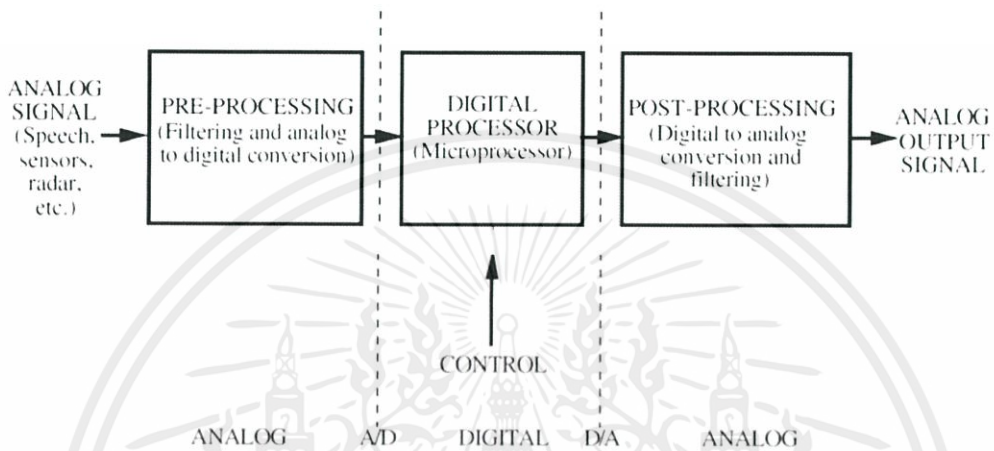
ตำแหน่งซ้ายบนสุดของจอภาพ

- 2) CURSOR AT HOME สำหรับกำหนดค่า DDRAM Address ให้เป็น 0 พร้อมทั้ง Cursor จะไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายบนสุดของจอภาพโดยที่ข้อมูลใน DDRAM ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
- 3) ENTRY MODE SET การกำหนดค่า I/D และ S นี้ให้กำหนดก่อนการเขียนข้อมูลใน DDRAM และเมื่อกำหนดแล้วจะต้องไม่ใช่คำสั่ง Clear Display อีก
 - a. I/D = 0 กำหนดทิศทางของ Cursor และ DDRAM ให้เป็นแบบ Decrement
 - b. I/D = 1 กำหนดทิศทางของ Cursor และ DDRAM ให้เป็นแบบ Increment
 - c. S = 0 เมื่อเขียนข้อมูลแล้วตัว Cursor จะถูกเลื่อนไปตามทิศทางของค่า I/D
 - d. S = 1 เมื่อเขียนข้อมูลแล้วตัว Cursor จะอยู่กับที่และตัวอักษรจะถูกดันไปตามทิศทางของค่า I/D
- 4) DISPLAY ON/OFF เมื่อค่าของ D, C และ B มีการเปลี่ยนแปลง จะทำให้เกิดสถานะดังนี้
 - a. D = 0 กำหนดให้ Off Display
 - b. D = 1 กำหนดให้ On Display
 - c. C = 0 กำหนดให้ Off Cursor
 - d. C = 1 กำหนดให้ On Cursor โดย Cursor จะเป็นเส้นขีดได้ตัวอักษร
 - e. B = 0 กำหนดให้ไม่มีการกระพริบที่ตำแหน่ง Cursor
 - f. B = 1 กำหนดให้มีการกระพริบที่ตำแหน่ง Cursor (กระพริบเป็นรูป□)
- 5) DISPLAY SHIFT ค่าของ S/C และ R/L ทำให้เกิดสถานะดังนี้
 - a. S/C = 0 กำหนดให้เลื่อน Cursor ตามทิศทาง R/L ไป 1 ตำแหน่ง
 - b. S/C = 1 กำหนดให้เลื่อนข้อความบนแผงแสดงตามทิศทาง R/L ไป 1 Column
 - c. R/L = 0 กำหนดให้มีทิศทางไปทางซ้าย
 - d. R/L = 1 กำหนดให้มีทิศทางไปทางขวา
- 6) FUNCTION SET ค่าของ DL, N และ F ทำให้เกิดสถานะดังนี้
 - a. DL = 0 กำหนดให้การติดต่อกับ LCD Module เป็นแบบ 4 bit
 - b. DL = 1 กำหนดให้การติดต่อกับ LCD Module เป็นแบบ 8 bit จะสังเกตว่าการกำหนดค่า D/L นี้สามารถกระทำได้ที่ DB4-DB7 ซึ่งถ้ามีการกำหนดให้เป็นแบบ 4 bit ตั้งแต่ครั้งแรกหลังจากจ่ายไฟเลี้ยงก็จะทำให้ LCD Module มีการรับข้อมูลแบบ 4 bit ทันที
 - c. N = 0 กำหนดจำนวนบรรทัดแบบ 1/8 Duty และ 1/11Duty
 - d. N = 1 กำหนดจำนวนบรรทัดแบบ 1/16 Duty
 - e. F = 0 กำหนดให้ตัวอักษรเป็นแบบ 5*7 Dots
 - f. F = 1 กำหนดให้ตัวอักษรเป็นแบบ 5*10 Dots (กรณีที่ LDC Module เป็นแบบ 5*7 อยู่แล้วก็จะไม่มีผลอะไร) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำเนื้อหาไปลงบนสื่ออื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

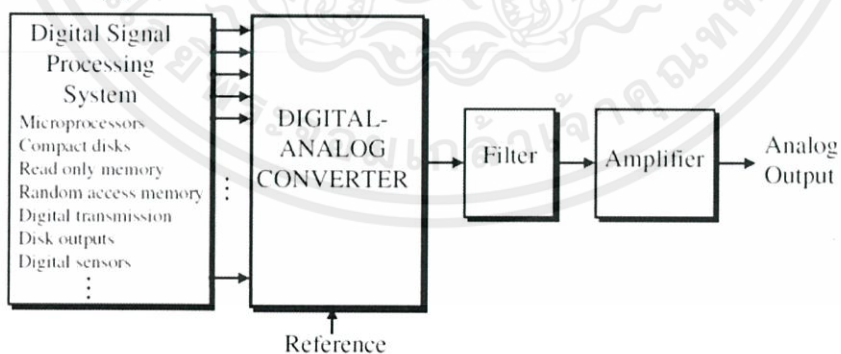
2.6 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ทำหน้าที่ที่เชื่อมต่อระหว่างสัญญาณแอนะล็อกที่มาจากภายนอกกับการประมวลสัญญาณดิจิทัล (รูปที่ 2.27)



รูปที่ 2.27 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) และวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) ในระบบการประมวลสัญญาณ

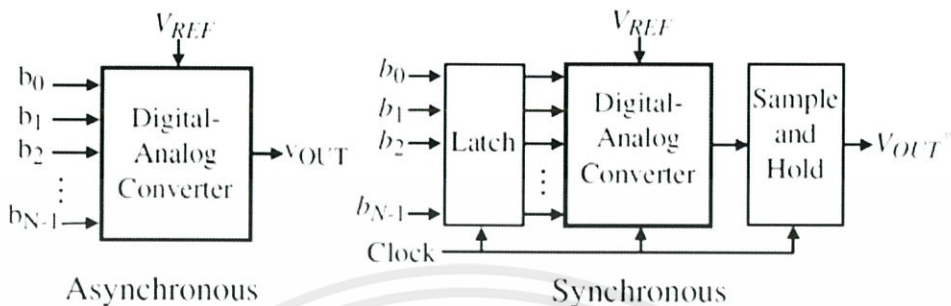
- รูปที่ 2.28 วงจร DAC แปลงสัญญาณดิจิทัลจากระบบการประมวลสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก



รูปที่ 2.28 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC) ในระบบการประมวลสัญญาณ

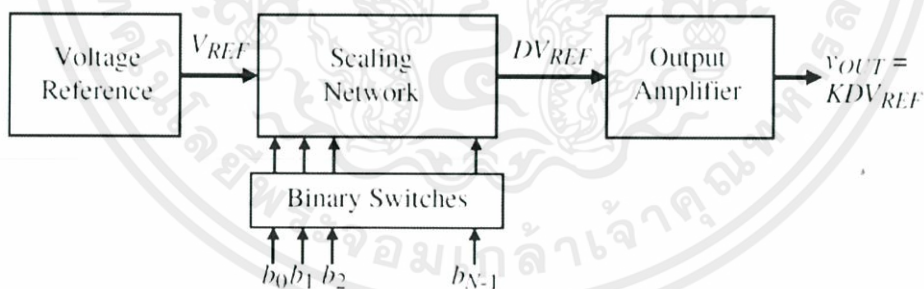
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รูปที่ 2.29 วงจร DAC ที่ไม่มีสัญญาณนาฬิกาควบคุมการทำงาน เรียกว่า วงจร DAC แบบอะซิงโครนัส (asynchronous) และวงจร DAC ที่มีสัญญาณนาฬิกาควบคุมการทำงาน เรียกว่าวงจร DAC แบบซิงโครนัส (synchronous)



รูปที่ 2.29 วงจร DAC แบบอะซิงโครนัส (asynchronous) และซิงโครนัส (synchronous)

- รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างของวงจร DAC โดยประกอบด้วย วงจรกำเนิดแรงดันอ้างอิง (voltage reference) โครงข่ายตั้งมาตราส่วน (scaling network) วงจรสวิตช์ฐานสอง (binary switches) วงจรกรอง และวงจรขยาย
 - $b_0 - b_{N-1}$ คือ สัญญาณดิจิทัล N บิต โดย b_0 คือบิตที่มีนัยสำคัญน้อยที่สุด (least significant bit: LSB) และ b_{N-1} คือ บิตที่มีนัยสำคัญมากที่สุด (most significant bit: MSB)

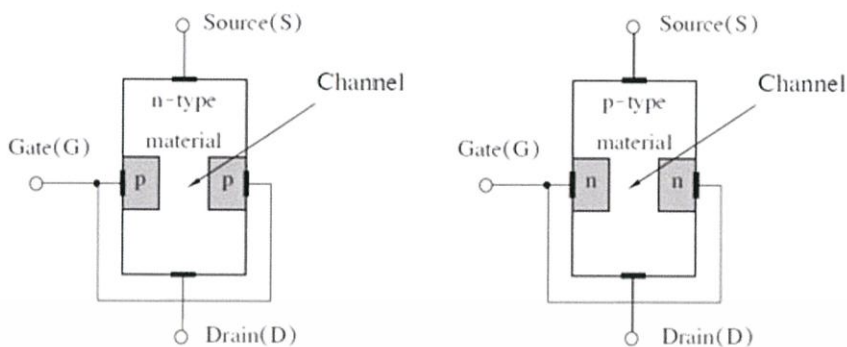


รูปที่ 2.30 โครงสร้างของวงจร DAC [11]

2.7 Junction Field-Effect Transistor, JFET

JFET จะมีแชนแนล (Channel) หรือช่องทางเดินพาหะเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปได้ ความกว้างของ Channel ถูกควบคุมได้โดยแรงดันอินพุต (V_{GS}) ทำให้สามารถควบคุมปริมาณการไหลของกระแสที่ผ่านแชนแนลได้

1) โครงสร้าง JFET

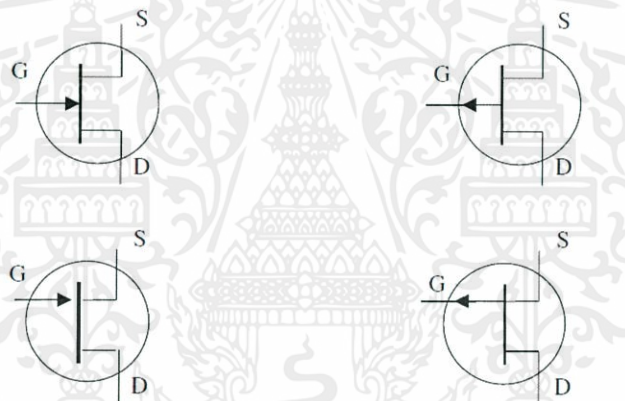


a) n-channel JFET

b) p-channel JFET

รูปที่ 2.31 โครงสร้าง JFET แบบ n-channel และ p-channel

2) สัญลักษณ์ของ JFET ที่พบได้โดยทั่วไป

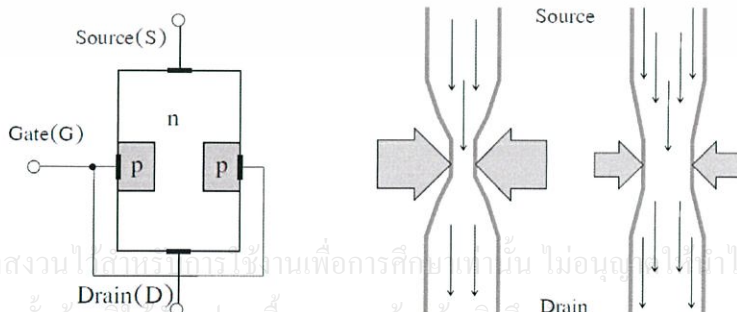


a) n-channel JFET

b) p-channel JFET

รูปที่ 2.32 สัญลักษณ์ทั่วไปของ JFET แบบ n-channel และ p-channel

3) การควบคุมการไหลของกระแส I_D ผ่าน Channel สามารถเปรียบเทียบการควบคุมการไหลของน้ำผ่านท่อ

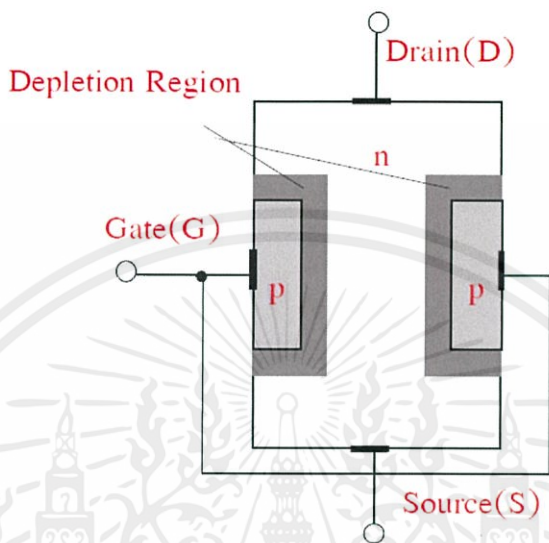


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.33 การไหลของกระแส I_D ผ่าน Channel โดยเปรียบเทียบการควบคุมการไหลของน้ำผ่านท่อ

2.7.1 การทำงานของ JFET n-channel

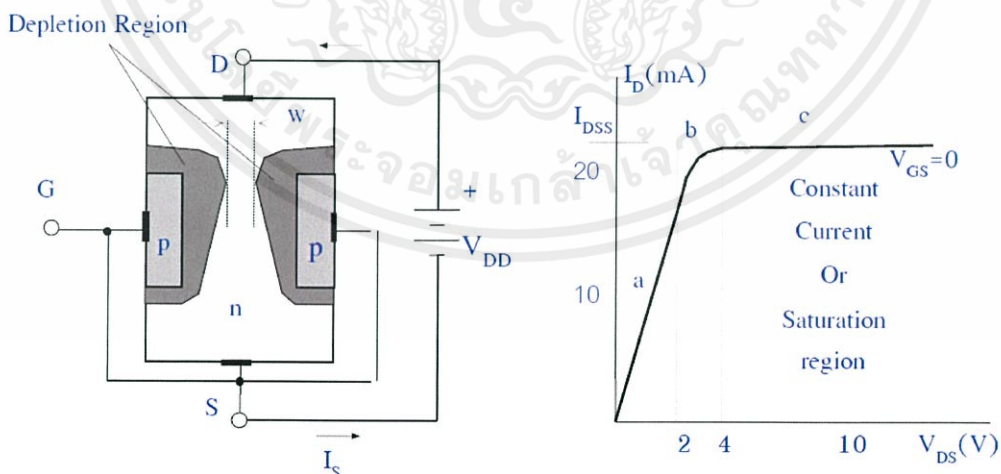
ส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่าง p-type material และ n-type material จะเป็น p-n Junction ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) เหมือนไดโอดเมื่อไม่มีการไบแอส (No Bias) Depletion Region จะเป็นฉนวนอยู่บริเวณรอยต่อ p-n Junction



รูปที่ 2.34 การทำงานของ JFET n-channel

เมื่อ ให้ $V_{GS} = 0V$ แล้วปรับค่า V_{DS} กระแสจากขา Drain จะไม่ไหลออกไปยังขา Gate เนื่องจาก Reverse Bias

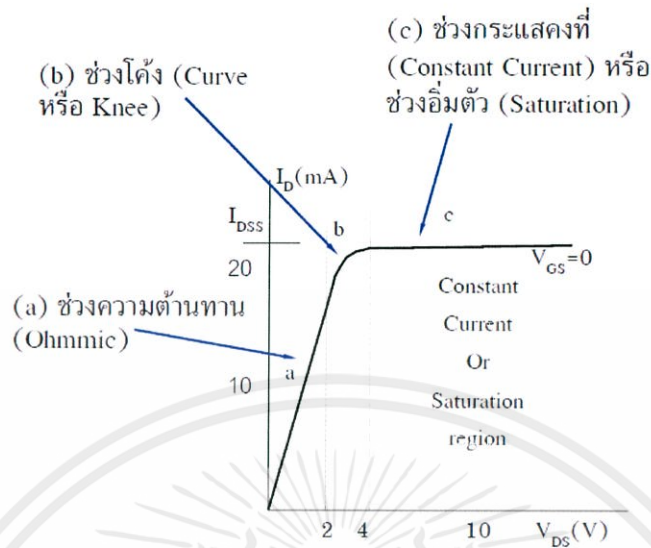
ดังนั้น $I_G = 0$ และ $I_D = I_S$



รูปที่ 2.35 การทำงานของ JFET n-channel เมื่อ $I_G = 0$ และ $I_D = I_S$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{DS} เมื่อ $V_{GS} = 0$

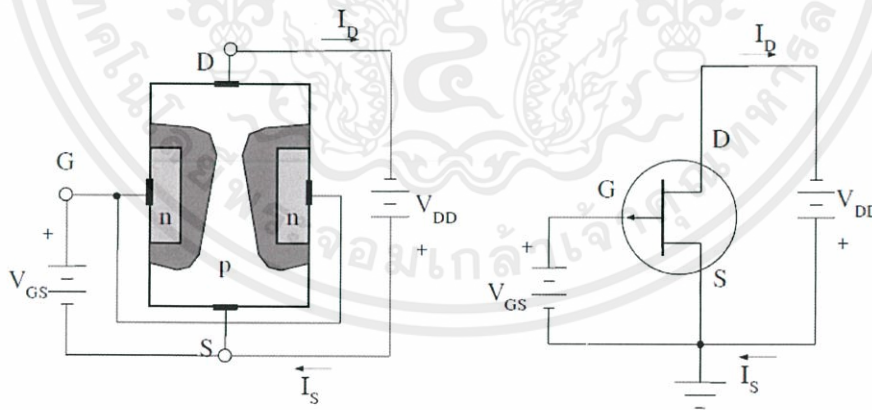


รูปที่ 2.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_D กับ V_{DS} เมื่อ $V_{GS} = 0$

2.7.2 การทำงานของ JFET แบบ p-channel

การทำงานของ JFET แบบ p-channel คล้าย JFET แบบ n-channel แต่ต่างกันที่ขั้วของแรงดันทั้งหมดจะตรงกันข้ามกับ JFET แบบ n-channel

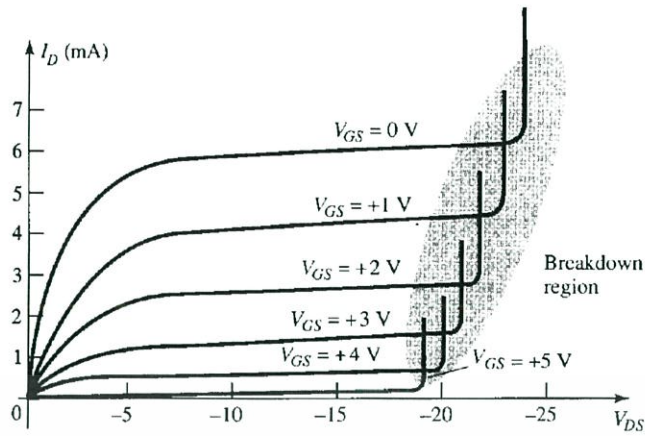
การใช้งาน $V_P > 0$, $V_{GS} \leq 0$ และ $V_{DS} < 0$



รูปที่ 2.37 JFET แบบ p-channel

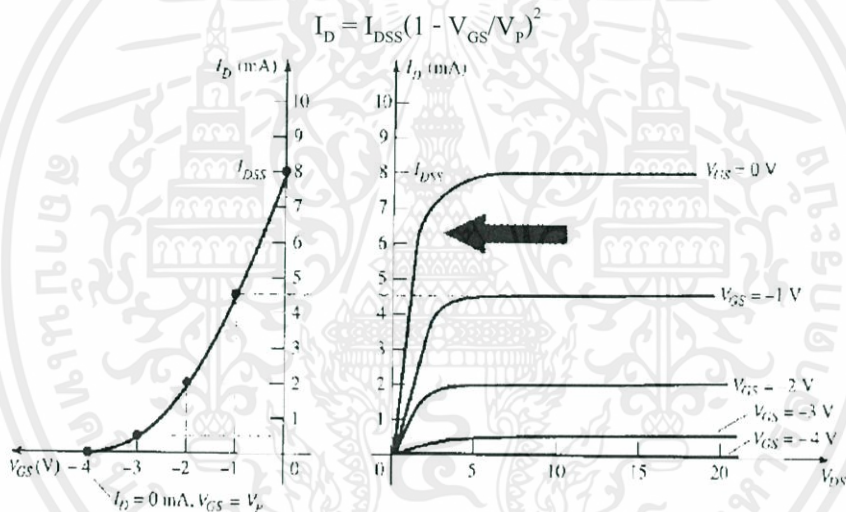
1) Breakdown Region

เพิ่มแรงดัน V_{DS} ขึ้นมาเรื่อยๆ จะทำให้ FET เปลี่ยนจากพฤติกรรม Constant Current เป็นการนำกระแสอย่างมากซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ JFET เสียหายได้



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงลักษณะของ JFET แบบ p-channel เมื่อ $I_{DSS} = 6 \text{ mA}$ และ $V_p = +6 \text{ V}$

- 2) ลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ JFET เป็นไปตามสมการชอเคลย์ (Shockley's Equation) ในช่วง $0 \leq |V_{GS}| \leq |V_p|$ ดังนี้



รูปที่ 2.39 กราฟแสดงลักษณะลักษณะสมบัติถ่ายโอนของ JFET เป็นไปตามสมการชอเคลย์ (Shockley's Equation)

$$I_D = I_{DSS} \text{ เมื่อ } V_{GS} = 0$$

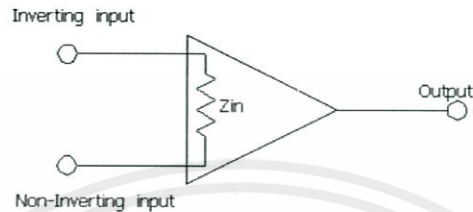
$$V_{GS} = V_p \text{ เมื่อ } I_D = 0 \text{ [12]}$$

2.8 ออปแอมป์ (OP-AMP)

2.8.1 คุณสมบัติของ OP-AMP ในอุดมคติ

1. มีอัตราขยายโวลต์ที่เตสูงมาก(A) (Infinite voltage amplification A)
2. มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมาก Z_{in} (Infinite input impedance Z_{in})

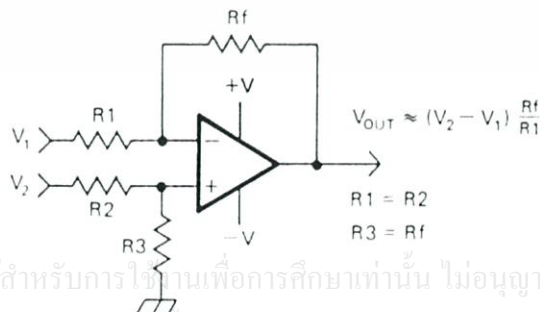
3. มีค่าเอาต์พุตที่มีแอมพลิจูดต่ำมาก Z_{out} (Zero output (Source) impedance)
4. มีแบนด์วิดท์กว้าง(ต่อการขยาย)(Infinite bandwidth)
5. มีอัตราขยายโวลต์ที่เท่ากันทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบเท่ากัน
6. $V_{out} = 0$ เมื่อ $V_{in} = 0$
7. ลักษณะของอินพุตมีลักษณะเป็นดิฟเฟอเรนเชียล



รูปที่ 2.40 Op-Amp ในอุดมคติ [13]

2.8.2 วงจร Differential-Input Amplifier

การที่เซนเซอร์ส่วนใหญ่จะมีสัญญาณเอาต์พุต 2 เส้น สัญญาณในแต่ละเส้นจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าหลายโวลต์ โดย DC Voltage ที่ปรากฏในสายสัญญาณนี้ซึ่งเรียกว่า “common-mode voltage” แต่สัญญาณจากเซนเซอร์ที่ต้องการขยายจริงจะมีความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้ง 2 เส้นเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์ ถ้าใช้วงจรขยายสัญญาณแบบปกติไม่ว่าจะเป็น Non inverting Amplifier หรือ Inverting Amplifier แรงเคลื่อนไฟฟ้าในสายสัญญาณทั้งหมดจะถูกขยายพร้อมกับความแตกต่างเพียงเล็กน้อยที่ต้องการ รูปที่ 2.41 แสดงวงจรขยายสัญญาณที่ใช้สำหรับแก้ไขปัญหานี้โดยไม่ต้องใช้คาปาซิเตอร์มาบล็อก DC Voltage แต่จะใช้ความต้านทานที่ต่ออยู่กับอินเวอร์ตติ้งอินพุตในการรักษาระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียงกับ Common-mode voltage ส่วนวงจรขยายสัญญาณจะรักษาวินเวอร์ตติ้งอินพุตให้มีระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้คงที่ ถ้าออกแบบให้ตัวต้านทานมีค่าที่เหมาะสม วงจรนี้จะทำการขยายเฉพาะค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่าง 2 V กับ 1 V ดังนั้นเอาต์พุตของวงจร Differential-input Amplifier จึงมีเฉพาะผลต่างของสัญญาณที่ไม่รวม Common-mode voltage



รูปที่ 2.41 Differential-Input Amplifier [14]

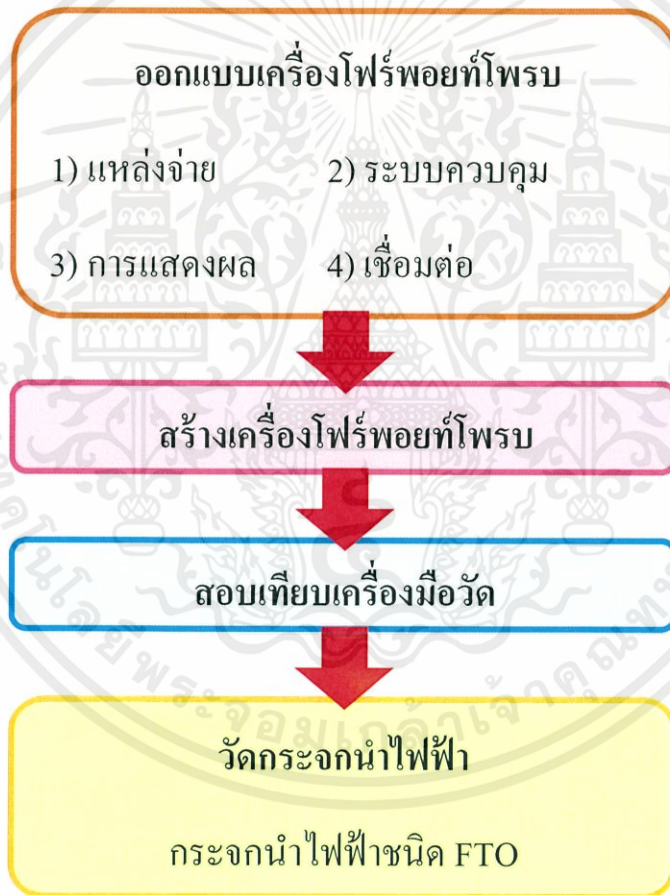
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน

ภาพรวมของการดำเนินโครงการพิเศษนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงภาพรวมการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

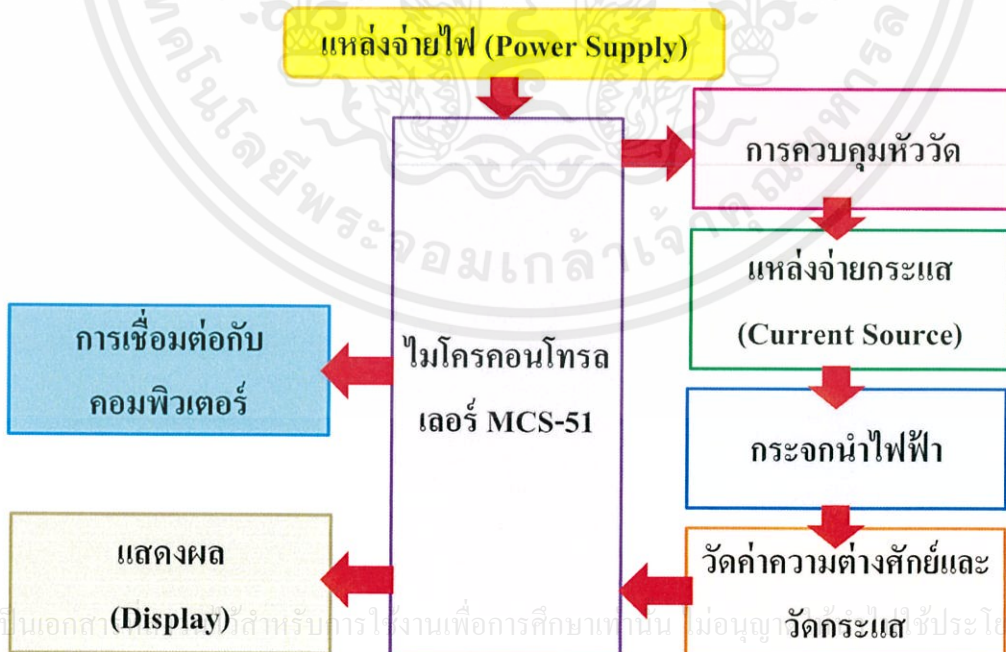
3.2 การออกแบบโพร์พอยท์โพรบ

ในการออกแบบการวัดความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance) โดยการใช้โพร์พอยท์โพรบ ต้องมีการจ่ายกระแส (I) ให้กับกระจกนำไฟฟ้าแล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อม (V) เพื่อจะหาความต้านทานเชิงแผ่น (R_{Sheet}) โครงการพิเศษนี้ได้มีออกแบบการวัดความต่างศักย์ตกคร่อม วงจรแหล่งจ่ายกระแส (Current source) และแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจร (Power supply) โดยการใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อแสดงผล ความคุมระบบการทำงานของ เครื่องและเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

3.2.1 องค์ประกอบของเครื่องโพร์พอยท์โพรบ

- 1) แหล่งจ่ายไฟ (Power supply)
- 2) แหล่งจ่ายกระแส (Current source)
- 3) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)
- 4) หัววัดโพร์พอยท์โพรบ (Four-point probe)
- 5) ส่วนแสดงผล (Display)

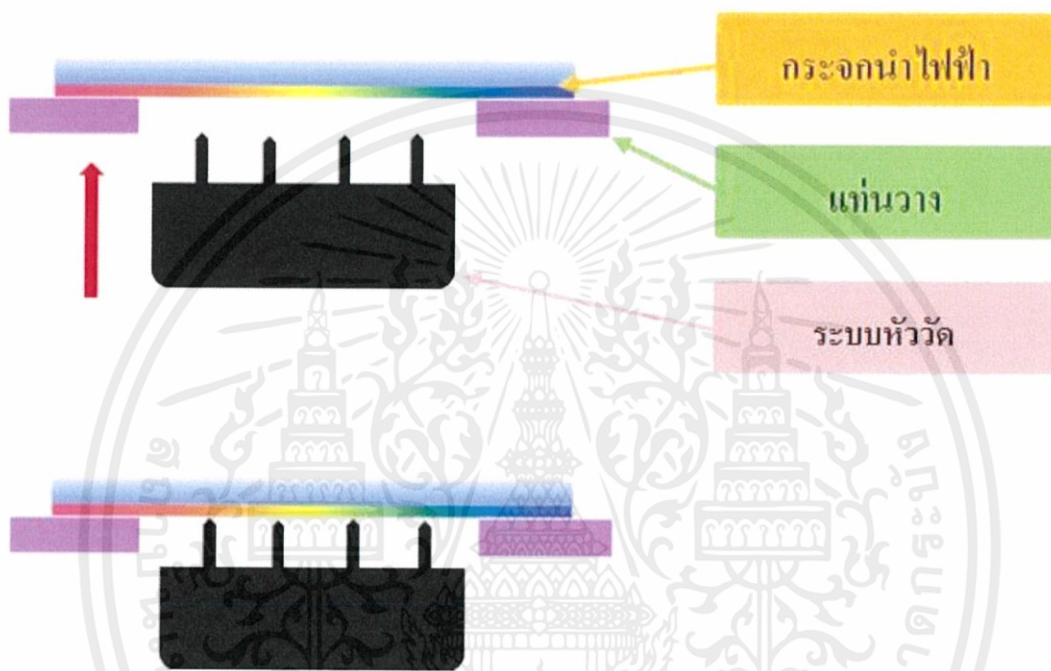
องค์ประกอบทั้งหมดเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างการทำงานของเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบ

3.2.2 การออกแบบแท่นวางหัววัด

การออกแบบแท่นวางหัววัดเราจะออกแบบให้หัววัดอยู่ข้างในเครื่องโพร์พอยท์โพรบมอเตอร์จะหมุนให้หัววัดเลื่อนขึ้นและสัมผัสกับกระจกนำไฟฟ้าที่วางด้านบน โดยกระจกนำไฟฟ้าต้องวางด้านที่นำไฟฟ้าคว่ำลงในช่องวัดของเครื่องโพร์พอยท์โพรบ จึงสามารถวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นได้



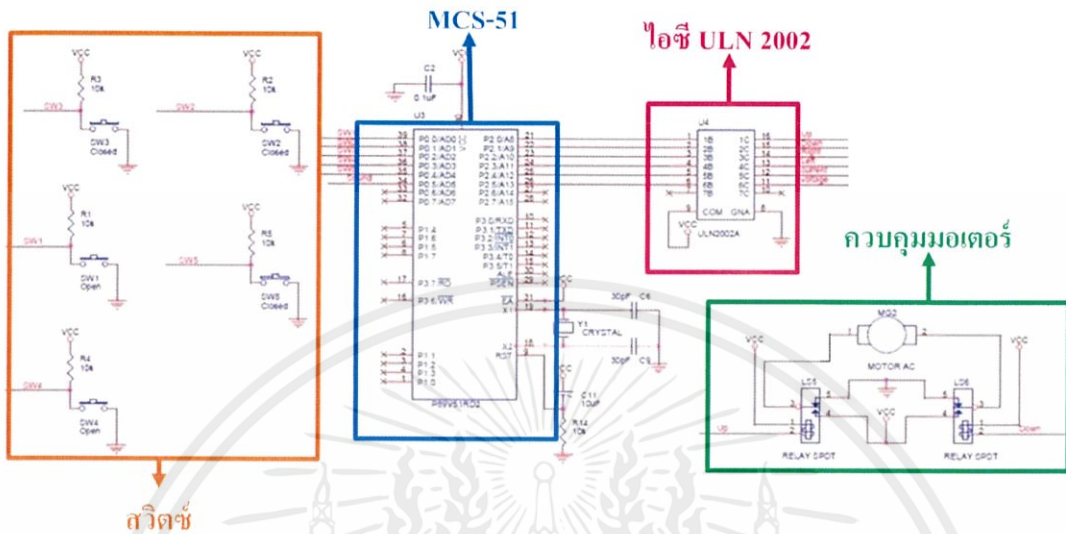
รูปที่ 3.3 แสดงวิธีการวัดของหัววัดโพร์พอยท์โพรบ

จากรูปที่ 3.3 ลักษณะการวัดของหัววัดโพร์พอยท์โพรบเราทำให้หัววัดเลื่อนขึ้นจากด้านล่างเพื่อสัมผัสกับกระจกนำไฟฟ้า

3.3 วงจรที่ใช้ควบคุม

การควบคุมเครื่องวัดโพร์พอยท์โพรบเราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 วงจรที่ใช้ควบคุมเครื่องโพร์พอยท์โพรบทั้งหมด ได้แก่ วงจรมอเตอร์ใช้ในการควบคุมหัววัดในการสัมผัสกับกระจกนำไฟฟ้าวงจรกำเนิดสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณเตือนเมื่อหัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดสัมพันธ์กับกระแสโดยอาศัยการส่งสัญญาณจากลิมิตสวิทช์ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และวงจรสวิทช์ใช้ในการเปิด-ปิดเครื่องและควบคุมมอเตอร์

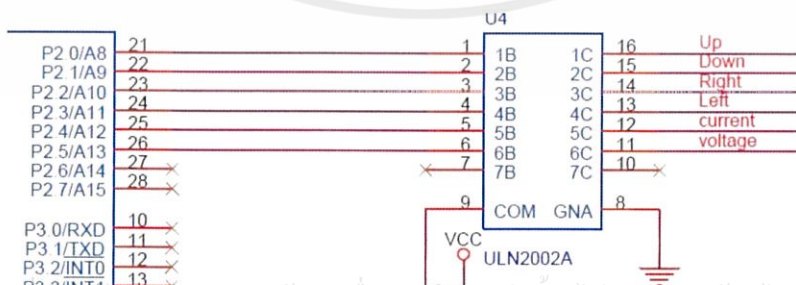


รูปที่ 3.4 วงจรที่ใช้ควบคุมเครื่องโพรไฟพอยท์โรบ

จากรูปที่ 3.4 วงจรควบคุมเครื่องโพรไฟพอยท์โรบมีไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสั่งการแล้วนำอุปกรณ์ที่จะสั่งการมาต่อกับพอร์ตต่างๆ

3.3.1 วงจรควบคุมมอเตอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งงานรีเลย์โดยผ่านอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่กลับสถานะลอจิกสัญญาณไฟฟ้าจาก High เป็น Low และจาก Low เป็น High อินเวอร์เตอร์จะเป็นตัวกันไม่ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นโหลด (Load) เพื่อไม่ให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เสียหายเนื่องจากการรับกระแสเข้ามาเกิน ดังรูปที่ 3.5

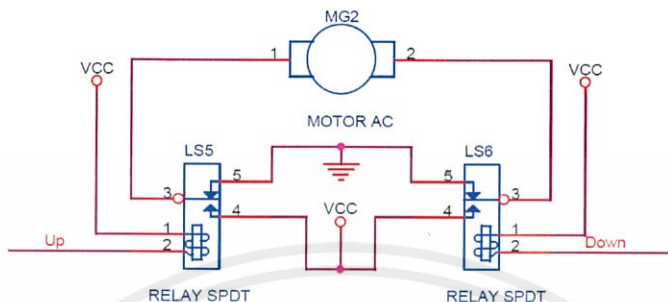


รูปที่ 3.5 วงจรการสั่งงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอินเวอร์เตอร์ (ULN2002A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์เป็นของสถาบันฯ และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ในการนำไปใช้

การควบคุมมอเตอร์ในการเคลื่อนขึ้นเคลื่อนลงของหัววัดเราจะใช้รีเลย์ควบคุมการทำงานซึ่งทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ให้มอเตอร์ทำงานการหมุนของมอเตอร์นั้นไฟจะไหลจากศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าต่ำถ้าเราต้องการให้มอเตอร์หมุนวนกลับจึงต้องสลับขั้วไฟฟ้า

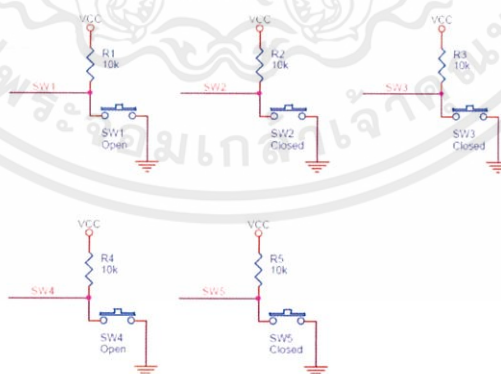


รูปที่ 3.6 วงจรควบคุมมอเตอร์เคลื่อนขึ้นและลง

จากรูปที่ 3.6 ลักษณะวงจรที่ทำให้มอเตอร์หมุนขึ้น - ลง จะมีรีเลย์สองตัวทำหน้าที่เป็นสวิตช์โดยที่สวิตช์จะติดอยู่กับกราวด์ (ground) ทั้งสองหากต้องการส่งคอนโทรลเลอร์ให้หมุนไปทางใดก็จะกำหนดให้ขั้วนั้นเป็น Low รีเลย์จะทำงานเหนี่ยวนำให้สวิตช์เปิดการจ่ายกระแสให้มอเตอร์หมุนได้

3.3.2 วงจรควบคุมสวิตช์

วงจรควบคุมสวิตช์ใช้ในการควบคุมเปิด - ปิดเครื่อง, เคลื่อนขึ้น - ลง และควบคุมการวัดความต่างศักย์และแหล่งจ่ายกระแสภายในภายนอก



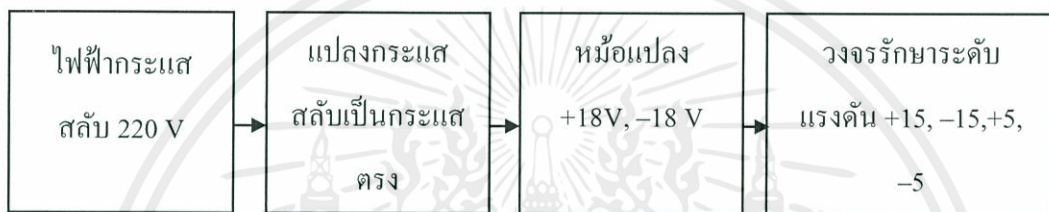
รูปที่ 3.7 วงจรสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควานไว้สำหรับครูโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จากรูปที่ 3.7 ในวงจรสวิตช์จะใช้ตัวต้านทาน 10 kΩ เพื่อลดกระแสและมีสวิตช์ต่อกับกราวด์ เมื่อกดสวิตช์สัญญาณจะเป็น High เมื่อปล่อยสวิตช์สัญญาณจะเป็น Low

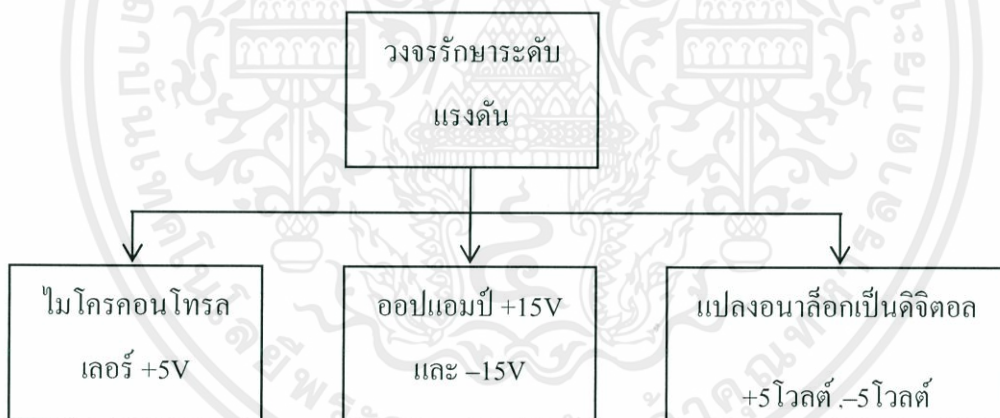
3.4 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า

3.4.1 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)

การเปลี่ยนแรงดันสูงจาก 220 V ลงมาเป็นระดับแรงดันที่เหมาะสมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากนั้นทำโดยอาศัยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ซึ่งจะเปลี่ยนไฟกระแสสลับเป็นไฟกระแสตรงจากนั้นใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นตัวเปลี่ยนแรงดันมาที่วงจรรักษาระดับแรงดันแบบ 3 ขา ซึ่งให้ค่าแรงดันเอาต์พุตคงที่สำหรับวงจรรักษาแรงดันขนาด +15V, -15V, +5V และ -5V เพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.8



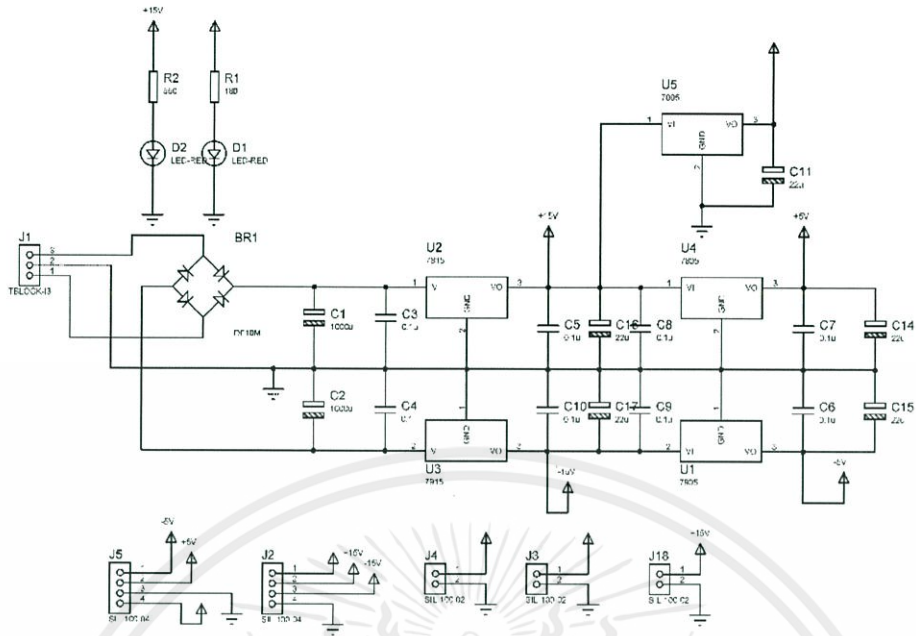
รูปที่ 3.8 แผนภาพส่วนประกอบแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ภายในเครื่องโพร์พอยท์โพรบ

จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 สำหรับโครงการนี้ต้องการแหล่งจ่ายไฟขนาด +15V, -15V, +5V และ -5V โดยที่แหล่งจ่ายไฟ +15V และ -15V ใช้สำหรับออปแอมป์ แหล่งจ่าย +5V และ -5V นั้นใช้สำหรับไอซีเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล และแหล่งจ่ายไฟ +5V ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

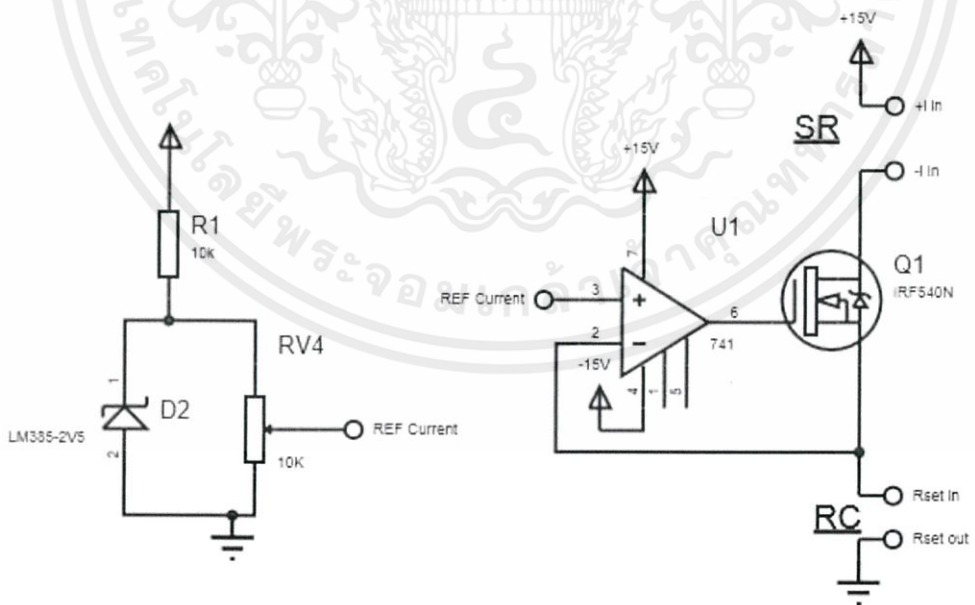
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)

จากรูปที่ 3.10 ลักษณะวงจรแหล่งจ่ายไฟตรงทั้งไฟแบบบวก ลบและกราวด์ โดยใช้ KIA7915, KIA7815, KIA7905 และ KIA7805

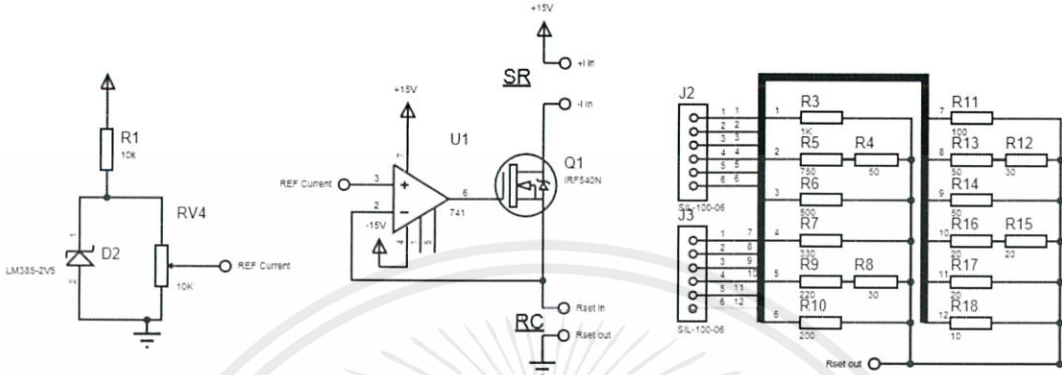
3.4.2 แหล่งจ่ายกระแส (Current Source)



รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายกระแสโดยใช้ออปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานำไปสอนและให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

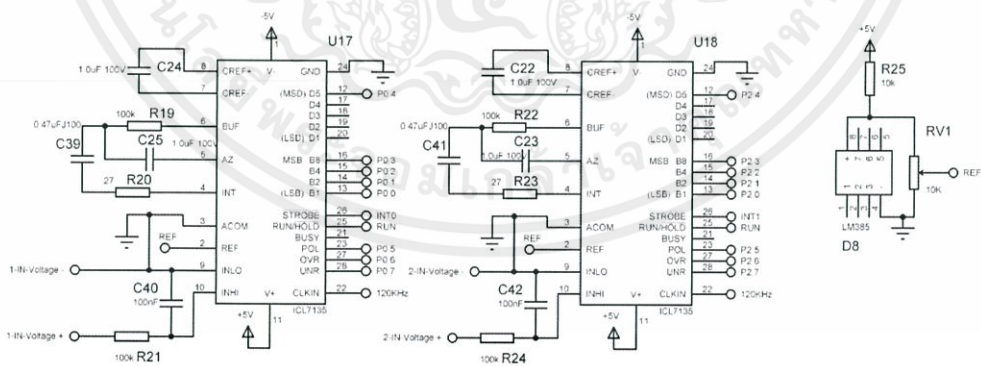
จากรูปที่ 3.11 ใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode) ทำหน้าที่แปลงไฟจาก +5V ให้เหลือ $\approx 1.4V$ ออปแอมป์ร่วมกับวงจรแหล่งจ่ายกระแสเพื่อให้แรงดันที่ป้อนเข้าไปในวงจรมีค่าคงที่เท่ากับ 1V ตลอด



รูปที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสของเครื่องโพรบที่โพรบที่สร้างขึ้น

3.5 การวัดกระแสและแรงดัน

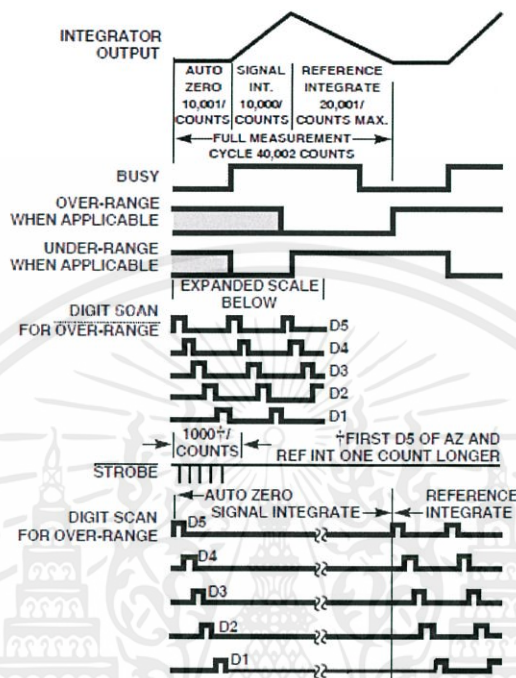
การแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลโดยใช้ A/D Converter (ICL7135) 2 ตัว โดยตัวที่ 1 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเป็นค่าความต่างศักย์ และตัวที่ 2 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเป็นค่ากระแส ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้บนจอ LCD โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ จำเป็นต้องมีการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิทัลดังรูปที่ 3.14 เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณที่เป็นดิจิทัลเท่านั้น



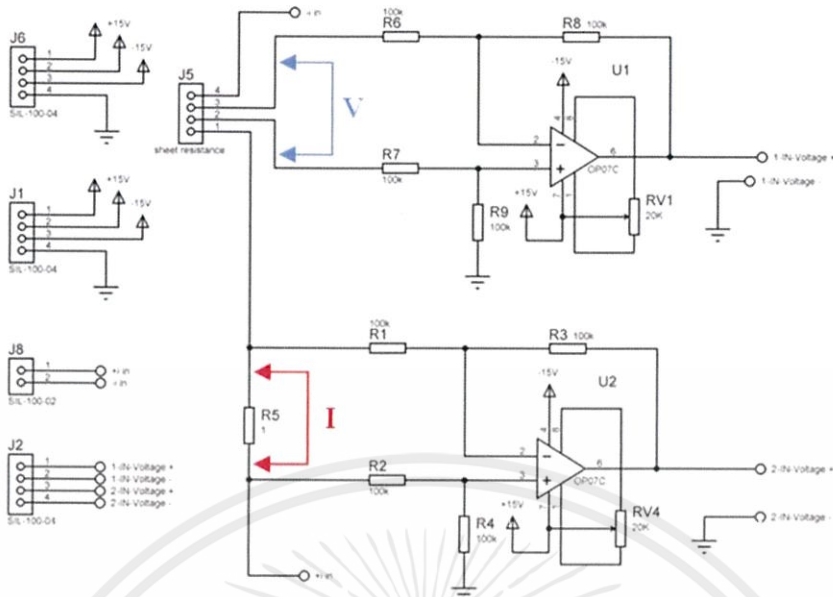
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

หลักการทำงานคือฟลิปฟลอปจะตรวจสอบสัญญาณข้อมูลหนึ่งครั้งทุกช่วงสัญญาณนาฬิกา เมื่อสัญญาณนาฬิกาผ่านไปจนถึงจุดครึ่งหนึ่งของสัญญาณ หากมีความผิดพลาดของสัญญาณนาฬิกาฟลิป ฟลอปจะไม่รับสัญญาณนั้น ฟลิปฟลอปอาจหน่วงสัญญาณที่แท้จริงไปได้หนึ่งครั้ง ทุกๆความผิดพลาด แต่หากความผิดพลาดนั้นไม่ได้รับการแก้ไขการแสดงผลก็จะมากไปหนึ่งครั้งเสมอ ดังนั้นตัวนับจะถูกปิดการใช้งานไปหนึ่งสัญญาณนาฬิกาที่จุดเริ่มต้นของเฟสที่สามเพื่อชดเชยการหน่วงของสัญญาณของฟลิปฟลอปจึงให้การแสดงผลที่ถูกต้อง ในทำนองเดียวกันการหน่วงหนึ่งครั้งที่จุดเริ่มของเฟสที่ 1 จะทำให้เกิดการแสดงผลเป็น 0000 แทนที่จะเป็น 0001 ไม่มีการหน่วงของสัญญาณที่เฟส 2 จึงให้ผลการอ่านค่าที่ถูกต้องตรงตามสัดส่วน

3.5.1 การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล

3.5.1.1 การวัดค่าความต่างศักย์ (V) และค่ากระแส (I) โดยใช้ Differential-Input Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

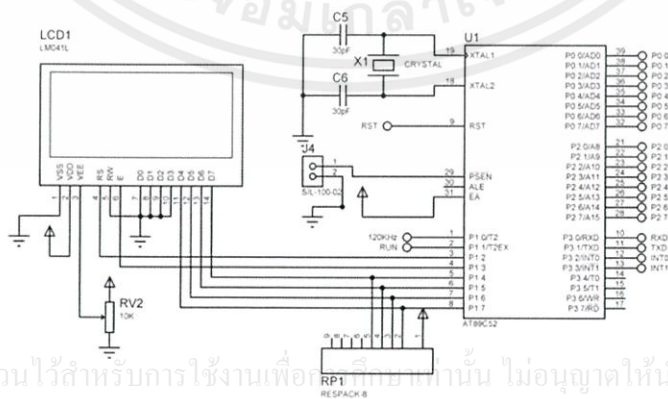


รูปที่ 3.15 การวัดค่าผลต่างโดยใช้วงจร Differential-Input Amplifier

จากรูปที่ 3.15 แหล่งจ่ายกระแสที่สร้างขึ้นไม่สามารถวัดค่ากระแส (I) และค่าความต่างศักย์ (V) โดยตรงได้ จึงใช้วงจร Differential-Input Amplifier เข้ามาช่วยเพื่อวัดค่าตรงตำแหน่งวงจร

3.6 การแสดงผลหน้าจอ LCD

หน้าจอ LCD 16 x 4 สามารถแสดงผลได้สี่บรรทัดใน โครงการพิเศษนี้ออกแบบให้จอ LCD แสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (ที่รับค่ามาจากวงจรวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า) ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์



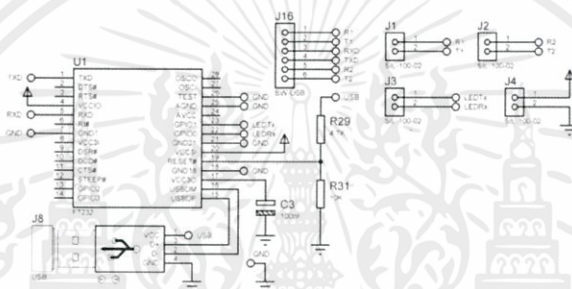
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.16 วงจรแสดงผล

จากรูปที่ 3.16 แสดงลักษณะการต่อ LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการแสดงผลของหน้าจอในการส่งข้อมูลแบบ 4 บิต

3.7 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม

วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมเป็นวงจรที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ในการรับข้อมูลและการส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ต้องมีการเปลี่ยนแรงดันในไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สูงเพียงพอด้วย



รูปที่ 3.17 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม

จากรูปที่ 3.17 แสดงการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมโดยใช้ FT232R โดยการสื่อสารผ่าน USB โดยการรับข้อมูลและส่งข้อมูลผ่านทาง TXD และ RXD

3.8 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมและรับข้อมูลจากเครื่องโฟร์พอยท์ โพรบ

3.8.1 ขั้นตอนการอัปเดตโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

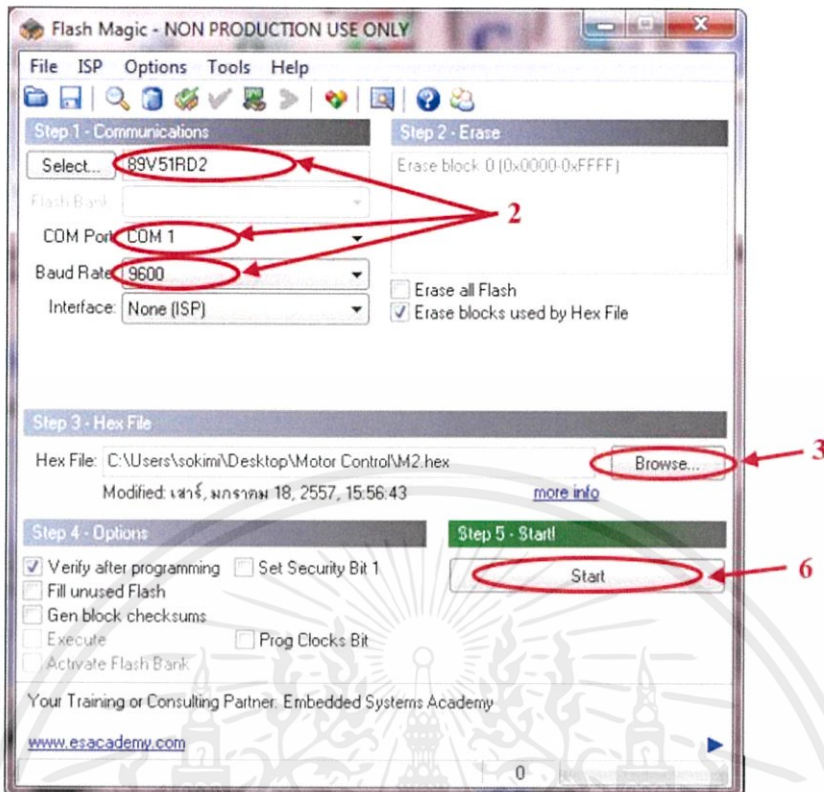
1. เปิดโปรแกรม Flash Magic



2. ตั้งค่าตามรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกทั้งหมด เหตุผลแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

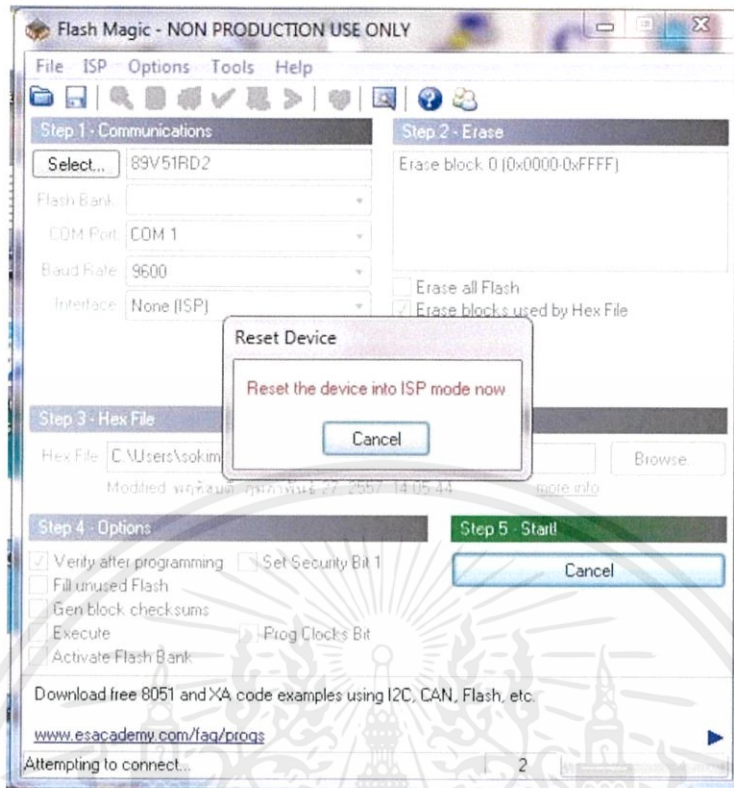
3. กดที่ Browse... เพื่อเลือกไฟล์ที่เขียนโปรแกรมไว้แล้วที่เป็นนามสกุล “.hex”



รูปที่ 3.18 การตั้งค่าการอัปเดตโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Flash Magic

4. กดปุ่ม “Reset” ที่บอร์ดค้างไว้
5. จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะเข้าสู่โหมดการอัปเดตโปรแกรม
6. กดที่คำว่า “Start” จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.19

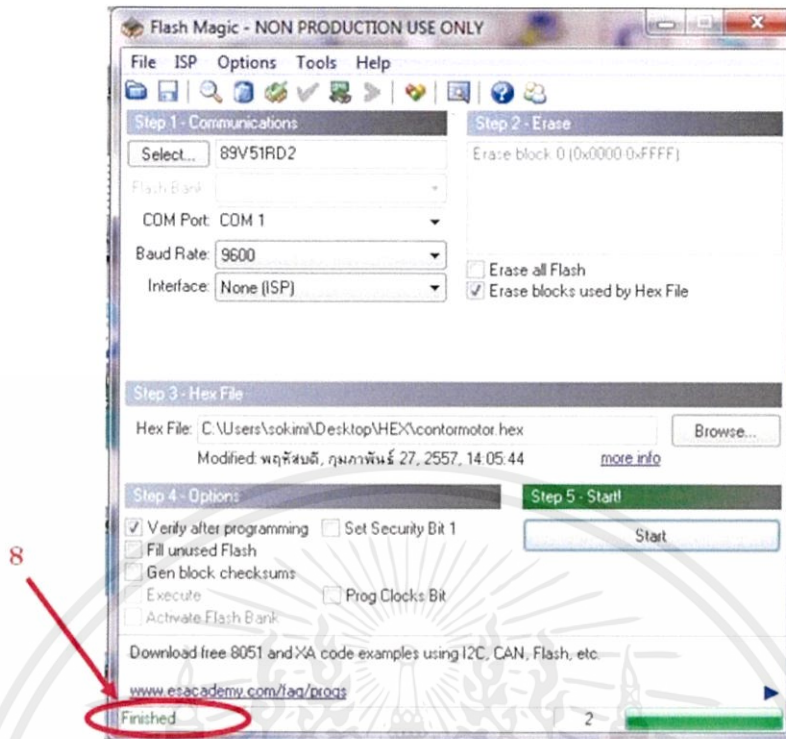
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 การตั้งค่าการอัปเดตโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Flash Magic (ต่อ)

7. ป้อนปุ่ม “Reset” จะขึ้นหน้าต่างดังรูปที่ 3.20 คอมพิวเตอร์จะทำการอัปเดตโปรแกรม
8. จะขึ้นคำว่า “Finished” ที่มุมซ้ายหน้าต่างด้านล่าง หมายถึงคอมพิวเตอร์อัปเดตโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เรียบร้อยแล้ว

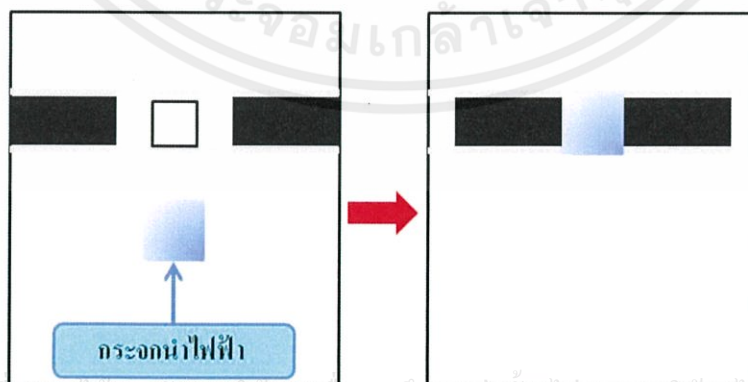
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การตั้งค่าการอัปเดตโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม Flash Magic (ต่อ)

3.8.2 ขั้นตอนการวัดกระแสไฟฟ้าชนิดเคลื่อนด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂)

1. เปิดเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ
2. ปรับความสว่างของหน้าจอ LCD โดยหมุนปุ่มปรับความสว่างหน้าจอ
3. นำกระแสไฟฟ้าวางที่แท่นวัดและเลื่อนกระแสไฟฟ้าไปในช่องวัด และเลื่อนที่ลือกทั้งสองข้างเข้ามาลือกกระแสไฟฟ้าไม่ให้เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

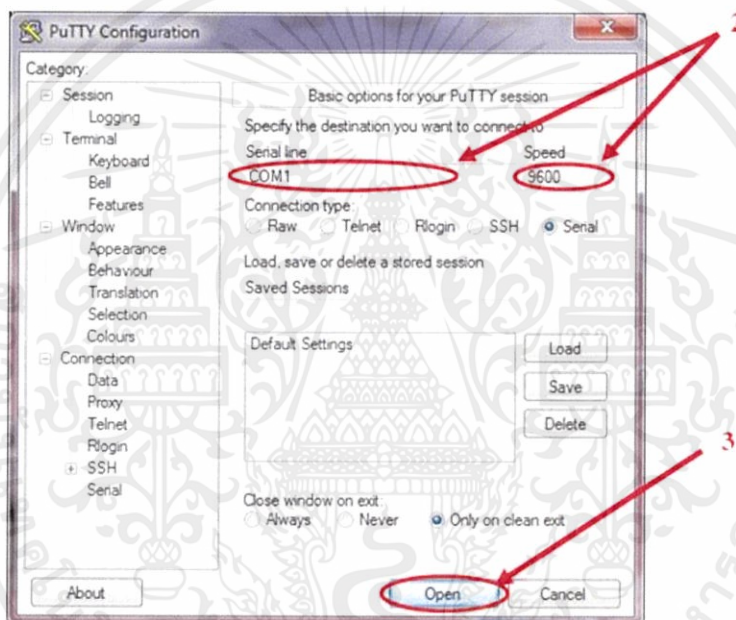
4. ปรับปุ่มลูกศรเลื่อนขึ้น – ลง เพื่อให้หัววัดสัมผัสกับกระจกอย่างพอดี
5. เมื่อมีค่า V, I และ R ขึ้นที่หน้าจอ LCD ให้กดปุ่ม RESET เพื่อรีเซตข้อมูล
6. จากนั้นจะมีค่า V, I และ R ขึ้นที่หน้า LCD

3.8.3 การแสดงข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์

1. เปิดโปรแกรม putty



2. ตั้งค่าตามรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 การใช้โปรแกรม Putty แสดงข้อมูลการวัดบนคอมพิวเตอร์

3. กดที่คำว่า “Open” ข้อมูลในการวัดจะขึ้นมาทันที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

COM10 - PuTTY
V = 0.1458 I = 0.1663 R = 0.8767
V = 0.1458 I = 0.1688 R = 0.8637
V = 0.1458 I = 0.1712 R = 0.8516
V = 0.1456 I = 0.1735 R = 0.8392
V = 0.1457 I = 0.1747 R = 0.8340
V = 0.1456 I = 0.1770 R = 0.8226
V = 0.1456 I = 0.1794 R = 0.8116
V = 0.1455 I = 0.1818 R = 0.8003
V = 0.1455 I = 0.1841 R = 0.7903
V = 0.1454 I = 0.1852 R = 0.7851
V = 0.1454 I = 0.1875 R = 0.7755
V = 0.1453 I = 0.1898 R = 0.7655
V = 0.1453 I = 0.1920 R = 0.7568
V = 0.1453 I = 0.1932 R = 0.7521
V = 0.1453 I = 0.1954 R = 0.7436
V = 0.1452 I = 0.1976 R = 0.7348
V = 0.1451 I = 0.1997 R = 0.7266
V = 0.1450 I = 0.2019 R = 0.7182
V = 0.1450 I = 0.2029 R = 0.7146

```

รูปที่ 3.23 ข้อมูลการวัดที่แสดงบนคอมพิวเตอร์

3.9 ตารางการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 ตารางการดำเนินงาน

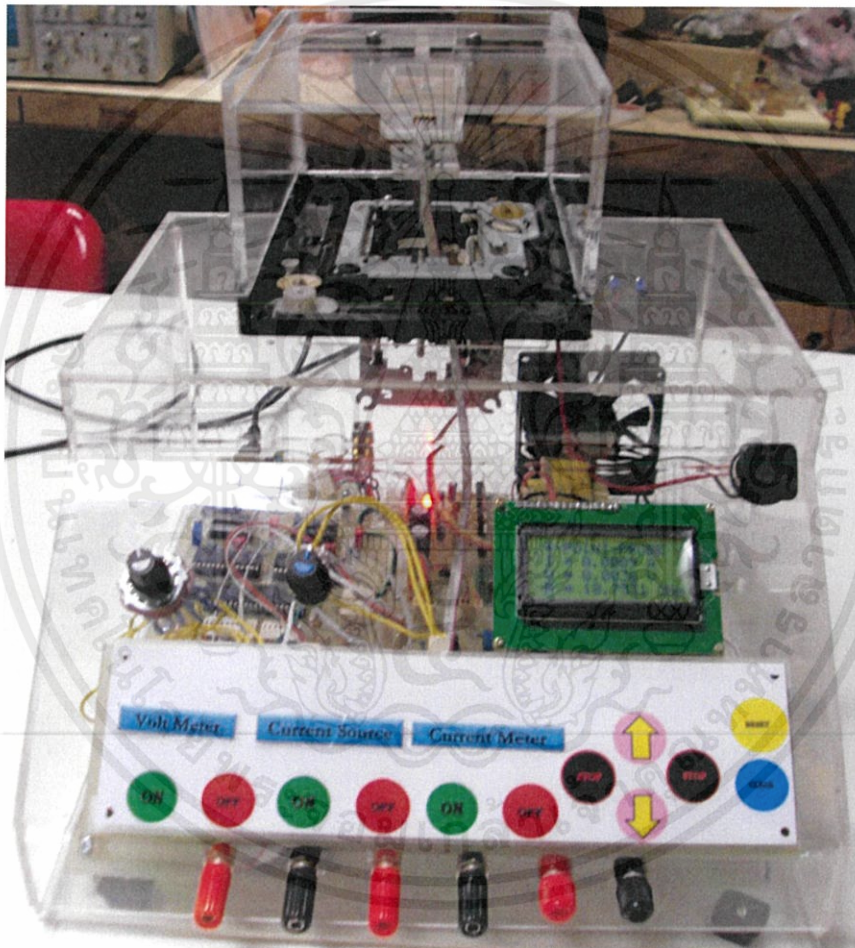
หัวข้อการดำเนินงาน	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
	2556	2556	2556	2556	2557	2557
ออกแบบเครื่องโพรโทไทป์						
ทดลองแหล่งจ่ายไฟ						
ทดลองแหล่งจ่ายกระแส						
ออกแบบหัววัดโพรโทไทป์						
ทดลองวัดความต่างศักย์และกระแส						
ทดลองแสดงผลบนหน้าจอ LCD						
ทดลองเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์						
สอบเทียบเครื่องมือวัด						
ทดลองวัดกระแสจกนำไฟฟ้า						
วิเคราะห์ผลการทดลอง						
จัดทำรูปเล่ม						

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 วงจรภายในเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ

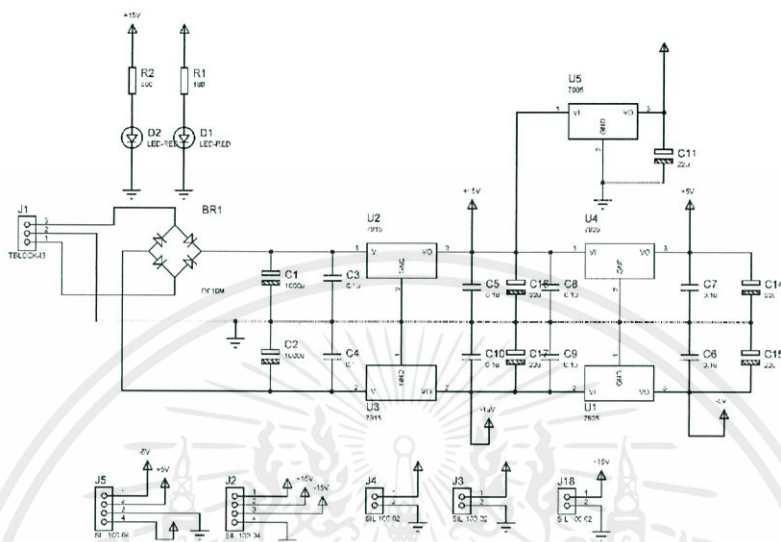


รูปที่ 4.1 เครื่องโฟร์พอยท์โพรบ

เครื่องโฟร์พอยท์โพรบที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วยวงจรภายในดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator Circuit)

■ วงจรที่ 1



รูปที่ 4.2 วงจรรักษาระดับแรงดันจำลองโดยโปรแกรม Proteus

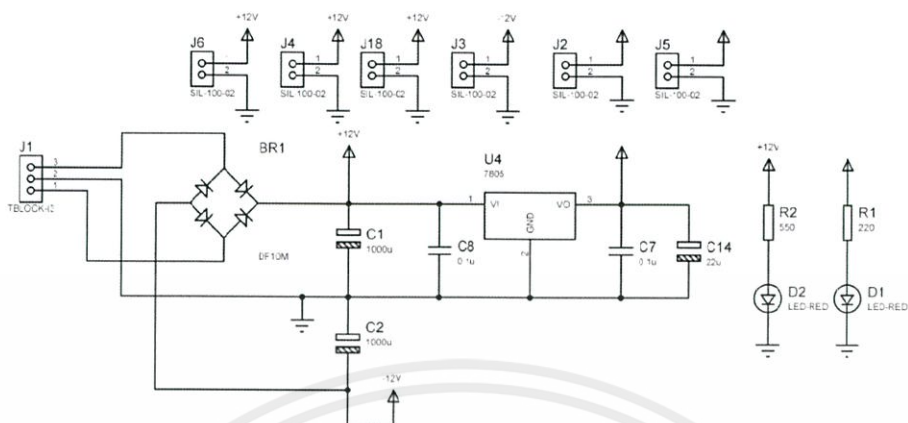


รูปที่ 4.3 วงจรรักษาระดับแรงดัน

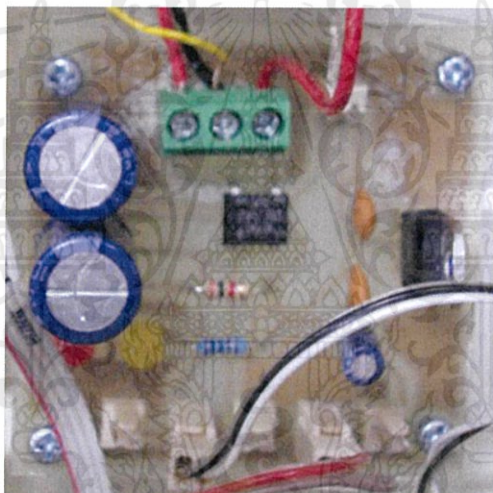
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 วงจรรักษาระดับแรงดันทำหน้าที่รักษาแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดให้มีค่าคงที่ แม้ว่าแรงดันที่ป้อนให้วงจรรักษาแรงดันจะมีค่าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งวงจรนี้จะจ่ายกระแสให้กับทุกวงจรภายในเครื่อง ยกเว้นวงจรควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ วงจรที่ 2



รูปที่ 4.4 วงจรรักษาระดับแรงดันจำลอง โดยโปรแกรม Proteus

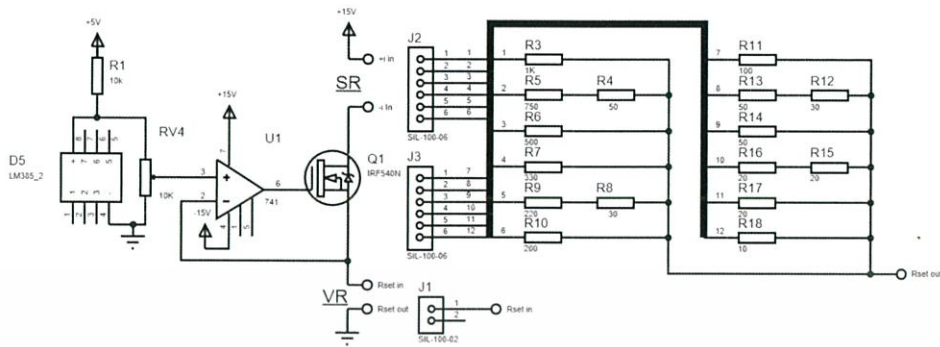


รูปที่ 4.5 วงจรรักษาระดับแรงดัน

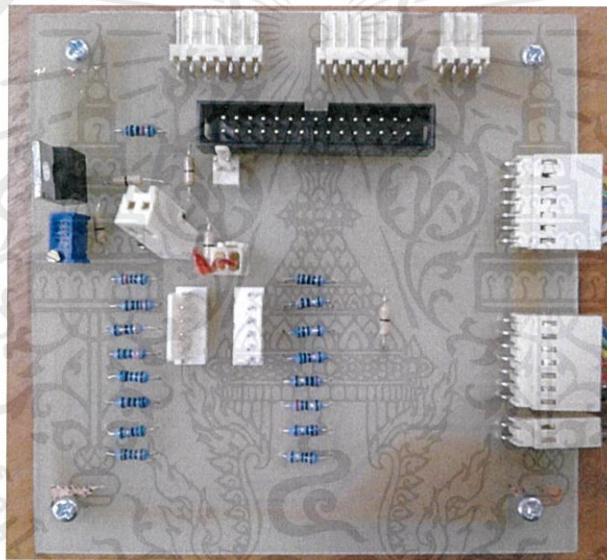
รูปที่ 4.4 และ 4.5 เป็นวงจรรักษาระดับแรงดันวงจรที่ 2 ที่ทำขึ้นมาเพื่อจ่ายกระแสให้วงจรควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะ เพื่อป้องกันการกระชากของไฟฟ้า เมื่อมอเตอร์เริ่มทำงานรีเลย์ในวงจรควบคุมมอเตอร์ใช้กระแสสูงจึงเกิดการดึงกระแสทำให้วงจรอื่นๆในเครื่องโพรพอยท์โพรบทำงานผิดปกติ และทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เกิดความเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 วงจรแหล่งจ่ายกระแส (Current Source)



รูปที่ 4.6 วงจรแหล่งจ่ายกระแสจำลองโดยโปรแกรม Proteus

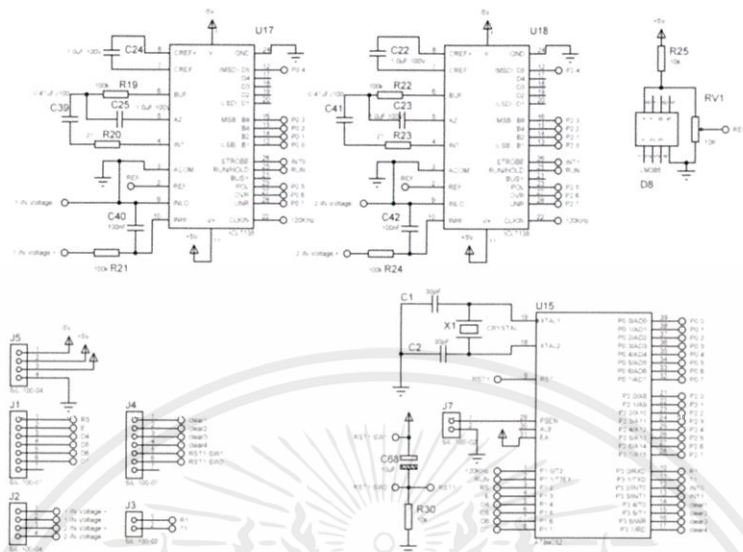


รูปที่ 4.7 วงจรแหล่งจ่ายกระแส

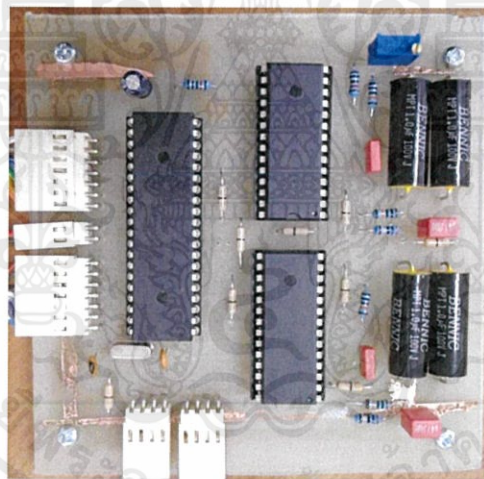
จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เป็นวงจรแหล่งจ่ายกระแสจะรักษาระดับแรงดันของการจ่ายกระแสให้คงที่ เมื่อมีโหลดดึงกระแส วงจรนี้จะสามารถปรับแรงดันกระแสให้คงที่เหมือนเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 วงจร Analog to Digital เพื่อใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์



รูปที่ 4.8 วงจรวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจำลองโดยโปรแกรม Proteus

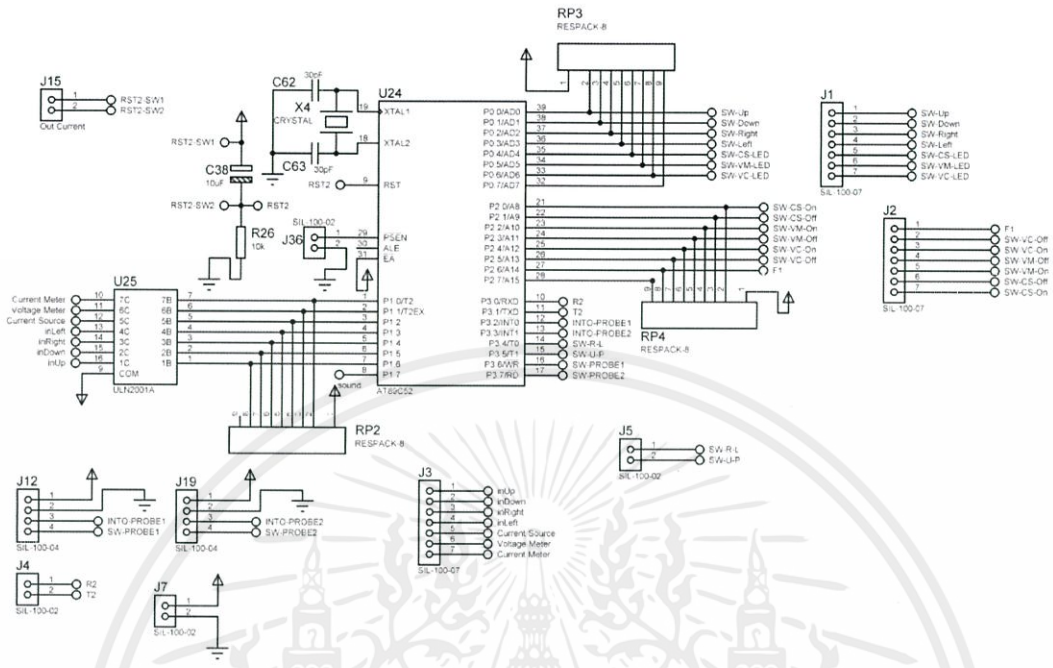


รูปที่ 4.9 วงจร Analog to Digital เพื่อใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

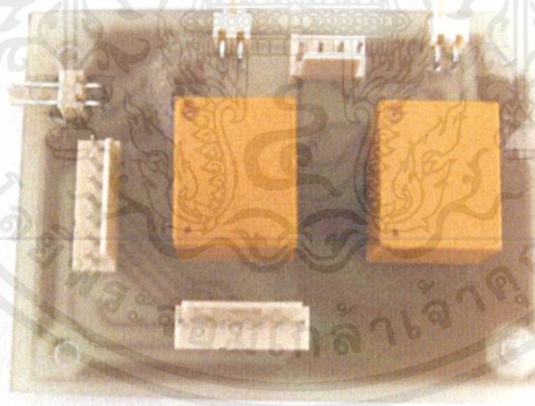
จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 เป็นวงใช้แปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถอ่านค่าที่เป็นอนาลอกได้ จึงแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลโดยใช้ ICL7135 เอาท์พุทที่ได้เป็นเลข BCD (Binary-coded decimal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 วงจรควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 4.10 วงจรควบคุมมอเตอร์จำลองโดยโปรแกรม Proteus

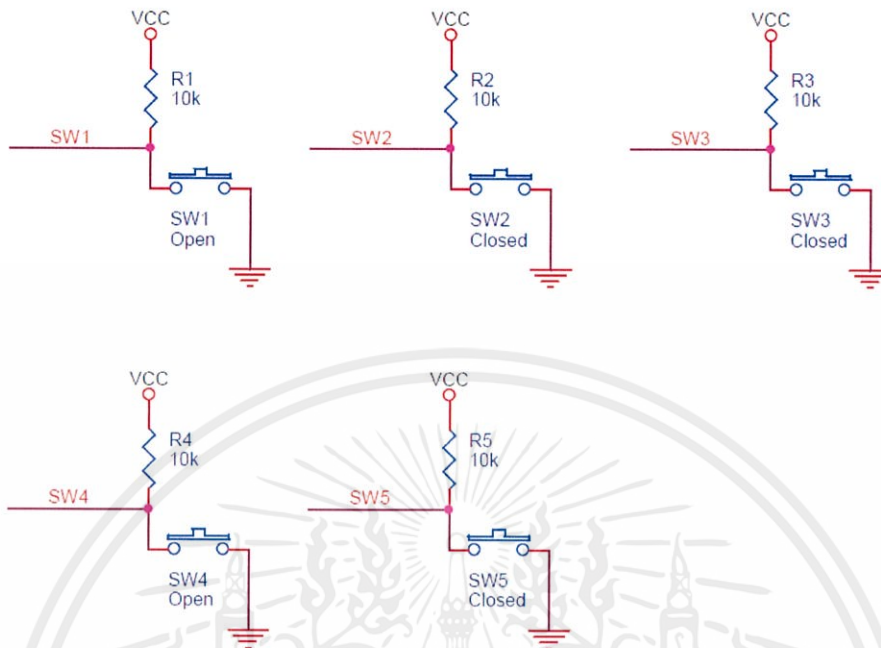


รูปที่ 4.11 วงจรควบคุมมอเตอร์

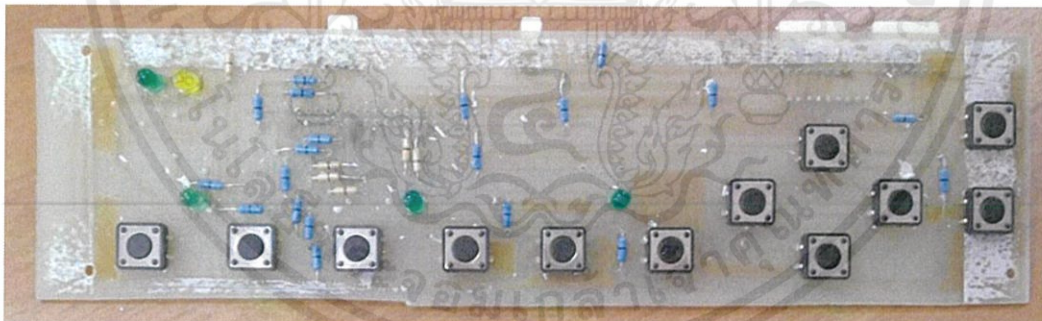
จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นวงจรควบคุมมอเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนขึ้น – ลง ของหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 วงจรควบคุมสวิตช์ (Switch control circuit)



รูปที่ 4.12 วงจรควบคุมสวิตช์จำลองโดยโปรแกรม OrCAD

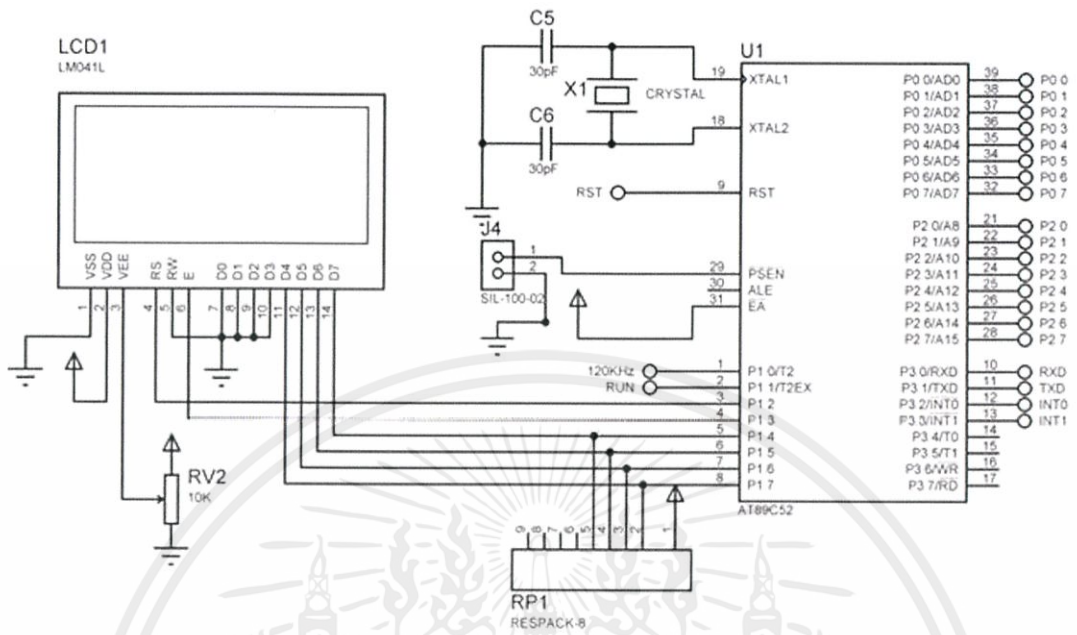


รูปที่ 4.13 วงจรควบคุมสวิตช์

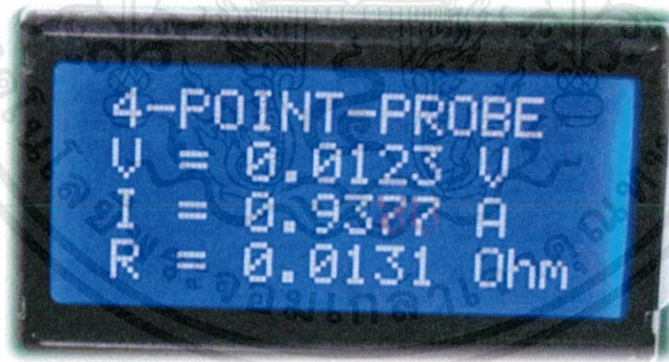
จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 วงจรควบคุมสวิตช์เพื่อควบคุมสวิตช์ต่างๆภายในเครื่องโฟรพอยท์โพรบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 วงจรแสดงผล



รูปที่ 4.14 วงจรแสดงผลจำลองโดยโปรแกรม Proteus



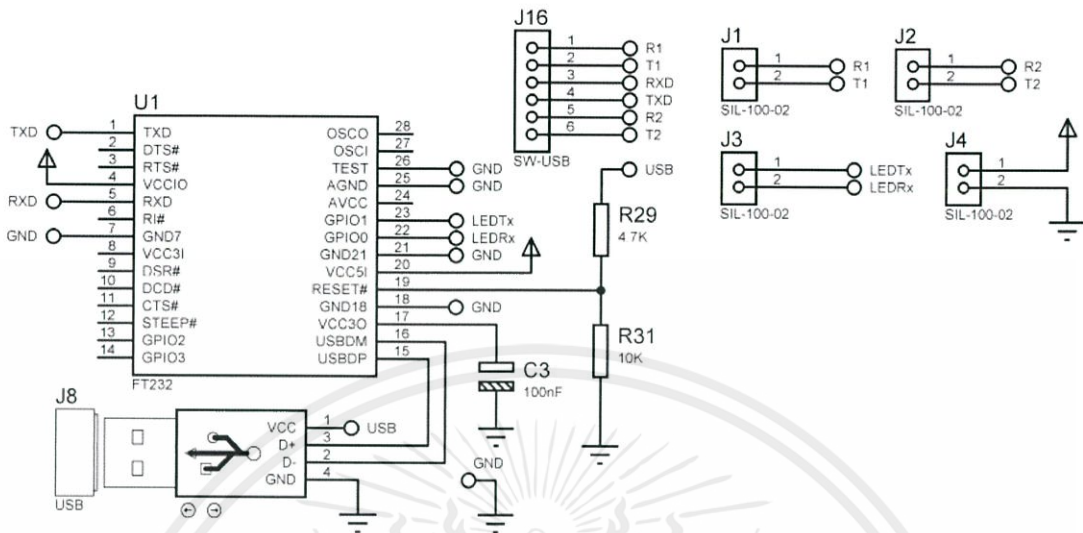
รูปที่ 4.15 วงจรแสดงผล

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงลักษณะการต่อ LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุม

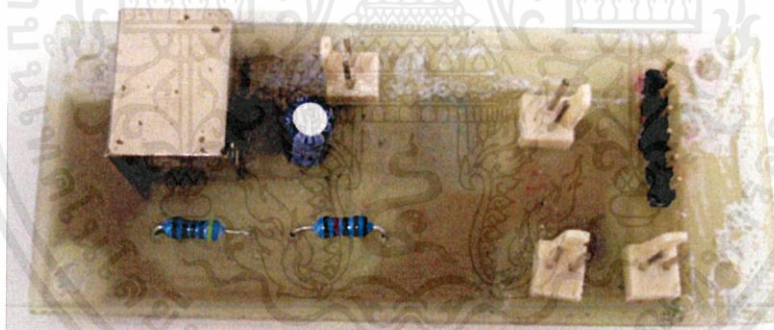
การแสดงผลของหน้าจอในการส่งข้อมูลแบบ 4 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม



รูปที่ 4.16 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมจำลองโดยโปรแกรม Proteus

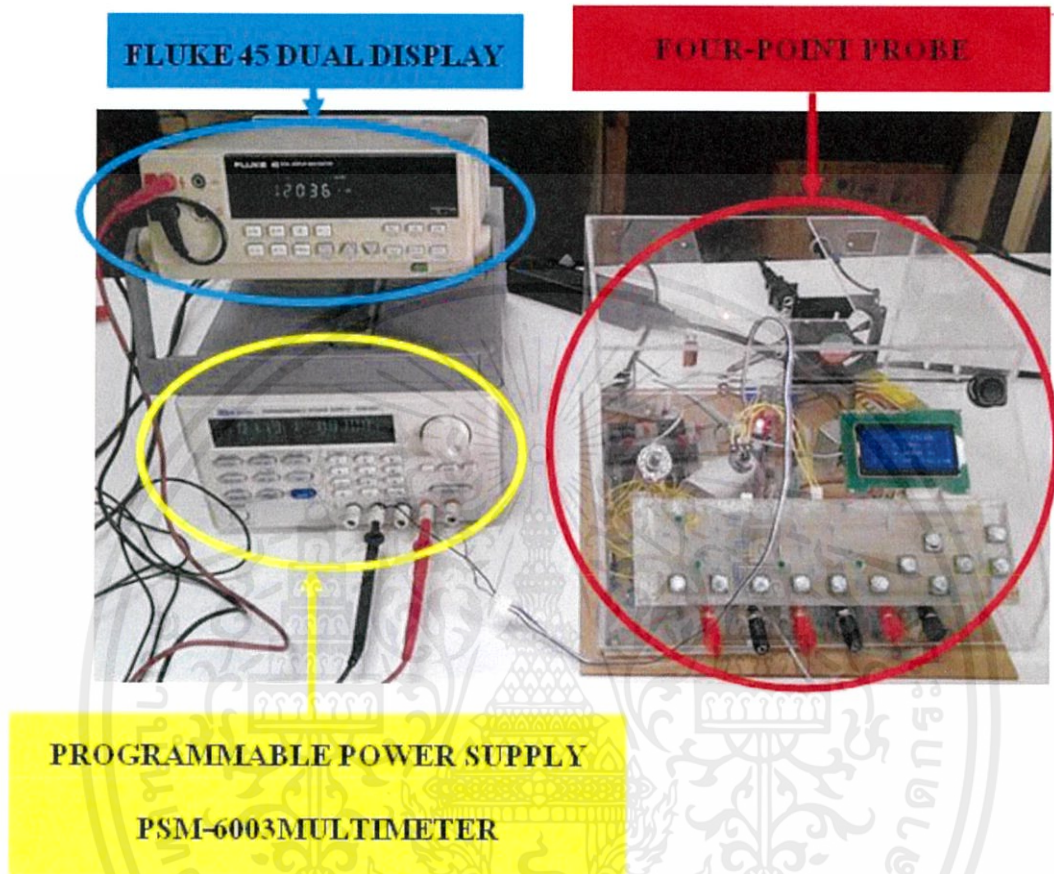


รูปที่ 4.17 วงจรสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมโดยใช้ FT232R โดยการสื่อสารผ่าน USB โดยการรับข้อมูลและส่งข้อมูลผ่านทาง TXD และ RIIN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ตารางบันทึกการวัดค่ากระแสไฟฟ้า, ความต่างศักย์, ความต้านทานโดยเครื่องโพรพอยท์โพรบ



รูปที่ 4.18 แสดงการสอบเทียบเครื่องมือวัด

จากรูปที่ 4.18 แสดงการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยการนำเครื่องวัดมาตรฐาน (FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER) เครื่องจ่ายไฟฟ้า (PROGRAMMABLE POWER SUPPLY PSM-6003) และเครื่องโพรพอยท์โพรบ (Four-point probe) มาต่อรวมกันดังรูป ซึ่งเครื่องวัดมาตรฐานสามารถวัดได้ทั้งค่าความต่างศักย์ (V) และกระแสไฟฟ้า (I) และเครื่องจ่ายไฟฟ้าสามารถจ่ายค่าความต่างศักย์ (V) และจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า (I) จึงนำทั้ง 2 เครื่องนี้มาสอบเทียบเครื่องโพรพอยท์โพรบที่สร้างขึ้น ผลการวัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

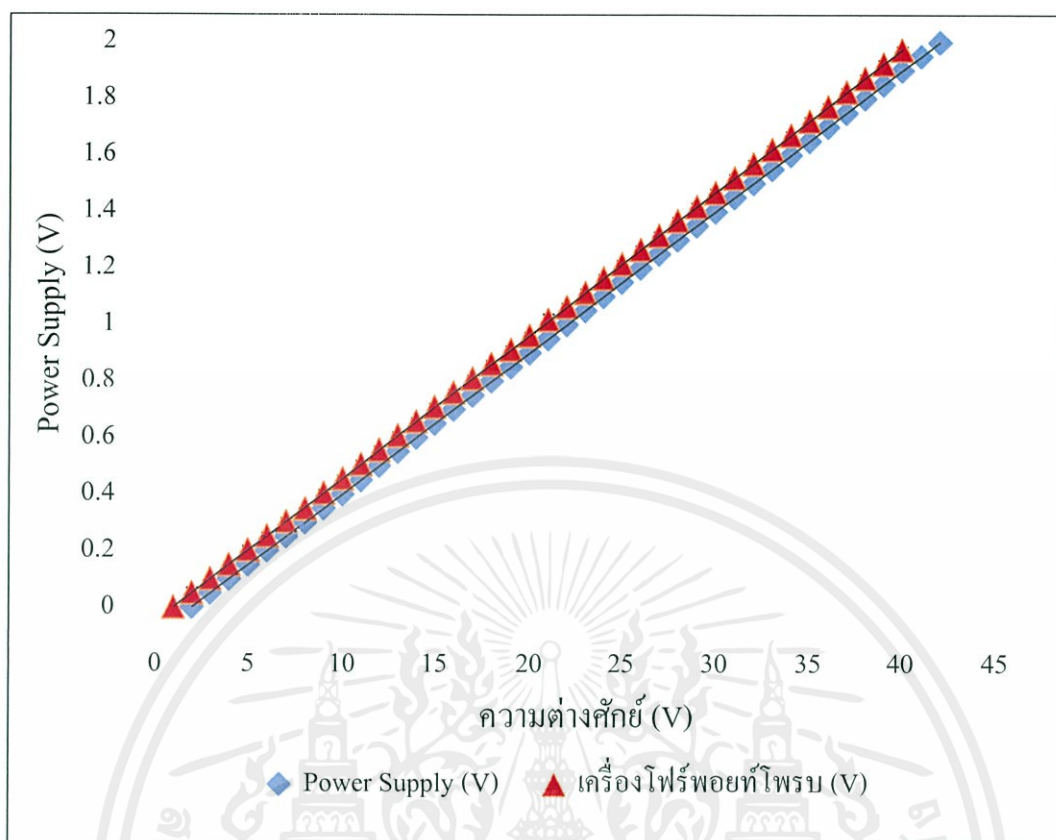
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบการอ่านค่าความต่างศักย์เครื่องโพรพอยท์โพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER) โดยใช้แหล่งจ่ายค่าความต่างศักย์มาตรฐาน (PROGRAMMABLE POWER SUPPLY PSM-6003)

Power Supply (V)	เครื่องอ่าน แหล่งจ่ายไฟ มาตรฐาน FLUKE (V)	เครื่องโพรพอยท์โพรบ (V)				เปอร์เซ็นต์ ความ คลาดเคลื่อน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0500	0.0510	0.0508	0.0507	0.0510	0.0508	0.0167
0.1000	0.1004	0.1002	0.1004	0.1003	0.1003	0.0030
0.1500	0.1511	0.1509	0.1510	0.1508	0.1509	0.0060
0.2000	0.2028	0.2027	0.2028	0.2027	0.2027	0.0137
0.2500	0.2526	0.2525	0.2524	0.2525	0.2525	0.0099
0.3000	0.3033	0.3034	0.3033	0.3034	0.3034	0.0112
0.3500	0.3549	0.3547	0.3548	0.3355	0.3483	0.0048
0.4000	0.4044	0.4043	0.4045	0.4043	0.4044	0.0109
0.4500	0.4551	0.4550	0.4552	0.4551	0.4551	0.0113
0.5000	0.5065	0.5065	0.5063	0.5062	0.5063	0.0127
0.5500	0.5564	0.5564	0.5565	0.5565	0.5565	0.0118
0.6000	0.6074	0.6074	0.6073	0.6075	0.6074	0.0123
0.6500	0.6575	0.6574	0.6575	0.6574	0.6574	0.0114
0.7000	0.7085	0.7084	0.7086	0.7084	0.7085	0.0121
0.7500	0.7592	0.7592	0.7591	0.7592	0.7592	0.0122
0.8000	0.8093	0.8093	0.8091	0.8090	0.8091	0.0114
0.8500	0.8606	0.8607	0.8606	0.8607	0.8607	0.0125
0.9000	0.9112	0.9112	0.9111	0.9112	0.9112	0.0124
0.9500	0.9611	0.9611	0.9612	0.9610	0.9611	0.0117
1.0000	1.0121	1.0122	1.0210	1.0220	1.0184	0.0184
1.0500	1.0628	1.0630	1.0629	1.0631	1.0630	0.0124
1.1000	1.1131	1.1133	1.1132	1.1133	1.1133	0.0121

1.1500	1.1644	1.1646	1.1645	1.1644	1.1645	0.0126
1.2000	1.2151	1.2152	1.2153	1.2151	1.2152	0.0127
1.2500	1.2655	1.2657	1.2656	1.2655	1.2656	0.0125
1.3000	1.3161	1.3163	1.3162	1.3161	1.3162	0.0125
1.3500	1.3673	1.3674	1.3672	1.3674	1.3673	0.0128
1.4000	1.4173	1.4174	1.4174	1.4175	1.4174	0.0125
1.4500	1.4677	1.4678	1.4679	1.4677	1.4678	0.0123
1.5000	1.5192	1.5193	1.5194	1.5193	1.5193	0.0129
1.5500	1.5693	1.5694	1.5693	1.5694	1.5694	0.0125
1.6000	1.6201	1.6201	1.6202	1.6201	1.6201	0.0126
1.6500	1.6710	1.6710	1.6710	1.6711	1.6710	0.0127
1.7000	1.7211	1.7211	1.7210	1.7213	1.7211	0.0124
1.7500	1.7717	1.7716	1.7715	1.7716	1.7716	0.0123
1.8000	1.8217	1.8217	1.8218	1.8279	1.8238	0.0132
1.8500	1.8733	1.8732	1.8734	1.8732	1.8733	0.0126
1.9000	1.9241	1.9239	1.9240	1.9241	1.9240	0.0126
1.9500	1.9736	1.9733	1.9737	1.9736	1.9735	0.0121
2.0000	2.0250	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบการอ่านค่าความต่างศักย์เครื่องโพรบยี่ห้อโฟรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน (FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER) โดยใช้แหล่งจ่ายค่าความต่างศักย์มาตรฐาน (PROGRAMMABLE POWER SUPPLY PSM-6003)

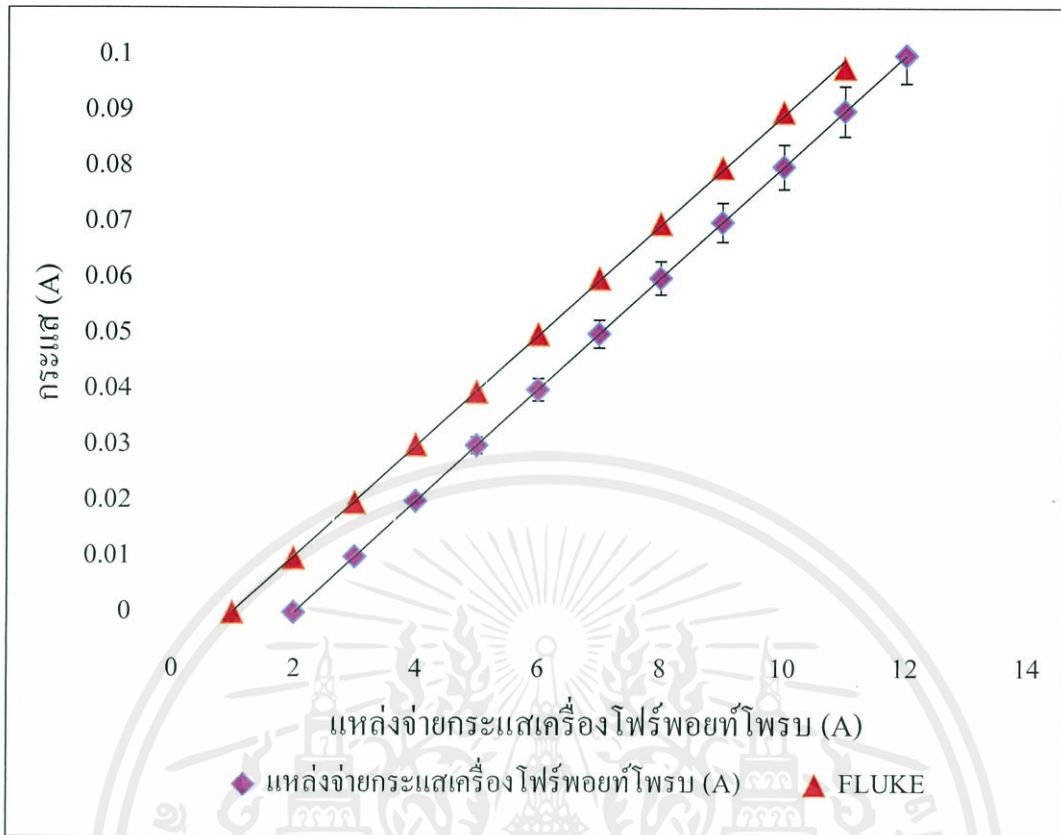
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่ากระแสของเครื่อง โฟร์พอยท์โพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน

(FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER)

แหล่งจ่ายกระแสเครื่อง โฟร์พอยท์โพรบ (A)	เครื่องวัดกระแสมาตรฐาน (A)				Standard (SD)	Standard Error (SE)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.00000
0.0100	0.0098	0.0097	0.0098	0.0098	0.00006	0.00003
0.0200	0.0196	0.0198	0.0197	0.0197	0.00010	0.00006
0.0300	0.0298	0.0304	0.0301	0.0301	0.00030	0.00017
0.0400	0.0401	0.0399	0.0389	0.0396	0.00064	0.00037
0.0500	0.0502	0.0501	0.0495	0.0499	0.00038	0.00022
0.0600	0.0598	0.0603	0.0597	0.0599	0.00032	0.00019
0.0700	0.0695	0.0701	0.0697	0.0698	0.00031	0.00018
0.0800	0.0802	0.0796	0.0798	0.0799	0.00031	0.00018
0.0900	0.0898	0.0900	0.0897	0.0898	0.00014	0.00008
0.1000	0.0974	0.0979	0.0980	0.0978	0.00033	0.00019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



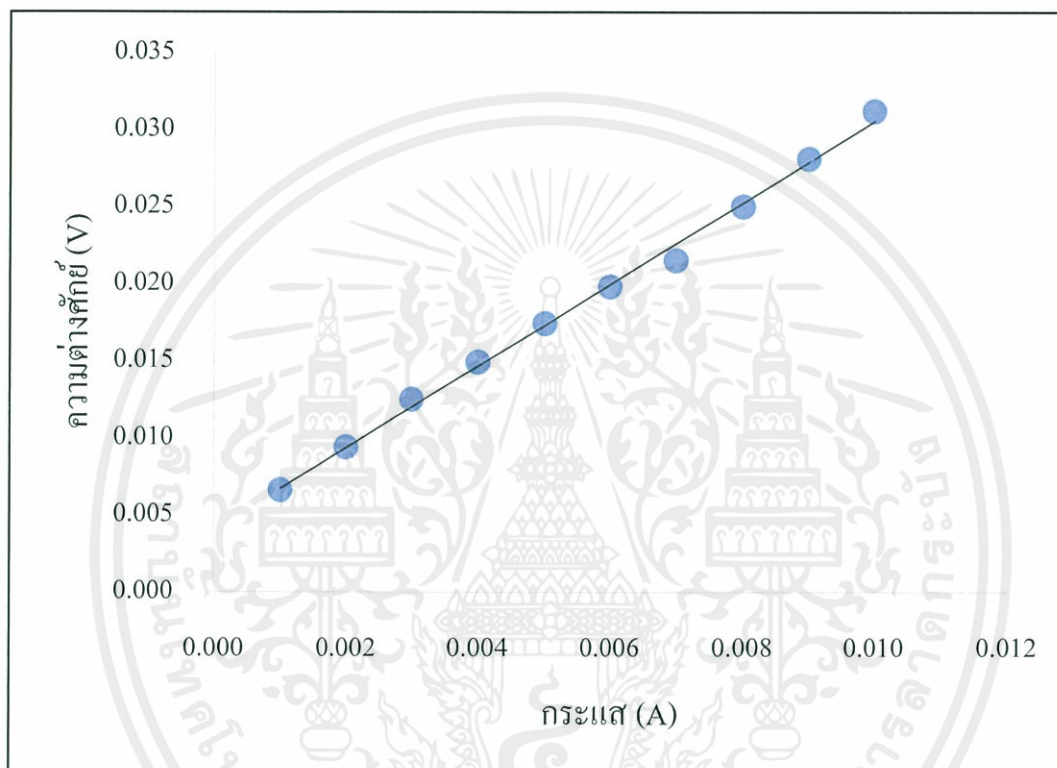
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบค่ากระแสของเครื่องโพรบกับเครื่องวัดมาตรฐาน
(FLUKE 45 DUAL DISPLAY MULTIMETER)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์
 เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂) ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว

กระแส (A)	ความต่างศักย์ (V)		ความต้านทาน (Ω)		ความต้านทานเชิงแผ่น (Ω/sq.)	
	V	V _{เฉลี่ย}	R	R _{เฉลี่ย}	R _{Sheet}	R _{Sheetเฉลี่ย}
0.0010	0.0066	0.0066	6.6000	6.5667	29.9112	29.9145
	0.0065		6.5000		29.9113	
	0.0066		6.6000		29.9210	
0.0020	0.0094	0.0094	4.7000	4.7000	20.3861	20.3817
	0.0093		4.6500		20.3791	
	0.0095		4.7500		20.3799	
0.0030	0.0125	0.0125	4.1667	4.1778	17.7031	17.7051
	0.0126		4.2000		17.7045	
	0.0125		4.1667		17.7076	
0.0040	0.0149	0.0148	3.7250	3.7083	16.0770	16.0783
	0.0148		3.7000		16.0791	
	0.0148		3.7000		16.0787	
0.0050	0.0174	0.0175	3.4800	3.5000	15.4621	15.4662
	0.0175		3.5000		15.4686	
	0.0176		3.5200		15.4679	
0.0060	0.0198	0.0197	3.3000	3.2889	14.7870	14.7890
	0.0197		3.2833		14.7900	
	0.0197		3.2833		14.7899	
0.0070	0.0215	0.0214	3.0714	3.0571	14.4318	14.4366
	0.0214		3.0571		14.4389	
	0.0213		3.0429		14.4390	
0.0080	0.0250	0.0251	3.1250	3.1417	14.1059	14.1062
	0.0251		3.1375		14.1029	
	0.0253		3.1625		14.1099	
0.0090	0.0281	0.0281	3.1222	3.1185	13.8423	13.8428
	0.0280		3.1111		13.8459	

	0.0281		3.1222		13.8401	
0.0100	0.0312	0.0313	3.1200	3.1300	13.5560	13.5516
	0.0313		3.1300		13.5569	
	0.0314		3.1400		13.5419	



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ในการวัดกระแสจกนาไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂) ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรแบบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

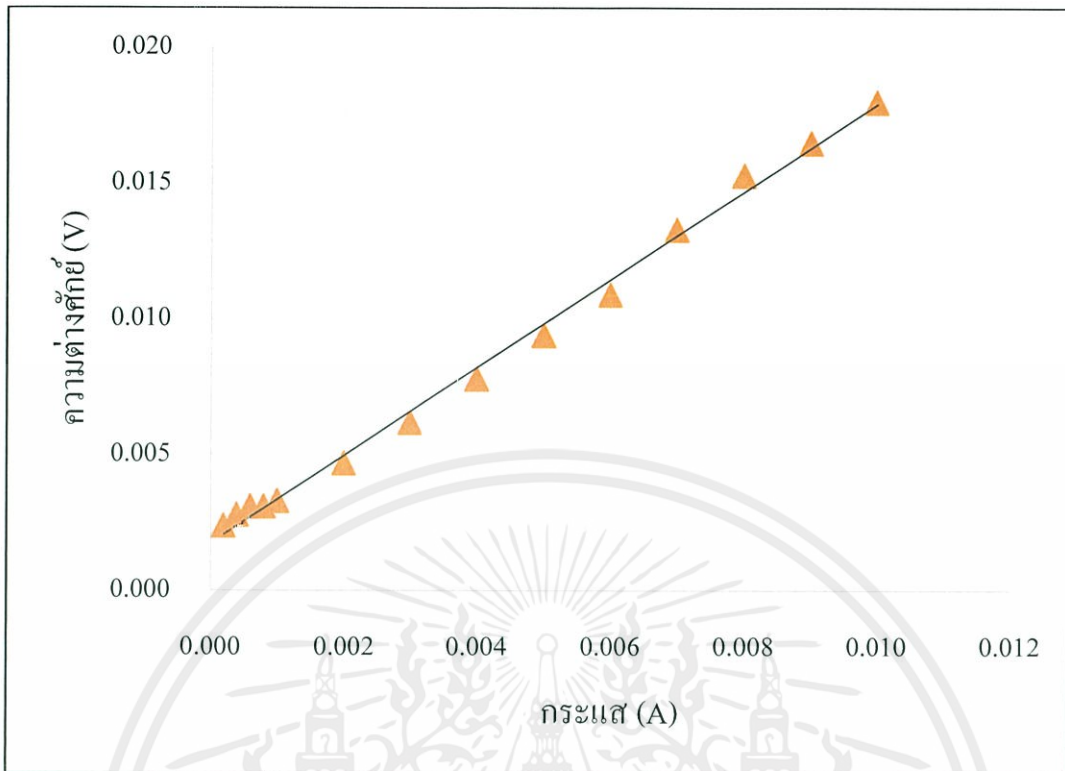
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์
เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂) ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบรูปแบบแวนเดอร์พาว

กระแส (A)	ความต่างศักย์ (V)		ความต้านทาน (Ω)		ความต้านทานเชิงแผ่น (Ω/sq.)	
	V	V _{เฉลี่ย}	R	R _{เฉลี่ย}	R _{Sheet}	R _{Sheetเฉลี่ย}
0.0002	0.0024	0.0024	12.0000	12.0000	54.3840	54.3840
	0.0024		12.0000		54.3799	
	0.0024		12.0000		54.3881	
0.0004	0.0028	0.0028	7.0000	7.0000	31.7240	31.7253
	0.0028		7.0000		31.7290	
	0.0028		7.0000		31.7230	
0.0006	0.0031	0.0031	5.1667	5.1667	22.6600	22.6601
	0.0031		5.1667		22.6601	
	0.0031		5.1667		22.6602	
0.0008	0.0031	0.0031	3.8750	3.8750	17.5615	17.5617
	0.0031		3.8750		17.5616	
	0.0031		3.8750		17.5620	
0.0010	0.0033	0.0033	3.3000	3.3000	14.9560	14.9564
	0.0033		3.3000		14.9565	
	0.0033		3.3000		14.9568	
0.0020	0.0047	0.0047	2.3500	2.3500	10.6502	10.6503
	0.0047		2.3500		10.6503	
	0.0047		2.3500		10.6504	
0.0030	0.0062	0.0062	2.0667	2.0667	9.3661	9.3663
	0.0062		2.0667		9.3664	
	0.0062		2.0667		9.3665	
0.0040	0.0078	0.0078	1.9500	1.9500	8.8374	8.8389
	0.0078		1.9500		8.8401	
	0.0078		1.9500		8.8392	
0.0050	0.0094	0.0094	1.8800	1.8800	8.5202	8.5205
	0.0094		1.8800		8.5204	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

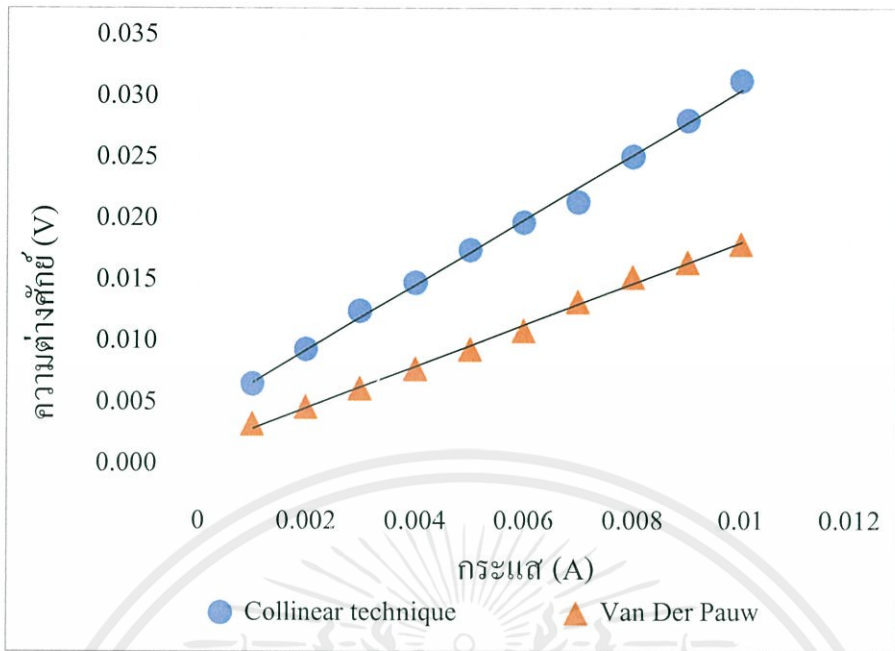
	0.0094		1.8800		8.5210	
0.0060	0.0109	0.0109	1.8167	1.8167	8.2331	8.2332
	0.0109		1.8167		8.2333	
	0.0109		1.8167		8.2332	
0.0070	0.0133	0.0133	1.9000	1.9000	8.6108	8.6106
	0.0133		1.9000		8.6101	
	0.0133		1.9000		8.6109	
0.0080	0.0153	0.0153	1.9125	1.9125	8.4485	8.4832
	0.0153		1.9125		8.5001	
	0.0153		1.9125		8.5011	
0.0090	0.0165	0.0165	1.8333	1.8333	8.3087	8.3097
	0.0165		1.8333		8.3100	
	0.0165		1.8333		8.3103	
0.0100	0.0180	0.0180	1.8000	1.8000	8.2029	8.2016
	0.0180		1.8000		8.2019	
	0.0180		1.8000		8.1999	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

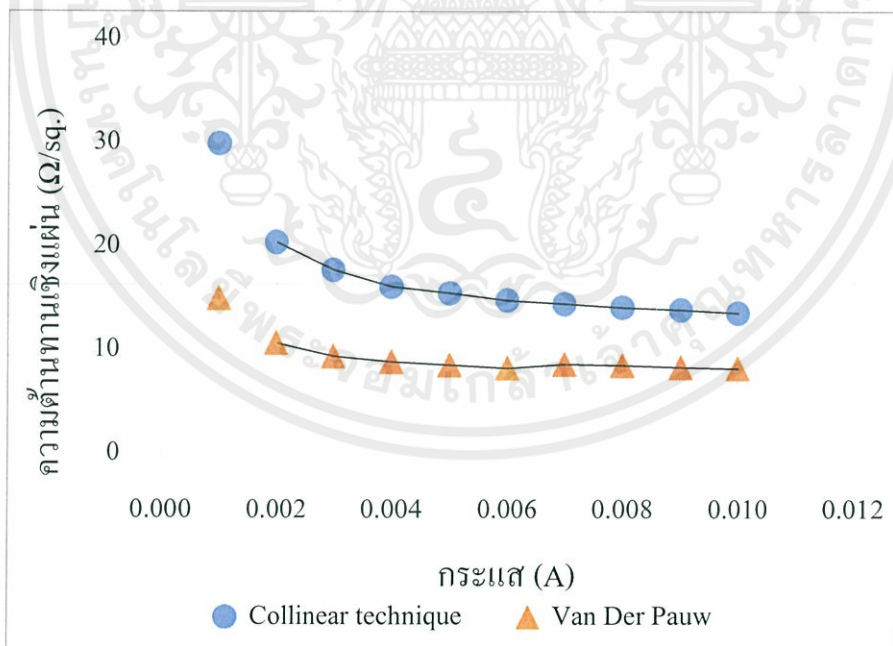


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ในการวัดกระแสจนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂) ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบรูปแบบแวนเดอร์พาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต่างศักย์ในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂) ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถวและเวนเดอร์พาว



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและความต้านทานเชิงแผ่นในการวัดกระแสจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน (F:SnO₂) ด้วยเครื่องโพร์พอยท์โพรบรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถวและเวนเดอร์พาว

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 เพื่อควบคุมระบบการวัด การคำนวณค่า และการแสดงผลเครื่องวัดความต้านทานของฟิล์มบางโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ อีกทั้งยังนำเครื่องที่สร้างขึ้นนี้มาประยุกต์ใช้ในการวัดกระจกนำไฟฟ้าชนิดเคลือบด้วยฟิล์มบางของทินไดออกไซด์เจือด้วยฟลูออรีน ($F:SnO_2$) โดยสร้างหัววัด 2 รูปแบบ คือ รูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว (Collinear four-point probe technique) และรูปแบบแวนเดอร์พาว (Van der Pauw mode) จากทดลองพบว่าค่าที่ได้จากหัววัดทั้ง 2 แบบ มีทิศทางเดียวกัน สำหรับรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถวมีสำหรับช่วงกระแสการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ $F:SnO_2$ ที่เหมาะสมคือ 0.004A-0.008A และรูปแบบแวนเดอร์พาวมีสำหรับช่วงกระแสการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของ $F:SnO_2$ ที่เหมาะสมคือ 0.008A-0.010A ช่วงกระแสดังกล่าวให้ค่าการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานเชิงแผ่นของกระจกนำไฟฟ้าจากบริษัทโซลาร์รอนิก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การพัฒนาเครื่องโพร์พอยท์โพรบต่อควรเพิ่มช่วงของการวัดกระแสที่ละเอียดขึ้นเพื่อทราบช่วงการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่แม่นยำที่สุด
2. การวัดรูปแบบสี่หัววัดเรียงแถวและรูปแบบแวนเดอร์พาว จากรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่วัดได้มีทิศทางเดียวกัน แต่หัววัดรูปแบบแวนเดอร์พาวค่าความต้านทานที่วัดได้แตกต่างจากรูปแบบสี่หัววัดแบบเรียงแถว อาจเนื่องมาจากการตัดชิ้นงานตัวอย่างไม่เหมาะสมกับหัววัด เพราะหัววัดรูปแบบแวนเดอร์พาวต้องให้หัววัดอยู่ที่ขอบชิ้นงานตัวอย่าง จึงควรมีการพัฒนาต่อไป
3. เขียนโปรแกรมเพื่อให้เลื่อนซ้าย-ขวาอัตโนมัติ ทำปุ่มควบคุมสวิทช์เพิ่มเติม เช่น สวิทช์ ON-OFF การใช้แหล่งจ่ายกระแสภายนอก (Current Source) และสวิทช์ ON-OFF ของมิเตอร์วัดจากภายนอก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะณใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/phy3_1.htm
- [2] A. Kay, M. Gratzel, 1996
- [3] นันทนัช วัฒนสุภิญญา, 2553, หน้า 2
- [4] Dr. Alan Doolittle, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology
- [5] นายมนูญ ปางพรหม, การสร้างและศึกษาลักษณะของเป่าสปัตเตอร์ริงที่ทำจากสังกะสีออกไซด์ (FABRICCATION AND CHARACTERISATION OF ZnO SPUTTERING), หน้า 53
- [6] J.C. Li,* Y. Wang, D.C. Ba, Vacumm and fluid engineering center, School of mechanical engineering and automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China
- [7] http://eng.vu.ac.th/mn/2009/~arnon/theching/elec_mn_lab/lab_sheet/Lab4.pdf
<http://203.172.182.172/~kriengsak/project/data/rectifier.htm>
- [8] http://elec.pnt.rmutl.ac.th/attachments/014_el_lesson3.pdf
- วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุลและชัยวัฒน์ ลีพิมพ์หมจิตร์วิไล, ฉบับ AT89C5x, หน้า 3
- [9] <http://www.oocities.org/siliconvalley/station/3169/mcs51.htm>
- [10] นายเปี่ยมศักดิ์ นัยกุล 503040244-4, นายวศกร คำเพราะ 503040256-7, หมายเลขโครงการ

COE2010-05, เครื่องตั้งสายกีตาร์และเมโทรโนม ระยะที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม ลิขสิทธิ์เป็นของเจ้าของ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] <http://www.kmitl.ac.th/~ktapinun/teaching/file/book9.pdf>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[12] <http://dk.coe.psu.ac.th/lecture/beslide/51BE08%20FET%20520123.pdf>

[13] <http://www.kmitl.ac.th/~s2011041/Opamp.pdf>

[14] <http://www.rtna.ac.th/subject/Microprocessor/13.pdf>

[15] <http://www.kmitl.ac.th/~kswichit/index.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้