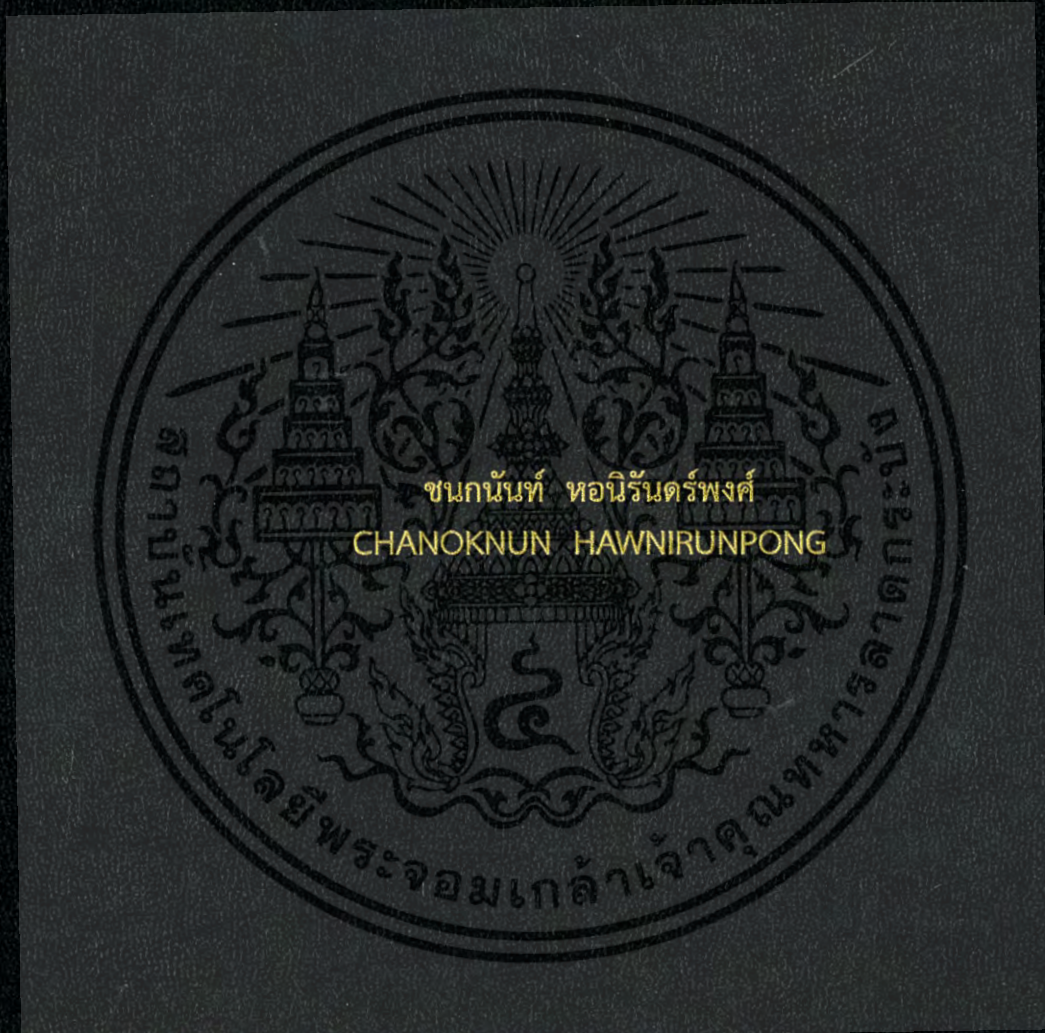


ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน
ด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี

GROUND-IMPEDANCE MONITORING NETWORK
BASED ON MULTI XBEE MODULE TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-103

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน
ด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี

GROUND-IMPEDANCE MONITORING NETWORK
BASED ON MULTI XBEE MODULE TECHNOLOGY



T148769

ชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์

CHANOKNUN HAWNIRUNPONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148769**
วันเดือนปี **23 ๗๐. 2560**

b. **00267080**
f.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-020-103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GROUND-IMPEDANCE MONITORING NETWORK
BASED ON MULTI XBEE MODULE TECHNOLOGY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-020-103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี
Thesis Title Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module
Technology
นักศึกษา นายชนกันันท์ หอนิรันดร์พงศ์
รหัสประจำตัว 57601403
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-103

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กীরติ	ชยะกุลศิริ	
รศ.ดร.สมชาติ	จิรวិภากร	
ผศ.ดร.ชาย	ชมภูอินไหว	
ผศ.ดร.นิรุช	จิรสวรรณกุล	
ผศ.ดร.เชาว์	ชมภูอินไหว	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงจากเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้
วันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี
นักศึกษา	นายชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์
รหัสประจำตัว	57601403
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอหลักการและวิธีการในการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คูโดยใช้เทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บีสร้างเป็นระบบโครงข่ายการวัด ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักดังนี้ ส่วนแรกคือส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measuring Part) ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวประมวลผลหลักในการทำงาน ได้แก่ การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog Converter, DAC) สร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1.6 kHz เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน ตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC) เพื่อวัดค่ากระแสที่ไหลภายในลูปความต้านทานการต่อลงดิน การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) กับโมดูลเอ็กซ์บี และการแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินรวมถึงการแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์ภายนอก (Displaying and Alarming) ส่วนที่สองคือส่วนเครือข่ายการสื่อสาร (Communication Network) เป็นการนำเอาเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module Technology) มาใช้เพื่อสร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ที่สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินกับคอมพิวเตอร์แบบรวมศูนย์ที่ใช้เป็นตัวแสดงผล ควบคุม และประมวลผล โดยทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011) และส่วนสุดท้ายคือส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Friendly Interface) เป็นการนำเอาโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 มาใช้เขียนหน้าต่างโปรแกรมในการจัดการและแสดงผลข้อมูลต่อผู้ใช้งาน (User Interface, UI) จากผลการทดลองพบว่าส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินสามารถวัดค่าความต้านทานได้ตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ ± 2.99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเครือข่ายการสื่อสารสามารถรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ตามต้องการ และส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานสามารถแสดงผลแบบเวลาจริง (Real Time Monitoring) และแจ้งเตือนเมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงที่กำหนด นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนขอบเขตบน-ล่างในการแจ้งเตือน และสามารถบันทึกข้อมูลออกมาในรูปแบบของไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic File Data Logger) เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์ต่อไป

Thesis	Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology
Student	Mr. Chanoknun Hawwirunpong
Student ID.	57601403
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chow Chompoo-inwai

ABSTRACT

This thesis proposes the design and implementation of the ground-impedance monitoring network based on multi XBee module technology. The proposed system consists of three major sections. The first one is the ground-impedance measuring part which mainly utilized the clamp-on magnetic core as a ground-impedance measuring device and Arduino microcontroller board as a central processing unit (CPU). The proposed microcontroller board is doing digital-to-analog converter (DAC) job generating the 1.6 kHz sinusoidal waveform to induce current in the ground loop complying with IEEE-81 (2012) standard, digital-to-analog converters (ADC) job to measure such a current, serial port communication (UART) to communicate with XBee module and displaying and alarming with an external devices. The second part is the communication network based on XBee module technology. Three XBee-PRO Series 1 modules have been used. The first two XBee modules act like an individual transmitter receiving data from Arduino board and sending such a data to another XBee module which acts as a network coordinator. The operational frequency of the proposed network is 2.4 GHz according to IEEE-802.15.4 (2011) standard. All of the receiving individual ground-impedance data will also be sending to either PC or laptop via serial port. The last part is the user friendly interface (UI). Microsoft Visual Studio 2013 version is used for this matter. The UI was designed such that it is simple, user-friendly, rich of features and customizable. The key features presented here in this research are: data mining/sorting all acquired ground-impedance values with time stamp, alarming when critical criteria happened (custom configurations) and data logging. After the completion of design and implementation, the extensive experimental results confirm that the proposed ground-impedance measuring device works accurately at the range of 1 to 100 Ohms with a maximum percentage of error at $\pm 2.99\%$. The proposed communication network is able to send/receive data wirelessly and reliably. The proposed UI is also able to function as desired.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากความกรุณาของท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิจัยรวมถึงในเรื่องการใช้ชีวิตอันเป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่มีคุณค่าแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.): ระดับปริญญาโท (Research and Researchers for Industries: RRI) และบริษัท พรีเมเทค (ประเทศไทย) จำกัด ที่ร่วมกันให้การสนับสนุนทุนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณพัชรินทร์ เจษฎาภิชน ผู้จัดการฝ่ายขาย บริษัท พรีเมเทค (ประเทศไทย) จำกัด และคุณชฎาพร สุขภูวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานกับทางบริษัท

ขอขอบคุณ คุณสุทธิพงศ์ บุญทากลาง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและคำแนะนำในการทำวิจัยอันเป็นประโยชน์เสมอมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์นราตล โชติวรรณพร ที่ให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้ออุปกรณ์สำหรับทำการทดลองจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ บุคลากรผู้ทรงความรู้ทุกท่านในศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมการส่องสว่าง (Energy System and Illumination Research Center, ESIRC) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัยรวมถึงให้ความช่วยเหลือในด้านสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณน้ำโอภาส เทพวารินทร์ อาจารย์จิรศักดิ์ ปรีชาวีรกุล คุณวรวัฒน์ ตั้งศรีอนุกุล คุณวิษณุ ต่อตระกูล และอีกหลายท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ซึ่งข้าพเจ้าไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา คุณพ่อนริศ หอนิรันดร์พงศ์ และคุณแม่วิไล เทพวารินทร์ ตลอดจนทุกท่านที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ชนกันท์ หอนิรันดร์พงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ลำดับขั้นตอนของการทำวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 กฎของโอห์ม	5
2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า.....	6
2.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ.....	7
2.3.2 ความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	9
2.3.2.1 ความสูญเสียในแกนเหล็ก.....	9
2.3.2.2 ความสูญเสียในขดลวดตัวนำ.....	13
2.3.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	14
2.3.4 หม้อแปลงเครื่องมือวัด	16
2.3.4.1 หม้อแปลงแรงดัน	16
2.3.4.2 หม้อแปลงกระแส	17
2.4 วงจรกรองความถี่.....	18
2.4.1 ประเภทของวงจรกรองความถี่.....	21
2.4.1.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	21
2.4.1.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน.....	22
2.4.1.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน.....	23
2.4.1.4 วงจรกรองกำจัดแถบความถี่.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 วงจรกรองความถี่อันดับสอง.....	26
2.4.2.1 วงจรกรองความถี่ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology.....	26
2.4.2.2 วงจรกรองความถี่ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Multiple Feedback Topology.....	27
2.5 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง	29
2.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน	30
2.6.1 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเมกเกอร์แบบดั้งเดิม	31
2.6.2 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยว.....	31
2.6.3 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่.....	31
2.7 การทดสอบการต่อลงดิน	32
2.7.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน.....	32
2.7.2 การวัดค่าความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน.....	36
2.7.2.1 วิธีการวัดแบบหกสปีดสองเปอร์เซ็นต์.....	39
2.7.2.2 วิธีการวัดแบบเจาะจงแท่งโลหะ	42
2.7.2.3 วิธีการวัดแบบสองจุด	43
2.7.2.4 วิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ	44
2.7.2.5 วิธีการวัดแบบสามจุด	44
2.8 หลักการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์คู่.....	46
2.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
2.9.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO Rev3.....	48
2.9.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3	49
2.10 เทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี.....	51
2.10.1 รูปแบบของเครือข่ายการสื่อสาร	52
2.10.2 โปรโตคอลซิกบี.....	53
2.10.3 มาตรฐาน IEEE-802.15.4	55
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง.....	56
3.1 ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน.....	57
3.1.1 ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์.....	58
3.1.2 แกนแม่เหล็ก	62
3.1.2.1 การออกแบบแคลมป์แรงดัน.....	63
3.1.2.2 การออกแบบแคลมป์กระแส.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.3 ความต้านทานการต่อลงดินจำลอง.....	66
3.1.4 ส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน.....	68
3.1.5 ส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน.....	73
3.2 ส่วนเครือข่ายการสื่อสาร.....	77
3.3 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน.....	78
บทที่ 4 การทดลองและสรุปผล.....	80
4.1 การทดลองส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน.....	80
4.1.1 การจำลองส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม Proteus.....	80
4.1.2 การจำลองวงจรกรองแถบความถี่ผ่านด้วยโปรแกรม Multisim.....	82
4.1.3 การจำลองส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานด้วยโปรแกรม Proteus.....	85
4.1.4 การจำลองส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือนด้วยโปรแกรม Proteus.....	88
4.1.5 การทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้น.....	90
4.1.6 การทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น.....	95
4.1.7 การทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น.....	100
4.2 การทดลองส่วนเครือข่ายการสื่อสาร.....	102
4.2.1 การทดลองการติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บี.....	102
4.2.2 การทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลของโมดูลเอ็กซ์บีรุ่น XBee-PRO Series 1.....	104
4.3 การทดลองส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน.....	106
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
เอกสารอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก ก แผนผังวงจรบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ที่ใช้ในงานวิจัย.....	114
ภาคผนวก ข Datasheet ของโมดูลเอ็กซ์บี.....	117
ภาคผนวก ค แผนผังการเขียนวงจรจำลองด้วยโปรแกรม Proteus.....	121
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการ.....	127
ภาคผนวก จ การเข้าร่วมประชุมเสนอผลงานและนิทรรศการที่จัดโดย สกว.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรความถี่แบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ.....	19
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามชนิดของดิน.....	32
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามเปอร์เซ็นต์เกลือแร่ในดินเหนียว ปนทรายความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ ตามน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส.....	33
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามอุณหภูมิในดินเหนียวปนทราย ความชื้น 15.2 เปอร์เซ็นต์ ตามน้ำหนัก	33
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตามน้ำหนัก..	33
ตารางที่ 2.6 ตัวคูณของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่จำนวนหลักดินตั้งแต่สองถึงยี่สิบสี่หลัก.....	38
ตารางที่ 2.7 ระบุแนะนำสำหรับการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ระยะ ความลึกต่างๆ ด้วยวิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์	41
ตารางที่ 2.8 ข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3.....	49
ตารางที่ 2.9 ข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3	50
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละรุ่น.....	52
ตารางที่ 2.11 พื้นที่ใช้งานและอัตราการรับส่งข้อมูลของแต่ละย่านความถี่	55
ตารางที่ 3.1 การแปลงค่าในตารางอ้างอิงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า	60
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการต่อสายไฟเข้าขั้วต่อของค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม	66
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดและคำนวณค่าความต้านทานจากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus	86
ตารางที่ 4.2 ผลการแจ้งเตือนจากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus	89
ตารางที่ 4.3 ผลการทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นด้วย เครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 91	
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้ บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3.....	96
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานจากอุปกรณ์ความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นด้วย เครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 Kumwell รุ่น KIGM-01 และต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino ทั้งสองรุ่น	101
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ในการตั้งค่าโมดูลเอ็กซ์บีให้เชื่อมต่อในรูปแบบดาว	103

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย.....	5
รูปที่ 2.2 วงจรการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับภาระทางไฟฟ้า.....	7
รูปที่ 2.3 การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับในวงจรแม่เหล็ก.....	7
รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ.....	8
รูปที่ 2.5 ลูปฮีสเทอรีซิสของแกนเหล็ก.....	10
รูปที่ 2.6 ลูปฮีสเทอรีซิสของ แกนเหล็กที่มีความสูญเสียฮีสเทอรีซิสมาก (ก) และแกนเหล็กที่มีความสูญเสียฮีสเทอรีซิสน้อย (ข).....	11
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กของเนื้อสารแต่ละชนิด.....	12
รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของแกนเหล็กที่เกิดกระแสไหลวน.....	13
รูปที่ 2.9 เส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	15
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูล (ก) และแผนภาพเฟเซอร์ (ข) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถ่ายโอนมาอยู่ทางด้านปฐมภูมิ.....	15
รูปที่ 2.12 วงจรการเชื่อมต่อหม้อแปลงแรงดัน.....	17
รูปที่ 2.13 วงจรการเชื่อมต่อ (ก) และวงจรแม่เหล็ก (ข) ของหม้อแปลงกระแส.....	17
รูปที่ 2.14 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่แต่ละประเภทในอุดมคติ.....	18
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่งถึงยี่สิบ.....	20
รูปที่ 2.16 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอคทีฟ (ข) อันดับหนึ่ง.....	21
รูปที่ 2.17 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	22
รูปที่ 2.18 วงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟอันดับ n	22
รูปที่ 2.19 วงจรรองความถี่สูงผ่าน แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอคทีฟ (ข) อันดับหนึ่ง.....	23
รูปที่ 2.20 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่สูงผ่าน.....	23
รูปที่ 2.21 วงจรรองแถบความถี่ผ่าน แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอคทีฟ (ข).....	24
รูปที่ 2.22 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองแถบความถี่ผ่าน.....	24
รูปที่ 2.23 วงจรรองกำจัดแถบความถี่แคบ แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอคทีฟ (ข).....	25
รูปที่ 2.24 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองกำจัดแถบความถี่แคบ.....	25
รูปที่ 2.25 วงจรรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK.....	26
รูปที่ 2.26 วงจรรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB.....	27
รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านชนิด Butterworth (ก) Bessel (ข) Elliptic (ค) Chebyshev Type I (ง) และ Chebyshev Type II (จ).....	28
รูปที่ 2.28 ลักษณะการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.29 อัตราการสู่มตัวอย่างเมื่อความถี่ในการสู่มตัวอย่างเท่ากับ 1.2 เท่า (ก) 3 เท่า (ข) 6 เท่า (ค) และ 12 เท่า (ง) ของความถี่สัญญาณที่นำมาประมวลผล	30
รูปที่ 2.30 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน เมกเกอร์แบบดั้งเดิม (ก) แบบแคลมป์เดียว (ข) และแบบแคลมป์คู่ (ค)	30
รูปที่ 2.31 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์	31
รูปที่ 2.32 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตาม เกลือแรในดิน (ก) อุณหภูมิ (ข) และความชื้นในดิน (ค)	34
รูปที่ 2.33 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีการวัดแบบสี่จุด	35
รูปที่ 2.34 องค์ประกอบของความต้านทานการต่อลงดิน	36
รูปที่ 2.35 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานการต่อลงดินตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ หลักรดิน (ก) และระยะความลึกของหลักรดิน (ข)	37
รูปที่ 2.36 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์	39
รูปที่ 2.37 ความต้านทานการต่อลงดินเมื่อหลักรดินช่วยวัดแรงดันอยู่ในพื้นที่ส่งผล	40
รูปที่ 2.38 ความต้านทานการต่อลงดินเมื่อหลักรดินช่วยวัดแรงดันอยู่นอกพื้นที่ส่งผล	41
รูปที่ 2.39 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบเจาะจงแทงโลหะ	42
รูปที่ 2.40 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบสองจุด	43
รูปที่ 2.41 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแทงโลหะ	44
รูปที่ 2.42 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบสามจุด	45
รูปที่ 2.43 วงจรสมมูลของระบบมัลติกราวด์นิวตรอน	46
รูปที่ 2.44 วงจรสมมูลของการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่	47
รูปที่ 2.45 องค์ประกอบของบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3	49
รูปที่ 2.46 องค์ประกอบของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3	50
รูปที่ 2.47 โครงสร้างและขาใช้งานของโมดูลเอ็กซ์บีรุ่น XBee-PRO Series 1	51
รูปที่ 2.48 รูปแบบของเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้โมดูลเอ็กซ์บี	53
รูปที่ 2.49 โครงสร้างชั้นโปรโตคอลของซิกบี	54
รูปที่ 2.50 ย่านความถี่ในการใช้งานของมาตรฐาน IEEE-802.15.4	55
รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน	56
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน	57
รูปที่ 3.3 วงจรการเชื่อมต่อชิป DAC0800 กับพอร์ตใช้งานของบอร์ด Arduino	58
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าในตารางอ้างอิงของสัญญาณรูปคลื่นไซน์เทียบกับเวลา	59
รูปที่ 3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟอันดับสองที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ	61
รูปที่ 3.6 วงจรขยายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.7 ลักษณะภายนอก (ก) และองค์ประกอบภายใน (ข) ของแกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่.....	62
รูปที่ 3.8 แผนผังการเลื่อนระดับแรงดันอ้างอิง.....	64
รูปที่ 3.9 ขนาดของแกนแม่เหล็ก.....	65
รูปที่ 3.10 ความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่ใช้ในงานวิจัย.....	66
รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่สามารถปรับกำลังขยายได้.....	69
รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับค่า D_n	69
รูปที่ 3.13 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองชนิด Butterworth ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology ที่ใช้ในงานวิจัย.....	71
รูปที่ 3.14 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน.....	71
รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับแอลซีดีแบบขนาน.....	73
รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 กับแอลซีดีแบบอนุกรม.....	74
รูปที่ 3.17 วงจรการเชื่อมต่อสวิตช์ปุ่มกดกับขาใช้งานของบอร์ด Arduino.....	74
รูปที่ 3.18 วงจรการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับอุปกรณ์แจ้งเตือน.....	75
รูปที่ 3.19 ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ประกอบสร้างขึ้น.....	75
รูปที่ 3.20 ต้นแบบเครื่องวัดแบบระบบโครงข่ายการวัดที่ใช้อยู่บนบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3.....	76
รูปที่ 3.21 ต้นแบบเครื่องวัดแบบพกพาที่ใช้อยู่บนบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3.....	76
รูปที่ 3.22 เครื่องข่ายการสื่อสารรูปแบบดาว.....	77
รูปที่ 3.23 แผนผังการเชื่อมต่อและการทำงานของเครื่องข่ายการสื่อสารแบบไร้สายด้วยโมดูลเอ็กซ์บี.....	77
รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ออกแบบขึ้น.....	78
รูปที่ 3.25 ส่วนเครื่องข่ายการสื่อสารและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ประกอบสร้างขึ้น.....	79
รูปที่ 4.1 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม Proteus.....	81
รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus.....	81
รูปที่ 4.3 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB ด้วยโปรแกรม Multisim.....	82
รูปที่ 4.4 การตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูด (ก) และมุมเฟส (ข) ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB.....	83
รูปที่ 4.5 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK ด้วยโปรแกรม Multisim.....	84
รูปที่ 4.6 การตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูด (ก) และมุมเฟส (ข) ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK.....	84
รูปที่ 4.7 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานด้วยโปรแกรม Proteus.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่จำลองขึ้นกับ ค่าความต้านทานที่กำหนด.....	87
รูปที่ 4.9 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัด ที่จำลองขึ้นกับค่าความต้านทานที่กำหนด	87
รูปที่ 4.10 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือนด้วยโปรแกรม Proteus....	88
รูปที่ 4.11 การทวนสอบความถูกต้องของค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นด้วยเครื่อง ทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 (ก) และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 (ข).90	90
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 กับค่าความต้านทานที่กำหนด	93
รูปที่ 4.13 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ การต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 กับค่าความต้านทานที่กำหนด.....	93
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 กับค่าความต้านทานที่กำหนด.....	94
รูปที่ 4.15 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ การต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 กับค่าความต้านทานที่กำหนด	94
รูปที่ 4.16 การทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้ บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 (ก) และรุ่น MEGA 2560 Rev3 (ข).....	95
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด.....	98
รูปที่ 4.18 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้ บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด	98
รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด	99
รูปที่ 4.20 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้ บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด.....	99
รูปที่ 4.21 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยเครื่องทดสอบ การต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471	100
รูปที่ 4.22 การสร้างลูปความต้านทานการต่อลงดิน	101
รูปที่ 4.23 การทดลองวัดค่าความต้านทานจากลูปความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นด้วยเครื่อง ทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 (ก) Kumwell รุ่น KIGM-01 (ข) และต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino ทั้งสองรุ่น (ค)	101
รูปที่ 4.24 แผนผังการทดลองติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บีในรูปแบบดาว.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองรับส่งข้อมูลระหว่าง Router 1 Router 2 และ Coordinator	103
รูปที่ 4.26 แผนผังการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายกรณีที่ 1.....	104
รูปที่ 4.27 แผนผังการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายกรณีที่ 2.....	105
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายกรณีที่ 1 (ก) และกรณีที่ 2 (ข).....	105
รูปที่ 4.29 การแสดงผลของหน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน.....	106
รูปที่ 4.30 ไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ .xls (ก) และ .csv (ข) ที่บันทึกจากโปรแกรม.....	107



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) ในปัจจุบันสามารถแบ่งเป็น 3 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้า (Generation System) ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Transmission System) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) ซึ่งระบบดังกล่าวจำเป็นต้องมีระบบการต่อลงดิน (Grounding System) ที่ถูกต้องและเหมาะสมตรงตามมาตรฐาน โดยระบบการต่อลงดินทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดสภาวะผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น กระแสฟ้าผ่า (Lightning Strikes) กระแสลัดวงจร (Short-Circuit Current) กระแสรั่วไหล (Leakage Current) การถ่ายเทประจุไฟฟ้าสถิต (Static Discharges) รวมถึงสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าและความถี่วิทยุ (EMI and RFI Signals) หรือความผิดปกติอื่นๆ ให้ไหลผ่านลงสู่ดิน เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ในบริเวณที่เกิดสภาวะผิดปกติดังกล่าว [1-2] ดังนั้นแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของระบบการต่อลงดินหรือค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance, Resistance to Ground) จึงต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ หรืออย่างมากที่สุดไม่ควรเกินค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ซึ่งระบุไว้ว่า “ค่าความต้านทานการต่อลงดินต้องมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม ยกเว้น พื้นที่ที่ยากในการปฏิบัติและการไฟฟ้าฯ เห็นชอบ ยอมให้ค่าความต้านทานของหลักดินกับดินต้องไม่เกิน 25 โอห์ม หากทำการวัดแล้วยังมีค่าเกิน ให้ปักหลักดินเพิ่มอีก 1 แท่ง” [3-4]

ในความเป็นจริงนั้นค่าความต้านทานการต่อลงดินอาจเปลี่ยนแปลงได้อยู่เสมอขึ้นกับปัจจัยต่างๆ [2, 5-8] ได้แก่ เกลือแร่ในดิน (Saline Water) องค์ประกอบของดิน (Compositions) ขนาดของอนุภาคดิน (Size of Particles) ความหนาแน่นของดิน (Compactness) อุณหภูมิ (Temperature) ความชื้นในดิน (Moisture) ฤดูกาล (Weather Conditions) [9] และจำนวนหลักดิน (Number of Ground Electrodes) [10] เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการตรวจวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินอยู่เสมอ ทำให้ต้องมีระบบการวัดและแสดงผลค่าดังกล่าว และแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นกับค่าความต้านทานการต่อลงดิน เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น และสามารถดำเนินการแก้ไขปัญหาได้อย่างทันท่วงที

ในปัจจุบันเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ (Clamp-on Ground-Impedance Tester) ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม่ต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในการวัด ไม่ต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด สามารถวัดขณะที่ระบบยังทำงานอยู่ได้ โดยทำการคล้องเครื่องวัดเข้ากับหลักดินจากนั้นค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้จะแสดงบนหน้าจอของเครื่องวัดในเวลาอันสั้น [11] แต่เครื่องวัดดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้านราคาของผลิตภัณฑ์และไม่มีฟังก์ชันการทำงานเสริมที่สามารถส่งข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้แบบไร้สายไปแสดงผลและเก็บข้อมูล ณ ห้องควบคุม งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยมีจุดประสงค์หลักคือเพื่อประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดที่มีฟังก์ชันการทำงานเสริมที่สามารถส่งข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบไร้สายไปแสดงผลและเก็บข้อมูลยังคอมพิวเตอร์แบบรวมศูนย์โดยใช้ต้นทุนต่ำ [12-13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ที่สามารถติดตั้งใช้งานได้จริง
2. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างเครือข่ายการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายโดยใช้เทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี
3. เพื่อศึกษาและออกแบบระบบการจัดการข้อมูลและแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 เป็นตัวประมวลผลหลัก
2. ต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินได้ในช่วง 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์
3. ต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นสามารถแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้แบบเวลาจริงผ่านหน้าจอแอลซีดีและแจ้งเตือนด้วยอุปกรณ์แจ้งเตือนภายนอกเมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนด
4. ต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นสามารถส่งข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้ผ่านโครงข่ายการสื่อสารแบบไร้สายด้วยโมดูลเอ็กซ์บีโดยใช้การสื่อสารรูปแบบดาว
5. หน้าต่างของโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 สามารถแสดงผลและเก็บบันทึกข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินออกมาในรูปแบบของไฟล์อิเล็กทรอนิกส์

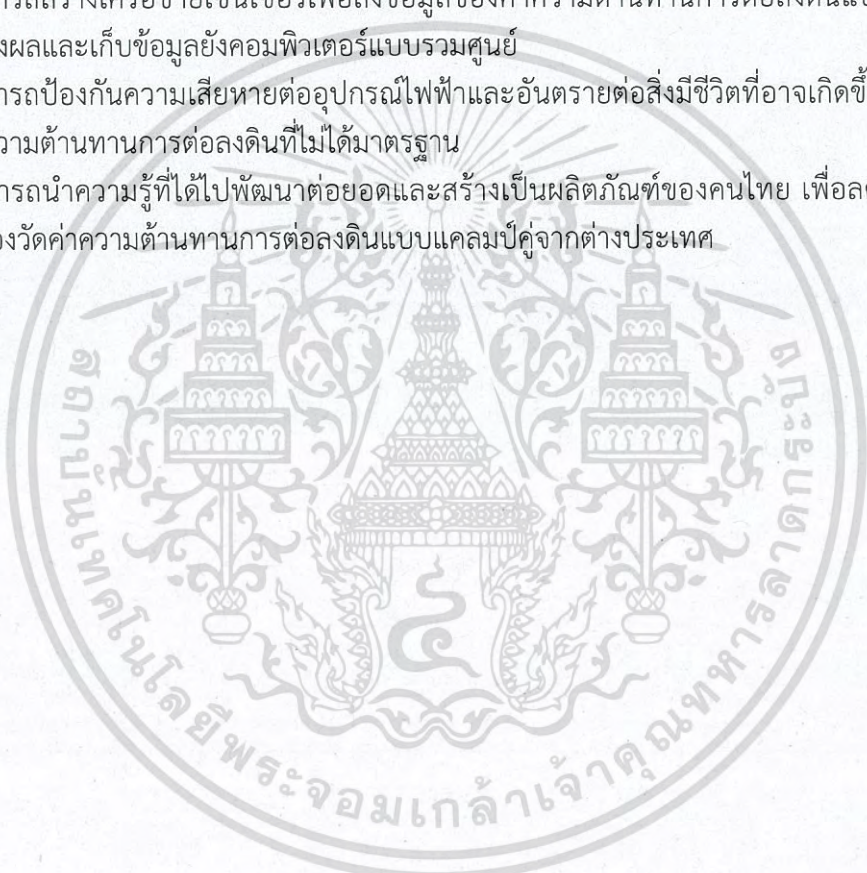
1.4 ลำดับขั้นตอนของการทำวิจัย

1. สืบค้นและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษามาตรฐานของระบบการต่อลงดินและเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน
3. ออกแบบและประกอบสร้างส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน
4. ออกแบบและสร้างส่วนเครือข่ายการสื่อสาร
5. ออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน
6. ทดลองและบันทึกผลการวิจัยของระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้น
7. วิเคราะห์และทวนสอบผลการทดลองเพื่อปรับแก้ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดสูงสุดไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์
8. สรุปผลการวิจัยและตีพิมพ์เป็นบทความวิชาการและรายงานเพื่อเผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ ได้จำนวน 1 ชุด และสามารถนำต้นแบบเครื่องวัดดังกล่าวสร้างเพิ่มเป็นหลายชุดได้ เพื่อขยายเป็นเครือข่ายของการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน
2. สามารถวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินได้ โดยเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นมีความเที่ยงตรงแม่นยำของการวัดในช่วง 1 ถึง 100 โอห์ม ได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐาน
3. สามารถสร้างเครือข่ายเซ็นเซอร์เพื่อส่งข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบไร้สายไปแสดงผลและเก็บข้อมูลยังคอมพิวเตอร์แบบรวมศูนย์
4. สามารถป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ไม่ได้มาตรฐาน
5. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ของคนไทย เพื่อลดการนำเข้าเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่จากต่างประเทศ



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัย เพื่อออกแบบและประกอบสร้างระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีของโมดูลอิเล็กทรอนิกส์ปี ประกอบด้วยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง กฎของโอห์ม หม้อแปลงไฟฟ้า วงจรกรองความถี่ ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน การทดสอบการต่อลงดิน หลักการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์คู่ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัย และเทคโนโลยีของโมดูลอิเล็กทรอนิกส์ปี โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

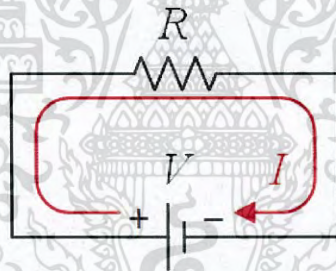
เครื่องวัดแบบแคลมป์โดยทั่วไปแล้วใช้ในงานด้านการวัดกระแสและมิงงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องวัดกระแสแบบแคลมป์ออกมามากมาย [14-17] เนื่องจากมีขั้นตอนในการวัดที่สะดวกและรวดเร็วเพียงทำการคล้องเครื่องมือวัดเข้ากับสายไฟที่ต้องการวัดค่ากระแส จึงเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่งานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้งานเครื่องวัดแบบแคลมป์ในการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินยังมีจำนวนไม่มากนัก ในปี 2006 ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์แบบใหม่ที่สามารถปรับความถี่ในการวัด [11] และได้มีการศึกษาชนิดของเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันว่าสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ เครื่องวัดแบบดั้งเดิม (Traditional Megger) เครื่องวัดแบบแคลมป์เดี่ยว (Single Clamp) และเครื่องวัดแบบแคลมป์คู่ (Double Clamps) โดยแบบดั้งเดิม มีข้อจำกัดคือต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในขั้นตอนการวัด ต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด ต้องอาศัยมนุษย์ในการสร้างหลักดินช่วย แบบแคลมป์เดี่ยว มีข้อดีที่เหนือกว่าแบบดั้งเดิมคือ ไม่ต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในการวัด ไม่ต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด แต่ยังคงมีความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดต่ำ แบบแคลมป์คู่ มีข้อดีที่เหมือนกับแบบแคลมป์เดี่ยวทุกประการและมีความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดสูง แต่ยังคงมีข้อจำกัดด้านราคาของผลิตภัณฑ์และไม่สามารถส่งข้อมูลของค่าความต้านทานที่วัดได้แบบไร้สายไปแสดงผลและเก็บข้อมูล ณ ห้องควบคุม ต่อมาในปี 2007 เริ่มมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้โมดูลอิเล็กทรอนิกส์ปีในการส่งข้อมูลของค่าพารามิเตอร์แบบไร้สายสำหรับการเฝ้าสังเกตการณ์ (Monitoring) [18-20] และในปัจจุบันเริ่มมีการนำเอาโมดูลอิเล็กทรอนิกส์ปีมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในการเฝ้าสังเกตการณ์ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า และการควบคุมการบริหารจัดการการใช้งานของภาระทางไฟฟ้าสำหรับบ้านอัจฉริยะ (Smart Home) เช่น [21-23] เนื่องจากโมดูลอิเล็กทรอนิกส์ปีสามารถสื่อสารแบบไร้สายโดยมีอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำและไม่สูงมากและมีจุดเด่นคือ ราคาไม่แพง กินกำลังไฟฟ้าต่ำ สามารถใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศได้ดี และทำงานได้ทุกสภาพแวดล้อม จึงเหมาะสำหรับเป็นอุปกรณ์ในการเฝ้าสังเกตการณ์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการการตรวจวัดอยู่เป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษา ออกแบบ และประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ที่มีฟังก์ชันการทำงานเสริมในการส่งข้อมูลของค่าความต้านทานที่วัดได้แบบไร้สายไปแสดงผลและเก็บข้อมูล ณ ห้องควบคุม โดยใช้โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module) สร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ที่สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินกับคอมพิวเตอร์แบบรวมศูนย์ที่ใช้เป็นตัวแสดงผล ควบคุม และประมวลผล โดยใช้ต้นทุนต่ำ

2.2 กฎของโอห์ม

วงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage, V) กระแสไฟฟ้า (Current, I) และความต้านทานไฟฟ้า (Resistance or Impedance, R) ซึ่งคือภาระทางไฟฟ้า (Load) หรืออุปกรณ์ไฟฟ้า (Electrical Equipment) ที่ใส่เข้าไปในวงจรไฟฟ้า ดังนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าคือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในวงจรต้องมีค่าไม่มากเกินไป ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือวงจรเสียหายได้ จึงมีการคิดค้นกฎความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้าขึ้น เพื่อใช้ในการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าดังกล่าว วงจรไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วงจรไฟฟ้ากระแสตรงอย่างง่าย

ในปี ค.ศ. 1822 ฌอง แบ็ปติสท์ โจเซฟ ฟูเรียร์ (Jean-Baptiste Joseph Fourier) นักฟิสิกส์และนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ตีพิมพ์ผลงานเรื่องการไหลเวียนของความร้อน (Analytic Theory of Heat) ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของความร้อนไว้ว่า “อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนจากจุด A ไปยังจุด B หรือการที่ความร้อนไหลผ่านตัวนำโดยส่งต่อจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลหนึ่ง ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของจุดทั้งสอง และขึ้นอยู่กับตัวนำด้วยว่าสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขนาดไหน” เมื่อจอร์จ ซิมอน โอห์ม (George Simon Ohm) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้อ่านและศึกษาอย่างละเอียดจึงเกิดความสนใจ และมีความคิดที่ว่า การไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าอาจเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน เขาจึงเริ่มทำการทดลองโดยเลือกใช้วัสดุที่เป็นโลหะซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เช่น ทองแดง เงิน และอะลูมิเนียม มาทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดนำไฟฟ้า และค้นพบความจริง 3 ข้อ คือกระแสไฟฟ้าจะไหลในเส้นลวดได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ข้อแรกวัสดุที่นำมาทำเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี ข้อสองความยาวของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าแปรผกผันกับค่ากระแสไฟฟ้า และข้อสามพื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งภายหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำความจริงดังกล่าวมาเขียนสมการความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.1 โดย R คือความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) หน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω) ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) หน่วยเป็น โอห์ม-เมตร (Ohm-meter, $\Omega\cdot m$) l คือความยาว (Length) หน่วยเป็น เมตร (Meter, m) และ A คือพื้นที่หน้าตัด (Area) หน่วยเป็น ตารางเมตร (Square Meter, m^2)

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.1)$$

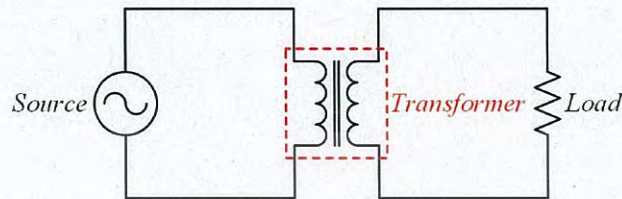
ต่อมาในปี ค.ศ. 1826 โอห์มได้ทำการทดลองต่อและค้นพบว่า หากอุณหภูมิของตัวนำสูงขึ้นส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อยลง และหากทำให้ศักดาไฟฟ้าระหว่างสองตำแหน่งต่างกันมากขึ้นส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลได้มากขึ้นด้วย การค้นพบนี้ต่อมาเป็นที่รู้จักกันในกฎทางฟิสิกส์ที่มีชื่อว่า กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ซึ่งเป็นกฎที่อธิบายเกี่ยวกับการคำนวณหาค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำไฟฟ้ากล่าวไว้ว่า “ค่ากระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าและแปรผกผันกับค่าความต้านทาน” ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.2 โดย I คือกระแสไฟฟ้า (Current) หน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere, A) V คือแรงดันไฟฟ้า (Voltage) หน่วยเป็น โวลต์ (Volt, V) และ R คือความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) หน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω) [24]

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.2)$$

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) คืออุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่งหรือแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการในการใช้งาน โดยใช้หลักการของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามระดับการแปลงแรงดันไฟฟ้าได้ 3 ระดับ ดังนี้ หม้อแปลงไฟฟ้าอัตราส่วนหนึ่งต่อหนึ่ง (Isolation or One-to-One Transformer) หม้อแปลงยกกระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-up Transformer) และหม้อแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้า (Step-down Transformer) หรือสามารถแบ่งตามลักษณะของแกนเหล็กและการพันขดลวดได้ 3 แบบ ดังนี้ หม้อแปลงไฟฟ้าแบบคอร์ (Core Type Transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเชลล์ (Shell Type Transformer) และหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเบอร์รี่ (Berry Type or Cross Type Transformer) โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ แกนเหล็ก (Core) ขดลวด (Winding) และฉนวน (Insulator) ในด้านประสิทธิภาพทางกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าจัดว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพทางด้านกำลังไฟฟ้าสูงเพราะส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และเนื่องจากการทำงานหลักไม่มีการเคลื่อนไหวจึงทำให้เป็นอุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงทนทาน นอกจากการใช้งานในด้านการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าแล้ว หม้อแปลงไฟฟ้ายังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการวัดค่าแรงดันและกระแส โดยทำหน้าที่ลดระดับของค่าสัญญาณดังกล่าวเพื่อความสะดวกในการวัดค่า เรียกหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทนี้ว่า หม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformer) แบ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

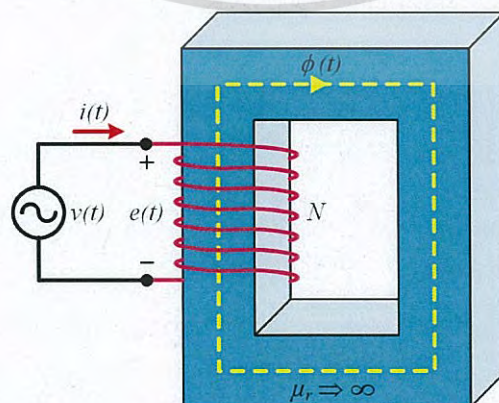
ออกเป็น 2 แบบ คือ หม้อแปลงแรงดัน (Voltage or Potential Transformer, P.T.) และหม้อแปลงกระแส (Current Transformer, C.T.) [25] ซึ่งในรายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.3.4 เป็นลำดับต่อไป วงจรการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับภาระทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วงจรการเชื่อมต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเข้ากับภาระทางไฟฟ้า

2.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

จากวงจรแม่เหล็กในรูปที่ 2.3 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ $v(t)$ เข้าขดลวดที่พันรอบแกนเหล็กจำนวน N รอบ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า $i(t)$ ไหล เรียกกระแสไฟฟ้านี้ว่า กระแสไฟฟ้ากระตุ้น (Exciting Current) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Electromotive Force, Induced EMF) $e(t)$ ตกคร่อมขดลวดดังกล่าว โดยกระแสไฟฟ้า $i(t)$ เหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก $\phi(t)$ ซึมซาบผ่านแกนเหล็ก มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 โดย ϕ_{max} คือเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Maximum Magnetic Flux) หน่วยเป็น เวเบอร์ (Weber, Wb) A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (Core Area) หน่วยเป็น ตารางเมตร (Square Meter, m^2) B_{max} คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Maximum Magnetic Flux Density) หน่วยเป็น เทสลา (Tesla, T) ω คือความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) หน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (Radian per Second, rad/s) และ t คือเวลา (Time) หน่วยเป็น วินาที (Second, s) และจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ดังสมการที่ 2.5 เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.4 เข้าไป ทำให้สามารถเขียนสมการของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 2.6 โดย E_{rms} คือค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Root Mean Square of Induced EMF, RMS of Induced EMF) หน่วยเป็น โวลต์ (Volt, V) และ f คือความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Frequency) หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz, Hz) ซึ่งกระบวนการที่ได้กล่าวมานี้เรียกว่า การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Excitation)



รูปที่ 2.3 การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับในวงจรแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

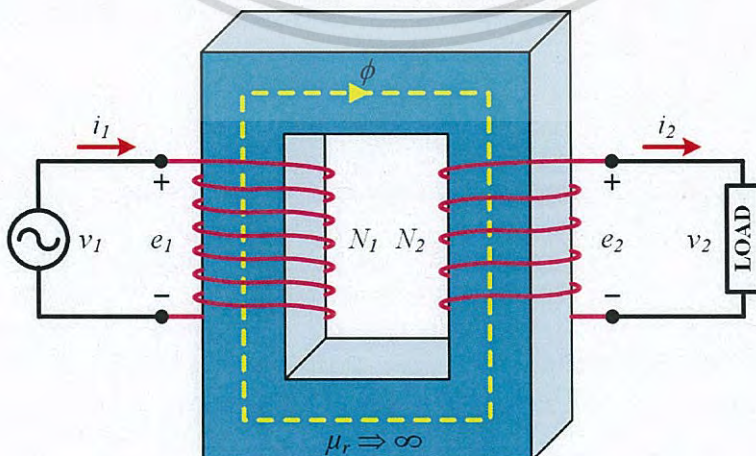
$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.3)$$

$$\phi(t) = A_c B_{\max} \sin \omega t \quad (2.4)$$

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.5)$$

$$E_{\text{rms}} = 4.44 f N A_c B_{\max} \quad (2.6)$$

เมื่อนำภาระทางไฟฟ้า (Load) มาต่อเข้ากับขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่งผลให้กระบวนการเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ เริ่มจากป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ v_1 เข้าขดลวดทางด้านปฐมภูมิที่มีจำนวนรอบการพัน N_1 รอบ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า i_1 ไหล และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e_1 ตกร่วมขดลวดดังกล่าว โดยกระแสไฟฟ้า i_1 เหนี่ยวนำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ซึมซาบผ่านแกนเหล็กไปตัดผ่านขดลวดทางด้านทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบการพัน N_2 รอบ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า i_2 ไหลในขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetomotive Force, MMF) ทางด้านทุติยภูมิไปต้านแรงเคลื่อนทางแม่เหล็กไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.7 และเนื่องจากค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability, μ_r) ของแกนเหล็กของหม้อแปลงในอุดมคติมีค่าสูงมากและไม่มีความสูญเสียในแกนเหล็กจึงทำให้ i_2 มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ใหม่ ดังสมการที่ 2.8 กระแสไฟฟ้า i_2 ที่ไหลในขดลวดทางด้านทุติยภูมิ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ v_2 ตกร่วมภาระทางไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ e_2 ตกร่วมขดลวดทางด้านทุติยภูมิ จากกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 เมื่อนำสมการทั้งสองมาหารกัน จึงสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ใหม่ ดังสมการที่ 2.11 และจากสมการที่ 2.8 และ 2.11 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และจำนวนรอบของขดลวด ทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยเรียกอัตรส่วนของจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ ต่อจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิว่า อัตราส่วนรอบของหม้อแปลง (Transformer Ratio or Turn Ratio) [25] ดังสมการที่ 2.12



รูปที่ 2.4 วงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = N_1 i_\phi \quad (2.7)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{i_2}{i_1} \quad (2.8)$$

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.9)$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.10)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} \quad (2.11)$$

$$\text{Turn Ratio } (a) = \frac{N_1}{N_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{i_2}{i_1} \quad (2.12)$$

2.3.2 ความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีส่วนประกอบใดที่เคลื่อนที่ได้ จึงไม่มีความสูญเสียจากความฝืดและแรงต้านจากลม ความสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Loss) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (Iron or Core Loss) และความสูญเสียในขดลวดตัวนำ (Copper Loss) โดยทั่วไปแล้วความสูญเสียในแกนเหล็กส่วนใหญ่มักมีค่าไม่สูงมากนักและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับภาระทางไฟฟ้าที่นำมาต่อ ส่วนความสูญเสียในขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงตามภาระทางไฟฟ้าที่นำมาต่อ กล่าวคือหากภาระทางไฟฟ้ามากส่งผลให้ความสูญเสียในขดลวดตัวนำมาก แต่หากภาระทางไฟฟ้าน้อยส่งผลให้ความสูญเสียในขดลวดตัวนำน้อยลงไปด้วย

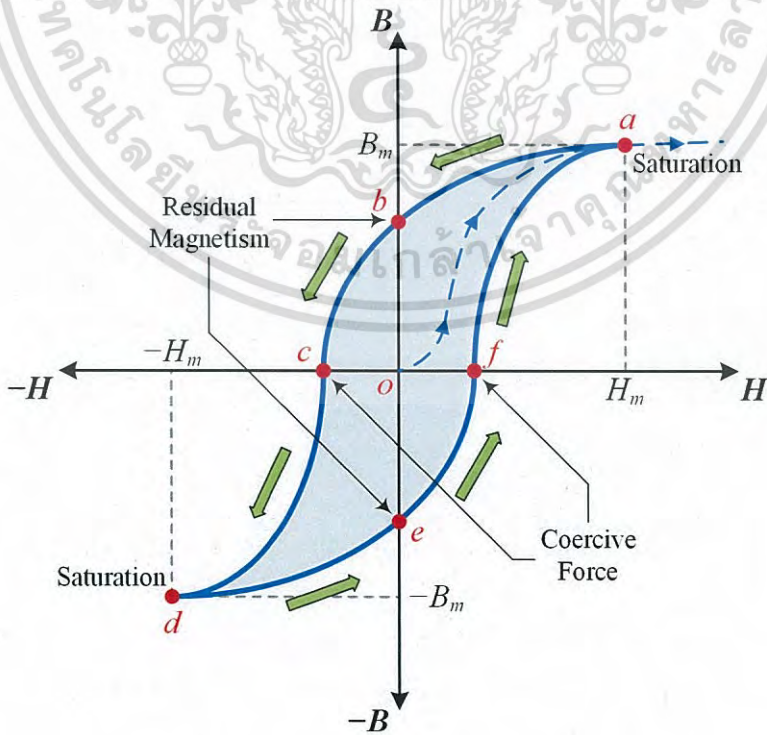
2.3.2.1 ความสูญเสียในแกนเหล็ก

เมื่อวงจรแม่เหล็กหรือหม้อแปลงไฟฟ้าถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก ทำให้สนามแม่เหล็กในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของฟังก์ชันไซน์เช่นเดียวกับแรงดันที่ป้อนเข้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กกับเวลาดังกล่าว ทำให้เกิดความสูญเสียในแกนเหล็ก ประกอบด้วย ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) และความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

ก) ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส

ความสูญเสียในแกนเหล็กชนิดนี้เป็นความสูญเสียที่เกิดจากคุณสมบัติของแกนเหล็กที่มีสนามแม่เหล็กตกค้างและการอิมตัวของแกนเหล็กทำให้เกิดลูปีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) โดยการเปลี่ยนแปลงทิศทางสนามแม่เหล็กเมื่อป้อนเข้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิดความสูญเสียจากลูปีดังกล่าว ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density, B) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เริ่มต้นจากค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งคู่ที่จุด o เมื่อค่ากระแสที่ป้อนเข้าขดลวดเพิ่มขึ้นในทิศทางบวกทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่ากระแสที่เอกสการนี้เป็นเอกสการที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

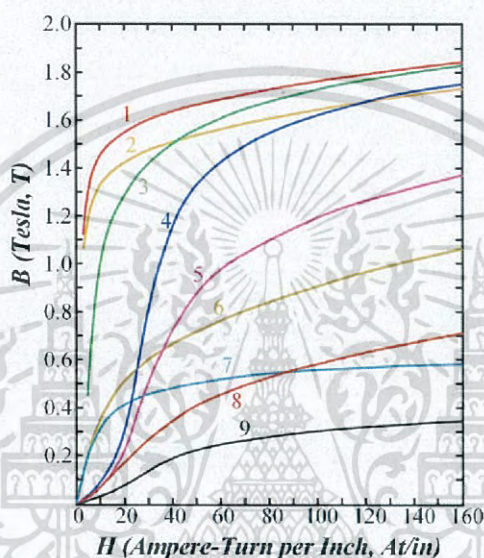
ป้อนเข้าและค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วยจากจุด o ไปจุด a เรียกตำแหน่งนี้ว่า จุดอิ่มตัวในทิศทางบวก (Positive Saturation) ต่อมาเมื่อกระแสลดลงเป็นศูนย์ทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์ด้วยจากจุด a ไปจุด b แต่ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กยังคงหลงเหลืออยู่ไม่เป็นศูนย์ เรียกตำแหน่งนี้ว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้างในทิศทางบวก (Positive Residual Magnetism) ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างในทิศทางบวกเป็นศูนย์ ต้องกลับทิศกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดเพื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์จากจุด b ไปจุด c เรียกตำแหน่งที่อำนาจแม่เหล็กตกค้างในทิศทางบวกลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ว่า แรงบังคับในทิศทางลบ (Negative Coercive Force) การเพิ่มขึ้นต่อไปของความเข้มสนามแม่เหล็กทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงข้ามข้ามจากจุด c ไปจุด d เรียกตำแหน่งนี้ว่า จุดอิ่มตัวในทิศทางลบ (Negative Saturation) และเมื่อค่ากระแสลดลงเป็นศูนย์อีกทำให้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์เช่นกันจากจุด d ไปจุด e เรียกตำแหน่งนี้ว่า อำนาจแม่เหล็กตกค้างในทิศทางลบ (Negative Residual Magnetism) ถ้าต้องการให้อำนาจแม่เหล็กตกค้างในทิศทางลบเป็นศูนย์ ต้องกลับทิศกระแสที่ป้อนเข้าขดลวดให้เป็นทิศทางบวกเพื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์จากจุด e ไปจุด f เรียกตำแหน่งที่อำนาจแม่เหล็กตกค้างในทิศทางลบลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ว่า แรงบังคับในทิศทางบวก (Positive Coercive Force) และเช่นเดิม การเพิ่มขึ้นต่อไปของความเข้มสนามแม่เหล็กทำให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจากจุด f ไปจุด a เป็นเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ สังเกตได้ว่า จุด $f a$ และ b สมมาตรกับจุด $c d$ และ e ตามลำดับ แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ความสูญเสียฮิสเทอรีซิสแปรผันกับพื้นที่ของลูป ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข)



รูปที่ 2.5 ลูปฮิสเทอรีซิสของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Density) หน่วยเป็น เทสลา (Tesla, T) หรือ เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Weber per Square Meter, Wb/m²) H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) หน่วยเป็น แอมแปร์-รอบต่อเมตร (Ampere-Turn per Meter, At/m) μ_0 คือความซึมซาบแม่เหล็กของสุญญากาศ (Permeability of Free Space) เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ หน่วยเป็น เวเบอร์ต่อแอมแปร์-รอบ เมตร (Weber per Ampere-Turn Meter, Wb/At·m) และ μ_r คือความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability) ของเนื้อสารแต่ละชนิดเทียบกับสุญญากาศ ไม่มีหน่วย



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็กของเนื้อสารแต่ละชนิด

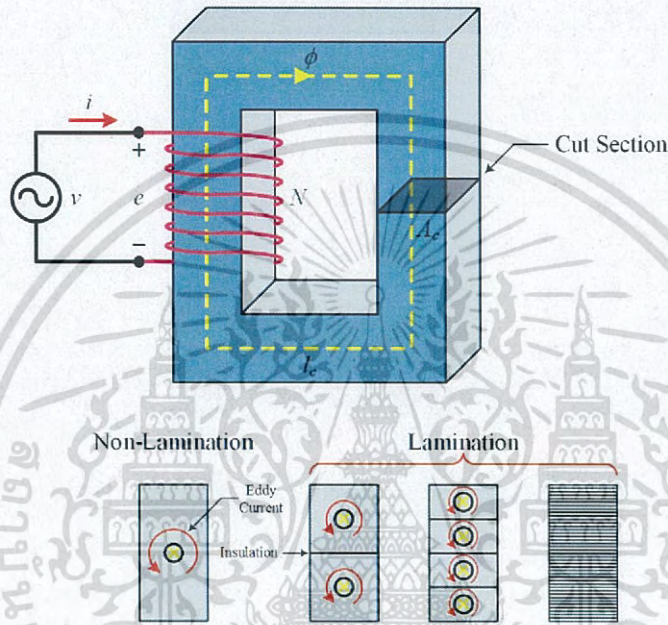
$$B = \mu H \quad (2.14)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.15)$$

ข) ความสูญเสียจากกระแสไหลวน

ความสูญเสียในแกนเหล็กชนิดนี้เป็นความสูญเสียที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ภาพตัดขวางของแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรมแม่เหล็กและเกิดกระแสไหลวน แสดงดังรูปที่ 2.8 จากรูปแสดงลักษณะการเกิดกระแสไหลวนเมื่อไม่มีการแบ่งเป็นแผ่น (Non-Lamination) และมีการแบ่งเป็นแผ่น (Lamination) 2 แผ่น 4 แผ่น และหลายแผ่น ตามลำดับ โดยระหว่างแผ่นที่แบ่งมีฉนวนกันเพื่อแยกวงจรทางไฟฟ้าระหว่างแผ่น การเกิดกระแสไหลวนทำให้เกิดความร้อนและความสูญเสียพลังงานในแกนเหล็ก ซึ่งสามารถลดความสูญเสียดังกล่าวได้โดยการทำแกนเหล็กให้เป็นแผ่นบางๆ และมีฉนวนหรือสารเคลือบผิวที่มีค่าความต้านทานสูงเคลือบแผ่นแต่ละแผ่น สามารถคำนวณหาความสูญเสียโดยประมาณได้จากสมการที่ 2.16 [25] โดย P_e คือความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) หน่วยเป็น วัตต์ (Watt, W) K_e คือค่าคงที่ของความสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss Constant) ไม่มีหน่วย ขึ้นอยู่กับเนื้อสารแม่เหล็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f คือความถี่ของแหล่งจ่าย (Supply Frequency) หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz, Hz) B_{max} คือความหนาแน่น
 เส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (Maximum Magnetic Flux Density) หน่วยเป็น เทสลา (Tesla, T)
 t คือความหนาของแผ่นเหล็กเคลือบฉนวน (Thickness of Lamination) หน่วยเป็น เมตร (Meter, m)
 และ V คือปริมาตรของแกนเหล็ก (Volume of Magnetic Material) หน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร (Cubic
 Meter, m^3)



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของแกนเหล็กที่เกิดกระแสไหลวน

$$P_e = K_e f^2 B_{max}^2 t^2 V \tag{2.16}$$

2.3.2.2 ความสูญเสียในขดลวดตัวนำ

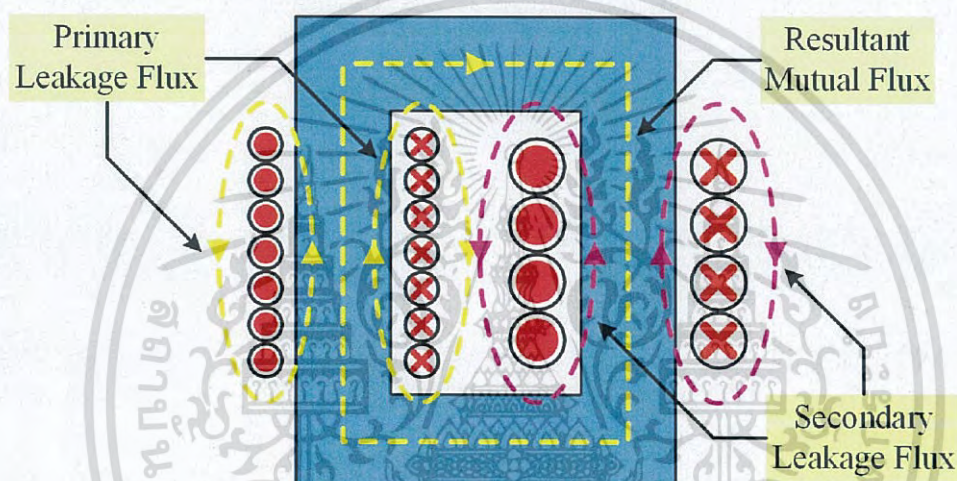
ความสูญเสียในขดลวดตัวนำหรือความสูญเสียในขดลวดทองแดงเป็นความสูญเสียในรูปแบบของ
 ความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลผ่านค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำของหม้อแปลงไฟฟ้าขณะจ่ายภาระ
 ทางไฟฟ้า หรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นความสูญเสียขณะมีภาระทางไฟฟ้า (Load Loss) ซึ่งแปรผันตามภาระ
 ทางไฟฟ้าที่นำมาต่อ การทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำ คือ การทดสอบแบบลัดวงจร
 (Short Circuit Test) โดยทำการลัดวงจรทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าทางด้าน
 แรงดันไฟฟ้าสูง ค่าความสูญเสียในขดลวดตัวนำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17 [27] โดย P_{cu} คือ
 ความสูญเสียในขดลวดตัวนำ (Copper Loss) หน่วยเป็น วัตต์ (Watt, W) I_1 และ I_2 คือกระแสของ
 ขดลวดทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูงและต่ำตามลำดับ หน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere, A) และ R_1 และ R_2
 คือความต้านทานของขดลวดทางด้านแรงดันไฟฟ้าสูงและต่ำตามลำดับ หน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \tag{2.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

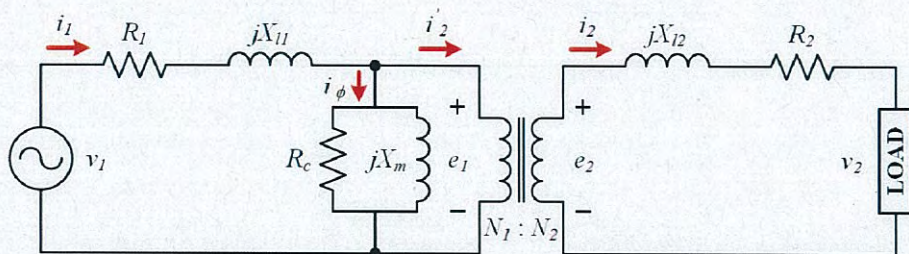
2.3.3 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในการหาค่าแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า กระแสไฟฟ้าป้อนเข้า หรือค่าตัวประกอบกำลังทางด้านป้อนเข้า เพื่อใช้ในการออกแบบและประกอบสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานแต่ละงาน จำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าช่วยในการคำนวณ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่าความต้านทานของเส้นลวดและสนามแม่เหล็กรั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยเส้นประสีเหลืองรูปวงรี คือเส้นแรงแม่เหล็กรั่วของทางด้านปฐมภูมิ (Primary Leakage Flux) เส้นประสีเหลืองรูปสี่เหลี่ยม คือเส้นแรงแม่เหล็กรั่วร่วม (Resultant Mutual Flux) และเส้นประสีม่วงรูปวงรี คือเส้นแรงแม่เหล็กรั่วของทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Leakage Flux)



รูปที่ 2.9 เส้นแรงแม่เหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า

วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (Equivalent Circuit of Transformer) แสดงดังรูปที่ 2.10 โดย v_1 และ i_1 คือแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิตามลำดับ R_1 และ R_2 คือความต้านทานของขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ X_{1l} และ X_{2l} คือรีแอกแตนซ์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กรั่วทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ และเนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็กมีค่าความต้านทานแม่เหล็กและมีความสูญเสียในแกนเหล็กจึงมีส่วนของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Current Component, i_m) และส่วนของกระแสที่แสดงถึงความสูญเสียในแกนเหล็ก (Core Loss Current Component, i_c) โดย i_ϕ คือกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสทั้งสอง ดังสมการที่ 2.18 โดยแทนผลของการกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยวงจรความต้านทานของความสูญเสียในแกนเหล็ก (R_c) ขนานกับรีแอกแตนซ์ส่วนสร้างสนามแม่เหล็ก (X_m) และเนื่องจากแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็กไม่เป็นอุดมคติทำให้กระแสไฟฟ้าป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิ (i_1) เท่ากับผลรวมของกระแสทางด้านทุติยภูมิที่ถ่ายโอนมาทางด้านปฐมภูมิ (i_2') กับกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (i_ϕ) ดังสมการที่ 2.19

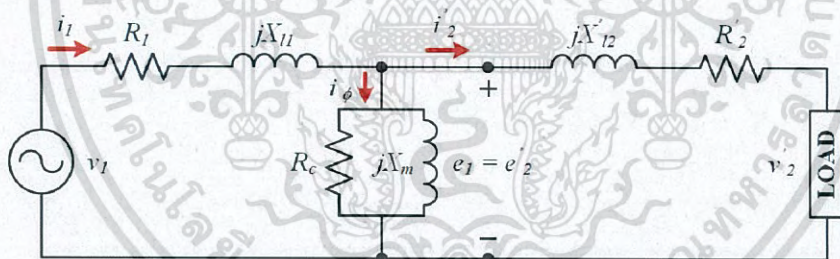


รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

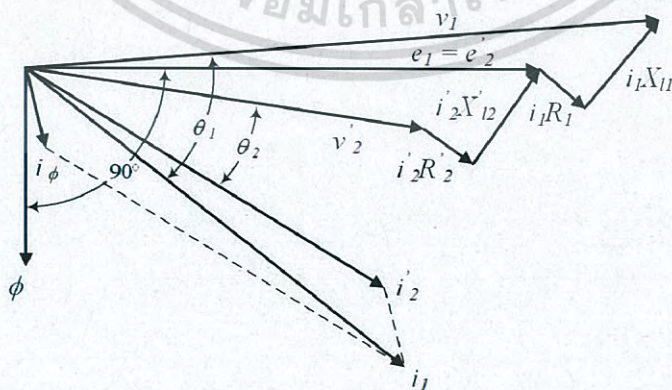
$$i_\phi = i_m + i_c \tag{2.18}$$

$$i_1 = i_2 + i_\phi \tag{2.19}$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูล จึงจำเป็นต้องทำการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์จากทางด้านใดด้านหนึ่งไปอยู่อีกด้านหนึ่ง ในหัวข้อย่อยนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์จากทางด้านทุติยภูมิมาอยู่ทางด้านปฐมภูมิ เนื่องจากใช้หลักการเดียวกันกับการถ่ายโอนค่าพารามิเตอร์จากทางด้านปฐมภูมิมาอยู่ทางด้านทุติยภูมิ วงจรสมมูลและแผนภาพเฟเซอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถ่ายโอนมาอยู่ทางด้านปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 2.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ถูกถ่ายโอนมาอยู่ทางด้านปฐมภูมิมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.20 ถึง 2.23



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 วงจรสมมูล (ก) และแผนภาพเฟเซอร์ (ข) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถ่ายโอนมาอยู่ทางด้านปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_2' = \frac{i_2}{a} \quad (2.20)$$

$$v_2' = av_2 \quad (2.21)$$

$$R_2' = a^2 R_2 \quad (2.22)$$

$$jX_{l2}' = ja^2 X_{l2} \quad (2.23)$$

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.11 (ก) สังเกตได้ว่าอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิกับแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกทางด้านทุติยภูมิไม่เป็นไปตามอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง (Turn Ratio, a) เนื่องจากแรงดันตกคร่อมความต้านทานเชิงซ้อนอนุกรมของหม้อแปลง รวมถึงอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าทางด้านปฐมภูมิกับกระแสไฟฟ้าจ่ายออกทางด้านทุติยภูมิไม่เป็นไปตามส่วนกลับของอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง เนื่องจากแกนเหล็กมีความสูญเสียและมีความต้านทานทางแม่เหล็ก ทำให้ต้องมีส่วนของกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กเป็นตัวแทนของค่าความสูญเสียดังกล่าว [25]

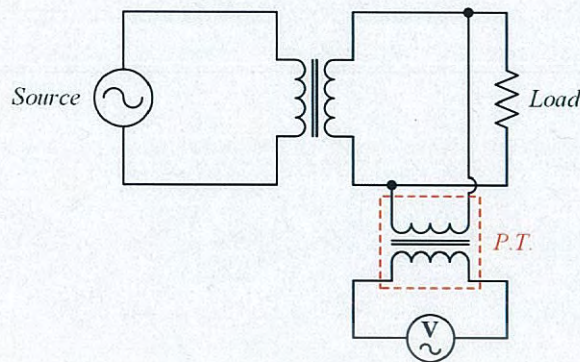
2.3.4 หม้อแปลงเครื่องมือวัด

หม้อแปลงไฟฟ้านอกจากมีประโยชน์ในด้านการเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย เรียกหม้อแปลงไฟฟ้าประเภทนี้ว่า หม้อแปลงเครื่องมือวัด (Instrument Transformer) มีจุดเด่นทางด้านคุณสมบัติการแยกวงจรไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิกับทุติยภูมิออกจากกัน (Isolated Electric Circuit) และสามารถออกแบบให้ใกล้เคียงกับหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติโดยที่ราคาของหม้อแปลงไม่สูงมากนัก โดยทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าหรือขนาดกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เหมาะสมกับเครื่องมือวัดและเพื่อความปลอดภัย แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ หม้อแปลงแรงดัน (Voltage or Potential Transformer, P.T.) และหม้อแปลงกระแส (Current Transformer, C.T.) [25]

2.3.4.1 หม้อแปลงแรงดัน

หม้อแปลงแรงดันเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากระดับแรงดันที่ต้องการวัดให้เป็นระดับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับเครื่องมือวัด เพื่อความปลอดภัยในการวัดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดมีค่าสูงและระบบการต่อลงดิน (Grounding System) ที่รวมกันกับระบบแรงสูง จุดเด่นที่สำคัญของหม้อแปลงแรงดัน คือมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหม้อแปลงไฟฟ้าในอุดมคติ (Ideal Transformer) โดยแกนเหล็กมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ (Relative Permeability, μ_r) สูง ทำให้กระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (i_d) ต่ำ จึงส่งผลให้ความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำและเป็นไปตามอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง (Transformer Ratio or Turn Ratio, a) อีกสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือคุณภาพของฉนวนระหว่างขดลวดทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิต้องดี เพื่อป้องกันอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและเครื่องมือวัด หม้อแปลงแรงดันมีข้อห้ามปฏิบัติที่สำคัญคือห้ามลัดวงจรทางด้านทุติยภูมิ เนื่องจากการกระทำดังกล่าวทำให้เกิดกระแสเกิน (Over Current) ทางด้านทุติยภูมิและทำให้ขดลวดทางด้านทุติยภูมิร้อนจนอาจเป็นสาเหตุให้หม้อแปลงได้รับความเสียหายได้ วงจรการเชื่อมต่อหม้อแปลงแรงดัน แสดงดังรูปที่ 2.12

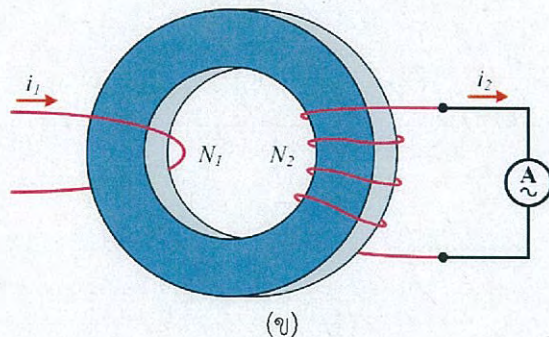
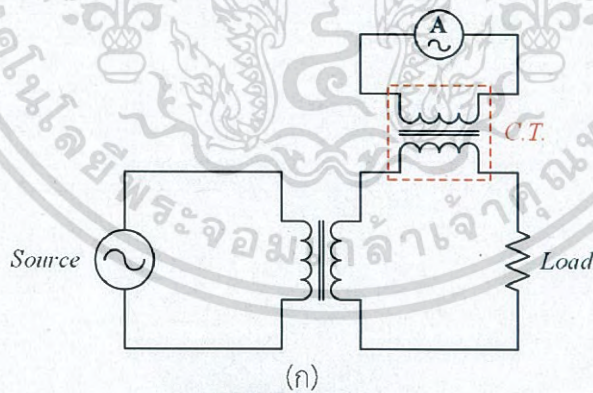
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรการเชื่อมต่อหม้อแปลงแรงดัน

2.3.4.2 หม้อแปลงกระแส

หม้อแปลงกระแสเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ลดขนาดกระแสสูงในวงจรไฟฟ้าหลักที่ต้องการวัดให้มาอยู่ในย่านที่เหมาะสมกับพิกัดของเครื่องวัด หม้อแปลงกระแสมีข้อห้ามปฏิบัติที่สำคัญคือห้ามเปิดวงจรทางด้านทุติยภูมิ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงกระแสมีจำนวนรอบของขดลวดทางด้านปฐมภูมิ (N_1) น้อยกว่าจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (N_2) มาก โดยทั่วไปแล้ว N_1 เท่ากับ 1 รอบ ส่งผลให้การกระทำดังกล่าวเป็นการทำให้หม้อแปลงกระแสประพฤติกรรมเหมือนกับหม้อแปลงยกระดับแรงดันไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) ทางด้านทุติยภูมิ ส่งผลให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กและเกิดความร้อนจนอาจเป็นสาเหตุให้หม้อแปลงได้รับความเสียหายได้ วงจรการเชื่อมต่อและวงจรแม่เหล็กของหม้อแปลงกระแส แสดงดังรูปที่ 2.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

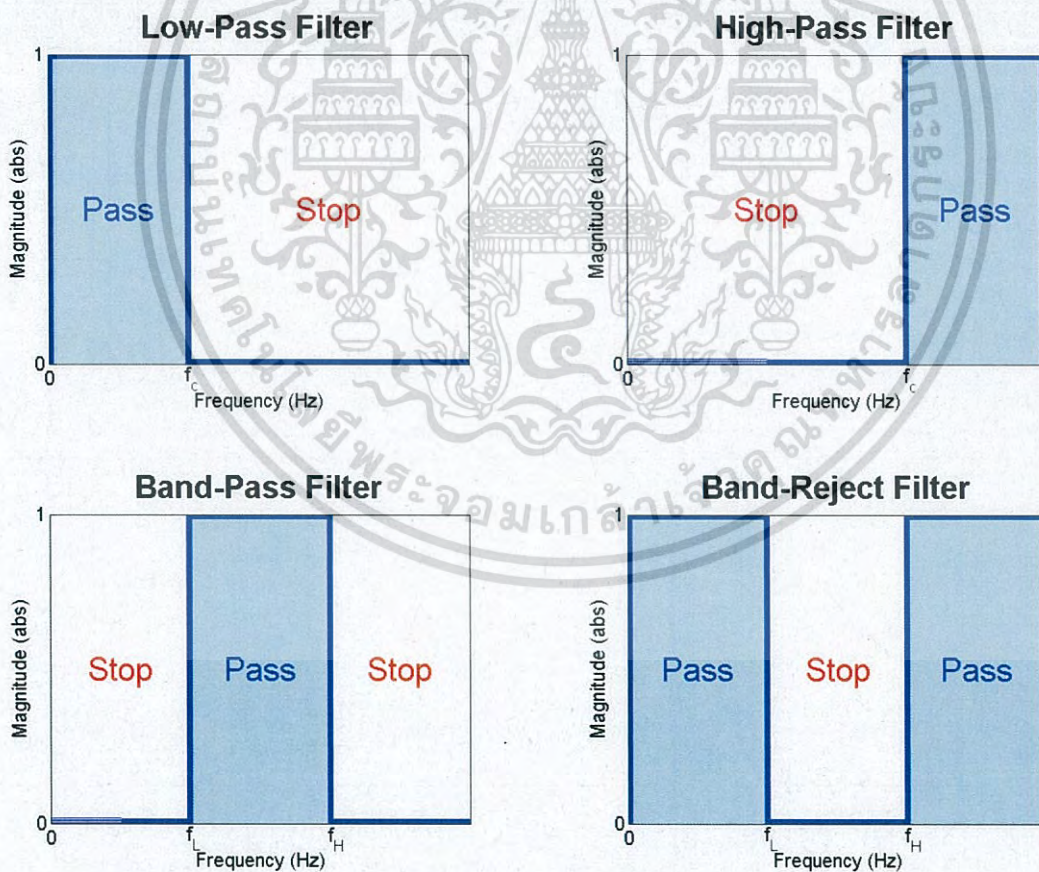


รูปที่ 2.13 วงจรการเชื่อมต่อ (ก) และวงจรแม่เหล็ก (ข) ของหม้อแปลงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่ (Filter) คือวงจรที่ทำหน้าที่กรองสัญญาณที่มีความถี่หรือช่วงความถี่ตามที่กำหนดให้ผ่านได้และลดทอนสัญญาณที่มีความถี่นอกเหนือจากที่กำหนดออกไป สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบหลัก คือ วงจรกรองความถี่แบบดิจิทัล (Digital Filter) และวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก (Analog Filter) โดยวงจรกรองความถี่แบบดิจิทัลทำงานโดยการดำเนินการเชิงคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถแสดงเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์หรือขั้นตอนวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้ ส่วนวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อกต้องอิงกับเครือข่ายเชิงกายภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ผลการกรองความถี่ตามที่ต้องการ โดยวงจรกรองความถี่ทั้ง 2 แบบหลัก สามารถแบ่งตามคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ได้ 4 ประเภท ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter, LPF) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter, HPF) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter, BPF) และวงจรกรองก้ำจืดแถบความถี่ (Band-Stop Filter, BSF or Band-Reject Filter, BRF) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดย f_c คือความถี่ตัด (Cut-off Frequency) f_L และ f_H คือ ความถี่ตัดด้านต่ำและสูง (Lower and Upper Cut-off Frequency) ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แต่ละประเภทในอุดมคติ

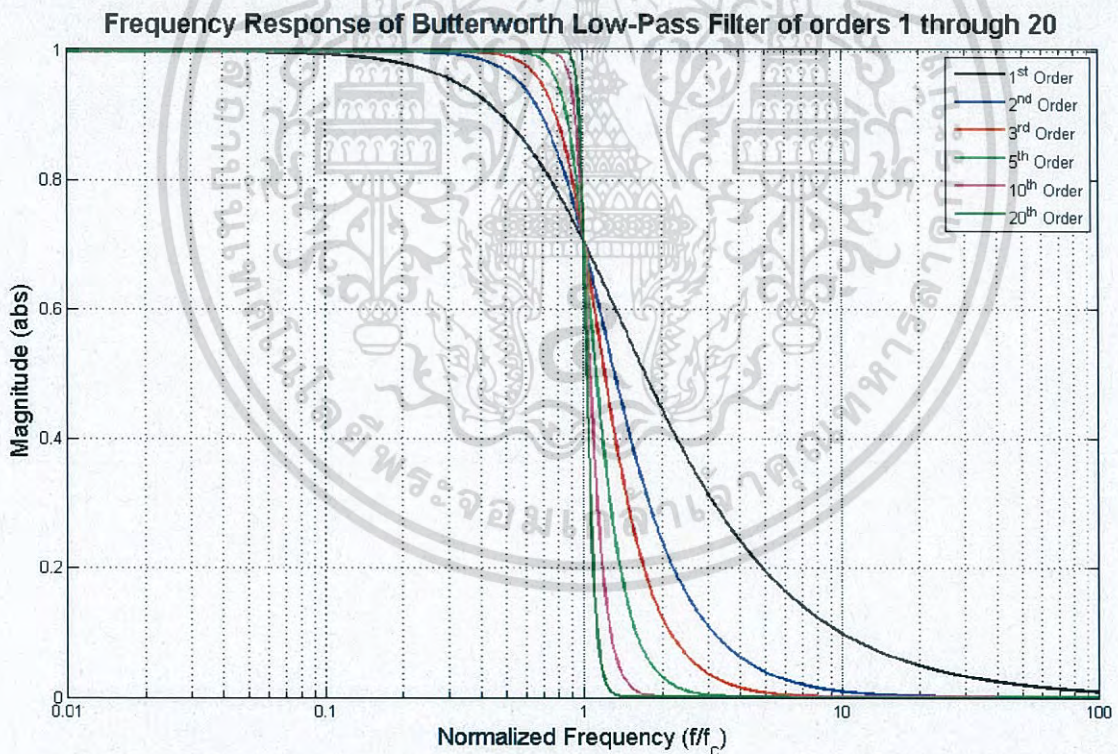
ในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะวงจรกรองความถี่แบบอนาล็อก เนื่องจากเป็นวงจรกรองความถี่แบบที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองความถี่ได้ 2 แบบ คือ วงจรกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์แบบพาสซีฟ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวต้านทาน (Resistor) เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) และวงจรกรองความถี่ที่ใช้อุปกรณ์แบบแอคทีฟ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ตัวขยายสัญญาณหรือออปแอมป์ (Operational Amplifier, Op-Amp) ที่ต่อร่วมกับ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) ตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ และแบบแอคทีฟ แสดงดังตารางที่ 2.1 [28]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟ

	วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ	วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> ● ไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า ● สามารถรองรับกระแสและแรงดันสูงได้ ● มีเสถียรภาพสูง ● ใช้ส่วนประกอบน้อยในการสร้างวงจรกรองความถี่ ● เกิดสัญญาณรบกวนแค่จากตัวต้านทาน ● สามารถออกแบบความกว้างของแถบความถี่ได้ไม่จำกัด 	<ul style="list-style-type: none"> ● ไม่ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำ ● ง่ายต่อการออกแบบวงจรกรองความถี่ ● มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าสูงและอิมพีแดนซ์ขาออกต่ำ ● สามารถสร้างกำลังขยายสูงได้ ● ง่ายต่อการปรับแอมพลิฟิเคชัน ● วงจรมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> ● ใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่ในการสร้างวงจรกรองความถี่สำหรับความถี่ต่ำ ● ตัวเหนี่ยวนำบางชนิดต้องหุ้มฉนวน ● ข้อจำกัดของตัวเหนี่ยวนำขนาดมาตรฐาน ● ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำมีราคาแพง ● ยากต่อการออกแบบวงจรกรองความถี่ ● วงจรมีขนาดใหญ่ ● ไม่สามารถสร้างกำลังขยายได้ 	<ul style="list-style-type: none"> ● ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า ● ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ ● ไม่สามารถกำจัดองค์ประกอบไฟกระแสดตรง (DC Offset) ได้ ● ข้อจำกัดในการออกแบบความกว้างของแถบความถี่ ● ข้อจำกัดของอัตราความไวในการขยายสัญญาณ (Slew Rate) ของออปแอมป์ ● ใช้ส่วนประกอบมากในการสร้างวงจรกรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่แต่ละประเภทนั้นไม่เป็นอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่งถึงยี่สิบสังเกตได้ว่าวงจรกรองความถี่อันดับยิ่งสูงเท่าใดการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่ดังกล่าวยิ่งใกล้เคียงกับอุดมคติเท่านั้น โดยที่ความถี่ตัด (Cut-off Frequency, f_c) หรือที่ความถี่บรรทัดฐาน (Normalized Frequency, f/f_c) เท่ากับ 1 ขนาดหรือค่าแมกนิจูด (Magnitude) ของสัญญาณขาออกจากรวมกรองความถี่แต่ละอันดับมีค่าเท่ากันคือเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ หรือประมาณ 0.707 เท่า ข้อเสียของวงจรกรองความถี่อันดับสูงคือวงจรมีความซับซ้อนและออกแบบวงจรถายก ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการสร้างวงจรจำนวนมาก ยกต่อการหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) สำหรับใช้ในการคำนวณหาค่าแอมพลิจูด (Amplitude) มุมเฟส (Phase Angle) และความถี่ตัด ของสัญญาณขาออกจากรวมกรองความถี่ และวงจรกรองความถี่อันดับสูงมีการตอบสนองเชิงความถี่ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ในงานบางงาน ดังนั้นวงจรกรองความถี่ที่ได้รับความนิยมและใช้งานมากที่สุดคือวงจรกรองความถี่อันดับสอง ซึ่งในรายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.4.2 เป็นลำดับต่อไป



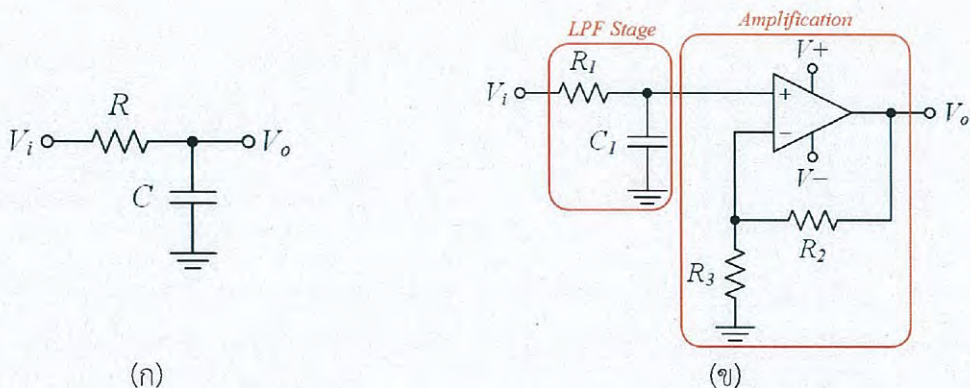
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับหนึ่งถึงยี่สิบ

2.4.1 ประเภทของวงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่สามารถแบ่งตามคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ได้ 4 ประเภท ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-Pass Filter, LPF) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter, HPF) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-Pass Filter, BPF) และวงจรกรองก้ำจืดแถบความถี่ (Band-Stop Filter, BSF or Band-Reject Filter, BRF) โดยแต่ละประเภทยังสามารถแบ่งตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาสร้างเป็นวงจรกรองความถี่ได้อีก 2 แบบ คือ วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) และวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ (Active Filter) โดยวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟที่ใช้งานที่ความถี่มากกว่า 1 MHz อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างวงจรประกอบด้วย ตัวต้านทาน (Resistor, R) ตัวเก็บประจุ (Capacitor, C) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor, L) เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟที่ใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ (RCL Passive Filter) และวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟที่ใช้งานตั้งแต่ความถี่ 1 Hz จนถึง 1 MHz อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างวงจรประกอบด้วย ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเท่านั้น เรียกว่า วงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (RC Passive Filter) เนื่องจากในช่วงความถี่ดังกล่าวเป็นช่วงความถี่ต่ำจึงต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำตัวใหญ่ ทำให้วงจรมีขนาดใหญ่เทอะทะและไม่สะดวกในการใช้งาน [28] ในหัวข้อนี้ในส่วนของวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟขอกกล่าวถึงเฉพาะวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ เนื่องจากเป็นวงจรกรองความถี่แบบที่ใช้ในงานวิจัย รายละเอียดของวงจรกรองความถี่แต่ละประเภทอธิบายดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.4.1.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

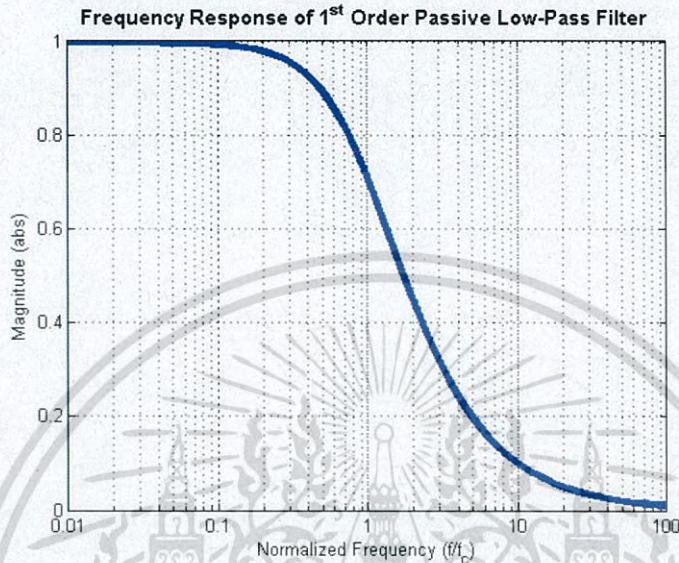
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ และความถี่ที่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดถูกกลทอนออกไป วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟและแบบแอคทีฟอันดับหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) และ (ข) ตามลำดับ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ (LPF Stage) และส่วนวงจรขยายสัญญาณ (Amplification) ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.24 เมื่อนำเอาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปประมวลผลเพื่อหาการตอบสนองเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอคทีฟ (ข) อันดับหนึ่ง

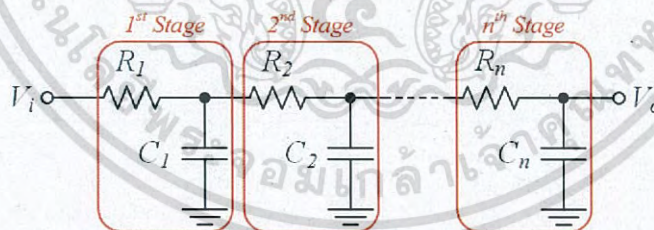
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{sCR + 1} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.17 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

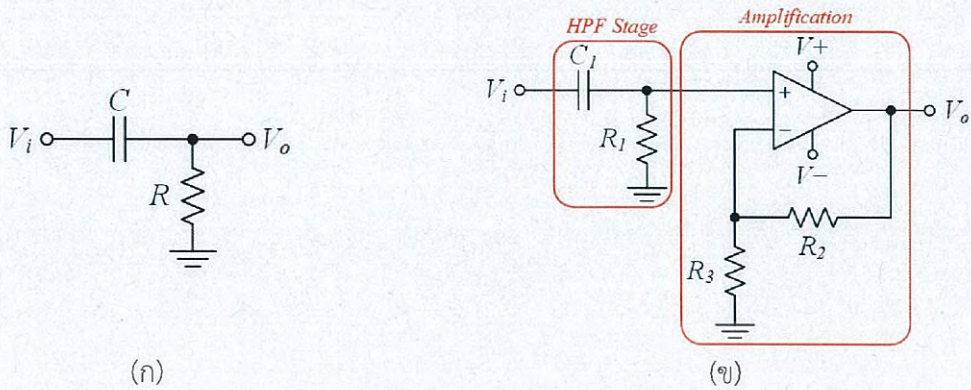
ในการเชื่อมต่อวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟให้มีอันดับสูงขึ้นทำได้โดยการต่อวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟอันดับหนึ่งอนุกรมกันไปเรื่อยๆ จนถึงอันดับที่ต้องการ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟอันดับ n แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟอันดับ n

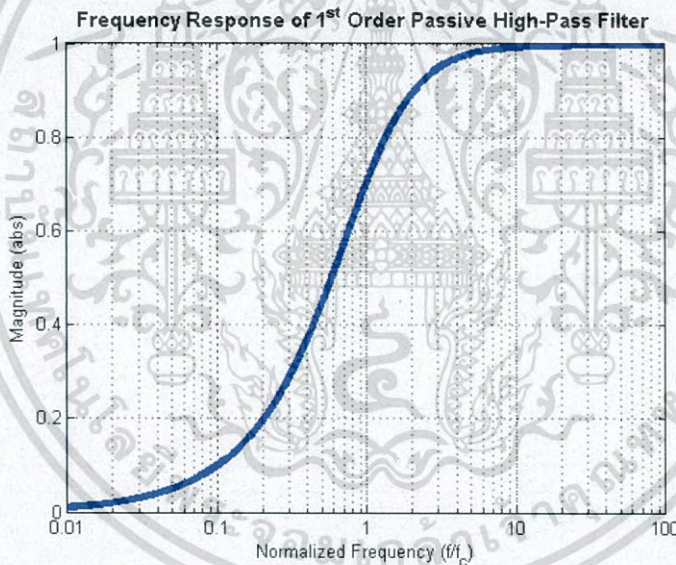
2.4.1.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ที่กำหนดผ่านไป และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ที่กำหนดถูกลดทอนออกไป วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟอันดับหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข) ตามลำดับ วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบแอกทีฟประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟ (HPF Stage) และส่วนวงจรมายสัญญาณ (Amplification) ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟ มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.25 เมื่อนำเอาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปประมวลผลเพื่อหาค่าตอบสนองเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอกทีฟ (ข) อันดับหนึ่ง

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sCR}{sCR + 1} \tag{2.25}$$

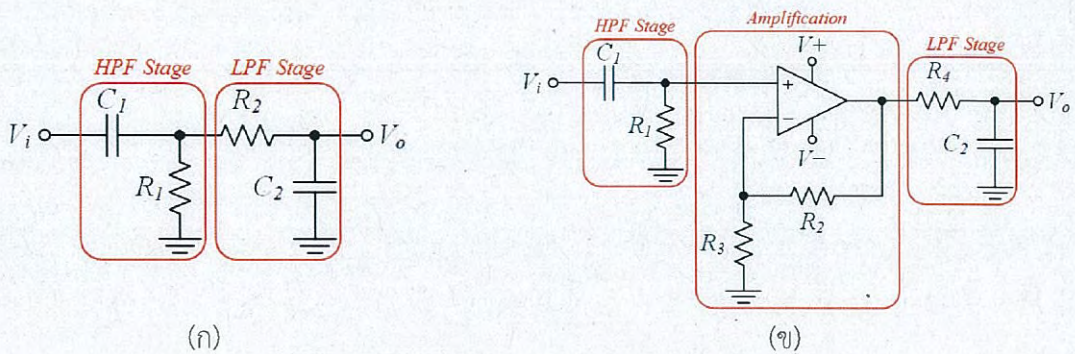


รูปที่ 2.20 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน

2.4.1.3 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

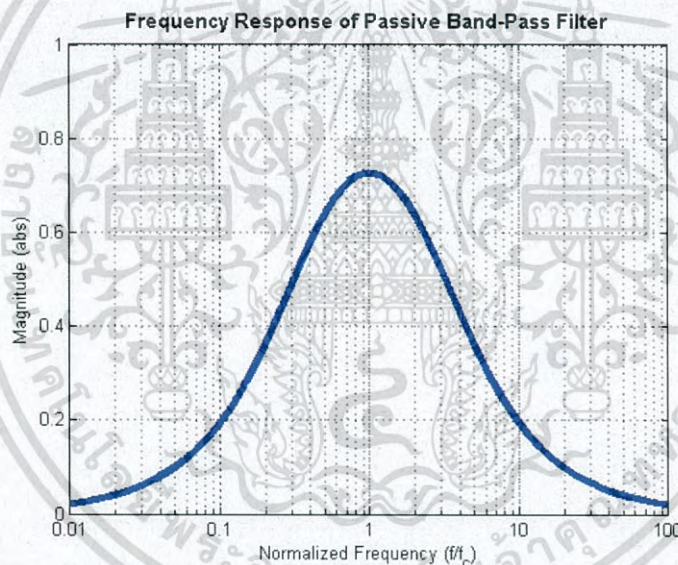
วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ที่อยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กำหนดผ่านไปและความถี่ที่อยู่นอกเหนือจากช่วงแถบความถี่ที่กำหนดถูกลดทอนออกไป วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ แสดงดังรูปที่ 2.21 (ก) และ (ข) ตามลำดับ วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบพาสซีฟประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟ (LPF Stage) และส่วนวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟ (HPF Stage) ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบพาสซีฟ มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.26 เมื่อนำเอาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปประมวลผลเพื่อหาการตอบสนองเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอกทีฟ (ข)

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{sC_1R_1}{s^2(C_1R_1C_2R_2) + s(C_1R_1 + C_2R_2 + C_2R_1) + 1} \tag{2.26}$$

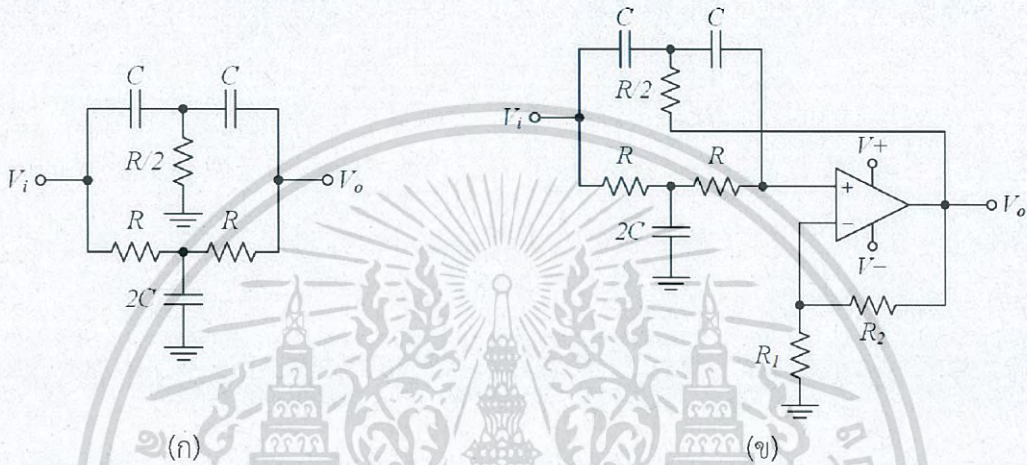


รูปที่ 2.22 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

2.4.1.4 วงจรกรองกำจัดแถบความถี่

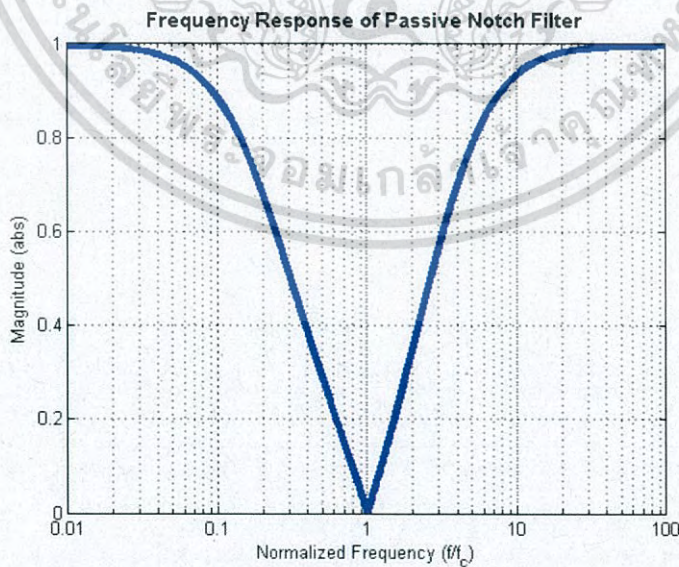
วงจรกรองกำจัดแถบความถี่ คือวงจรที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ที่อยู่นอกเหนือจากช่วงแถบความถี่ที่กำหนดผ่านไปและความถี่ที่อยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กำหนดถูกลดทอนออกไป สามารถแบ่งตามความกว้างของแถบความถี่ที่ถูกกำจัดได้ 2 แบบ คือ วงจรกรองกำจัดแถบความถี่กว้าง (Wide Band-Stop Filter or Wide Band-Reject Filter) และวงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบ (Narrow Band-Stop Filter or Narrow Band-Reject Filter or Notch Filter or Single Frequency Rejection Filter) โดยหลักการคือเป็นการนำเอาวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) มาต่อขนานกับวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (HPF) แล้วนำสัญญาณขาออกจากทั้งสองวงจรมารวมเข้าด้วยกัน ในหัวข้อย่อยนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะวงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบ เนื่องจากวงจรกรองความถี่ประเภทนี้ไม่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยจึงขอกล่าวเพียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วน วงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบบแบบพาสซีฟและแบบแอกทีฟ แสดงดังรูปที่ 2.23 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เรียกวงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบบแบบนี้ว่า วงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบบแบบตัวทีแผลด (Twin-T Notch Filter) [28] ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่แบบพาสซีฟ มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.27 เมื่อนำเอาสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปประมวลผลเพื่อหาการตอบสนองเชิงความถี่ด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 วงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบบ แบบพาสซีฟ (ก) และแบบแอกทีฟ (ข)

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s^3 C^3 R^3 + s^2 C^2 R^2 + sCR + 1}{s^3 C^3 R^3 + 5s^2 C^2 R^2 + 6sCR + 1} \quad (2.27)$$



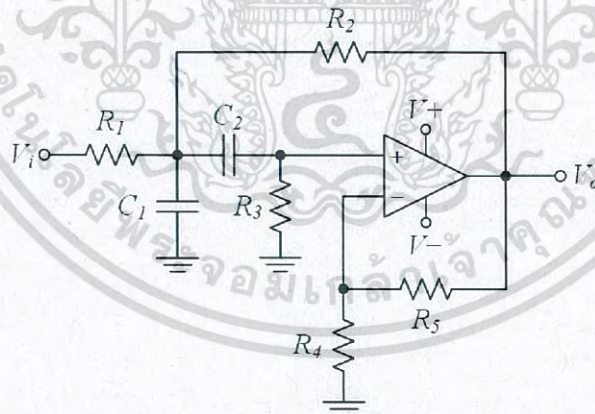
รูปที่ 2.24 การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่แคบบ

2.4.2 วงจรกรองความถี่อันดับสอง

วงจรกรองความถี่อันดับสอง (Second Order Filter) สามารถแบ่งตามรูปแบบการเชื่อมต่อออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology (SK) และรูปแบบการเชื่อมต่อ Multiple Feedback Topology (MFB) โดยในแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อยังสามารถแบ่งตามการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดหรือขนาดของการตอบสนองเชิงความถี่ได้อีก 5 ชนิด ได้แก่ Butterworth Bessel Elliptic Chebyshev Type I (Pass-Band Ripple) และ Chebyshev Type II (Stop-Band Ripple) [28] ในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสอง (Second Order Active Band-Pass Filter) เนื่องจากเป็นวงจรกรองความถี่ประเภทที่ใช้ในงานวิจัย และวงจรกรองความถี่แต่ละประเภทนั้นมีรูปแบบการเชื่อมต่อวงจรที่เหมือนกันอยู่แล้ว ต่างกันเพียงแต่ตำแหน่งในการวางอุปกรณ์แบบพาสซีฟเท่านั้น รายละเอียดของวงจรกรองความถี่แต่ละรูปแบบอธิบายดังหัวข้อย่อต่อไปนี้

2.4.2.1 วงจรกรองความถี่ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK (Sallen-Key Second Order Active Band-Pass Filter) แสดงดังรูปที่ 2.25 มีอุปกรณ์แบบพาสซีฟจำนวน 7 ตัว และอุปกรณ์แบบแอคทีฟจำนวน 1 ตัว โดยมีวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) รวมอยู่ในวงจรให้สามารถปรับกำลังขยายได้ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.28 โดย k คือกำลังขยายของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส และมีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.29



รูปที่ 2.25 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK

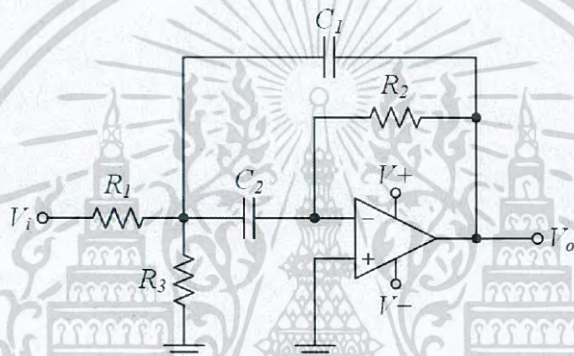
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{s(R_2 R_3 C_2 k)}{s^2 (R_1 R_2 R_3 C_1 C_2) + s(R_2 R_3 C_2 + R_1 R_2 C_2 + R_1 R_2 C_1 + R_1 R_3 C_2 (1-k)) + (R_1 + R_2)} \quad (2.28)$$

$$\text{gain}(k) = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 วงจรกรองความถี่ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Multiple Feedback Topology

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB (Multiple Feedback Second Order Active Band-Pass Filter) แสดงดังรูปที่ 2.26 มีอุปกรณ์แบบพาสซีฟจำนวน 5 ตัว และอุปกรณ์แบบแอกทีฟจำนวน 1 ตัว ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.30 สังเกตได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB ใช้อุปกรณ์แบบพาสซีฟน้อยกว่ารูปแบบ SK ทำให้มีสัญญาณรบกวน (Noise) ในวงจรน้อยกว่าและสัญญาณรบกวนดังกล่าวมีผลมากที่วงจรอันดับสูง สำหรับวงจรอันดับสองนั้นแทบมีผลไม่ต่างกันมาก แต่วงจรรูปแบบ MFB มีข้อเสียคือยากต่อการปรับกำลังขยายและสัญญาณขาออกกลับเฟส

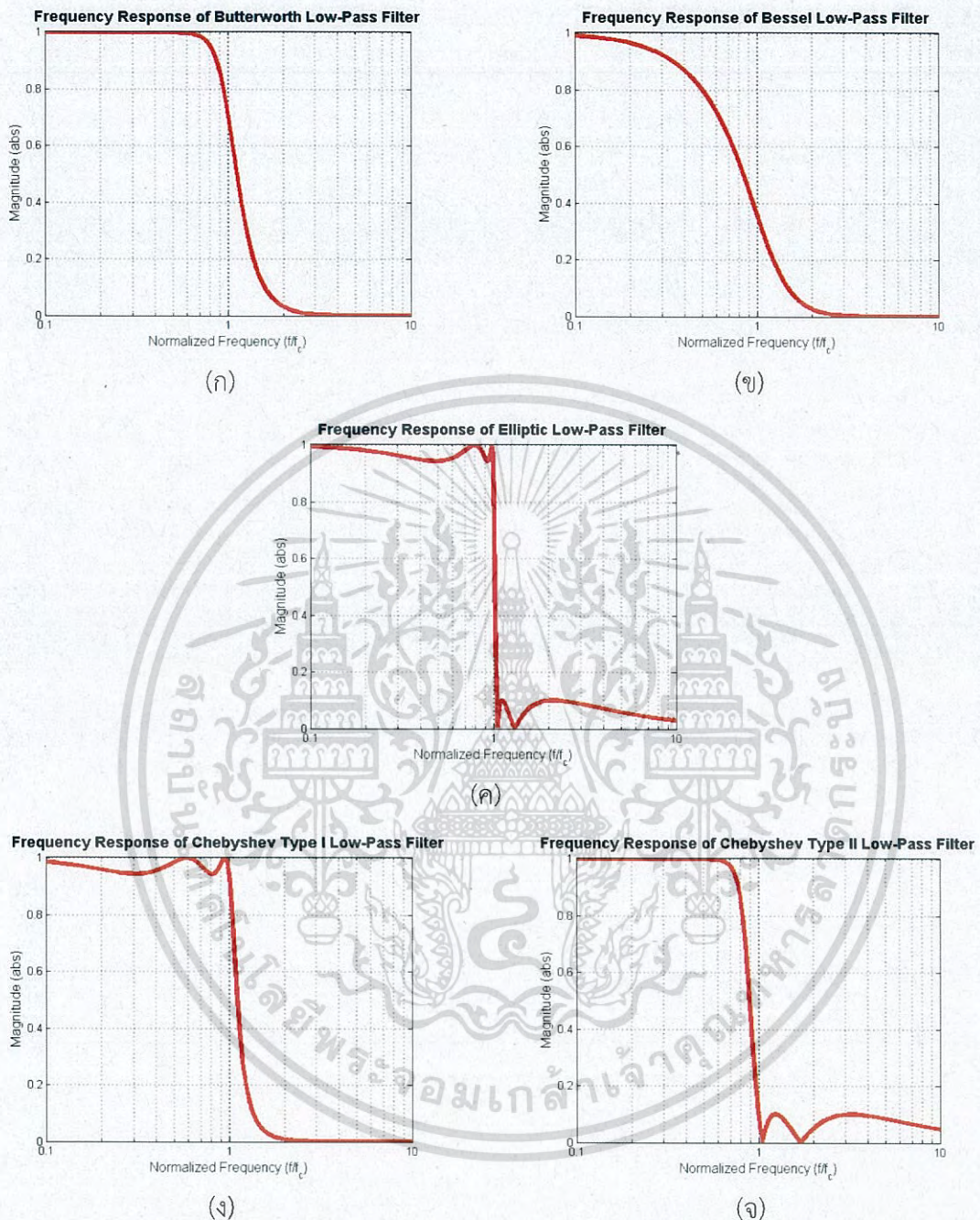


รูปที่ 2.26 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{-s(R_2 R_3 C_2)}{s^2(R_1 R_2 R_3 C_1 C_2) + s(R_1 R_3 C_1 + R_1 R_3 C_2) + (R_1 + R_3)} \quad (2.30)$$

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น วงจรกรองความถี่อันดับสองแต่ละรูปแบบการเชื่อมต่อสามารถแบ่งตามการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดหรือขนาดของการตอบสนองเชิงความถี่ได้ 5 ชนิด การตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด Butterworth Bessel Elliptic Chebyshev Type I และ Chebyshev Type II แสดงดังรูปที่ 2.27 (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ โดยชนิด Butterworth และชนิด Bessel เป็นวงจรกรองความถี่เพียงสองชนิดที่ไม่มีการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดทั้งในช่วงความถี่แถบผ่าน (Pass-Band Frequency) และในช่วงความถี่แถบหยุด (Stop-Band Frequency) แต่ชนิด Butterworth มีความไวในการตอบสนองที่เร็วกว่าชนิด Bessel ส่วนชนิด Elliptic มีความไวในการตอบสนองที่เร็วที่สุด แต่มีการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดทั้งในช่วงความถี่แถบผ่านและในช่วงความถี่แถบหยุด ชนิด Chebyshev Type I (Pass-Band Ripple) มีความไวในการตอบสนองที่เร็วกว่าชนิด Butterworth แต่มีการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดในช่วงความถี่แถบผ่าน และมีการกระเพื่อมมากกว่าชนิด Elliptic และชนิด Chebyshev Type II (Stop-Band Ripple) หรือ Inverse Chebyshev มีคุณลักษณะของการตอบสนองเชิงความถี่คล้ายกับชนิด Chebyshev Type I แต่ต่างกันตรงที่มีการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดในช่วงความถี่แถบหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

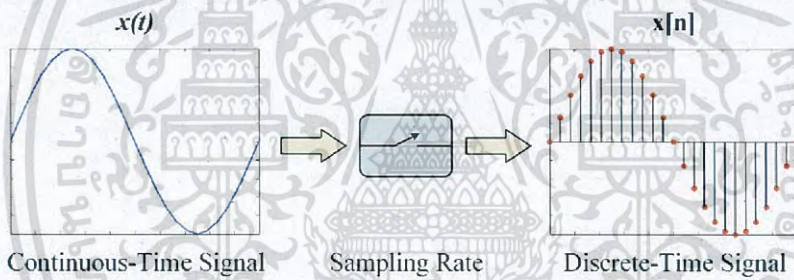


รูปที่ 2.27 เปรียบเทียบการตอบสนองเชิงความถี่ของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านชนิด Butterworth (ก) Bessel (ข) Elliptic (ค) Chebyshev Type I (ง) และ Chebyshev Type II (จ)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้งานวงจรรองความถี่ที่มีการกระเพื่อมของค่าแมกนิจูดหรือขนาดของการตอบสนองเชิงความถี่ชนิด Butterworth เนื่องจากมีคุณสมบัติของผลตอบสนองต่อความถี่ที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรรองความถี่ชนิดอื่น และวงจรรองความถี่ชนิดดังกล่าวมีค่าแมกนิจูดหรือขนาดของสัญญาณขาออกไม่เปลี่ยนแปลงมากหรือเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราส่วนที่คงที่แน่นอน (Constant Magnitude) ทำให้กระบวนการกรองความถี่มีความคลาดเคลื่อนของค่าแมกนิจูดต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีการสุ่มตัวอย่าง

ในการประมวลผลหรือวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัล (Digital Signal Processing) หัวใจสำคัญคือวงจรการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC) โดยค่าสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) เป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา (Continuous-Time Signal) นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดหรือแอมพลิจูดสัญญาณอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเปลี่ยน แทนด้วยฟังก์ชัน $x(t)$ เมื่อนำสัญญาณดังกล่าวมาผ่านวงจรการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยอัตราในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) ค่าหนึ่ง ทำให้ได้ค่าสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) เป็นขนาดของสัญญาณอนาล็อก ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง มีความสัมพันธ์เป็นขนาดเทียบกับลำดับ (Sequence) ในการแปลงสัญญาณ เรียกสัญญาณลักษณะนี้ว่า สัญญาณไม่ต่อเนื่องทางเวลา (Discrete-Time Signal) แทนด้วยฟังก์ชัน $x[n]$ โดยอัตราการสุ่มตัวอย่างมีผลต่อความถูกต้องในการแปลงสัญญาณ กล่าวคือถ้าอัตราการสุ่มตัวอย่างสูง ทำให้สัญญาณดิจิทัลที่แปลงมามีค่าคลาดเคลื่อนน้อย แต่ในทางกลับกันถ้าอัตราการสุ่มตัวอย่างต่ำ ทำให้สัญญาณดิจิทัลที่แปลงมามีค่าคลาดเคลื่อนมาก ลักษณะการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล แสดงดังรูปที่ 2.28

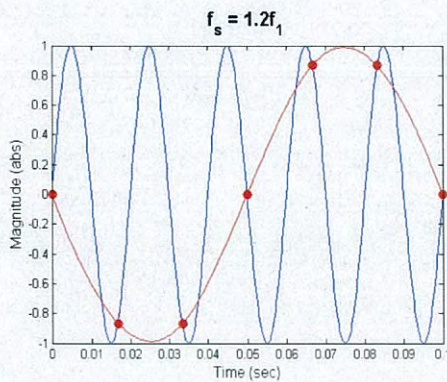


รูปที่ 2.28 ลักษณะการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

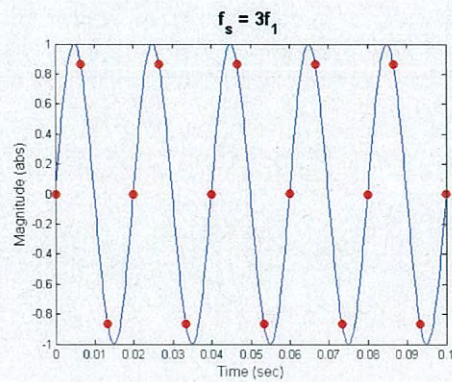
จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ความถูกต้องในการแปลงสัญญาณขึ้นอยู่กับอัตราในการสุ่มตัวอย่าง และอัตราในการสุ่มตัวอย่างขึ้นอยู่กับความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Frequency, f_s) โดยความถี่ที่เหมาะสมในการสุ่มตัวอย่าง เรียกว่า ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่สัญญาณที่นำมาประมวลผล (Signal Frequency, f_1) ตามสมการที่ 2.31 ซึ่งความถี่ดังกล่าวทำให้การแปลงสัญญาณดิจิทัลคืนกลับสู่สัญญาณอนาล็อกเป็นไปอย่างถูกต้อง แต่ถ้าความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าสองเท่าของความถี่สัญญาณที่นำมาประมวลผล ทำให้การแปลงสัญญาณดิจิทัลคืนกลับสู่สัญญาณอนาล็อกเกิดความคลาดเคลื่อน เรียกความถี่ในการสุ่มตัวอย่างดังกล่าวว่า ความถี่การเคลือบแฝง (Aliasing Frequency) อัตราการสุ่มตัวอย่างเมื่อความถี่ในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 1.2 เท่า 3 เท่า 6 เท่า และ 12 เท่า ของความถี่สัญญาณที่นำมาประมวลผล แสดงดังรูปที่ 2.29 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่ายิ่งความถี่ในการสุ่มตัวอย่างมีค่ามาก ทำให้ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณยังมีค่าน้อยลง และที่ความถี่ในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 1.2 เท่า ของความถี่สัญญาณที่นำมาประมวลผล เกิดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณหรือเกิด Aliasing เมื่อทำการแปลงสัญญาณคืนทำให้ได้สัญญาณเส้นสีแดง [29-30]

$$f_s \geq 2f_1 \quad (2.31)$$

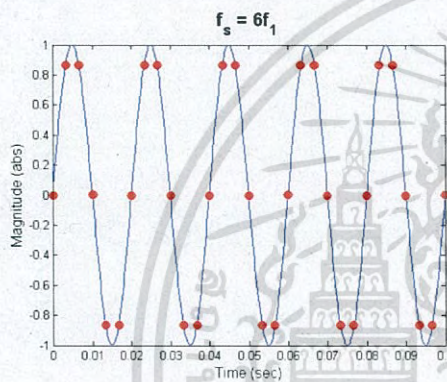
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



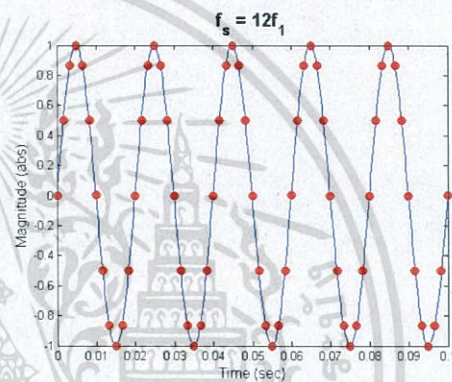
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.29 อัตราการสุ่มตัวอย่างเมื่อความถี่ในการสุ่มตัวอย่างเท่ากับ 1.2 เท่า (ก) 3 เท่า (ข) 6 เท่า (ค) และ 12 เท่า (ง) ของความถี่สัญญาณที่นำมาประมวลผล

2.6 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance/Resistance Tester) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเมกเกอร์แบบดั้งเดิม (Traditional Megger) เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยว (Single Clamp) และ เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ (Double Clamps) [11-12] ดังแสดงในรูปที่ 2.30



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.30 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน เมกเกอร์แบบดั้งเดิม (ก) แบบแคลมป์เดี่ยว (ข) และแบบแคลมป์คู่ (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเมกเกอร์แบบดั้งเดิม

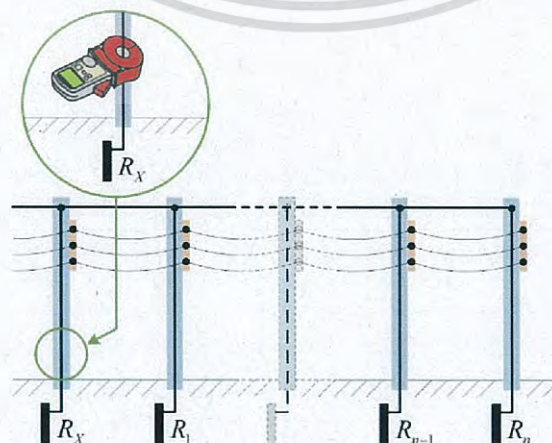
เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเมกเกอร์แบบดั้งเดิม มีข้อจำกัดสำคัญอยู่ 3 ข้อด้วยกัน ข้อแรกคือต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในขั้นตอนการวัดอย่างน้อย 2 หลัก ทำให้การวัดแต่ละครั้งกินเวลานาน ข้อต่อมาคือต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด ทำให้ต้องหยุดการทำงานของระบบขณะทำการวัด และข้อสุดท้ายคือเนื่องจากกระบวนการวัดต้องอาศัยมนุษย์ในการสร้างหลักดินช่วย ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดระหว่างกรวัดได้ ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยวขึ้น เพื่อแก้ข้อจำกัดดังกล่าว

2.6.2 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยว

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยว มีข้อดีที่เหนือกว่าเมกเกอร์แบบดั้งเดิมคือไม่ต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในการวัด ไม่ต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด นั่นคือสามารถวัดขณะที่ระบบยังทำงานอยู่ได้ โดยทำการคล้องเครื่องวัดเข้ากับหลักดินจากนั้นค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้จะแสดงบนหน้าจอของเครื่องวัดในเวลาอันสั้น แต่อย่างไรก็ตามเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยวยังคงมีข้อจำกัดอยู่ คือ มีความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดต่ำ เนื่องจากแคลมป์ที่ใช้ในการหนียวนำทำให้เกิดแรงดันในลูปความต้านทานการต่อลงดินกับแคลมป์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสใช้แคลมป์หรือแกนเดียวกัน จึงทำให้สัญญาณเกิดการรบกวนกันเอง และมีผลกระทบมากเมื่อวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินในระบบที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ที่ใช้ในการวัดทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงหรือในบางกรณีอาจไม่สามารถวัดค่าได้เลย ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ขึ้น เพื่อแก้ข้อจำกัดดังกล่าว

2.6.3 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะไม่เพียงแต่มีข้อดีเหมือนกับเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยวทุกประการแล้วยังมีข้อดีที่เหนือกว่าคือมีความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดสูง เพราะแคลมป์ที่ใช้ในการหนียวนำทำให้เกิดแรงดันในลูปความต้านทานการต่อลงดินกับแคลมป์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสแยกแแกนกัน [11-13] ลักษณะการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์ แสดงดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การทดสอบการต่อลงดิน

การทดสอบการต่อลงดิน (Earth Ground Testing Methods) สามารถแบ่งเป็น 6 การทดสอบหลัก ได้แก่ การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Earth Resistivity Measurements) การวัดค่าความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน (Ground Impedance Measurements) การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่สายดิน (Testing Earth Potentials and Step and Touch Voltages) การตรวจสอบความต่อเนื่องกันทางไฟฟ้า (Integrity of Grounding Systems) การวัดกระแสไฟฟ้าที่สายต่อหลักดิน (Current Splits) และการวัดค่าอิมพีแดนซ์ชั่วคราวรอบผิวดำรงลงดิน (Transient Impedance of Grounding System) [5-6] ในหัวข้อนี้ขอกล่าวถึงเฉพาะการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินและการวัดค่าความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน เนื่องจากการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย รายละเอียดของการวัดค่าความต้านทานดังกล่าวอธิบายดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.7.1 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ความต้านทานจำเพาะของดินหรือสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน (Earth or Soil Resistivity, ρ) คือความต้านทานที่วัดได้จากด้านตรงข้ามกันของลูกบาศก์ของดินที่มีแต่ละด้านยาวหนึ่งหน่วย มีหน่วยเป็น โอห์ม-เมตร (Ohm-meter, $\Omega\text{-m}$) และตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 1 ค่าความต้านทานการต่อลงดินนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ เกลือแร่ในดิน (Saline Water) ดินที่มีเกลือแร่มากมีแนวโน้มความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกว่าดินที่มีเกลือแร่ในดิน องค์ประกอบของดิน (Compositions) ดินที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์มากมีแนวโน้มความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกว่าดินที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์น้อย ขนาดของอนุภาคดิน (Size of Particles) ดินที่มีขนาดของอนุภาคเล็กมีแนวโน้มความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกว่าดินที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่ ความหนาแน่นของดิน (Compactness) ดินที่มีความหนาแน่นมากมีแนวโน้มความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกว่าดินที่มีความหนาแน่นน้อย อุณหภูมิ (Temperature) ดินที่มีอุณหภูมิสูงมีแนวโน้มความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกว่าดินที่มีอุณหภูมิต่ำ ความชื้นในดิน (Moisture) ดินที่มีความชื้นมากมีแนวโน้มความต้านทานจำเพาะของดินต่ำกว่าดินที่มีความชื้นน้อย และฤดูกาล (Weather Conditions) เนื่องจากฤดูกาลที่แตกต่างกันส่งผลให้ปัจจัยต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นเปลี่ยนแปลง ทำให้ความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงด้วย ตารางและกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตาม ชนิดของดิน เกลือแร่ในดิน อุณหภูมิ และความชื้นในดิน แสดงดังตารางที่ 2.2 ถึง 2.5 และรูปที่ 2.32 (ก) ถึง (ค) [31-33] ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามชนิดของดิน

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega\text{-m}$)		
	ถ้า ดินดาน ถ่าน	5.9	23.7
ดินเหนียว	3.4	40.6	163
ดินเหนียวปนทรายและกรวด	10.2	158	1,350
หินกรวดทรายที่มีเนื้อดินปนอยู่เล็กน้อย	590	940	4,580

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามเปอร์เซ็นต์เกลือแร่ในดินเหนียวปนทราย ความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ ตามน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส

เปอร์เซ็นต์เกลือแร่ในดิน (%)	ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω -m)
0	107
0.1	18
1.0	4.6
5	1.9
10	1.3
20	1

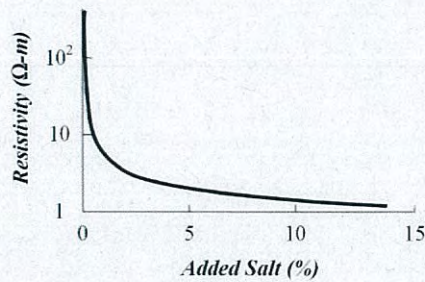
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามอุณหภูมิในดินเหนียวปนทรายความชื้น 15.2 เปอร์เซ็นต์ ตามน้ำหนัก

อุณหภูมิ		ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω -m)
องศาเซลเซียส ($^{\circ}$ C)	องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}$ F)	
20	68	72
10	50	99
0	32 (น้ำ)	138
0	32 (น้ำแข็ง)	300
-5	23	790
-15	14	3,300

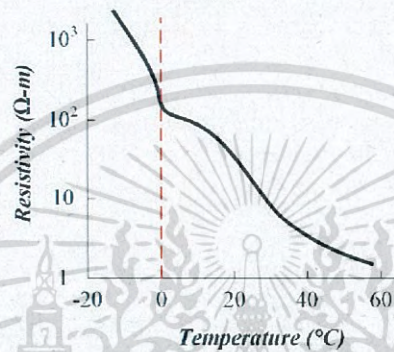
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตามเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตามน้ำหนัก

เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตามน้ำหนัก (%)	ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω -m)	
	ดินเหนียว	ดินเหนียวปนทราย
0	$>10^7$	$>10^7$
2.5	2,500	1,500
5	1,650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

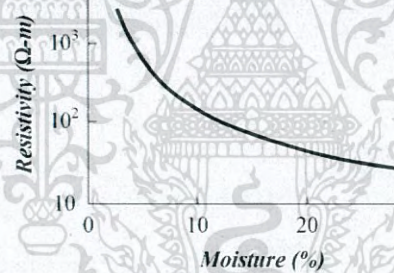
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



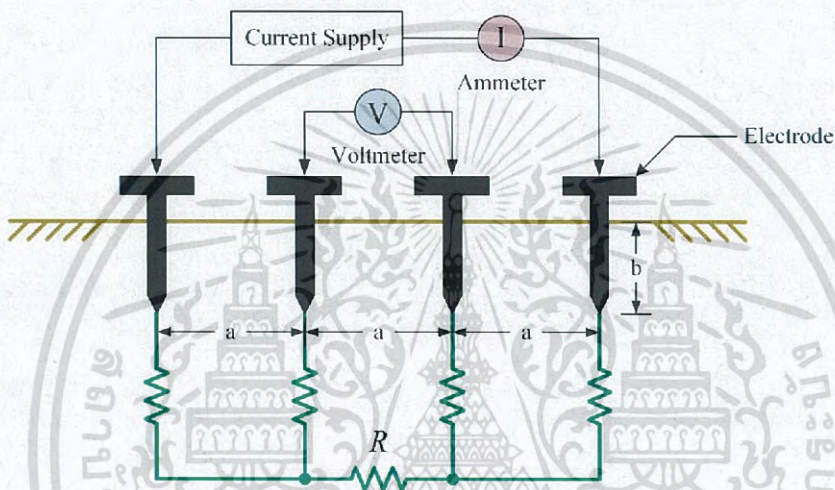
(ค)

รูปที่ 2.32 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานจำเพาะของดินตาม เกลือแร่ในดิน (ก) อุณหภูมิ (ข) และความชื้นในดิน (ค)

จากตารางและกราฟข้างต้นพบว่าค่าความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลงตามความชื้นและอุณหภูมิ ดังนั้นค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินจึงเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามความชื้นและอุณหภูมิลดความเปลี่ยนแปลงลงที่ดินระดับลึก จึงสามารถสรุปได้ว่าหลักดินที่ตอกลงไปถึงระดับความลึกที่เพียงพอมีเสถียรภาพในทุกฤดูกาล และมีเสถียรภาพมากที่สุดเมื่อตอกถึงจนถึงระดับน้ำใต้ดิน แต่ในบางพื้นที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงมากจนต้องลงทุนสูงและใช้ความพิถีพิถันมากในการสร้างระบบการต่อลงดินเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานการต่อลงดินต่ำและตรงตามมาตรฐาน วิธีแก้ที่ประหยัดกว่าคือการใช้สารเคมีช่วยปรับสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อดินในพื้นที่ดังกล่าวเป็นประจำ เพราะสารเคมีที่ใช้อาจมีความเข้มข้นลดลง เนื่องจากถูกละลายหรือถูกชะล้างด้วยฝนเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยทั่วไปมี 2 วิธี คือ วิธีการวัดแบบสองจุด (Two-Point Method) และวิธีการวัดแบบสี่จุด (Four-Point Method) ซึ่งวิธีการวัดแบบสี่จุดเป็นที่ยอมรับกันว่ามี ความแม่นยำมากกว่า หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า วิธีของเวนเนอร์ (Wenner's method) ทำการวัดโดยใช้ หลักดินทดสอบหรือแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) จำนวน 4 แท่ง ปักบนพื้นดินที่ต้องการวัดค่าความ ต้านทานจำเพาะของดินให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน 4 จุด และห่างกันเป็นระยะเท่าๆ กันเท่ากับ a โดยมี ระยะความลึกในการปักเท่ากับ b ซึ่งระยะ b ต้องไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์หรือ 0.05 เท่าของระยะห่าง a การ วัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีการวัดแบบสี่จุด แสดงดังรูปที่ 2.33 [31]



รูปที่ 2.33 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีการวัดแบบสี่จุด

ขั้นตอนในการวัดเริ่มจากเครื่องวัดสร้างกระแสทดสอบ (I) จ่ายให้กับหลักดินทดสอบ 2 หลักนอกสุด ทำให้กระแสทดสอบไหลลงสู่ดินผ่านหลักดินทดสอบ 2 หลักใน ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อม (V) ที่หลัก ดินทดสอบดังกล่าว โดยค่าแรงดันตกคร่อมที่หลักดินทดสอบ 2 หลักใน แปรผันตรงกับค่าความต้านทาน ดิน (R) ที่อ่านได้จากเครื่องวัด ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันตกคร่อมที่หลักดินทดสอบ 2 หลักใน (V) กับกระแสทดสอบ (I) มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω) จากนั้นนำค่าความต้านทานดินที่อ่านได้ ดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ตามสมการที่ 2.32 แต่เนื่องจากระยะความลึก b ถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.05 เท่าของระยะห่าง a ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะห่าง a เพื่อ ความง่ายและสะดวกในการคำนวณจึงประมาณระยะความลึก b ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถเขียน สมการความสัมพันธ์ใหม่ ดังสมการที่ 2.33 โดยผลลัพธ์ของการคำนวณค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จากสมการดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยของพิกัดความต้านทานของเนื้อดินที่ความลึกจากผิวดินลงไปเท่ากับระยะ a ของหลักดินทดสอบ

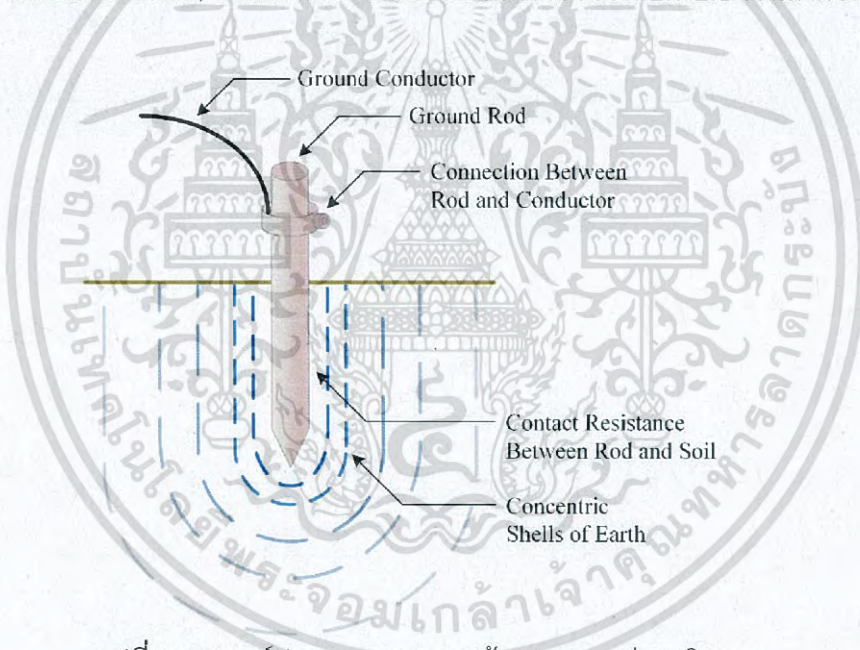
$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.32)$$

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การวัดค่าความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน

ความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน (Resistance to Ground, R) หรือความต้านทานการต่อลงดิน (Ground Impedance) เป็นความต้านทานรวมของ 3 องค์ประกอบความต้านทาน ได้แก่ ความต้านทานของสายต่อหลักดินจนถึงหลักดิน (The Resistance of The Ground Electrode and Its Connection) ความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างหลักดินกับเนื้อดิน (The Contact Resistance of The Surrounding Earth to The Electrode) และความต้านทานของเนื้อดินจนถึงจุดศูนย์ของดิน (The Resistance of The Surrounding Body of Earth) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าความต้านทานของสายต่อหลักดินจนถึงหลักดิน และค่าความต้านทานของผิวสัมผัสระหว่างหลักดินกับเนื้อดินมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานของเนื้อดินจนถึงจุดศูนย์ของดิน จึงสามารถกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานการต่อลงดินคือค่าความต้านทานของเนื้อดินจนถึงจุดศูนย์ของดินหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าค่าความต้านทานดินนั่นเอง องค์ประกอบของความต้านทานการต่อลงดิน แสดงดังรูปที่ 2.34 โดยเส้นประสีฟ้าแสดงถึงพื้นที่ส่งผล (Sphere of Influence or Concentric Shells of Earth) รายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.7.2.1 เป็นลำดับต่อไป

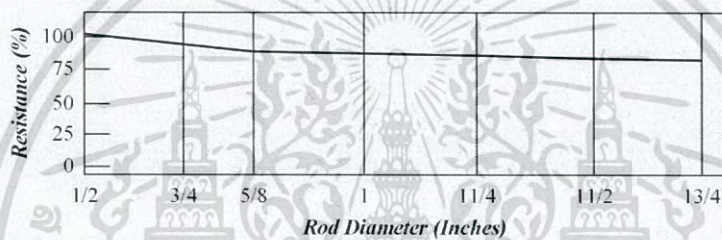


รูปที่ 2.34 องค์ประกอบของความต้านทานการต่อลงดิน

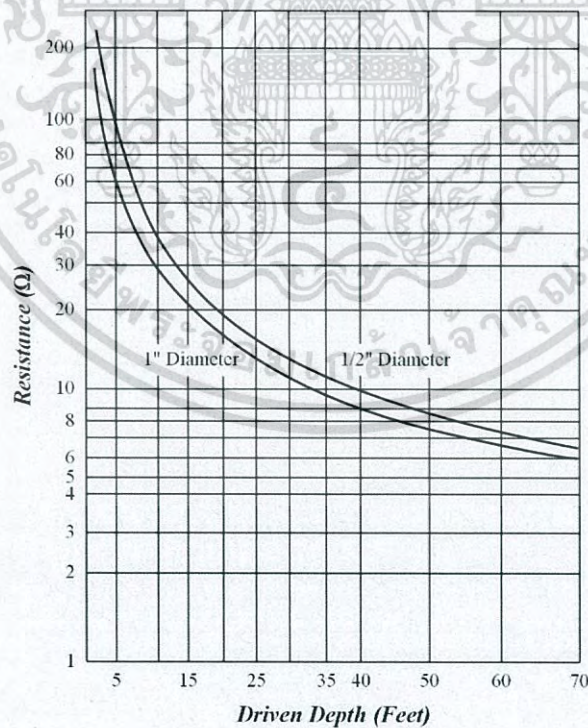
ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการต่อลงดินนอกจากที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อย่อยที่ 2.7.1 ซึ่งเป็นปัจจัยที่ค่อนข้างควบคุมยากหรือบางอย่างอาจไม่สามารถควบคุมได้เลย เช่น ฤดูกาล ยังมีปัจจัยที่สามารถควบคุมได้อีก 4 อย่าง ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดิน (Diameter of The Ground Electrode) ระบบการต่อลงดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินมากมีแนวโน้มความต้านทานการต่อลงดินต่ำกว่าระบบการต่อลงดินที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินน้อย ความลึกของหลักดิน (Depth of The Ground Electrode) ระบบการต่อลงดินที่มีความลึกของหลักดินมากมีแนวโน้มความต้านทานการต่อลงดินต่ำกว่าระบบการต่อลงดินที่มีความลึกของหลักดินน้อย จำนวนหลักดิน (Number of Ground Electrodes) ระบบการต่อลงดินที่มีจำนวนหลักดินมากมีแนวโน้มความต้านทานการต่อลงดินต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการต่อลงดินที่มีจำนวนหลักดินน้อย และการออกแบบระบบการต่อลงดิน (Ground System Design) โดยระบบการต่อลงดินสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบทั่วไป (Simple Grounding Systems) ประกอบด้วย หลักดินเพียงหนึ่งแท่งต่อลงดิน (Single Ground Electrode) ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันมากที่สุดตามอาคารบ้านเรือนทั่วไป และแบบซับซ้อน (Complex Grounding Systems) ประกอบด้วย หลักดินหลายแท่งที่เชื่อมต่อกันต่อลงดิน (Multiple Ground Electrodes Connected) โครงข่ายกริด (Mesh or Grid Networks) และแผ่นกราวด์ (Ground Plate) เป็นต้น ซึ่งเป็นแบบที่ใช้ใน โรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าย่อย โรงงานอุตสาหกรรม และอาคารสำนักงาน โดยระบบการต่อลงดินแบบซับซ้อนมีแนวโน้มความต้านทานการต่อลงดินต่ำกว่าระบบการต่อลงดินแบบทั่วไป กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานการต่อลงดินตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินและระยะความลึกของหลักดิน แสดงดังรูปที่ 2.35 (ก) และ (ข) [32-33] ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.35 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานการต่อลงดินตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดิน (ก) และระยะความลึกของหลักดิน (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.35 (ก) สังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินเป็น 2 เท่าจากเดิม ทำให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินลดลงสูงสุดน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินตั้งแต่ 5 หุน หรือ 5/8 นิ้วขึ้นไป การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลักดินแทบไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานการต่อลงดินเลย ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมในการลดค่าความต้านทานการต่อลงดินคือการเพิ่มระยะความลึกของหลักดิน จากรูปที่ 2.35 (ข) สังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของระยะความลึกของหลักดินเป็น 2 เท่าจากเดิม ทำให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินลดลงโดยเฉลี่ย 40 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐาน NEC (National Electrical Code) ระบุไว้ว่า “หลักดินต้องสัมผัสกับเนื้อดินที่ความลึกอย่างน้อยที่สุด 8 ฟุต หรือ 2.4 เมตร” ด้วยเหตุนี้หลักดินที่นิยมนำมาใช้งานกันมากที่สุดคือหลักดินรูปทรงกระบอกที่มีความยาว 10 ฟุต หรือ 3 เมตร นั้นเอง และมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อยที่สุด 5 หุน หรือ 5/8 นิ้ว หรือ 1.59 เซนติเมตร สำหรับหลักดินที่ทำมาจากเหล็กกล้า (Steel Rods) และ 4 หุน หรือ 1/2 นิ้ว หรือ 1.27 เซนติเมตร สำหรับหลักดินที่ทำมาจากทองแดงหรือเหล็กกล้าชุบด้วยทองแดง (Copper or Copper-Clad Steel Rods) แต่อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่นั้นยากต่อการปักหลักดินให้ลึกลงไปในระยะตามที่ต้องการ อาจเนื่องมาจากระดับของชั้นดินที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ทำให้การติดตั้งหลักดินมีความยากง่ายต่างกัน หรือเมื่อปักหลักดินลงไปในระยะตามที่ต้องการแล้วแต่ค่าความต้านทานการต่อลงดินยังคงสูงเกินกว่ามาตรฐานอยู่ วิธีแก้ก็อีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้เพื่อให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินลดลงคือการปักหลักดินเพิ่มหรือการทำให้จำนวนหลักดินเพิ่มขึ้นนั่นเอง โดยหลักดินที่ปักเพิ่มต้องมีระยะห่างระหว่างกันมากกว่าหรือเท่ากับระยะความลึกของหลักดินเดิม และต้องปักลงไปที่ระยะความลึกเท่ากัน วิธีดังกล่าวเปรียบเหมือนเป็นการเพิ่มตัวต้านทานไปต่อขนานกับค่าความต้านทานการต่อลงดินเดิมที่มีอยู่ ทำให้ผลรวมของค่าความต้านทานการต่อลงดินลดลง ตัวคูณของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่จำนวนหลักดินตั้งแต่สองถึงยี่สิบสี่หลัก แสดงดังตารางที่ 2.6 โดยวิธีการคำนวณเริ่มจากนำค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้ที่ใช้หลักดิน 1 หลัก มาหารด้วยจำนวนหลักดินใหม่ที่ต้องการปัก แล้วนำไปคูณด้วยตัวคูณตามจำนวนหลักดินในตาราง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยตัวคูณดังกล่าวเป็นค่าความต้านทานการต่อลงดินโดยประมาณเท่านั้น เพื่อใช้ประเมินความเหมาะสมในการติดตั้ง

ตารางที่ 2.6 ตัวคูณของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่จำนวนหลักดินตั้งแต่สองถึงยี่สิบสี่หลัก

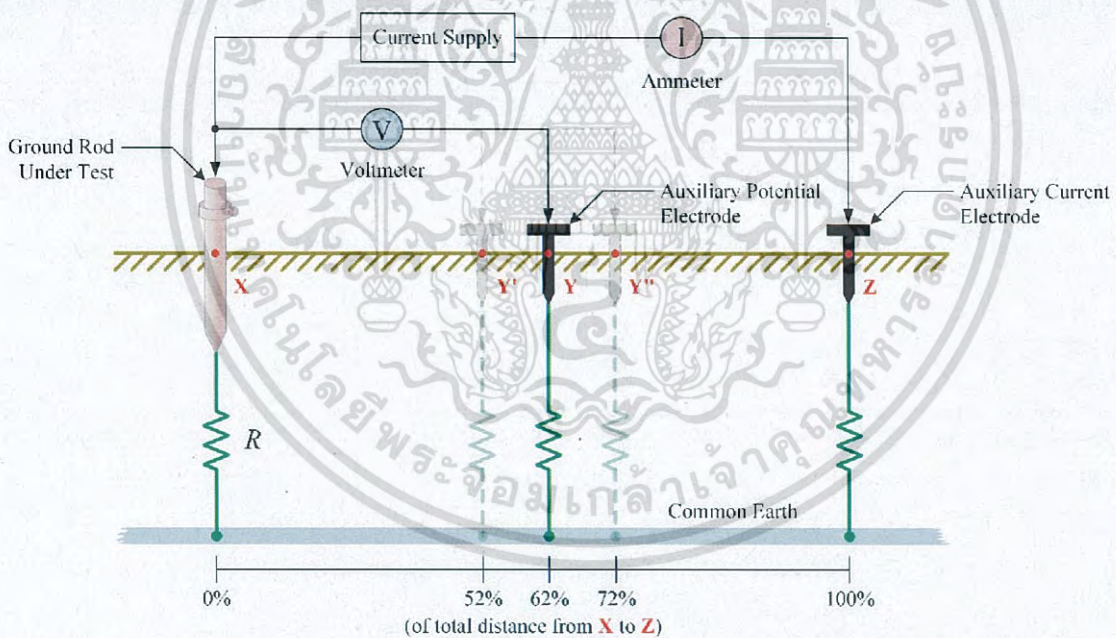
จำนวนหลักดิน	ตัวคูณ
2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความต้านทานของระบบการต่อลงดินหรือค่าความต้านทานการต่อลงดิน เป็นการวัดหลังจากทำการติดตั้งระบบการต่อลงดินเรียบร้อยแล้ว เพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานการต่อลงดินที่เกิดขึ้นจริงว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณหรือตรงตามมาตรฐานหรือไม่ วิธีการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้กันโดยทั่วไปมี 5 วิธี ได้แก่ วิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์ (Fall-of-Potential, FOP or 62% Method) วิธีการวัดแบบเจาะจงแห่งโลหะ (Selective Method) วิธีการวัดแบบสองจุด (Simplified or Two-Point Method) วิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแห่งโลหะ (Clamp-on or Stakeless Method) และวิธีการวัดแบบสามจุด (Three-Point Method) รายละเอียดของการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแต่ละวิธีอธิบายดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

2.7.2.1 วิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์

วิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์หรือในบางตำราเรียกว่าวิธีการวัดแบบสามจุด เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ใน 5 วิธีที่น่าเสนอ และยังเป็นวิธีการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามีความแม่นยำมากที่สุด การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 2.36 [5-6, 32-33]



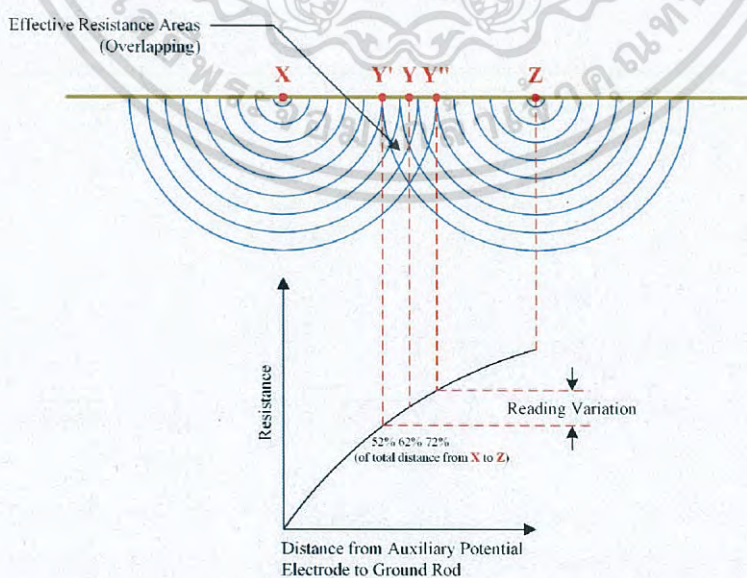
รูปที่ 2.36 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบหกสิบสองเปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 2.36 กำหนดให้หลักดินที่ทำการทดสอบ (Ground Rod Under Test) เป็นตำแหน่ง X และทำการวัดโดยปักหลักดินช่วยหรือแห่งอิเล็กทรอนิกส์ทรดช่วยจำนวน 2 แห่ง ให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับหลักดินที่ทำการทดสอบ แห่งที่หนึ่งคือ หลักดินช่วยวัดกระแส (Auxiliary Current Electrode) ต่อเข้ากับแอมมิเตอร์สำหรับวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทานการต่อลงดิน (R) กำหนดให้เป็นตำแหน่ง Z โดยปักที่ระยะห่างจากหลักดินที่ทำการทดสอบระยะหนึ่ง และแห่งที่สองคือ หลักดินช่วยวัดแรงดัน (Auxiliary Potential Electrode) ต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานการต่อลงดิน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อลงดิน (R) ระหว่างหลักดินที่ทำการทดสอบกับจุดศูนย์ของดิน (Common Earth) กำหนดให้เป็นตำแหน่ง Y โดยปักที่ระยะห่างจากหลักดินที่ทำการทดสอบ 62 เปอร์เซ็นต์ ของระยะ $X-Z$

ขั้นตอนในการวัดเริ่มจากเครื่องวัดสร้างกระแสทดสอบ (I) จ่ายให้กับหลักดินช่วยวัดกระแสที่ตำแหน่ง Z และกลับไปครบวงจรที่หลักดินที่ทำการทดสอบ หรือจ่ายให้กับหลักดินที่ทำการทดสอบและกลับไปครบวงจรที่หลักดินช่วยวัดกระแสที่ตำแหน่ง Z ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อม (V) ระหว่างหลักดินที่ทำการทดสอบที่ตำแหน่ง X และหลักดินช่วยวัดแรงดันที่ตำแหน่ง Y โดยค่าแรงดันตกคร่อมดังกล่าวคือค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานการต่อลงดิน (R) ระหว่างหลักดินที่ทำการทดสอบกับจุดศูนย์ของดินนั่นเอง ค่าความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องวัดเป็นค่าความต้านทานการต่อลงดิน (R) ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันตกคร่อม (V) กับกระแสทดสอบ (I) มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

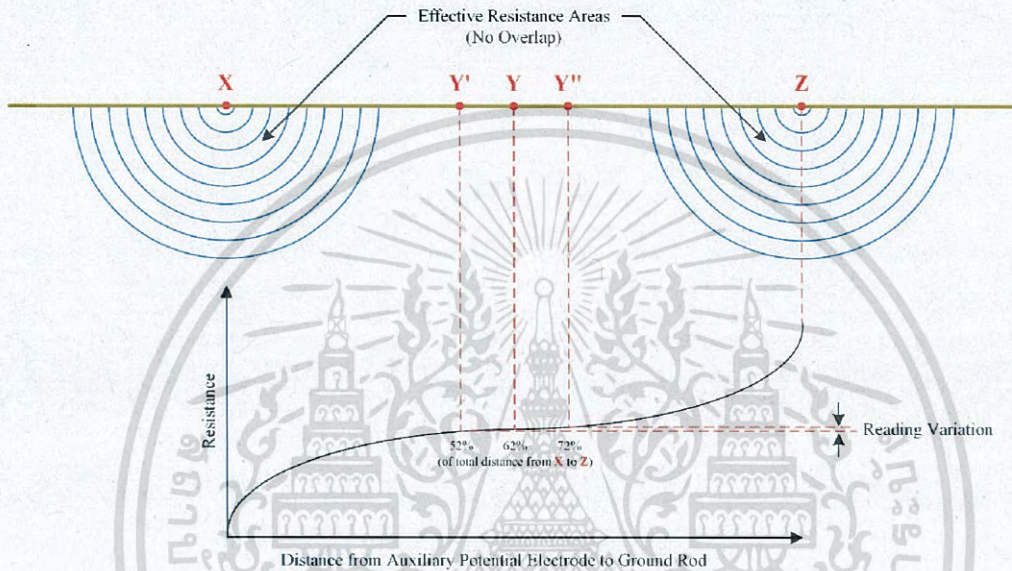
ในทางปฏิบัติการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินให้มีความแม่นยำต้องปักหลักดินช่วยวัดกระแสที่ตำแหน่ง Z ให้มีระยะห่างที่เหมาะสมจากหลักดินที่ทำการทดสอบที่ตำแหน่ง X เพื่อให้หลักดินช่วยวัดแรงดันที่ตำแหน่ง Y อยู่บนพื้นที่ส่งผล (Sphere of Influence or Concentric Shells of Earth or Effective Resistance Areas) โดยพื้นที่ดังกล่าวคือพื้นที่ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของหลักดินที่ทำการทดสอบ เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากการไหลของกระแสทดสอบ ทำให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินที่อ่านได้จากเครื่องวัดไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องและมีความแปรปรวนในการอ่าน (Reading Variation) สูง วิธีพิสูจน์ว่าหลักดินช่วยวัดแรงดันที่ตำแหน่ง Y อยู่บนพื้นที่ส่งผลหรือไม่คือการลองย้ายตำแหน่ง Y ในแนว $X-Z$ ให้มีระยะลดลงและเพิ่มขึ้นจากเดิม 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นระยะห่างจากหลักดินที่ทำการทดสอบ 52 และ 72 เปอร์เซ็นต์ ของระยะ $X-Z$ กำหนดให้เป็นตำแหน่ง Y' และ Y'' ตามลำดับ หากหลักดินช่วยวัดแรงดันอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวของตำแหน่ง X หรือ Z หรือทั้ง X และ Z ซึ่งซ้อนทับกัน (Overlapping) ดังแสดงในรูปที่ 2.37 ค่าความต้านทานการต่อลงดินที่อ่านได้เมื่อย้ายหลักดินช่วยวัดแรงดันที่ตำแหน่ง Y ไป Y' และ Y'' จะแตกต่างกันมากและไม่มีค่าใดเป็นค่าที่ถูกต้อง



รูปที่ 2.37 ความต้านทานการต่อลงดินเมื่อหลักดินช่วยวัดแรงดันอยู่ในพื้นที่ส่งผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางตรงกันข้าม หากหลักดินช่วยวัดแรงดันอยู่นอกพื้นที่ส่งผลของตำแหน่ง X และ Z หรือพื้นที่ส่งผลของทั้งตำแหน่ง X และ Z ไม่ซ้อนทับกัน (No Overlap) ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ค่าความต้านทานการต่อลงดินที่อ่านได้เมื่อย้ายหลักดินช่วยวัดแรงดันที่ตำแหน่ง Y ไป Y' และ Y'' จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือมีความแปรปรวนในการอ่าน (Reading Variation) ต่ำนั่นเอง และค่าดังกล่าวจะเป็นค่าที่แท้จริงของความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบที่ตำแหน่ง X



รูปที่ 2.38 ความต้านทานการต่อลงดินเมื่อหลักดินช่วยวัดแรงดันอยู่นอกพื้นที่ส่งผล

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่าการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบหกสลิปสองเปอร์เซ็นต์ให้มีความแม่นยำต้องกำหนดระยะ X-Z ให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้หลักดินช่วยวัดแรงดันอยู่ในพื้นที่ส่งผล วิธีการวัดแบบนี้มีข้อเสียที่สำคัญคือต้องมีการปลดระบบการต่อลงดินออกจากระบบไฟฟ้า และต้องสร้างหลักดินช่วยก่อนทำการวัด ระยะแนะนำสำหรับการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ระยะความลึกต่างๆ ด้วยวิธีการวัดแบบหกสลิปสองเปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 2.7 [32-33]

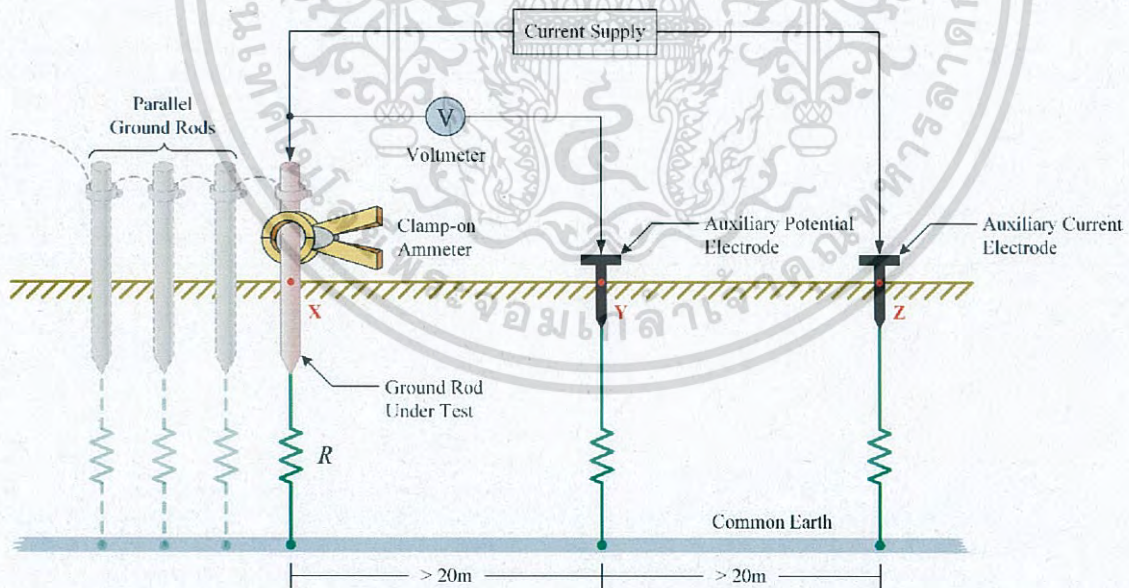
ตารางที่ 2.7 ระยะแนะนำสำหรับการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ระยะความลึกต่างๆ ด้วยวิธีการวัดแบบหกสลิปสองเปอร์เซ็นต์

ระยะความลึกของหลักดินที่ทำการทดสอบ (เมตร)	ระยะห่างจากหลักดินที่ทำการทดสอบถึงหลักดินช่วยวัดแรงดัน (เมตร)	ระยะห่างจากหลักดินที่ทำการทดสอบถึงหลักดินช่วยวัดกระแส (เมตร)
2	15	25
3	20	30
6	25	40
10	30	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.2 วิธีการวัดแบบเจาะจงแห่งโลหะ

วิธีการวัดแบบเจาะจงแห่งโลหะ (Selective Method) เป็นวิธีที่ใช้หลักการวัดเช่นเดียวกับวิธีการวัดแบบหกลีบสองเปอร์เซ็นต์ แต่ต่างกันตรงที่มีการใช้แคลมป์วัดกระแส (Clamp-on Ammeter) ช่วยในการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านหลักดินที่ทำการทดสอบแทนที่การใช้แอมมิเตอร์แบบทั่วไปวัดกระแสทดสอบที่สร้างจากเครื่องวัด ข้อดีของการวัดด้วยวิธีนี้ที่เหนือกว่าวิธีการวัดแบบหกลีบสองเปอร์เซ็นต์คือไม่ต้องมีการปลดระบบการต่อลงดินออกจากระบบไฟฟ้าก่อนทำการวัด นั่นคือสามารถวัดขณะที่ระบบยังทำงานอยู่ได้ และสามารถวัดในกรณีที่หลักดินที่ทำการทดสอบเชื่อมต่อไปกับหลักดินแห่งอื่นแบบขนาน (Parallel Ground Rods) แต่ต้องการวัดเฉพาะค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบเพียงหลักเดียว เนื่องจากกระแสที่วัดได้จากแคลมป์วัดกระแสเป็นค่าของกระแสจริงที่ไหลผ่านหลักดินที่ทำการทดสอบ ทำให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินที่อ่านได้จากเครื่องวัด (R) ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันตกคร่อมความต้านทานการต่อลงดินกับกระแสที่ไหลผ่านหลักดินที่ทำการทดสอบเป็นค่าที่ถูกต้อง ต่างกับการวัดแบบหกลีบสองเปอร์เซ็นต์ที่วัดกระแสทดสอบซึ่งเป็นค่าของกระแสรวมที่ผ่านหลักดินทุกแห่ง ทำให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินที่อ่านได้จากเครื่องวัดไม่ใช่ค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบแต่เป็นค่าความต้านทานการต่อลงดินรวมของทั้งระบบ วิธีการวัดแบบนี้มีข้อเสียที่สำคัญคือต้องสร้างหลักดินช่วย (Auxiliary Electrode) อย่างต่ำ 2 หลัก ก่อนทำการวัด ได้แก่ หลักดินช่วยวัดกระแส (Auxiliary Current Electrode) และหลักดินช่วยวัดแรงดัน (Auxiliary Voltage Electrode) การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบเจาะจงแห่งโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.39

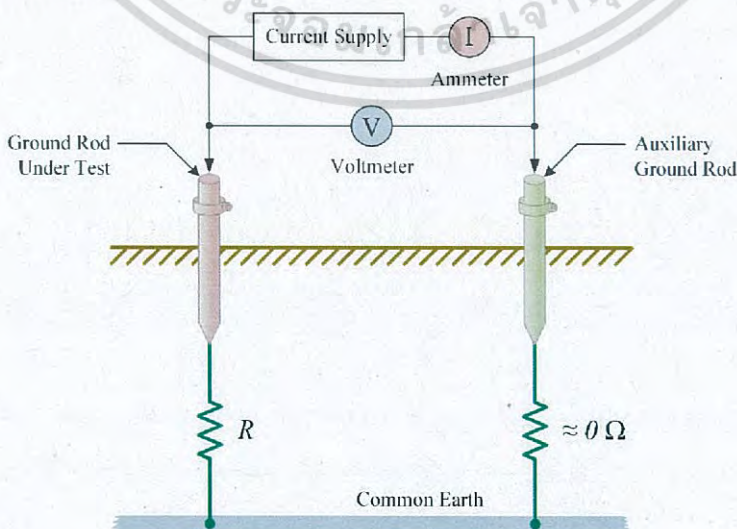


รูปที่ 2.39 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบเจาะจงแห่งโลหะ

2.7.2.3 วิธีการวัดแบบสองจุด

วิธีการวัดแบบสองจุด (Simplified or Two-Point Method) เป็นวิธีการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้เมื่อหลักดินที่ทำการทดสอบอยู่ในพื้นที่ที่ยากต่อการสร้างหลักดินช่วยและพื้นที่บริเวณใกล้เคียงมีระบบการต่อลงดินหรือหลักดินที่ทราบค่าความต้านทานการต่อลงดิน การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบสองจุด แสดงดังรูปที่ 2.40 กำหนดให้หลักดินที่ทำการทดสอบ (Ground Rod Under Test) มีค่าความต้านทานการต่อลงดินเท่ากับ R และหลักดินที่ทราบค่าความต้านทานการต่อลงดินแทนเป็นหลักดินช่วย (Auxiliary Ground Rod) มีค่าความต้านทานการต่อลงดินต่ำมาก (Excellent Ground) ประมาณเท่ากับศูนย์

ขั้นตอนในการวัดเริ่มจากเครื่องวัดสร้างกระแสทดสอบ (I) จ่ายให้กับหลักดินช่วยที่มีค่าความต้านทานการต่อลงดินประมาณเท่ากับศูนย์และกลับไปครบวงจรที่หลักดินที่ทำการทดสอบ หรือจ่ายให้กับหลักดินที่ทำการทดสอบและกลับไปครบวงจรที่หลักดินช่วย ส่งผลให้เกิดแรงดันตกคร่อม (V) ระหว่างหลักดินที่ทำการทดสอบและหลักดินช่วย โดยค่าแรงดันตกคร่อมดังกล่าวเป็นผลรวมของค่าแรงดันตกคร่อมความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบและของหลักดินช่วยซึ่งกำหนดให้มีค่าต่ำมากประมาณเท่ากับศูนย์ ดังนั้นค่าความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องวัดจึงเป็นค่าความต้านทานการต่อลงดิน (R) ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากอัตราส่วนระหว่างแรงดันตกคร่อม (V) กับกระแสทดสอบ (I) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ohm, Ω) แต่หากหลักดินช่วยมีค่าความต้านทานการต่อลงดินค่าหนึ่งซึ่งไม่เท่ากับศูนย์ ค่าความต้านทานที่อ่านได้จากเครื่องวัดจะเป็นผลรวมของค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบอนุกรมกันของหลักดินที่ทำการทดสอบ (R) และของหลักดินช่วย ดังนั้นจึงต้องนำค่าดังกล่าวมาลบออกด้วยค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินช่วยเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบ (R) อย่างไรก็ตามการวัดด้วยวิธีนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากต้องคำนึงถึงระยะห่างระหว่างหลักดินที่ทำการทดสอบกับหลักดินช่วย และไม่ควรใช้เป็นวิธีการวัดมาตรฐานสำหรับตรวจรับงาน แต่สามารถใช้เพื่อดูแนวโน้มหรือค่าโดยประมาณของค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบในพื้นที่ที่ยากต่อการสร้างหลักดินช่วย

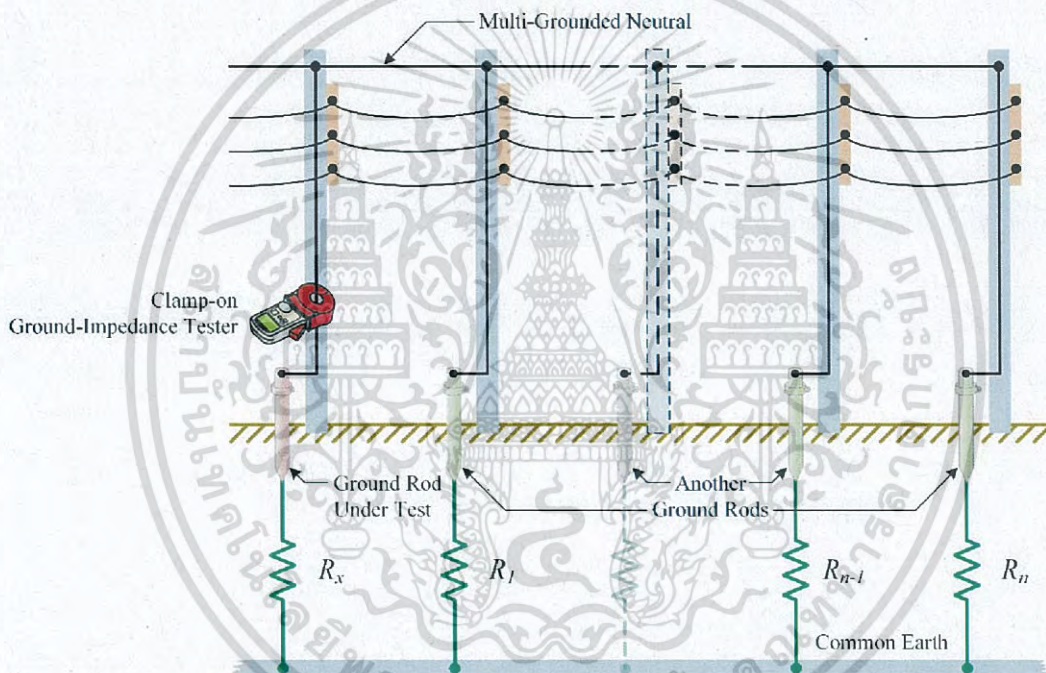


รูปที่ 2.40 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบสองจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2.4 วิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ

วิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ (Clamp-on or Stakeless Method) เป็นวิธีการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ไม่ต้องใช้หลักดินช่วยวัดกระแสหรือหลักดินช่วยวัดแรงดันในขั้นตอนการวัด ใช้สำหรับระบบการต่อลงดิน (Grounding System) แบบระบบมัลติกราวด์นิวตรอน (Multi-grounded Neutral System) หรือระบบที่มีลูปความต้านทานการต่อลงดิน (Ground Loop) โดยใช้เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ (Clamp-on Ground-Impedance Tester) การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.41 กำหนดให้หลักดินที่ทำการทดสอบ (Ground Rod Under Test) มีค่าความต้านทานการต่อลงดินเท่ากับ R_x และหลักดินในตำแหน่งอื่นๆ ของระบบมัลติกราวด์นิวตรอนมีค่าความต้านทานการต่อลงดินเท่ากับ $R_1, R_2 \dots R_n$ โดยรายละเอียดของวิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.8 เป็นลำดับต่อไป [5-6]

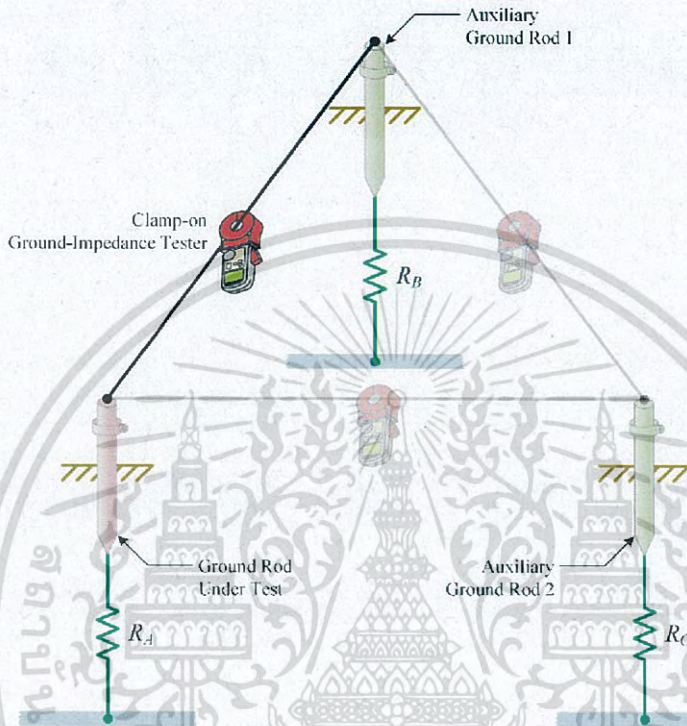


รูปที่ 2.41 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ

2.7.2.5 วิธีการวัดแบบสามจุด

วิธีการวัดแบบสามจุด (Three-Point Method) เป็นวิธีที่ใช้หลักการวัดเช่นเดียวกับวิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ โดยใช้เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ (Clamp-on Ground-Impedance Tester) แต่ต่างกันตรงที่หากระบบการต่อลงดินที่ต้องการวัดไม่ใช่แบบระบบมัลติกราวด์นิวตรอนหรือระบบที่มีลูปความต้านทานการต่อลงดินแล้วต้องการวัดด้วยเครื่องวัดดังกล่าว ต้องปลดหลักดินที่ทำการทดสอบ (Ground Rod Under Test) ออกจากระบบไฟฟ้าและสร้างหลักดินช่วย (Auxiliary Ground Rod) จำนวน 2 หลัก ก่อนทำการวัด โดยระยะความลึกของหลักดินช่วยต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะความลึกของหลักดินที่ทำการทดสอบ และมีระยะห่างระหว่างกันทั้งสามหลัก

เป็น 3 เท่าของระยะความลึกของหลักดินที่ทำการทดสอบ การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.42 กำหนดให้หลักดินที่ทำการทดสอบมีค่าความต้านทานการต่อลงดินเท่ากับ R_A และหลักดินช่วยหลักที่ 1 และ 2 มีค่าความต้านทานการต่อลงดินเท่ากับ R_B และ R_C ตามลำดับ



รูปที่ 2.42 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยวิธีการวัดแบบสามจุด

ขั้นตอนในการวัดเริ่มจากเชื่อมต่อหลักดินที่ทำการทดสอบกับหลักดินช่วยหลักที่ 1 ด้วยสายไฟเพื่อทำให้เกิดลูปความต้านทานการต่อลงดิน แล้วนำเครื่องวัดแบบแคลมป์มาคล้องสายไฟหรือลูปดังกล่าวเพื่อวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน ค่าที่วัดได้เป็นผลรวมของค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบและหลักดินช่วยหลักที่ 1 ดังสมการที่ 2.34 และปลดสายไฟดังกล่าวออก ทำเช่นนี้อีกสองครั้งโดยทำการเชื่อมต่อหลักดินที่ทำการทดสอบกับหลักดินช่วยหลักที่ 2 และหลักดินช่วยหลักที่ 1 กับหลักดินช่วยหลักที่ 2 ซึ่งค่าที่วัดได้ในแต่ละครั้งเป็นผลรวมของค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่เชื่อมต่อกันดังกล่าว ดังสมการที่ 2.35 และ 2.36 ตามลำดับ จากสมการข้างต้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานการต่อลงดินของหลักดินที่ทำการทดสอบ ดังสมการที่ 2.37

$$R_1 = R_A + R_B \quad (2.34)$$

$$R_2 = R_A + R_C \quad (2.35)$$

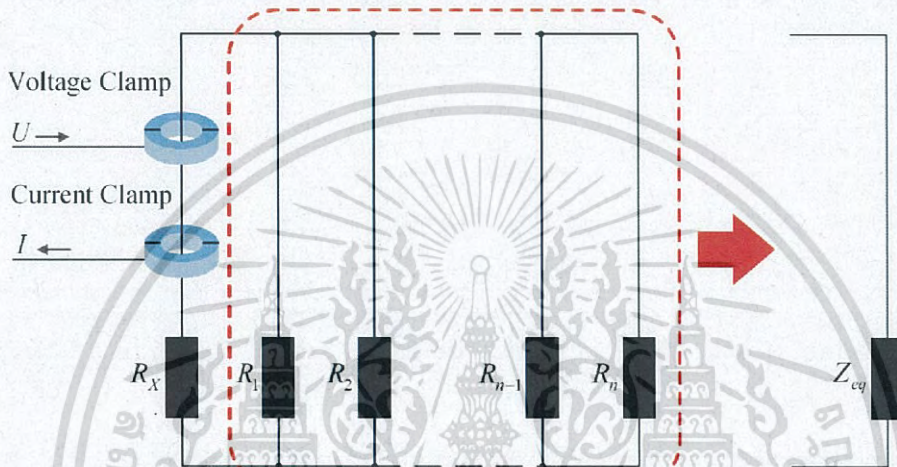
$$R_3 = R_B + R_C \quad (2.36)$$

$$R_A = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 หลักการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์คู่

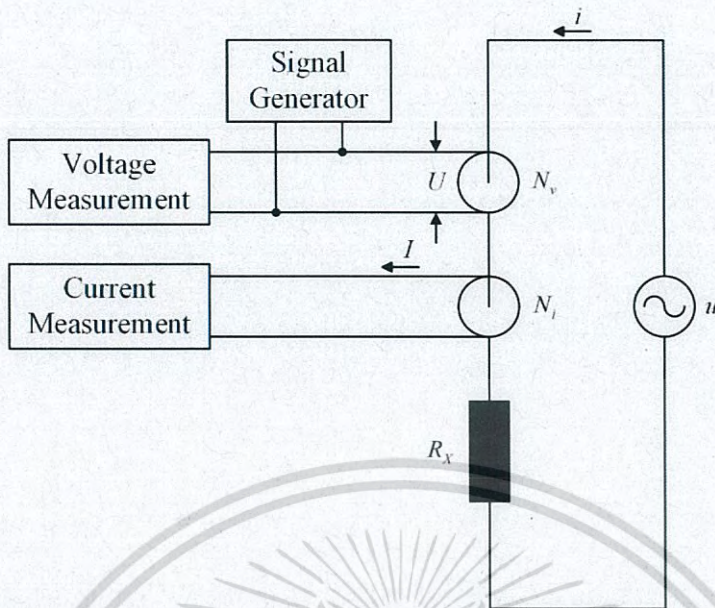
ระบบการต่อลงดินของโรงไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าย่อยโดยทั่วไปเป็นแบบระบบมัลติกราวด์นิวตรอน (Multi-grounded Neutral System) แสดงดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.43 ตัวแปร U และ I แทนแรงดันป้อนเข้าแคลมป์แรงดัน และกระแสเหนี่ยวนำจากการวัดของแคลมป์กระแส ตามลำดับ R_x คือความต้านทานการต่อลงดินของแท่งหลักดินที่เราต้องการทราบค่า และ $R_1, R_2 \dots R_n$ คือความต้านทานการต่อลงดินของแท่งหลักดินในตำแหน่งอื่นๆ ของระบบมัลติกราวด์นิวตรอน Z_{eq} คือผลรวมแบบขนานของค่าความต้านทานการต่อลงดิน $R_1, R_2 \dots R_n$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.38



รูปที่ 2.43 วงจรสมมูลของระบบมัลติกราวด์นิวตรอน

$$Z_{eq} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} \quad (2.38)$$

วิธีการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) [5] ในหัวข้อย่อยที่ 8.2.2.5 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินโดยใช้วิธีทดสอบแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ (Resistance measurements by clamp-on or stakeless method) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าผลรวมแบบขนานของค่าความต้านทานการต่อลงดินในตำแหน่งอื่นๆ นอกเหนือจากตำแหน่งของแท่งหลักดินที่ทำการวัดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการต่อลงดินของแท่งหลักดินที่ทำการวัดจึงอนุมานได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ ($Z_{eq} = 0$) และสามารถลดรูปวงจรถสมมูลจากรูปที่ 2.43 เขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 วงจรสมมูลของการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่

จากรูปที่ 2.44 ตัวแปร N_v และ N_i แทนจำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดันและแคลมป์กระแสตามลำดับ ขั้นตอนในการวัดเริ่มจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) บ้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำคงที่ค่าหนึ่ง U ให้กับขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดัน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน u ขึ้นในลูปความต้านทานการต่อลงดินผ่านการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมการที่ 2.39 แรงดันเหนี่ยวนำ u ทำให้เกิดกระแส i ตามสมการที่ 2.40 และกระแส I คือกระแสที่ไหลในขดลวดที่พันรอบแคลมป์กระแส มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.41 จากสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน R_x ได้จากสมการที่ 2.42 และ 2.43 [11-13]

$$u = \frac{U}{N_v} \quad (2.39)$$

$$i = \frac{u}{R_x} \quad (2.40)$$

$$I = \frac{i}{N_i} \quad (2.41)$$

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kU}{I} \quad (2.42)$$

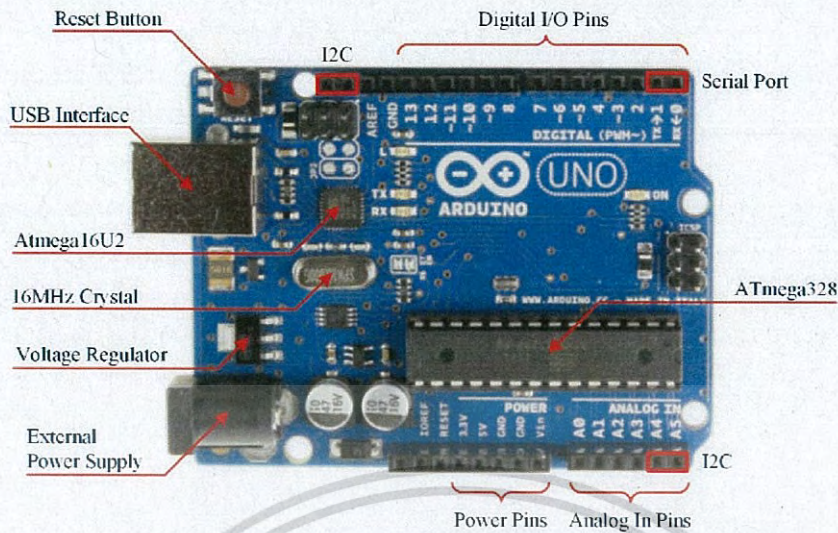
$$k = \frac{1}{N_v N_i} \quad (2.43)$$

2.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 บอร์ดหลัก ได้แก่ บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบเปิด (Open Source) นั่นคือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ จุดเด่นสำคัญที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม คือความสะดวกในการรหัสโปรแกรมลงตัวประมวลผลหลัก (Microcontroller Unit, MCU) เนื่องจากในบอร์ดประกอบด้วยชิป ATmega16U2 ซึ่งเป็นชิปแปลงสัญญาณยูเอสบีเป็นอนุกรม (USB-to-Serial Converter) ทำให้สามารถรหัสโปรแกรมลง MCU ได้ง่ายเพียงเชื่อมต่อสายยูเอสบีระหว่างคอมพิวเตอร์กับตัวบอร์ดโดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ช่วยรหัสโปรแกรมจากภายนอกเหมือนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อื่น จุดเด่นอีกประการคือการใช้ภาษาในการเขียนโปรแกรมที่เข้าใจง่ายไม่ซับซ้อนรวมถึงการเปิดให้ใช้ซอฟต์แวร์ (Arduino Software, IDE) โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย บอร์ด Arduino มีหลายรุ่นด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 (Package DIP) และรุ่น MEGA 2560 Rev3 มาใช้ในการทดลองเป็นหลัก ซึ่งทั้งสองเป็นรุ่นที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพง และโดยส่วนใหญ่แล้ว Library ต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมาขึ้นอ้างอิงกับบอร์ดรุ่น UNO เป็นหลัก บอร์ด Arduino รุ่น UNO เป็นบอร์ดที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นเรียนรู้ Arduino เพราะมีอุปกรณ์เสริมให้เลือกใช้งานได้มากกว่าบอร์ด Arduino รุ่นอื่น โดยตัวบอร์ดได้มีการพัฒนาเรื่อยมา ตั้งแต่ Rev2 Rev3 และรุ่นย่อยที่เปลี่ยนชิปประมวลผลเป็นแบบ SMD ซึ่งข้อดีของแบบ DIP ที่เหนือกว่าแบบ SMD คือในกรณีที่ MCU เสีย ผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนชิปประมวลผลเองได้ง่าย ส่วนบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 เป็นบอร์ดที่สามารถทำงานได้เหมือนกับบอร์ด Arduino รุ่น UNO ทุกประการ แต่มีข้อดีที่เหนือกว่าคือมีขาใช้งานและพอร์ต (Pin/Port) ที่มากกว่า จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานที่มีขนาดใหญ่กว่า

2.9.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO Rev3

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO Rev3 ใช้ชิป ATmega328 เป็นตัวประมวลผลหลัก (Microcontroller Unit, MCU) ขาใช้งานและส่วนประกอบสำคัญในบอร์ด ได้แก่ ขาอินพุต/เอาต์พุตของสัญญาณดิจิทัล (Digital-Input/Output Pins) 14 ขา คือ ขา D0 – D13 ขาอินพุตของสัญญาณอนาล็อก (Analog-Input Pins) 6 ขา คือ ขา A0 – A5 ตัวกำเนิดความถี่ (Crystal Oscillator) ขนาด 16 MHz 1 ตัว พอร์ตยูเอสบี (USB Interface Port) 1 พอร์ต หัวเสียบไฟเลี้ยง (Power Jack) 1 หัว ชิแปลงสัญญาณยูเอสบีเป็นอนุกรม (USB-to-Serial Converter) ATmega16U2 1 ตัว และปุ่มรีเซ็ต (Reset Button) 1 ปุ่ม องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 แสดงดังรูปที่ 2.45 และตารางที่ 2.8 ตามลำดับ [34]



รูปที่ 2.45 องค์ประกอบของบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3

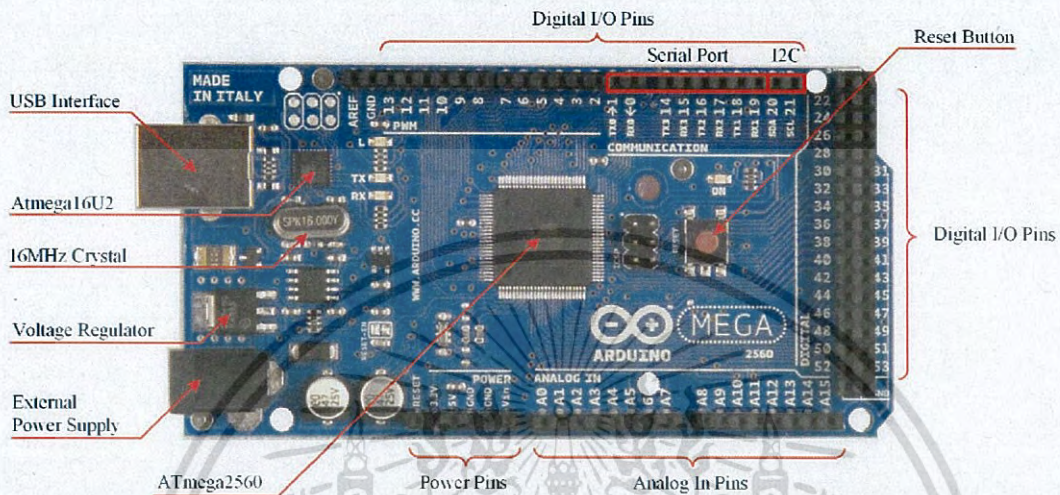
Lists	Details
Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	7 – 12 V
Input Voltage (limits)	6 – 20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by boot-loader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

2.9.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ใช้ชิป ATmega2560 เป็นตัวประมวลผลหลัก (Microcontroller Unit, MCU) ขาใช้งานและส่วนประกอบสำคัญในบอร์ด ได้แก่ ขาอินพุต/เอาต์พุตของสัญญาณดิจิทัล (Digital-Input/Output Pins) 54 ขา คือ ขา D0 – D53 ขาอินพุตของสัญญาณอนาล็อก (Analog-Input Pins) 16 ขา คือ ขา A0 – A15 ตัวกำเนิดความถี่ (Crystal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Oscillator) ขนาด 16 MHz 1 ตัว พอร์ตยูเอสบี (USB Interface Port) 1 พอร์ต หัวเสียบไฟเลี้ยง (Power Jack) 1 หัว ขิปแปลงสัญญาณยูเอสบีเป็นอนุกรม (USB-to-Serial Converter) ATmega16U2 1 ตัว และ ปุ่มรีเซ็ต (Reset Button) 1 ปุ่ม องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 แสดงดังรูปที่ 2.46 และตารางที่ 2.9 ตามลำดับ [34]



รูปที่ 2.46 องค์ประกอบของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

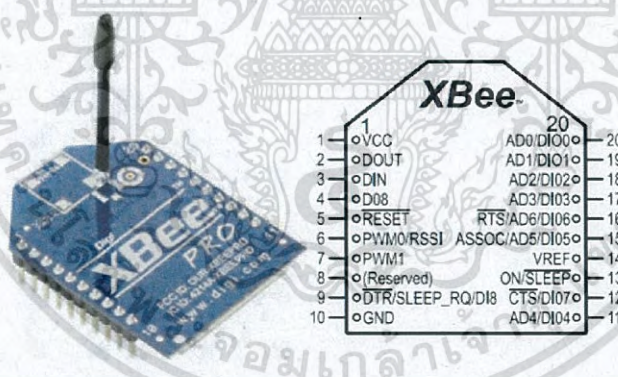
ตารางที่ 2.9 ข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

Lists	Details
Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	7 – 12 V
Input Voltage (limits)	6 – 20 V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB (ATmega2560) of which 8 KB used by boot-loader
SRAM	8 KB (ATmega2560)
EEPROM	4 KB (ATmega2560)
Clock Speed	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี

โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module) ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการสื่อสารแบบไร้สายซึ่งมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่ไม่สูงมาก มีจุดเด่นคือ ราคาไม่แพง กินกำลังไฟต่ำ สามารถใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ทนทานต่อสภาพภูมิอากาศได้ดี และทำงานได้ทุกสภาพแวดล้อม [29] โมดูลเอ็กซ์บีหรือเรียกอีกอย่างว่า อุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (RF Transceiver) ผลิตโดยบริษัท Digi International Inc. ใช้การรับส่งข้อมูลแบบกึ่งทางคู่ (Half-Duplex, Either-Way) ที่ย่านความถี่ 2.4 GHz อีกทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และวงจรรความถี่วิทยุ (Radio Frequency Integrated Circuits, RF IC) อยู่ภายในโมดูล ใช้พลังงานต่ำและใช้งานง่ายเนื่องจากมีส่วนต่อประสาน (Interface) ที่ใช้รับส่งข้อมูลแบบ UART ซึ่งทำงานที่ระดับแรงดันในช่วง 0V – 3.3V (Low Voltage Transistor-Transistor Logic, LVTTTL) และเหมาะสำหรับต่อใช้งานเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลเอ็กซ์บีสามารถใช้งานได้ตามมาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011) [35] โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมสร้างเครือข่ายซิกบี (ZigBee) เพราะทางผู้ผลิตได้จัดทำโปรแกรมอัปเดตเฟิร์มแวร์ (Firmware Updating Program) ที่มีชื่อว่า X-CTU ให้ผู้ใช้งานสามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และอัปโหลดเข้าไปในโมดูลเอ็กซ์บีผ่านทางชุดคำสั่งพื้นฐาน (AT command) โดยเมื่อตั้งค่าโมดูลเอ็กซ์บีให้ทำงานเป็นอุปกรณ์ในเครือข่ายซิกบีแล้วเราเรียกโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละโมดูลว่า โหนด (Node) [29, 36-37] โครงสร้างและขาใช้งานของโมดูลเอ็กซ์บีที่ใช้ในงานวิจัย และตารางเปรียบเทียบโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละรุ่น แสดงดังรูปที่ 2.47 และตารางที่ 2.10 ตามลำดับ



รูปที่ 2.47 โครงสร้างและขาใช้งานของโมดูลเอ็กซ์บีรุ่น XBee-PRO Series 1

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละรุ่น

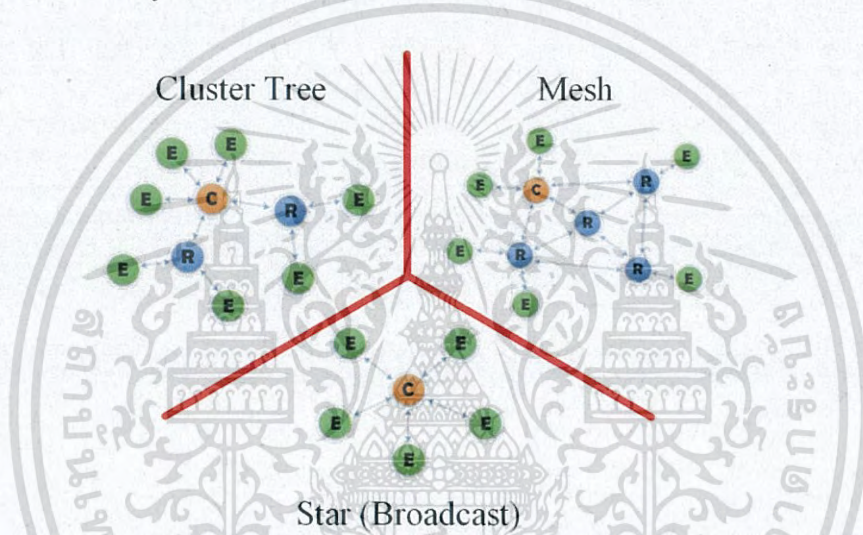
Features	Series 1		Series 2	
	General	Pro	General	Pro
Power Input	3.3 V at 50 mA	3.3 V at 215 mA	3.3 V at 40 mA	3.3 V at 295 mA
Power Output	1 mW	60 mW	2 mW	50 mW
Maximum Over-the-Air Data Rate	250 kilobit/second			
Distance Range	300 ft (100 m)	1 mile (1600 m)	400ft (120 m)	1 mile (1600 m)
Antenna	Wire, Chip, UFL, SMA			
Peripheral	7 10-bit ADC Input Pins, 8 Digital I/O Pins			
Update Firmware	Local		Local or Over-Air Configuration (ZB)	
Network Topology	Point-to-Point and Point-to-Multipoint (Broadcast)		Point to Point, Point-to-Multipoint (Broadcast), Mesh	

2.10.1 รูปแบบของเครือข่ายการสื่อสาร

โมดูลเอ็กซ์บีสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ Coordinator Router และ End Device โดย Coordinator มีหน้าที่สร้างเครือข่ายเชื่อมโยงการสื่อสารระหว่าง End Device กับ Router หรือ Coordinator กับ Coordinator กันเอง หรือ Coordinator กับ Router อีกทั้งยังเป็นตัวกำหนดตำแหน่งที่อยู่ (Address) ให้กับโหนดอื่นที่อยู่ในเครือข่ายไม่ให้ซ้ำกัน ดูแลจัดการเรื่องการ Routing เส้นทาง เรียกว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันการทำงานแบบเต็ม (Full-Function Device, FFD) ด้วยเหตุนี้ Coordinator จึงไม่สามารถทำงานในโหมดประหยัดพลังงานได้ ลักษณะการทำงานต่อมาคือ End Device อุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานดังกล่าวจะรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ที่อยู่ปลายทางหรือส่งออกเอาต์พุตที่ปลายทาง ใช้พลังงานต่ำในการทำงาน เรียกว่าเป็นอุปกรณ์ที่ถูกตัดฟังก์ชันที่ไม่จำเป็นออก (Reduced-Function Device, RFD) หรือในบางกรณีอาจกำหนดให้ทำงานแบบ FFD ขึ้นอยู่กับเซ็นเซอร์หรืออุปกรณ์ปลายทางที่ใช้เชื่อมต่อด้วย และลักษณะการทำงานสุดท้ายคือ Router มีหน้าที่รับส่งข้อมูลในเส้นทางต่างๆ ของเครือข่ายและถือว่าเป็น FFD

รูปแบบของเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Network Topology) สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ รูปแบบเมช (Mesh) รูปแบบดาว (Star, Broadcast) และรูปแบบต้นไม้ (Cluster Tree) ดังแสดงในรูปที่ 2.48 โดยรูปแบบ Mesh เป็นรูปแบบที่มีเสถียรภาพของการรับส่งข้อมูลมากที่สุดเพราะสามารถทำให้ข้อมูลมีเส้นทางในการส่งไปหาตัวรับ (Coordinator) ได้หลายเส้นทาง จึงช่วยลดความเสี่ยงเมื่อโมดูลเอ็กซ์บีบางตัวเกิดไม่ทำงานแต่ข้อมูลยังคงสามารถส่งไปให้กับตัวรับได้ แต่เนื่องจากรูปแบบนี้เน้นความมีเสถียรภาพของการรับส่งข้อมูลเป็นหลักทำให้มีข้อเสียคือต้องใช้โมดูลเอ็กซ์บีมากกว่ารูปแบบอื่น รูปแบบต่อมาคือรูปแบบ Star หรือ Broadcast เป็นรูปแบบการสื่อสารที่ End Devices ทุกตัวในเครือข่ายต่างรับส่งข้อมูลกับ Coordinator โดยตรง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายใน

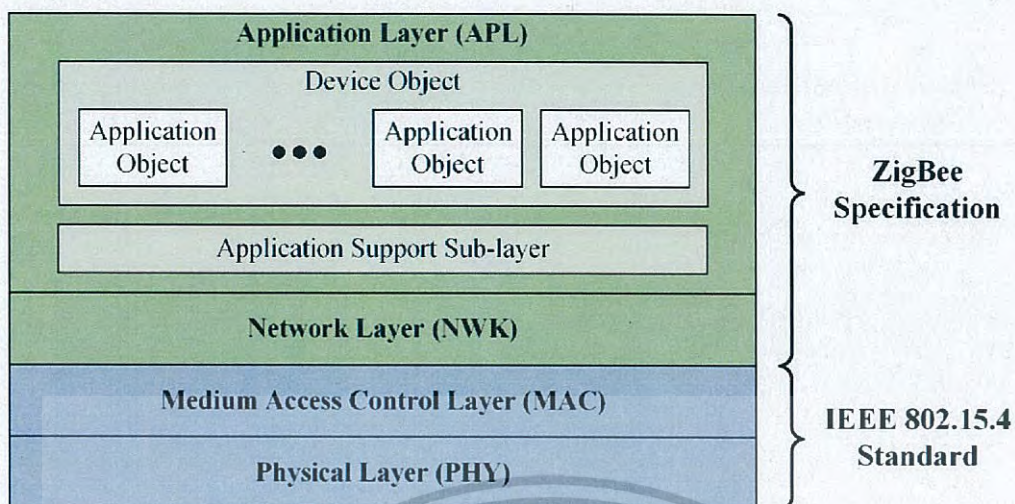
การซื้อโมดูลเอ็กซ์บี แต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียในเรื่องของควมมีเสถียรภาพในการรับส่งข้อมูล และรูปแบบสุดท้ายคือรูปแบบ Cluster Tree ซึ่งเป็นรูปแบบการสื่อสารที่คล้ายคลึงกับรูปแบบ Star ต่างกันตรงที่ในบางโหนดของ End Device ไม่ได้ติดต่อสื่อสารกับ Coordinator โดยตรง แต่กลับมี Router เป็นตัวกลางในการรับส่งข้อมูลกับ Coordinator หรือสามารถกล่าวได้ว่ารูปแบบ Cluster Tree เป็นรูปแบบของเครือข่ายการสื่อสารแบบ Star ในเครือข่ายที่กว้างขึ้น ในทางปฏิบัติ การตั้งค่ารูปแบบของเครือข่ายอย่างนั้นขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าต้องการควมมีเสถียรภาพของการรับส่งข้อมูลมากน้อยเพียงใด หากต้องการควมมีเสถียรภาพมากให้ใช้แบบ Mesh หากต้องการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโมดูลเอ็กซ์บีให้ใช้รูปแบบ Star หรือ Cluster Tree หรือใช้งานแบบผสมผสานกันทั้งสามรูปแบบก็สามารถทำได้ในบางกรณีที่ต้องการควมมีเสถียรภาพของการรับส่งข้อมูลเฉพาะบางโหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละรุ่นด้วยว่าสามารถทำงานรองรับรูปแบบของเครือข่ายที่ต้องการได้หรือไม่ [36-37]



รูปที่ 2.48 รูปแบบของเครือข่ายการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้โมดูลเอ็กซ์บี

2.10.2 โพรโทคอลซิกบี

โครงสร้างชั้นโพรโทคอลของซิกบี (ZigBee Protocol Stack) ดังแสดงในรูปที่ 2.49 ประกอบด้วยระดับชั้นที่กำหนดตามคุณลักษณะของซิกบี หรือเรียกว่า ระดับชั้นบน (Upper Layer) ได้แก่ ระดับชั้นประยุกต์ (Application Layer, APL) และระดับชั้นเครือข่าย (Network Layer, NWK) และระดับชั้นที่กำหนดตามมาตรฐาน IEEE-802.15.4 หรือเรียกว่า ระดับชั้นล่าง (Lower Layer) ได้แก่ ระดับชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (Medium or Media Access Control Layer, MAC) และระดับชั้นกายภาพ (Physical Layer, PHY) [29, 35-37]



รูปที่ 2.49 โครงสร้างชั้นโปรโตคอลของซิกบี

ระดับชั้นประยุกต์ (APL) เป็นระดับชั้นที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงได้มากที่สุด ภายในระดับชั้นนี้มีส่วนสำหรับให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดลักษณะการตอบสนอง โดยสามารถใส่ชุดคำสั่ง (Application Object) ได้ถึง 240 ชุดคำสั่ง ซึ่งแต่ละการตอบสนองยังสามารถเขียนชุดคำสั่งเพิ่มเข้าไปได้ และมีตัวประสานช่วยจัดการบริการ (Application Support Sub-Layer) แบ่งหน้าที่ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนดูแลด้านข้อมูล (Application Support Sub-Layer Data Entity, APSDE) ทำหน้าที่จัดการสร้างและถอดโอเวอร์เฮด (Overhead) ของข้อมูลที่ถูกส่งเข้ามาในลักษณะการสื่อสารแบบที่อยู่เป็นกลุ่ม (Group Address) รวมถึงทำหน้าที่ปฏิเสธข้อมูลที่รับหากข้อมูลนั้นเคยได้รับมาก่อนหน้านี้แล้ว และส่วนดูแลด้านการจัดการ (Application Support Sub-Layer Management Entity, APSME) ทำหน้าที่เชื่อมต่ออุปกรณ์เข้าด้วยกันพร้อมรับส่งข้อมูลหากอุปกรณ์ทั้งสองติดต่อกัน และจัดการเพิ่มหรือลดอุปกรณ์จากการสื่อสารแบบที่อยู่เป็นกลุ่ม รวมถึงทำหน้าที่ติดต่อกับส่วนจัดหาบริการความปลอดภัย (Security Service Provider) สำหรับตั้งค่านโยบาย เพื่อใช้ในการดูแลความปลอดภัยของข้อมูลที่รับส่งภายในเครือข่าย

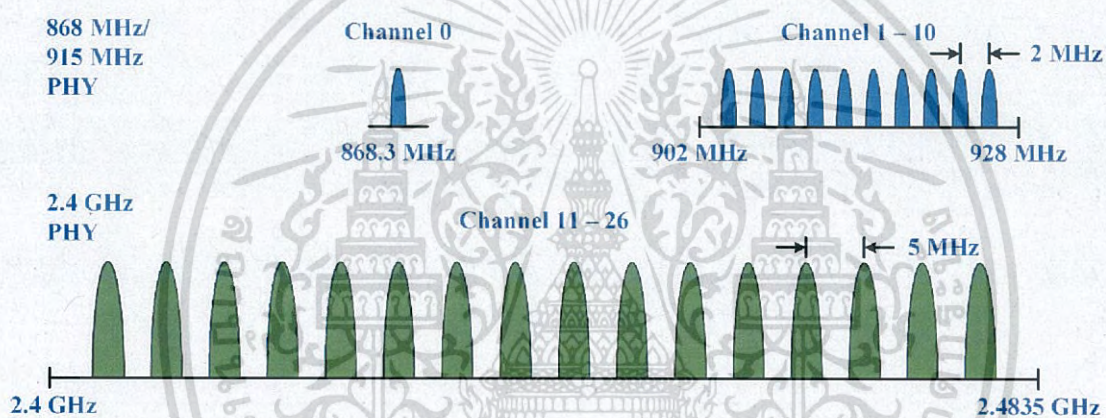
ระดับชั้นเครือข่าย (NWK) ทำหน้าที่ในการค้นหาเส้นทางของข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกัน และสามารถจัดการกับอุปกรณ์ที่อยู่รวมกันในเครือข่ายได้จำนวนมาก รวมถึงทำหน้าที่ติดต่อกับส่วนจัดหาบริการความปลอดภัย (Security Service Provider) เพื่อให้เครือข่ายมีความปลอดภัย

ระดับชั้นควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง (MAC) ทำหน้าที่จัดการรูปแบบของเครือข่ายการสื่อสารในรูปแบบต่างๆ กำหนดกลไกสำหรับการสื่อสารโดยตรง (Single Hop) ระหว่างโหนดสองตัว สร้างกรอบ (Frame) ข้อมูล ระบุที่อยู่ของโหนด และจัดการการติดต่อกับช่องทางสื่อสาร

ระดับชั้นกายภาพ (PHY) ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่อยู่ในระดับบิตไปยังอุปกรณ์การส่งด้วยคลื่นวิทยุ และย่านความถี่ใช้งานของซิกบีแบบที่ไม่ต้องขออนุญาตมี 3 ย่าน ได้แก่ 868 MHz 915 MHz และ 2.4 GHz โดยการส่งข้อมูลใช้ลักษณะการส่งแบบลำดับตรง (Direct Sequence) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้คลื่นพาหะแบบระบุความถี่ใช้งาน

2.10.3 มาตรฐาน IEEE-802.15.4

มาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011) เป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นสำหรับการรับส่งข้อมูลเบื้องต้นในวงจรเครื่องรับส่งวิทยุ (Physical Layer) และการควบคุมการรับส่ง (Link Layer) ถูกกำหนดย่านความถี่ที่สามารถใช้งานได้ดังนี้ การสื่อสารใช้คลื่นวิทยุความถี่ 2.4 GHz แบ่งออกเป็น 16 ช่องสัญญาณ สัญญาณละ 5 MHz สำหรับความถี่ 915 MHz แบ่งออกเป็น 10 ช่องสัญญาณ สัญญาณละ 2 MHz และสำหรับความถี่ 868 MHz จำนวน 1 ช่องสัญญาณ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้การสื่อสารเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายเป็นมาตรฐานเดียวกัน ถูกสร้างขึ้นโดยสถาบันวิศวกรรมาไฟฟ้าและวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นานาชาติ (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) ซึ่งงานหลักคือกำหนดมาตรฐานเพื่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ย่านความถี่ในการใช้งานของมาตรฐาน IEEE-802.15.4 และพื้นที่ใช้งานและอัตราการรับส่งข้อมูลของแต่ละย่านความถี่ แสดงดังรูปที่ 2.50 และตารางที่ 2.11 ตามลำดับ [35]



รูปที่ 2.50 ย่านความถี่ในการใช้งานของมาตรฐาน IEEE-802.15.4

ตารางที่ 2.11 พื้นที่ใช้งานและอัตราการรับส่งข้อมูลของแต่ละย่านความถี่

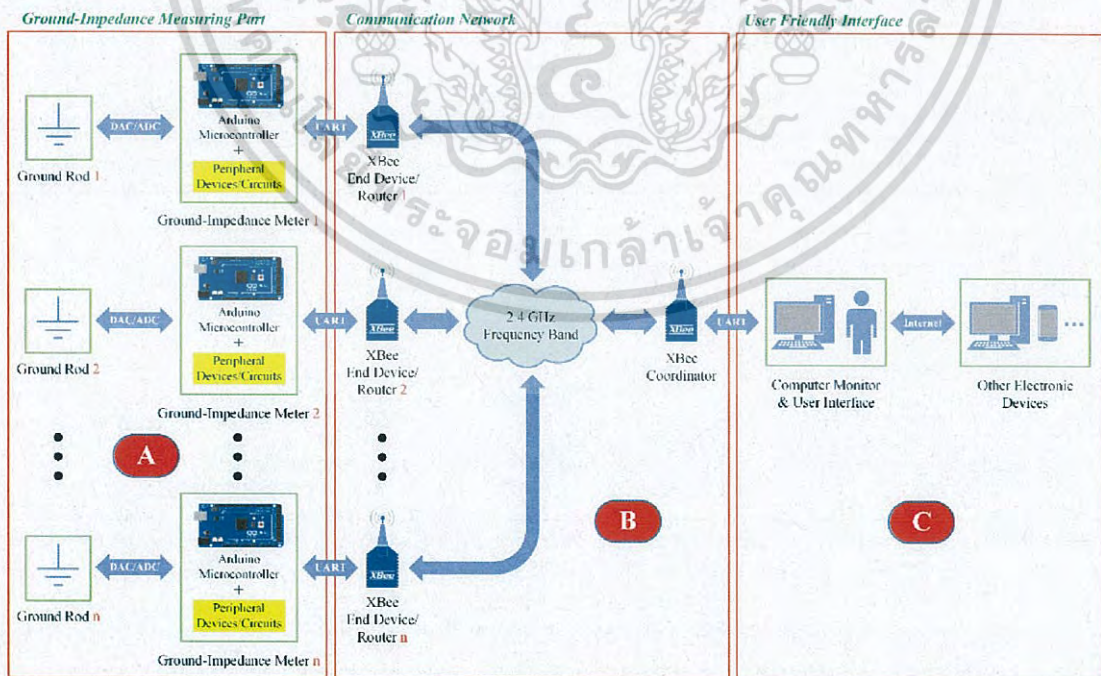
ช่องสัญญาณที่	ย่านความถี่	พื้นที่ใช้งาน	อัตราการรับส่งข้อมูล	จำนวนช่องสัญญาณ
0	868 – 868.6 MHz	ยุโรป	20 kbit/s	1
1 – 10	902 – 928 MHz	อเมริกาเหนือ	40 kbit/s	10
11 – 26	2.4 – 2.4835 GHz	ทั่วโลก	250 kbit/s	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measuring Part) แทนเป็นส่วน A ส่วนเครือข่ายการสื่อสาร (Communication Network) แทนเป็นส่วน B และส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Friendly Interface) แทนเป็นส่วน C โดยในส่วนแรกคือส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR หรือที่เรียกว่าบอร์ด Arduino เป็นตัวประมวลผลหลักในการทำงานของเครื่องวัดที่สร้างขึ้นอันได้แก่ การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog Converter, DAC) การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC) การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) และการแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินรวมถึงการแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์ภายนอก (Displaying and Alarming) ส่วนต่อมาคือส่วนเครือข่ายการสื่อสารได้นำเอาเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module Technology) มาใช้เพื่อสร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ที่สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินกับคอมพิวเตอร์ หนึ่งห้องควบคุม และส่วนสุดท้ายคือส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานนำเอาโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 มาใช้เขียนหน้าต่างโปรแกรมด้วยภาษา C# [38] โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน 2 แบบ ได้แก่ แบบระบบโครงข่ายการวัด และแบบพกพา โดยเน้นนำเสนอแบบระบบโครงข่ายการวัดเป็นหลัก ภาพรวมของระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแสดงดังรูปที่ 3.1 [12]

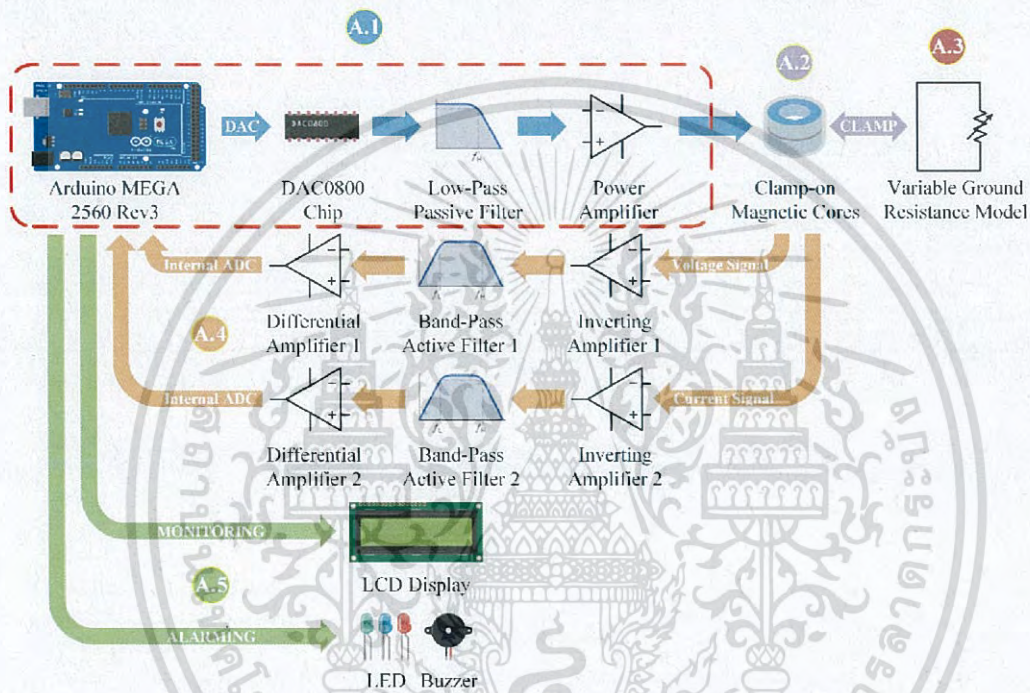


รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

โครงสร้างของส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินในรูปที่ 3.1 ส่วน A แบ่งออกเป็น 5 ส่วนย่อย ได้แก่ ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Waveform Generator) แทนเป็น A.1 แกนแม่เหล็ก (Measuring Magnetic Core) แทนเป็น A.2 ความต้านทานการต่อลงดินจำลอง (Variable Ground Resistance Model) แทนเป็น A.3 ส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measurement and Calculation) แทนเป็น A.4 และส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน (Monitoring and Alarming Section) แทนเป็น A.5 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 [39]



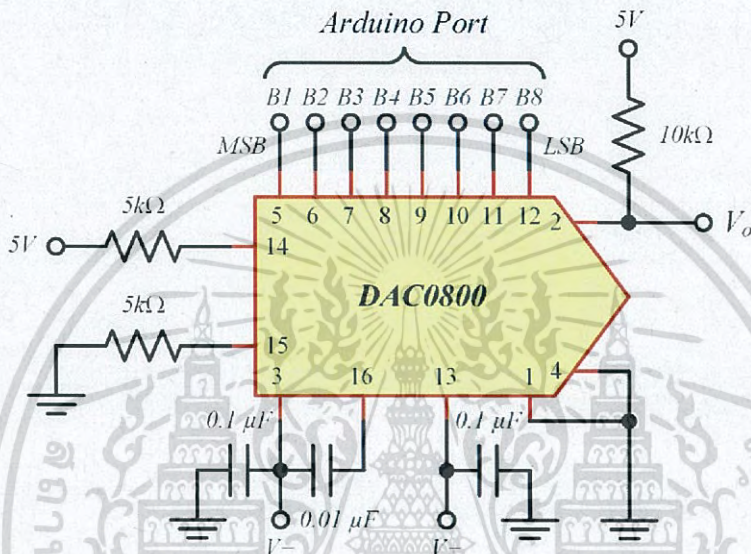
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

องค์ประกอบของโครงสร้างในแต่ละส่วนต้องทำงานสอดคล้องกัน เริ่มจากส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์สร้างแรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1.6 kHz ผ่านชิปแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog Converter, DAC) วงจรกรองความถี่ (Filter) และวงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) จ่ายให้กับขดลวดที่พันรอบแกนแม่เหล็กเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดินจำลอง จากนั้นส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดินจะตรวจจับกระแสดังกล่าวผ่านขดลวดที่พันรอบแกนแม่เหล็กเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC) และคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของสัญญาณแรงดันและกระแสที่ไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณค่าความต้านทานในไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจึงแสดงผลบนจอแอลซีดี (LCD) และส่งค่าความต้านทานที่คำนวณได้ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) ให้โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module) และใช้แอลอีดี (LED) ทำงานร่วมกับกริ่ง (Buzzer) ในการแจ้งเตือนเมื่อค่าที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์เริ่มต้นจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 สร้างสัญญาณลอจิกดิจิทัลขนาด 8 บิต ผ่านพอร์ตเอ (PORTA) ซึ่งคือขาใช้งาน D22 – D29 และต่อขาใช้งานดังกล่าวเข้ากับชิปแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC Chip) ที่ชื่อว่า DAC0800 ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากลอจิกดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอนาล็อกรูปคลื่นไซน์ วงจรการเชื่อมต่อชิป DAC0800 กับพอร์ตใช้งานของบอร์ด Arduino แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรการเชื่อมต่อชิป DAC0800 กับพอร์ตใช้งานของบอร์ด Arduino

ค่าของสัญญาณลอจิกดิจิทัลของขาใช้งานแต่ละขาใน PORTA ถูกกำหนดโดยค่าในตารางอ้างอิง (Lookup Table) ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วทำการรหัสโปรแกรมค่าดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำแฟลช (Flash Memory) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีรีจิสเตอร์การขัดจังหวะเวลา (Timer/Counter Interrupt Register) ชื่อว่า TIMER2 เป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่สร้างขึ้น ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในงานวิจัยนี้สร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ (Signal Frequency, f) 1.6 kHz อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) 1 V_{rms} ที่ความละเอียด 32 จุดต่อลูกคลื่น (Sample per Cycle, N) นั่นคือค่าความถี่ในการขัดจังหวะหรือค่าความถี่ในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Frequency, F_s) ของ TIMER2 ต้องเท่ากับ 51.2 kHz คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

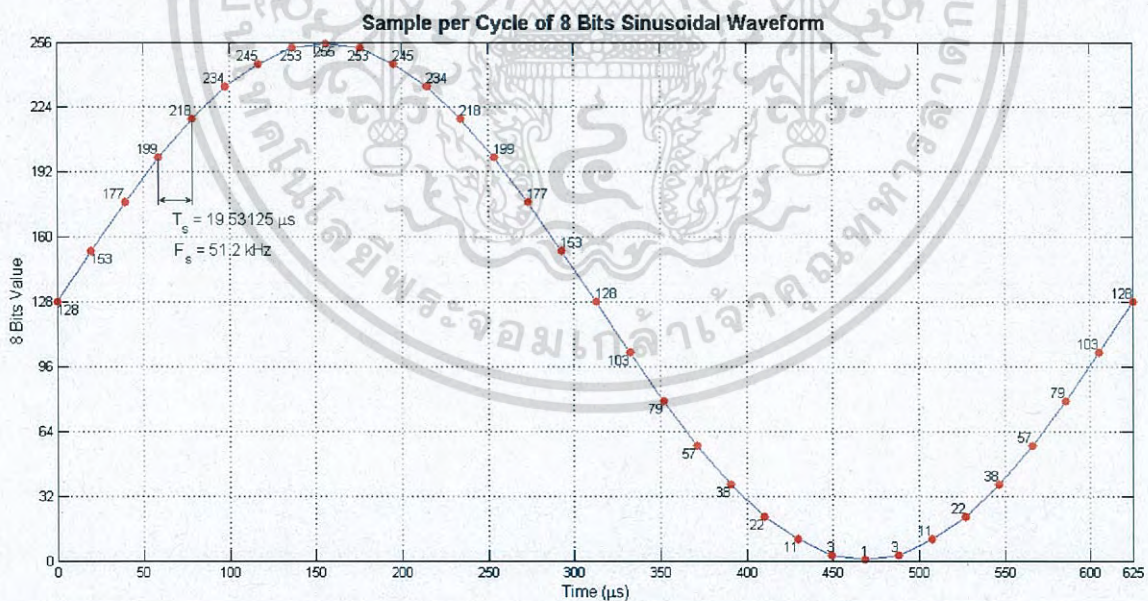
$$F_s = f \cdot N \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าในตารางอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 3.2 โดย A คือแอมพลิจูดขนาด 8 บิต มีค่าเท่ากับ 127 f คือความถี่มีค่าเท่ากับ 1.6 kHz และ t คือเมทริกซ์ของเวลามีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 625 μs ซึ่งคือระยะเวลาในหนึ่งลูกคลื่นของสัญญาณความถี่ดังกล่าว และเนื่องจากต้องการสร้างสัญญาณด้วยความละเอียด 32 จุดต่อลูกคลื่น จึงต้องแบ่งช่วงระยะเวลาดังกล่าวออกเป็น 32 ช่วง ดังนั้นจึงมีผลต่างเวลา (Time Step, T_s) เท่ากับ 19.53125 μs

$$f(t) = A \sin(2\pi ft) + 128 \quad (3.2)$$

เมื่อนำฟังก์ชันความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวไปคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลลัพธ์เป็นกลุ่มของตัวเลขขนาด 8 บิต ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 255 จำนวน 32 ค่า ดังนี้ 128, 153, 177, 199, 218, 234, 245, 253, 255, 253, 245, 234, 218, 199, 177, 153, 128, 103, 79, 57, 38, 22, 11, 3, 1, 3, 11, 22, 38, 57, 79, 103 เมื่อนำไปวาดกราฟความสัมพันธ์เทียบกับเวลาในการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Time) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และเมื่อแปลงกลุ่มของตัวเลขดังกล่าวเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.3 ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดย V_{out} คือแรงดันไฟฟ้าขาออก B คือค่าของตัวเลขขนาด 8 บิต ในตารางอ้างอิงที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB และ V_{ref} คือแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 และรุ่น UNO Rev3 ซึ่งบอร์ดทั้งสองรุ่นมีค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเท่ากับ 5 V



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ของค่าในตารางอ้างอิงของสัญญาณรูปคลื่นไซน์เทียบกับเวลา

$$V_{out} = B \cdot \frac{V_{ref}}{256} \quad (3.3)$$

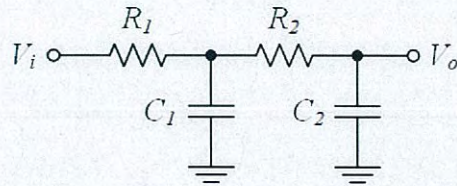
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การแปลงค่าในตารางอ้างอิงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า

B	Digital Logic of PORTA								V_{out} (V)
	D29 (PA7)	D28 (PA6)	D27 (PA5)	D26 (PA4)	D25 (PA3)	D24 (PA2)	D23 (PA1)	D22 (PA0)	
128	1	0	0	0	0	0	0	0	2.5000
153	1	0	0	1	1	0	0	1	2.9883
177	1	0	1	1	0	0	0	1	3.4570
199	1	1	0	0	0	1	1	1	3.8867
218	1	1	0	1	1	0	1	0	4.2578
234	1	1	1	0	1	0	1	0	4.5703
245	1	1	1	1	0	1	0	1	4.7852
253	1	1	1	1	1	1	0	1	4.9414
255	1	1	1	1	1	1	1	1	4.9805
103	0	1	1	0	0	1	1	1	2.0117
79	0	1	0	0	1	1	1	1	1.5430
57	0	0	1	1	1	0	0	1	1.1133
38	0	0	1	0	0	1	1	0	0.7422
22	0	0	0	1	0	1	1	0	0.4297
11	0	0	0	0	1	0	1	1	0.2148
3	0	0	0	0	0	0	1	1	0.0586
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0195

ถึงแม้ว่าสัญญาณขาออกจากชิป DAC0800 เป็นสัญญาณอนาล็อกรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ตามต้องการ แต่สัญญาณดังกล่าวยังคงมีความผิดเพี้ยน (Distortion) เป็นลักษณะขั้นบันได เนื่องจากมีสัญญาณในความถี่อื่นรวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องนำไปผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อกรองสัญญาณความถี่อื่นที่รวมอยู่ออกก่อนนำไปผ่านวงจรขยายกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับแอมพลิจูดและขยายกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอสำหรับการเหนี่ยวนำกระแสในลูปความต้านทานการต่อลงดินผ่านแกนแม่เหล็กต่อไป โดยชนิดของวงจรกรองความถี่ที่ใช้คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟอันดับสองที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (Second-Order Passive RC Low-Pass Filter) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในวงจรได้จากสมการที่ 3.4 โดยตัวแปร f_c คือความถี่ตัด (Cut-off Frequency) หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz, Hz) และเพื่อความง่ายในการแก้สมการจึงกำหนดให้ตัวแปร R_1 และ R_2 มีค่าเท่ากับ R และตัวแปร C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ C ทำให้สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ใหม่ ดังสมการที่ 3.5 ซึ่งในการออกแบบวงจรเลือกใช้ความถี่ตัดเท่ากับ 2 kHz เพื่อกรองความถี่ที่สูงกว่าออกและทำให้สัญญาณเรียบไม่เป็นลักษณะขั้นบันได โดยจากสมการที่ 3.5 เมื่อแทนค่าตัวแปร f_c เท่ากับ 2 kHz และคงค่า C เท่ากับ $0.1 \mu F$ แล้วแก้สมการหาค่า R จะได้ค่าความต้านทานเท่ากับ 795.7747 โอห์ม แต่การนำไปใช้งานจริงนั้นเป็นเรื่องยากในการหาตัวต้านทานค่าดังกล่าว ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทานขนาดใกล้เคียงซึ่งมีจำหน่ายอยู่ทั่วไปคือ 800 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

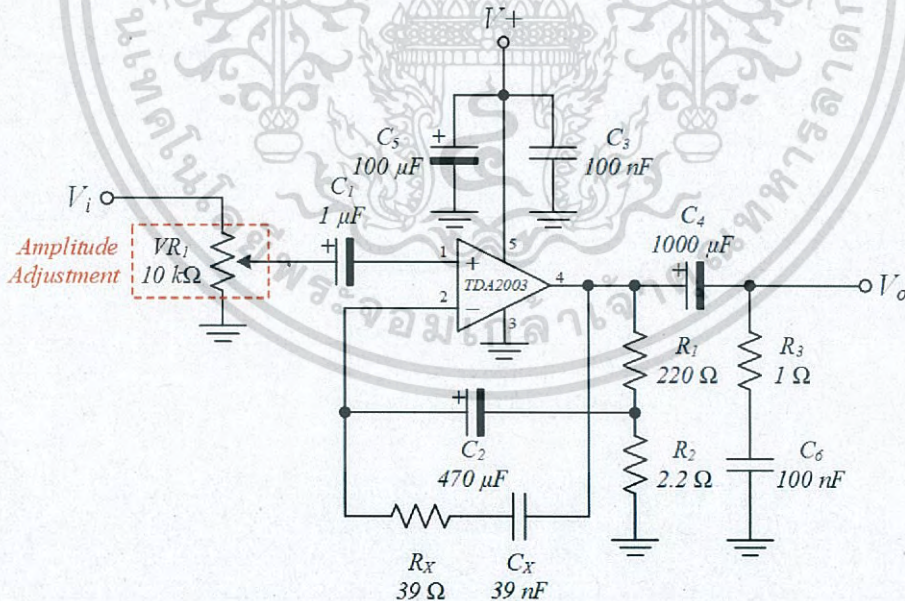


รูปที่ 3.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟอันดับสองที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (3.4)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.5)$$

วงจรรขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวงจรรขยายคลาสดี (Class D Amplifier) อย่างง่ายที่ใช้กันทั่วไปในงานขยายเสียง มีพิกัดการขยายกำลังไฟฟ้าได้สูงถึง 10 W และใช้ไฟเลี้ยง 9 ถึง 12 V ที่โหลดขนาด 4 โอห์ม โดยใช้ไอซีขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier Integrated Circuit) ชื่อว่า UTC/TDA2003 ที่สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดถึง 3.5 A มีค่าฮาร์โมนิค (Harmonics) และครอสโอเวอร์ดิสทอร์ชัน (Cross-over Distortion) ต่ำ ซึ่งไอซีตัวดังกล่าวมีการป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการลัดวงจรเมื่อโหลดเกิน สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 28 V และสามารถตอบสนองความถี่ได้ตั้งแต่ 40 Hz ถึง 15 kHz วงจรรขยายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 3.6

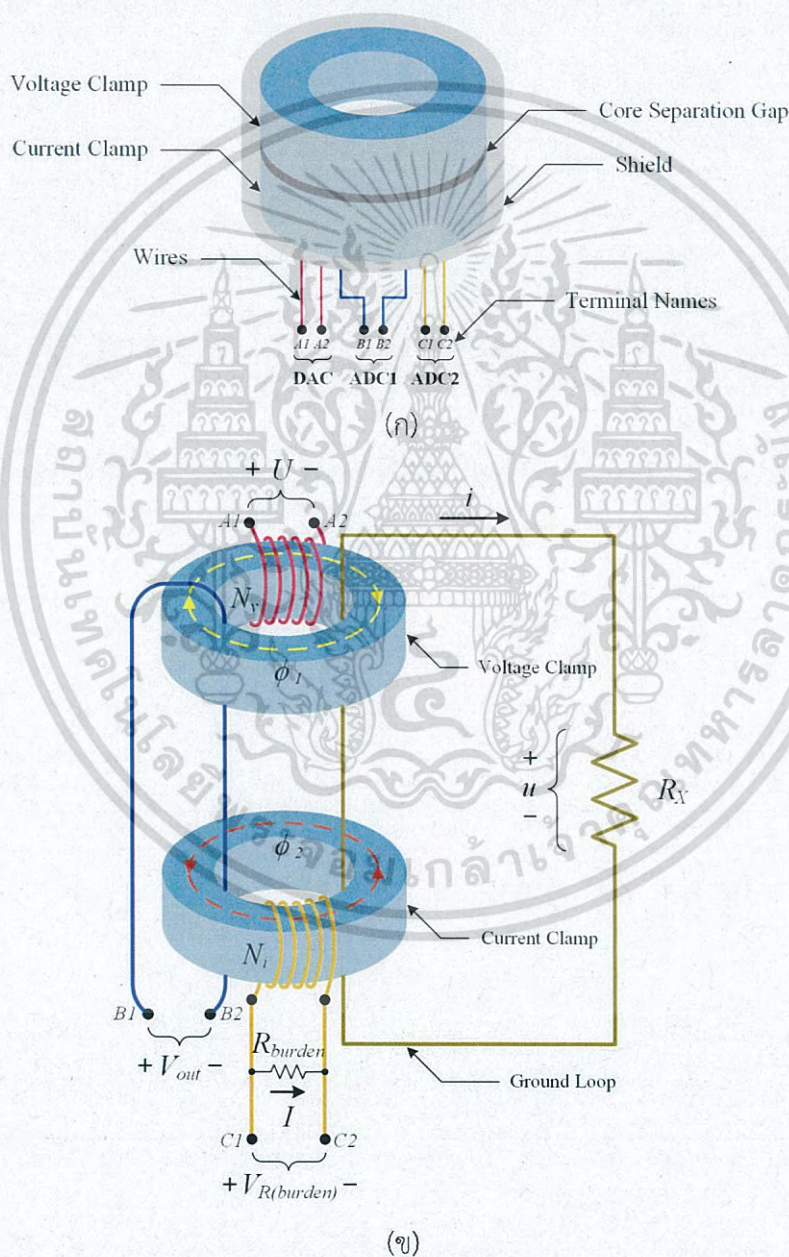


รูปที่ 3.6 วงจรรขยายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แกนแม่เหล็ก

แกนแม่เหล็กของเครื่องวัดที่สร้างขึ้นใช้แกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่ในการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน โดยทำการคล้องเข้ากับหลักดิน (Ground Rod) หรือลูปความต้านทานการต่อลงดิน (Ground Loop) ที่ต้องการทราบค่าความต้านทาน ซึ่งแกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่ที่ใช้ประกอบด้วย แคลมป์แรงดัน (Voltage Clamp) และแคลมป์กระแส (Current Clamp) ที่แยกอิสระต่อกันและมีฉนวนห่อหุ้มเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกและระหว่างแคลมป์ด้วยกันเอง ลักษณะภายนอกและองค์ประกอบภายในของแกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่ แสดงดังรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ลักษณะภายนอก (ก) และองค์ประกอบภายใน (ข) ของแกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) $A1$ และ $A2$ คือขั้วต่อของขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดันซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำคงที่ค่าหนึ่ง (U) ให้กับขดลวดดังกล่าวเพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน (u) ขึ้นในลูปความต้านทานการต่อลงดิน โดยแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวสามารถวัดค่าได้จาก $B1$ และ $B2$ คือขั้วต่อของขดลวดที่คล้องผ่านแคลมป์คู่หนึ่งรอบ ซึ่งอนุमानว่าเป็นลูปความต้านทานการต่อลงดิน เนื่องจากลูปความต้านทานการต่อลงดินนั้นมีจำนวนรอบหนึ่งรอบเสมอ ดังนั้นแรงดันตกคร่อมขั้วต่อของขดลวดดังกล่าว (V_{out}) จึงเท่ากับหรือสมมูลกับแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานการต่อลงดิน (u) ดังแสดงในสมการที่ 3.6 และกระแสเหนี่ยวนำ (i) สามารถคำนวณได้จากการวัดค่าแรงดันตกคร่อม $C1$ และ $C2$ ($V_{R(burden)}$) คือขั้วต่อของขดลวดที่พันรอบแคลมป์กระแส แล้วนำไปหารด้วยค่าความต้านทาน R_{burden} ที่ทราบค่า และนำผลลัพธ์ที่ได้คูณกับจำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแคลมป์กระแส (N_i) ดังแสดงในสมการที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ จากสมการที่ 3.6 ถึง 3.8 ทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน (R_x) ได้ตามสมการที่ 3.9 และ 3.10 [11-12]

$$u \cong V_{out} \quad (3.6)$$

$$I = \frac{V_{R(burden)}}{R_{burden}} \quad (3.7)$$

$$i = N_i \cdot I \quad (3.8)$$

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kV_{out}}{V_{R(burden)}} \quad (3.9)$$

$$k = \frac{R_{burden}}{N_i} \quad (3.10)$$

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่าแกนแม่เหล็กของเครื่องวัดที่สร้างขึ้นใช้แกนแม่เหล็กหรือแคลมป์จำนวน 2 แกน คือแคลมป์แรงดันและแคลมป์กระแส โดยแคลมป์แรงดันทำหน้าที่เหนี่ยวนำแรงดันและทำให้เกิดกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน และแคลมป์กระแสทำหน้าที่ตรวจจับกระแสดังกล่าวโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (Current Transformer, C.T.) และมีขดลวดคล้องผ่านแกนแม่เหล็กทั้งสองอีกหนึ่งรอบทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันตกคร่อมความต้านทานการต่อลงดินภายในลูปรายละเอียดการออกแบบแคลมป์แรงดันและแคลมป์กระแสอธิบายดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

3.1.2.1 การออกแบบแคลมป์แรงดัน

งานวิจัยนี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ชนิดเทอร์รอย (Ferrite Toroids) ในการออกแบบแคลมป์แรงดันและแคลมป์กระแส เนื่องจากเป็นวัสดุชนิด Ferrimagnetic ซึ่งมีความสูญเสียฮิสเตอร์ซิสและความสูญเสียจากกระแสไหลวนต่ำ และกำหนดให้ต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นมีขอบเขตในการวัด 1 ถึง 100 โอห์ม ดังนั้นที่ความต้านทานการต่อลงดิน (R_x) เท่ากับ 1 โอห์ม จึงเป็นค่าความต้านทานที่ทำให้กระแสที่ไหลในลูป (i) มีค่าสูงที่สุด โดยระดับของกระแสไฟฟ้าที่เริ่มทำให้กล้ามเนื้อหดตัว (Muscular Contraction) และมนุษย์สามารถช่วยเหลือตัวเองให้หลุดได้คือ 8 ถึง 20 mA เรียกกระแสระดับนี้ว่า กระแสปล่อยหลุด (Let-go Currents) [40] จึงเลือกใช้ค่า 20 mA นี้ในการออกแบบ

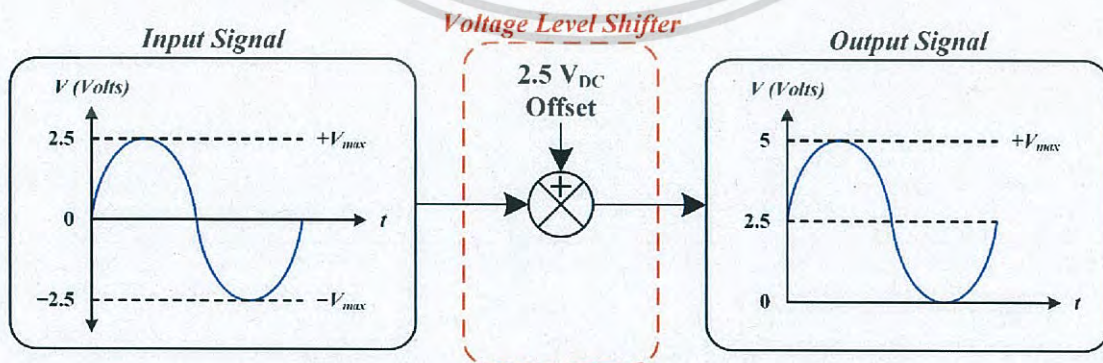
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 (ข) แคลมป์แรงดันออกแบบให้มีจำนวนรอบของขดลวด (N_s) เท่ากับ 50 รอบ เมื่อส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (U) ความถี่ 1.6 kHz แอมพลิจูด $1 V_{rms}$ ให้กับขดลวดดังกล่าว ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความต้านทานการต่อลงดิน (u) เท่ากับ $20 mV_{rms}$ ตามอัตราส่วนจำนวนรอบของหม้อแปลง (Transformer Ratio or Turn Ratio, a) เพื่อให้ได้ค่ากระแส (i) สูงสุดที่ความต้านทานการต่อลงดิน 1 โอห์ม มีค่าเท่ากับ 20 mA ซึ่งแรงดันตกคร่อมนี้สามารถวัดค่าได้จากแรงดันตกคร่อมขั้วต่อของขดลวดที่คล้องผ่านแกนแม่เหล็กทั้งสองหนึ่งรอบ (V_{out}) และมีค่าคงที่เสมอหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากไม่ขึ้นกับค่าความต้านทานการต่อลงดิน

3.1.2.2 การออกแบบแคลมป์กระแส

จากรูปที่ 3.7 (ข) แคลมป์กระแสออกแบบให้มีจำนวนรอบของขดลวด (N_i) เท่ากับ 350 รอบ และใช้ความต้านทาน R_{burden} ที่มีค่าเท่ากับ 2.8 กิโลโอห์ม เนื่องจากแรงดัน $V_{R(burden)}$ ที่ความต้านทานการต่อลงดิน 1 โอห์ม เป็นค่าที่วัดได้จากการเหนี่ยวนำของกระแส (i) สูงสุดที่ไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน จึงทำให้ค่าแรงดันดังกล่าวมีค่าสูงสุดเช่นกัน แต่บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (Operating Voltage) เท่ากับ 5 V จึงสามารถอ่านค่าแรงดันได้แค่เฉพาะซีกบวกในช่วง 0 – 5 V เท่านั้น ไม่สามารถอ่านค่าแรงดันซีกลบได้ ซึ่งสัญญาณรูปคลื่นไซน์เป็นสัญญาณที่มีทั้งซีกบวกและลบ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรเลื่อนระดับแรงดัน (Voltage Level Shifter Circuits) เพื่อเลื่อนระดับแรงดันอ้างอิงจาก 0 V ขึ้นเป็น 2.5 V ให้สัญญาณเลื่อนมาอยู่ซีกบวกทั้งหมด โดยรายละเอียดของวงจรเลื่อนระดับแรงดันได้อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยที่ 3.1.4 เป็นลำดับต่อไป ดังนั้นค่าเฉลี่ยกำลังสอง (V_{rms}) ของค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวสามารถอ่านค่าได้โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดคำนวณได้จากการนำเอาค่าแอมพลิจูดสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 2.5 V หรือครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าใช้งานหารด้วย $\sqrt{2}$ ตามสมการที่ 3.11 นั่นคือแรงดัน $V_{R(burden)}$ ที่ค่าความต้านทานการต่อลงดิน 1 โอห์ม ต้องมีค่าไม่เกิน $1.7678 V_{rms}$ แผนผังการเลื่อนระดับแรงดันอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 3.8

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.11)$$



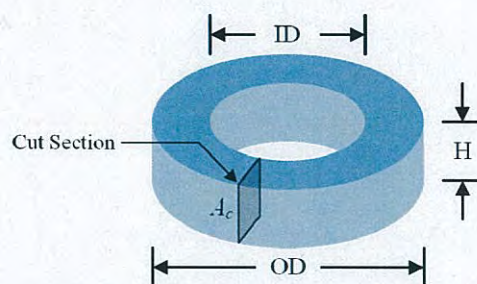
รูปที่ 3.8 แผนผังการเลื่อนระดับแรงดันอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สัญญาณดังกล่าวต้องผ่านวงจรขยายสัญญาณในหัวข้อย่อยที่ 3.1.4 ซึ่งมีกำลังขยายต่ำสุด 10 เท่า ก่อนเข้าไปประมวลผลและคำนวณค่าในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นแรงดัน $V_{R(burden)}$ ที่ค่าความต้านทานการต่อลงดิน 1 โอห์ม จึงต้องมีค่าไม่เกิน 176.78 mV_{rms} และเมื่อทดลองพันขดลวดของแคลมป์กระแสให้มีจำนวนรอบ (N_2) เท่ากับ 350 รอบ และใช้ความต้านทาน R_{burden} ที่มีค่าเท่ากับ 2.8 กิโลโอห์ม ทำให้แรงดัน $V_{R(burden)}$ ที่ค่าความต้านทานการต่อลงดิน 1 โอห์ม มีค่าเท่ากับ 160 mV_{rms} ซึ่งมีค่าไม่เกิน 176.78 mV_{rms} และจากสมการที่ 3.10 จะได้ว่า k มีค่าเท่ากับ 8 จากนั้นนำค่าแรงดัน $V_{R(burden)}$ และค่าความต้านทาน R_{burden} ที่ออกแบบไปคำนวณขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรท์ ดังสมการที่ 3.12 [41] โดย A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก (Core Area) หน่วยเป็น ตารางเมตร (Square Meter, m²) I_1 คือกระแสทางด้านปฐมภูมิ (Primary Current) หน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere, A) R_2 คือความต้านทานของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Secondary Wiring Resistance) หน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω) R_{burden} คือความต้านทานเบอร์ดน (Burden Resistance) k_w ค่าสัมประสิทธิ์ของรูปคลื่น (Waveform Coefficient) ซึ่งสำหรับรูปคลื่นไซน์มีค่าเท่ากับ 4.44 B คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) หน่วยเป็น เทสลา (Tesla, T) f คือความถี่ (Frequency) หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hertz, Hz) N_2 คือจำนวนรอบของขดลวดทางด้านทุติยภูมิ (Number of Secondary Turns)

$$A_c = \frac{I_1 (R_2 + R_{burden})}{k_w B f N_2} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 เมื่อแทนค่า I_1 เท่ากับ 20 mA ซึ่งเป็นกระแส (i) สูงสุดที่ไหลในรูปความต้านทานการต่อลงดิน R_2 เท่ากับศูนย์ R_{burden} เท่ากับ 2.8 กิโลโอห์ม k_w เท่ากับ 4.44 B เท่ากับ 0.2 เทสลา ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนเฟอร์ไรท์ f เท่ากับ 1.6 kHz และ N_2 เท่ากับ 350 รอบ ซึ่งเป็นจำนวนรอบของขดลวดของแคลมป์กระแส (N_2) ทำให้ได้ค่า A_c เท่ากับ 1.1254 ตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็กที่ต่ำที่สุด โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกนเฟอร์ไรท์ชนิดเทอร์รอยที่มีระยะเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (Inner Diameter, ID) เท่ากับ 1.6 นิ้ว หรือ 4.064 เซนติเมตร ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (Outer Diameter, OD) เท่ากับ 2.3 นิ้ว หรือ 5.842 เซนติเมตร ความสูง (Height, H) เท่ากับ 0.7 นิ้ว หรือ 1.778 เซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก (A_c) เท่ากับ 0.245 ตารางนิ้ว หรือ 1.5806 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าค่าต่ำสุดที่ได้จากการคำนวณ ขนาดของแกนแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.9

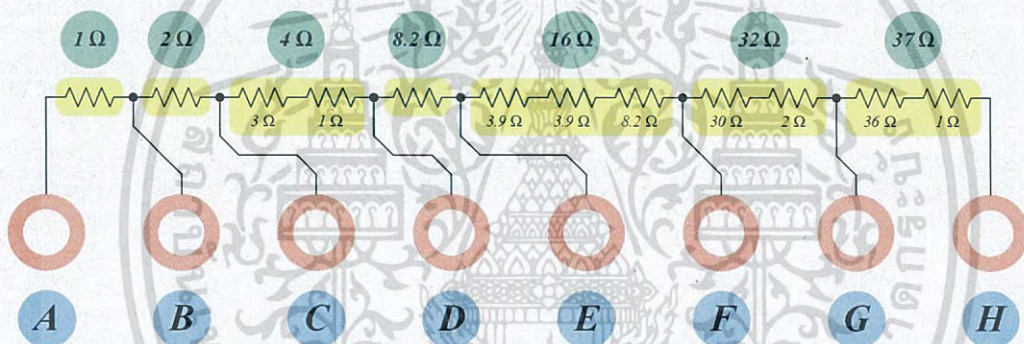


รูปที่ 3.9 ขนาดของแกนแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ความต้านทานการต่อลงดินจำลอง

ความต้านทานการต่อลงดินจำลองใช้ตัวต้านทานขนาด 2^n โอห์ม (เมื่อ $n = 0, 1, 2 \dots$) ที่มีค่าความผิดพลาด (Tolerance) เท่ากับ ± 1 เปอร์เซ็นต์ ต่อกันโดยการใช้การต่อตัวต้านทานในรูปแบบนี้ทำให้ประหยัดตัวต้านทานที่ใช้และทำให้ได้ค่าความต้านทานตามที่ต้องการตั้งแต่ 1 ถึง $2^{n+1}-1$ โอห์ม ตัวอย่างในการคำนวณค่าของตัวต้านทานที่ใช้ในการสร้างความต้านทานการต่อลงดินจำลอง เช่น ในงานวิจัยนี้มีขอบเขตการวัดค่าของความต้านทานการต่อลงดินจำลองอยู่ที่ 1 ถึง 100 โอห์ม จึงเลือกใช้ตัวต้านทานขนาด 2^n โอห์ม ต่อกันตั้งแต่ $n = 0$ ถึง 6 ทำให้ความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าความต้านทานที่สามารถวัดได้ตั้งแต่ 1 ถึง 127 ($2^{6+1}-1$) โอห์ม แต่เนื่องจากค่าความต้านทานมากที่สุดที่ต้องการวัดคือ 100 โอห์ม จึงต้องทำการปรับลดค่าของตัวต้านทานตัวสุดท้ายจาก 64 (2^6) โอห์ม เป็น 37 (2^5-27) โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และตัวอย่างการต่อสายไฟเข้าขั้วต่อของค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้น แสดงดังตารางที่ 3.2 โดย Measurement Terminal คือ ขั้วต่อของสายไฟที่คล้องผ่านแคลมป์ของเครื่องวัด และ Auxiliary Terminal คือ ขั้วต่อของสายไฟที่ต่อเพื่อลัดวงจรตัวต้านทานที่ไม่ใช้งาน [13]



รูปที่ 3.10 ความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการต่อสายไฟเข้าขั้วต่อของค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม

Resistance (Ω)		Measurement Terminal		Auxiliary Terminal			
Value	Tolerance	(+)	(-)	1 st Jumper	2 nd Jumper		
1.00	± 0.010	A	B	-	-	-	-
2.00	± 0.020	B	C	-	-	-	-
3.00	± 0.030	A	C	-	-	-	-
4.00	± 0.040	C	D	-	-	-	-
5.00	± 0.050	A	D	B	C	-	-
6.00	± 0.060	B	D	-	-	-	-
7.00	± 0.070	A	D	-	-	-	-
8.20	± 0.082	D	E	-	-	-	-
9.20	± 0.092	A	E	B	D	-	-
10.20	± 0.102	B	E	C	D	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการต่อสายไฟเข้าขั้วต่อของค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม (ต่อ)

Resistance (Ω)		Measurement Terminal		Auxiliary Terminal			
Value	Tolerance	(+)	(-)	1 st Jumper		2 nd Jumper	
11.20	± 0.112	A	E	C	D	-	-
12.20	± 0.122	C	E	-	-	-	-
13.20	± 0.132	A	E	B	C	-	-
14.20	± 0.142	B	E	-	-	-	-
15.20	± 0.152	A	E	-	-	-	-
16.00	± 0.160	E	F	-	-	-	-
17.00	± 0.170	A	F	B	E	-	-
18.00	± 0.180	B	F	C	E	-	-
19.00	± 0.190	A	F	C	E	-	-
20.00	± 0.200	C	F	D	E	-	-
21.00	± 0.210	A	F	B	C	D	E
22.00	± 0.220	B	F	D	E	-	-
23.00	± 0.230	A	F	D	E	-	-
24.20	± 0.242	D	F	-	-	-	-
25.20	± 0.252	A	F	B	D	-	-
26.20	± 0.262	B	F	C	D	-	-
27.20	± 0.272	A	F	C	D	-	-
28.20	± 0.282	C	E	-	-	-	-
29.20	± 0.292	A	F	B	C	-	-
30.20	± 0.302	B	F	-	-	-	-
35.00	± 0.350	A	G	C	F	-	-
40.20	± 0.402	D	G	E	F	-	-
45.20	± 0.452	A	G	B	C	E	F
50.00	± 0.500	B	G	C	E	-	-
55.00	± 0.550	A	G	D	E	-	-
60.20	± 0.602	C	G	-	-	-	-
65.20	± 0.652	C	H	F	G	-	-
70.00	± 0.700	A	H	B	F	-	-
75.00	± 0.750	B	H	D	F	-	-
80.20	± 0.802	A	H	C	D	E	F
85.00	± 0.850	E	H	-	-	-	-
90.00	± 0.900	A	H	B	C	D	E
95.20	± 0.952	B	H	C	D	-	-
100.20	± 1.002	A	H	-	-	-	-

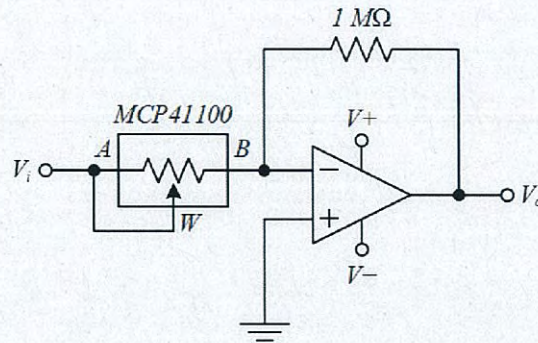
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน

จากสมการที่ 3.9 ตัวแปร k เป็นค่าคงที่ที่ทราบค่าซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.10 ดังนั้น ตัวแปรที่ต้องทำการวัดเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน (R_x) คือ V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ซึ่งเป็นแรงดันตกคร่อมขั้วต่อ $B1$ และ $B2$ กับ $C1$ และ $C2$ ตามลำดับ และจากรูปที่ 3.7 สังเกตได้ว่า เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ U ที่ป้อนให้กับขดลวดซึ่งพันรอบแคลมป์แรงดันเป็นค่าคงที่ จึงทำให้ค่า V_{out} ซึ่งเป็นค่าที่สมมูลกับแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานการต่อลงดิน (u) คงที่ด้วยที่ทุกค่าความต้านทาน ดังนั้นค่าของตัวแปรเพียงหนึ่งเดียวที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่าความต้านทานเปลี่ยนคือค่า $V_{R(burden)}$ เนื่องจากตามสมการที่ 3.7 และ 3.9 สังเกตได้ว่าค่า $V_{R(burden)}$ มีความสัมพันธ์กับค่ากระแสที่ไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดินจึงมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อค่าความต้านทานเปลี่ยน โดยค่า $V_{R(burden)}$ แปรผกผันกับค่าความต้านทานตามสมการที่ 3.9 และ 3.10

ขั้นตอนในการวัดเริ่มต้นจากนำสัญญาณแรงดันตกคร่อมขั้วต่อ $B1$ และ $B2$ กับ $C1$ และ $C2$ นั่นคือสัญญาณ V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ตามลำดับ ไปผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) เพราะสัญญาณมีขนาดเล็กในระดับมิลลิโวลต์ (mV) จึงต้องขยายแอมพลิจูดของสัญญาณให้เพียงพอสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่า และเนื่องจากค่า V_{out} เป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถคำนวณค่าได้เมื่อทราบค่าแรงดันไฟฟ้า U ที่ป้อนให้กับขดลวดซึ่งพันรอบแคลมป์แรงดัน และจำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดัน N_r ตามสมการที่ 2.39 และ 3.6 จึงทำให้สามารถคำนวณกำลังขยาย (Gain) ที่ตายตัวแน่นอนสำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสของสัญญาณ V_{out} ได้ แต่กำลังขยายสำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสของสัญญาณ $V_{R(burden)}$ นั้นแตกต่างออกไป เนื่องจากสัญญาณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจึงทำให้กำลังขยายต้องเปลี่ยนแปลงตามเพื่อให้สัญญาณได้รับการขยายจนถึงระดับแรงดันที่เหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่า นั่นคือค่าความต้านทานของตัวต้านทานในวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสอย่างน้อยหนึ่งตัวจำเป็นต้องปรับค่าได้ ด้วยเหตุนี้จึงนำเอาตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัล (Digital Potentiometer) มาใช้แทนตัวต้านทานแบบธรรมดา ชื่อว่า MCP41100 ซึ่งเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัลขนาด 100 กิโลโอห์มที่ติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านส่วนติดต่อสื่อสารรอบข้างอนุกรม (Serial Peripheral Interface, SPI) และสามารถนำมาใช้งานได้ 2 แบบ คือ แบ่งแรงดัน (Potentiometer Mode) และ กำหนดค่าความต้านทาน (Rheostat Mode) ในงานวิจัยนี้นำเอาตัวต้านทานปรับค่าได้มาใช้งานในแบบ กำหนดค่าความต้านทาน โดยทำการเชื่อมต่อขาด้านใดด้านหนึ่งของตัวต้านทานคือขา A หรือ B กับขา สำหรับปรับค่าความต้านทาน (Wiper) คือขา W วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่สามารถปรับกำลังขยายได้ แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยในส่วน MCP41100 เลือกใช้ขา A เชื่อมต่อกับขา W และสมการคำนวณค่าความต้านทานของ MCP41100 สำหรับการเชื่อมต่อดังกล่าวตามข้อมูลที่ได้จาก datasheet แสดงดังสมการที่ 3.13 โดย R_{WB} คือค่าความต้านทานที่ตำแหน่งขา W ถึง B R_{AB} คือค่าความต้านทานที่ตำแหน่งขา A ถึง B สำหรับ MCP41100 มีค่าเท่ากับ 100 กิโลโอห์ม D_n คือตัวเลขขนาด 8 บิตมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 และ R_W คือค่าความต้านทานที่ตำแหน่งขาสำหรับปรับค่าความต้านทานหรือขา W สำหรับ MCP41100 มีค่าเท่ากับ 125 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

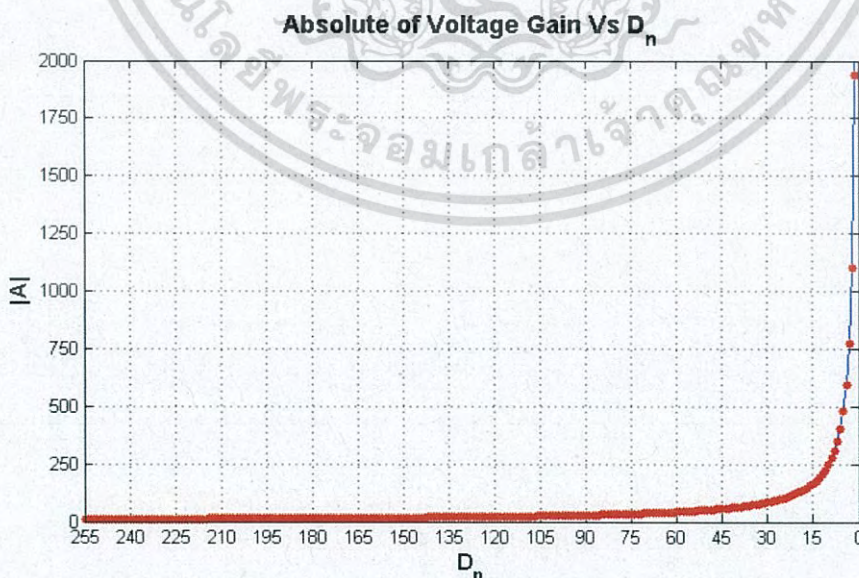


รูปที่ 3.11 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่สามารถปรับกำลังขยายได้

$$R_{WB} = \frac{R_{AB} D_n}{256} + R_W \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 สังเกตได้ว่าค่าความต้านทาน R_{WB} สามารถปรับค่าได้ 256 ค่า ด้วยการกำหนดค่า D_n ตั้งแต่ 0 ถึง 255 และจากวงจรขยายสัญญาณในรูปที่ 3.11 เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนแรงดันขาออก (V_o) ต่อแรงดันขาเข้า (V_i) หรืออัตราขยายแรงดัน (Voltage Gain, A) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.14 และเมื่อนำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวมาวาดกราฟ ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.12 สังเกตได้ว่าอัตราขยายแรงดันส่วนใหญ่อยู่ที่ต่ำกว่า 500 เท่า ที่ค่า D_n ตั้งแต่ 5 ถึง 255 และอัตราขยายแรงดันที่สูงกว่า 500 เท่า เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดดที่ค่า D_n ตั้งแต่ 0 ถึง 4 โดยมีอัตราขยายแรงดันต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 10.0266 และ 8,000 เท่า ที่ค่า D_n เท่ากับ 255 และ 0 ตามลำดับ

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2560}{D_n + 0.32} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันกับค่า D_n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากสัญญาณ V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ได้รับการขยายสัญญาณจนมีค่าแอมพลิจูดที่เหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำสัญญาณทั้งสองไปผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อกรองเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ตามต้องการ เนื่องจากในทางปฏิบัติเมื่อนำเครื่องวัดไปใช้จริงสัญญาณที่ได้ในการวัดจากลูปความต้านทานการต่อลงดินอาจมีสัญญาณที่ความถี่อื่นปะปนมากับสัญญาณที่ต้องการวัด จึงต้องกรองสัญญาณที่ปะปนมาออกก่อนเพื่อความถูกต้องเที่ยงตรงในการวัด โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองชนิด Butterworth ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology (Sallen-Key Butterworth Second Order Active Band-Pass Filter) ซึ่งเป็นชนิดของวงจรกรองความถี่อันดับสองที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ด้วยคุณสมบัติของผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) ที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่ชนิดอื่น แต่เหตุผลหลักที่เลือกใช้วงจรกรองความถี่ชนิดนี้คือค่าแมกนิจูดหรือขนาดของสัญญาณขาออกไม่เปลี่ยนแปลงมากหรือเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราส่วนที่คงที่แน่นอน (Constant Magnitude) ทำให้ในการวัดมีความคลาดเคลื่อนของค่าแมกนิจูดต่ำ

จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology ในรูปที่ 2.25 เพื่อความง่ายในการออกแบบวงจร กำหนดให้ค่าตัวต้านทานทุกตัวมีค่าเท่ากัน ($R_1 = R_2 = R_3 = R$) และค่าตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าเท่ากัน ($C_1 = C_2 = C$) จึงสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่ 2.28 ใหม่ได้ดังสมการที่ 3.15 และเมื่อนำมาเขียนให้อยู่ในเทอมของความถี่ มีความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 3.16 ถึง 3.20 โดย k_o คือกำลังขยายที่ความถี่ตัด ω_o คือความถี่ตัดเชิงมุม f_o คือความถี่ตัด และ Q คือตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) จากนั้นกำหนดให้ค่า C เท่ากับ $0.1 \mu F$ f_o เท่ากับ 1.6 kHz และ Q เท่ากับ $1/\sqrt{2}$ สำหรับวงจรกรองความถี่ชนิด Butterworth แล้วแก้สมการหาค่า R จะได้ค่าความต้านทานเท่ากับ $1,406.7442$ โอห์ม ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวต้านทานขนาดใกล้เคียงคือ 1.4 กิโลโอห์ม วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองชนิด Butterworth ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.13

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\left(\frac{k}{RC}\right)s}{s^2 + \left(\frac{4-k}{RC}\right)s + \left(\frac{\sqrt{2}}{RC}\right)^2} \quad (3.15)$$

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k_o \left(\frac{\omega_o}{Q}\right)s}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o^2} \quad (3.16)$$

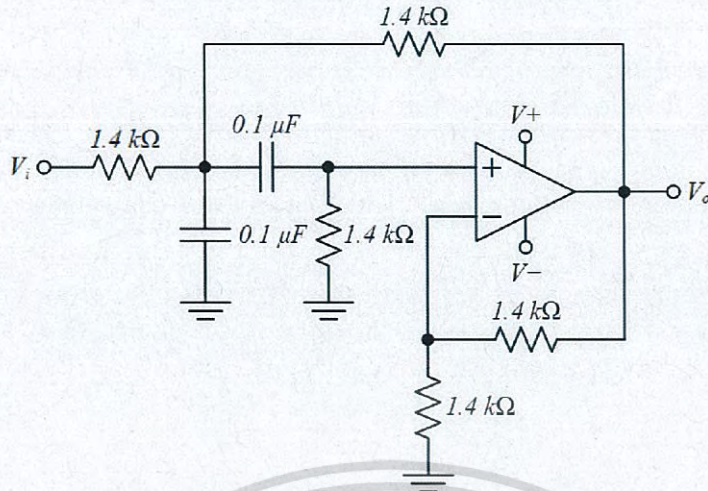
$$\omega_o = 2\pi f_o \quad (3.17)$$

$$f_o = \frac{1}{\sqrt{2\pi RC}} \quad (3.18)$$

$$k_o = 2\sqrt{2}Q - 1 \quad (3.19)$$

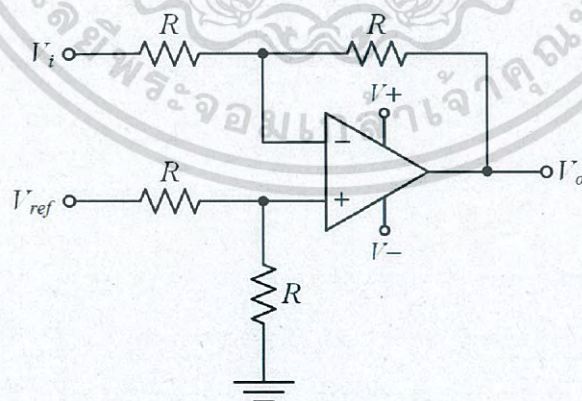
$$Q = \frac{\sqrt{2}}{4-k} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองชนิด Butterworth ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญญาณขาออกจากวงจรกรองแถบความถี่ถูกนำไปผ่านวงจรเลื่อนระดับแรงดัน (Voltage Level Shifter Circuits) เป็นขั้นตอนต่อไป เพื่อเลื่อนระดับแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference, V_{ref}) จาก 0 V ขึ้นเป็น 2.5 V หรือเป็นการเพิ่มองค์ประกอบโพตรง (DC Offset) ขนาด 2.5 V ให้สัญญาณเลื่อนขึ้นไปอยู่ชีกบวททั้งหมดก่อนเข้าไปประมวลผลและคำนวณค่าในไมโครคอนโทรลเลอร์นั่นเอง เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถอ่านค่าสัญญาณแรงดันชีกลบได้ โดยงานวิจัยนี้ใช้วงจรรขยายสัญญาณผลต่าง (Differential Amplifier Circuit) ที่มีกำลังขยายเท่ากับหนึ่ง (Unity Gain) เป็นวงจรเลื่อนระดับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยค่าความต้านทาน (R) ทุกตัวในวงจรมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโอห์ม และเมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออก (V_o) กับแรงดันขาเข้า (V_i) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.21 โดย V_{ref} มีค่าเท่ากับ 2.5 V



รูปที่ 3.14 วงจรเลื่อนระดับแรงดัน

$$V_o = V_{ref} - V_i \tag{3.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณแรงดัน V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ที่ผ่านกระบวนการข้างต้นถูกนำมาประมวลผลและคำนวณค่าในบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ผ่านขา A0 และ A1 ซึ่งเป็นขาอินพุตของสัญญาณอนาล็อก (Analog-Input Pins) ตามลำดับ โดยขาดังกล่าวมีรีจิสเตอร์การขัดจังหวะการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC Interrupt Register) อยู่ภายในให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกความละเอียดในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC Resolution) ที่ความละเอียด 8 บิต หรือ 10 บิต ได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ความละเอียด 10 บิต ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) 8 จุดต่อลูกคลื่น (Samples per Cycle) และทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 1,000 ลูกคลื่นต่อการคำนวณหนึ่งค่า โดยใช้รีจิสเตอร์การขัดจังหวะเวลา (Timer/Counter Interrupt Register) ชื่อว่า TIMER1 เป็นตัวกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่าง มีหน้าที่ในการกำหนดว่าเมื่อใด ADC Interrupt Register เริ่มขัดจังหวะการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งสัญญาณแรงดัน V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ที่วัดได้เป็นกลุ่มของตัวเลขขนาด 10 บิต (0 – 1023) จึงต้องนำมาแปลงเป็นค่าแรงดันแล้วนำไปลบกับระดับแรงดันที่เลื่อนขึ้น (2.5 V) ในตอนต้น จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ตามสมการที่ 3.22 และหารออกด้วยค่ากำลังขยาย เป็นลำดับถัดไป

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{n-1}^2 + V_n^2}{n}} \quad (3.22)$$

แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงนั้นค่าของระดับแรงดันที่เลื่อนขึ้นหรือระดับแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference, V_{ref}) ใหม่ ที่ได้จากวงจรเลื่อนระดับแรงดันอาจไม่ได้เป็น 2.5 V แบบในอุดมคติตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งการนำเอาค่าระดับแรงดันอ้างอิงที่ไม่ถูกต้องมาคำนวณจะส่งผลต่อค่าเฉลี่ยกำลังสองอย่างมาก เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณมีการยกกำลังสอง ทำให้การนำเอาค่าที่คลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยมาคำนวณอาจส่งผลให้ผลลัพธ์ของค่าเฉลี่ยกำลังสองมีความคลาดเคลื่อนสูง จึงต้องมีการคำนวณระดับแรงดันอ้างอิง ตามสมการที่ 3.23 แล้วจึงนำผลลัพธ์ของระดับแรงดันอ้างอิงดังกล่าวไปคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง ตามสมการที่ 3.24 เพื่อให้การคำนวณมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และเมื่อแทนค่าสมการที่ 3.23 ลงในสมการที่ 3.24 ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 3.25 โดย V_{op} คือแรงดันไฟฟ้าใช้งานเท่ากับ 5 V n คือจำนวนจุดในการสุ่มตัวอย่าง b คือจำนวนบิตเท่ากับ 10 และ V_i คือแรงดันขนาด 10 บิต ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์วัดได้ในแต่ละจุดของการสุ่มตัวอย่าง

$$V_{ref} = \frac{V_{op}}{n(2^b - 1)} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.23)$$

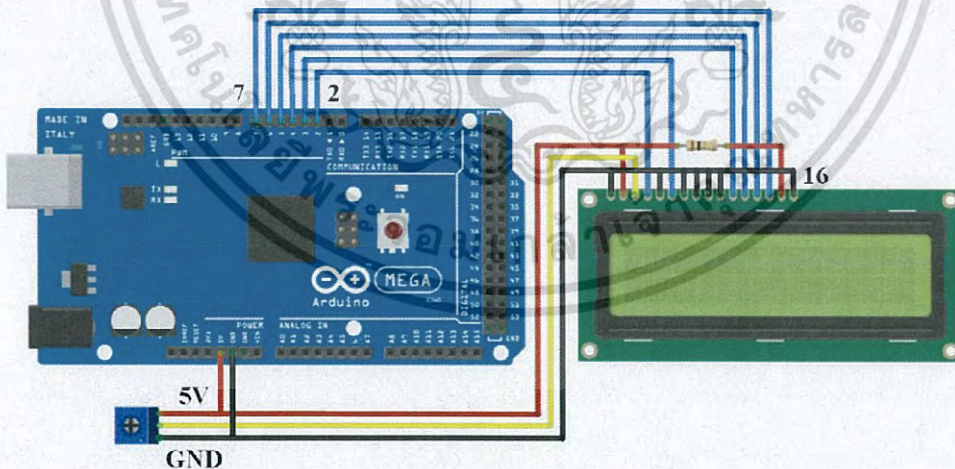
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(V_i \cdot \frac{V_{op}}{2^b - 1} \right) - V_{ref} \right]^2} \quad (3.24)$$

$$V_{rms} = \frac{V_{op}}{n(2^b - 1)} \sqrt{n \sum_{i=1}^n V_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n V_i \right)^2} \quad (3.25)$$

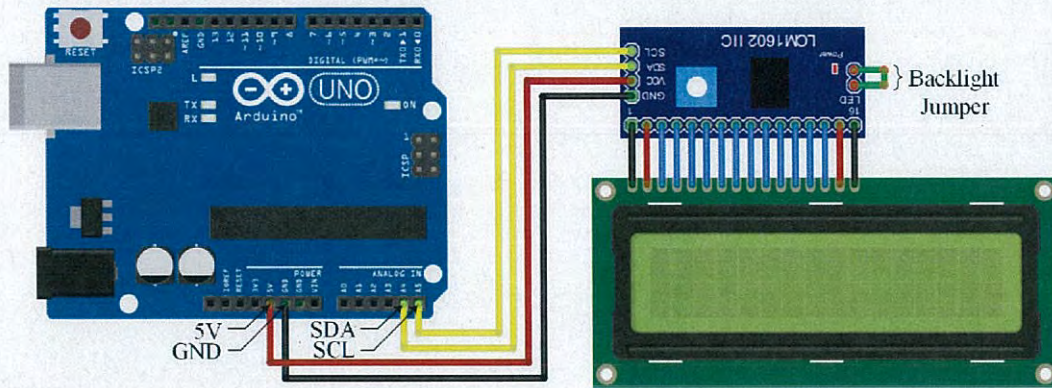
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน

ส่วนการแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินใช้แอลซีดี (LCD) ขนาด 16x4 (16 ตัวอักษร 4 บรรทัด) การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอลซีดีแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบขนาน (Parallel) และแบบอนุกรมหรือไอส์แคร์ซี (Inter-Integrated Circuit, I2C) โดยแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน แบบขนานมีข้อดีคือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถสั่งงานควบคุมแอลซีดีได้โดยตรงผ่านการเชื่อมต่อเพียงแค่อสายไฟ ไม่ต้องใช้อุปกรณ์หรือโมดูลเสริมเพื่อช่วยในการติดต่อสื่อสารกับแอลซีดี แต่มีข้อเสียคือใช้จำนวนขาใช้งานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มากจึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องใช้ขาใช้งานเป็นจำนวนมากทำให้ขาใช้งานอาจไม่เพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อ ส่วนแบบ I2C เป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับแอลซีดีผ่านโมดูลสื่อสารแบบอนุกรมสำหรับแอลซีดี (LCD Serial Interface Module) ชื่อว่า LCM1602 IIC มีข้อดีคือช่วยประหยัดจำนวนขาใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากใช้ขาสัญญาณเพียงแค่อสองขาในการควบคุมเท่านั้น คือ ขาข้อมูลอนุกรม (Serial Data line, SDA) และขาสัญญาณนาฬิกาอนุกรม (Serial Clock line, SCL) แต่มีข้อเสียคือจำเป็นต้องใช้โมดูลเสริมเพื่อช่วยในการติดต่อสื่อสาร งานวิจัยนี้เลือกใช้การเชื่อมต่อแบบขนานสำหรับต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบระบบโครงข่ายการวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 และเลือกใช้การเชื่อมต่อแบบ I2C สำหรับต้นแบบเครื่องวัดแบบพกพาที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 เนื่องจากบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 มีจำนวนขาใช้งานที่เพียงพอสำหรับการใช้งานอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องใช้การเชื่อมต่อแบบ I2C เพื่อประหยัดขาใช้งาน ส่วนบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 มีจำนวนขาใช้งานที่น้อยกว่า จึงต้องประหยัดขาใช้งานเพื่อให้มีเพียงพอสำหรับนำไปใช้งานในส่วนอื่นได้ การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับแอลซีดีแบบขนาน และรุ่น UNO Rev3 กับแอลซีดีแบบอนุกรม แสดงดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ

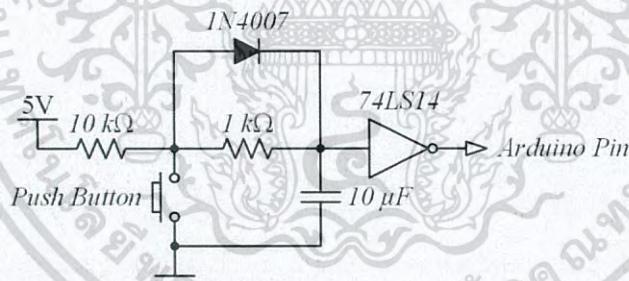


รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับแอลซีดีแบบขนาน



รูปที่ 3.16 การเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 กับแอลซีดีแบบอนุกรม

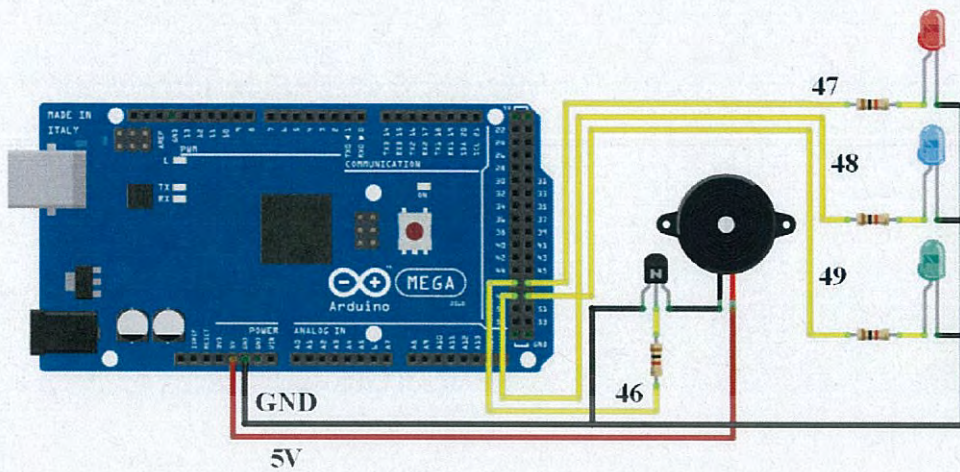
นอกเหนือจากการแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้บนหน้าจอแอลซีดีแล้ว เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นยังมีฟังก์ชันการทำงานเสริมสำหรับผู้ใช้งานให้สามารถกดสวิตช์ปุ่มกดเพื่อคงค่าที่อ่านได้ (Hold Button) และสวิตช์ปุ่มกดเพื่อเปลี่ยนหน้าจอแสดงผล (Next Button) ให้แสดงรายละเอียดและข้อมูลต่างๆ ของเครื่องวัด โดยใช้รีจิสเตอร์การขัดจังหวะภายนอก (External Interrupt Register) ชื่อว่า INT0 และ INT1 เป็นตัวกำหนดการขัดจังหวะให้บอร์ด Arduino สั่งงานคงค่าที่อ่านได้หรือเปลี่ยนหน้าจอแสดงผล ตามการทำงานของสวิตช์ปุ่มกด โดยตั้งค่าให้ทำงานในโหมดขอบขาขึ้นของสัญญาณแรงดัน (Rising Edge) วงจรการเชื่อมต่อสวิตช์ปุ่มกดกับขาใช้งานของบอร์ด Arduino แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรการเชื่อมต่อสวิตช์ปุ่มกดกับขาใช้งานของบอร์ด Arduino

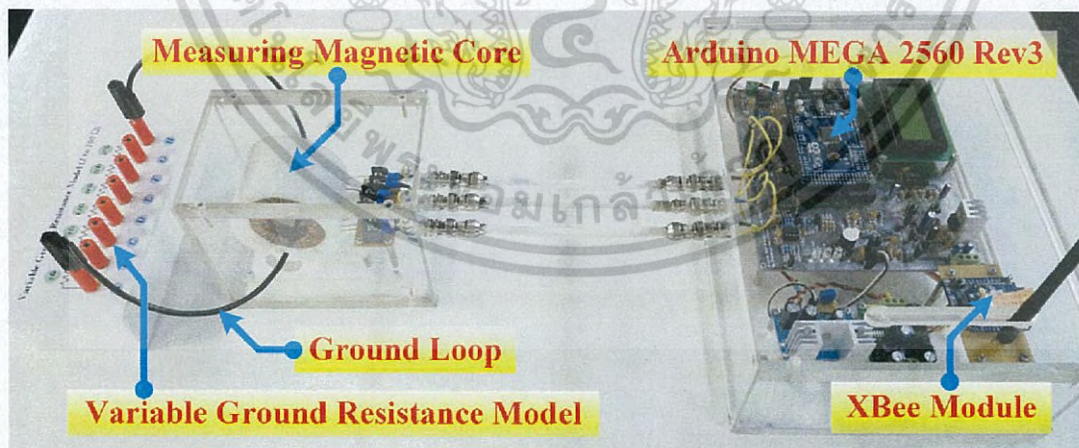
ส่วนการแจ้งเตือนใช้แอลอีดี (LED) 3 ตัว ทำงานร่วมกับกริ่ง (Buzzer) 1 อัน โดยมีเงื่อนไขในการแจ้งเตือน 3 เงื่อนไขดังนี้ เงื่อนไขแรกคือที่ค่าความต้านทานมากกว่าหรือเท่ากับ 1 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 โอห์ม ($1 \leq R_x \leq 5 \Omega$) ให้แอลอีดีสีเขียวติด หมายถึง ค่าความต้านทานต่ำ (Low Resistance) เงื่อนไขสองคือที่ค่าความต้านทานมากกว่า 5 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 โอห์ม ($5 < R_x \leq 25 \Omega$) ให้แอลอีดีสีฟ้าติด หมายถึง ค่าความต้านทานปกติ (Normal Resistance) และเงื่อนไขสุดท้ายคือที่ค่าความต้านทานมากกว่า 25 โอห์ม ($R_x > 25 \Omega$) ให้แอลอีดีสีแดงติดและกริ่งร้อง หมายถึง ค่าความต้านทานสูง (High Resistance) วงจรการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับอุปกรณ์แจ้งเตือนแสดงดังรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



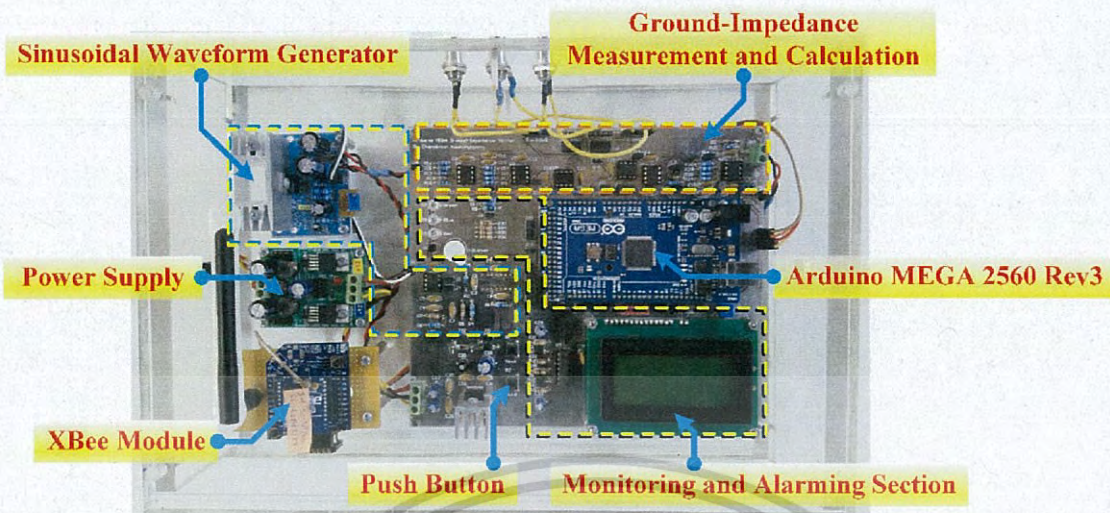
รูปที่ 3.18 วงจรการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับอุปกรณ์แจ้งเตือน

จากการออกแบบตั้งแต่หัวข้อย่อยที่ 3.1.1 ถึง 3.1.5 เมื่อนำเอาแต่ละส่วนมาประกอบสร้างเป็นส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน 2 แบบ ได้แก่ แบบระบบโครงข่ายการวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 และแบบพกพาที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่าต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 มีขาใช้งานที่เพียงพอสำหรับฟังก์ชันการทำงานเสริมสวิตช์ปุ่มกด (Push Button) เพื่อคงค่าที่อ่านและเปลี่ยนหน้าจอแสดงผล อีกทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับเอ็กซ์บีเพื่อส่งข้อมูลแบบไร้สาย ในขณะที่ต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 ไม่มีขาใช้งานที่เพียงพอสำหรับฟังก์ชันการทำงานเสริมดังกล่าว

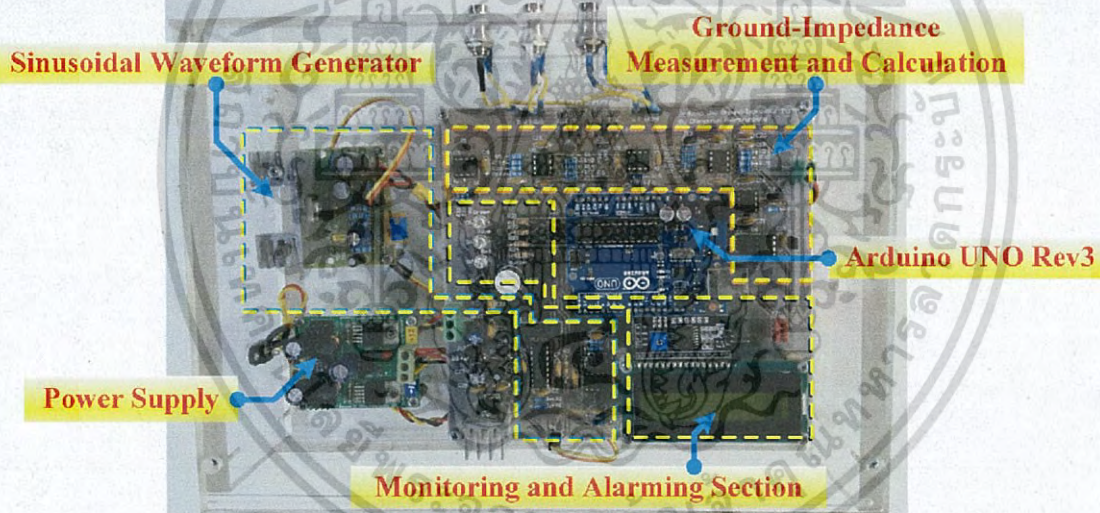


รูปที่ 3.19 ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ประกอบสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ต้นแบบเครื่องวัดแบบระบบโครงข่ายการวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

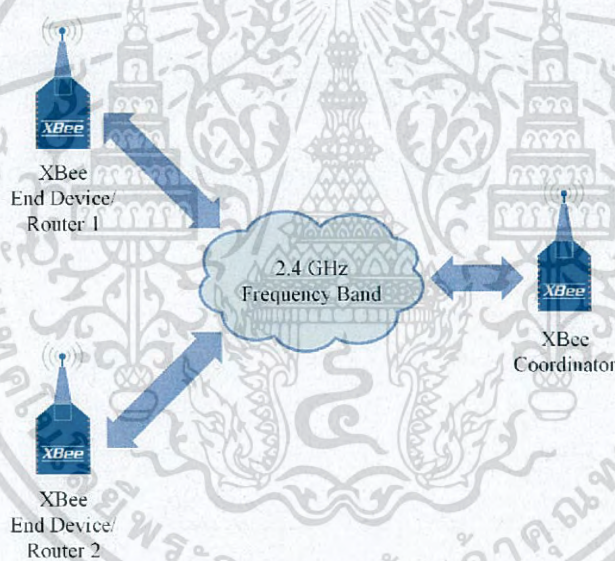


รูปที่ 3.21 ต้นแบบเครื่องวัดแบบพกพาที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3

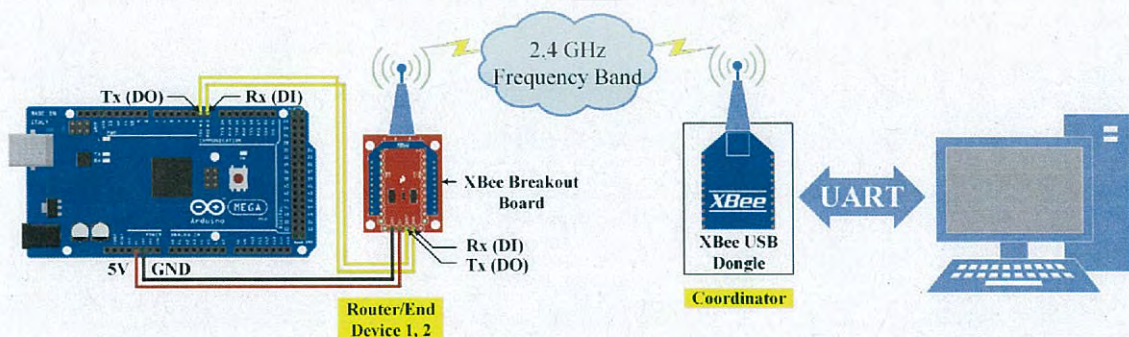
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนเครือข่ายการสื่อสาร

ส่วนเครือข่ายการสื่อสารในรูปที่ 3.1 ส่วน B ใช้เครือข่ายการสื่อสารรูปแบบดาว (Star, Broadcast) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 เพื่อเป็นการศึกษาโมดูลเอ็กซ์บีเบื้องต้น โดยนำเอาโมดูลเอ็กซ์บี 3 ตัว มาใช้สร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) โมดูลเอ็กซ์บี 2 ตัวแรก ทำหน้าที่เป็น End Device รับค่าความต้านทานการต่อลงดินที่คำนวณได้จากต้นแบบเครื่องวัดแต่ละเครื่องผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) ซึ่งคือขาใช้งานที่ D1 (Digital I/O Pin 1) ของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ทำหน้าที่เป็น DO (Digital Output) หรือ Tx (Transmitter) เชื่อมต่ออยู่กับขา DI (Digital Input) หรือ Rx (Receiver) ของโมดูลเอ็กซ์บีผ่านบอร์ดที่ใช้ในการโปรแกรมเอ็กซ์บี (XBee Breakout Board) เพื่อแปลงระดับแรงดันจาก 5 V เป็น 3.3 V จากนั้นข้อมูลค่าความต้านทานการต่อลงดินจึงถูกส่งแบบไร้สายผ่านย่านความถี่ 2.4 GHz ไปยังเอ็กซ์บีตัวรับอีกตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็น Coordinator ที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ผ่านตัวแปลงยูเอสบีของเอ็กซ์บี (XBee USB Dongle) เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลค่าดังกล่าวต่อไป แผนผังการเชื่อมต่อและการทำงานของเครือข่ายแบบไร้สายด้วยโมดูลเอ็กซ์บี แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 เครือข่ายการสื่อสารรูปแบบดาว

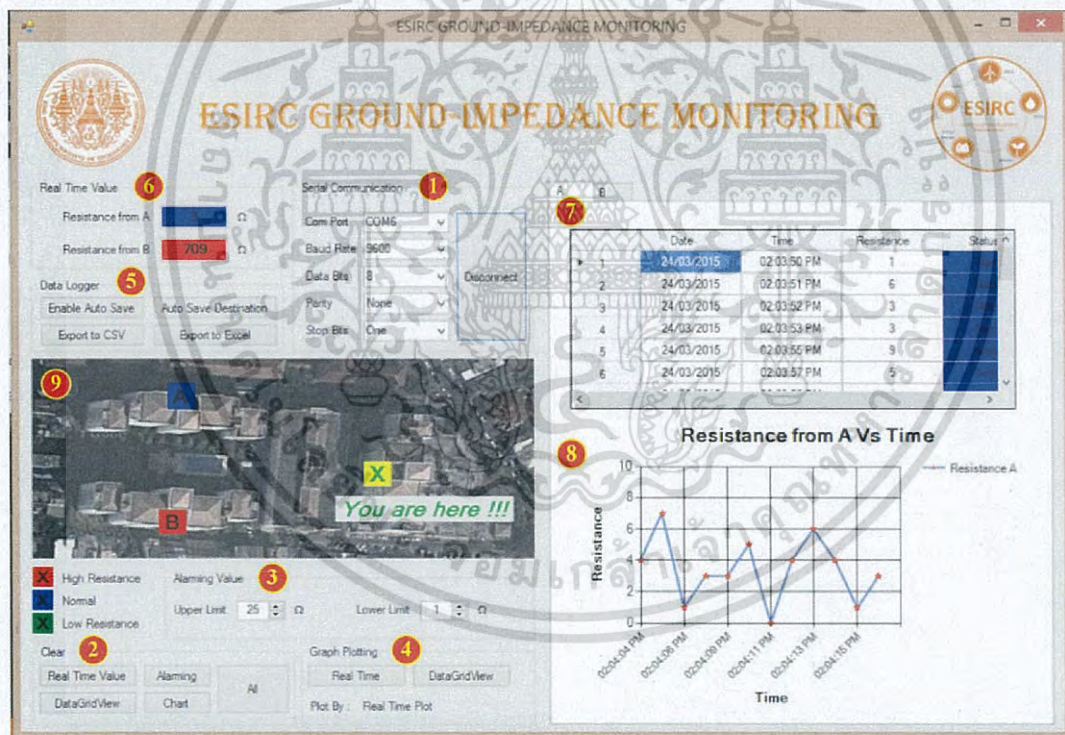


รูปที่ 3.23 แผนผังการเชื่อมต่อและการทำงานของเครือข่ายแบบไร้สายด้วยโมดูลเอ็กซ์บี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานในรูปแบบที่ 3.1 ส่วน C นำเอาโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 มาใช้เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C# [38] ในโหมดการทำงานแบบหน้าต่างโปรแกรม (Window Application) โดยหน้าต่างโปรแกรมที่สร้างขึ้นประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphic User Interface, GUI) ส่วนการจัดการข้อมูล (Data Management System, DMS) ส่วนการแสดงผล (Displaying) และส่วนการแจ้งเตือน (Alarming) ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งานมีหน้าที่ทำให้ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนการตั้งค่าต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน โดยสามารถกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูล และสามารถปรับเปลี่ยนขอบเขตบนและล่างของค่าความต้านทานในการแจ้งเตือน ส่วนการจัดการข้อมูลมีหน้าที่บันทึกข้อมูลของค่าที่วัดได้เป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ พร้อมทั้งบอก วัน-เวลา-สถานที่ในการเก็บข้อมูล ส่วนการแสดงผลทำหน้าที่แสดงผลค่าที่ได้รับในตารางของข้อมูล และวาดกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่วัดได้กับเวลา และส่วนการแจ้งเตือนทำหน้าที่แจ้งเตือนบนหน้าจอแผนที่ถึงจุดที่เกิดความผิดปกติเมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนดไว้ [12] หน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ออกแบบขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.24



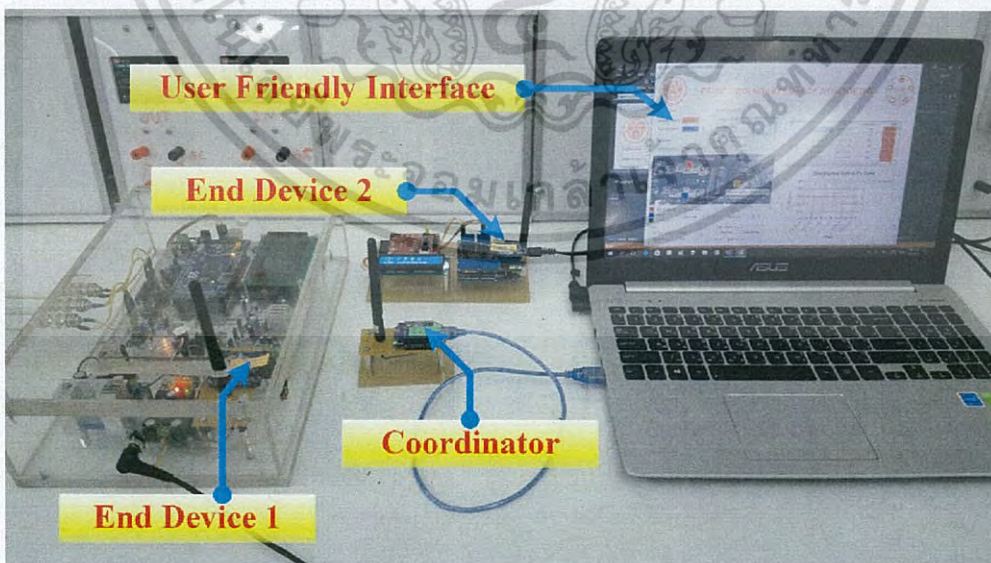
รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ออกแบบขึ้น

ส่วนแรกคือส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน ประกอบด้วย หมายเลข 1 ถึง 4 ดังรูปที่ 3.24 โดยหมายเลข 1 คือ ส่วนการตั้งค่าการสื่อสารของพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication Setting) ประกอบด้วย การตั้งค่าของ พอร์ตคอมพิวเตอร์ (Com Port) อัตรารับส่ง (Baud Rate) บิตข้อมูล (Data Bits) ค่าเสมอภาค (Parity) และบิตหยุด (Stop Bits) โดยในการตั้งค่าจำเป็นต้องตั้งค่าให้เหมือนกันทั้งในตัวโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และโมดูลเอ็กซ์พีทีทำการเชื่อมต่อ หมายเลข 2 คือ ส่วนของการล้างข้อมูล (Clear Data) ซึ่งสามารถเลือกได้ว่าต้องการล้างข้อมูลใน ส่วนการแสดงผลข้อมูลตามเวลาจริง (Real Time Value) ส่วนตารางเก็บข้อมูล (Data Grid View) ส่วนการแจ้งเตือน (Alarming) ส่วนการวาดกราฟ (Chart) หรือล้างข้อมูลทุกส่วน (All) หมายเลข 3 คือ ส่วนการตั้งค่าขอบเขตบน-ล่างของช่วงค่าความต้านทานที่ต้องการให้แจ้งเตือน หมายเลข 4 คือ ส่วนการตั้งค่ารูปแบบการวาดกราฟ (Graph Plotting) ซึ่งสามารถเลือกได้ว่าต้องการให้วาดกราฟข้อมูลตามเวลาจริงหรือจากตารางเก็บข้อมูล ส่วนที่สองของหน้าต่างโปรแกรมที่สร้างขึ้นคือส่วนการจัดการข้อมูล คือ หมายเลข 5 ดังรูปที่ 3.24 โดยสามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ได้ 2 แบบ คือ Microsoft Excel 97-2003 Worksheet (.xls) และ Microsoft Excel Comma Separated Values File (.csv) ส่วนที่สามคือส่วนการแสดงผล ประกอบด้วย หมายเลข 6 ถึง 8 ดังรูปที่ 3.24 โดย หมายเลข 6 คือ ส่วนการแสดงผลข้อมูลตามเวลาจริง หมายเลข 7 คือ ส่วนตารางเก็บข้อมูล หมายเลข 8 คือ ส่วนการวาดกราฟ และส่วนสุดท้ายของหน้าต่างโปรแกรมที่สร้างขึ้นคือส่วนการแจ้งเตือน คือ หมายเลข 9 ดังรูปที่ 3.24 โดยเป็นส่วนที่แสดงแผนที่รวมถึงตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องวัดและตำแหน่งของผู้ใช้งาน หากค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้ของตำแหน่งใดมีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่างที่ตั้งค่าไว้ในส่วนการตั้งค่าขอบเขตบน-ล่างของช่วงค่าความต้านทานที่ต้องการให้แจ้งเตือน (หมายเลข 3) สีของตำแหน่งนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว (Low Resistance) หากค่าที่วัดได้มีค่าสูงกว่าขอบเขตบนสีของตำแหน่งนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีแดง (High Resistance) และหากค่าที่วัดได้อยู่ระหว่างขอบเขตบน-ล่างสีของตำแหน่งนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน (Normal)

จากการออกแบบในหัวข้อย่อยที่ 3.2 และ 3.3 เมื่อนำเอาแต่ละส่วนมาประกอบสร้างเป็นส่วนเครือข่ายการสื่อสารและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน ได้ผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 โดยจำลองว่า End Device 2 เชื่อมต่ออยู่กับต้นแบบเครื่องวัดอีกเครื่องหนึ่งซึ่งส่งค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบสุ่มตั้งแต่ 1 ถึง 5 โอห์ม ไปให้กับ Coordinator ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.25 ส่วนเครือข่ายการสื่อสารและส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ประกอบสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและสรุปผล

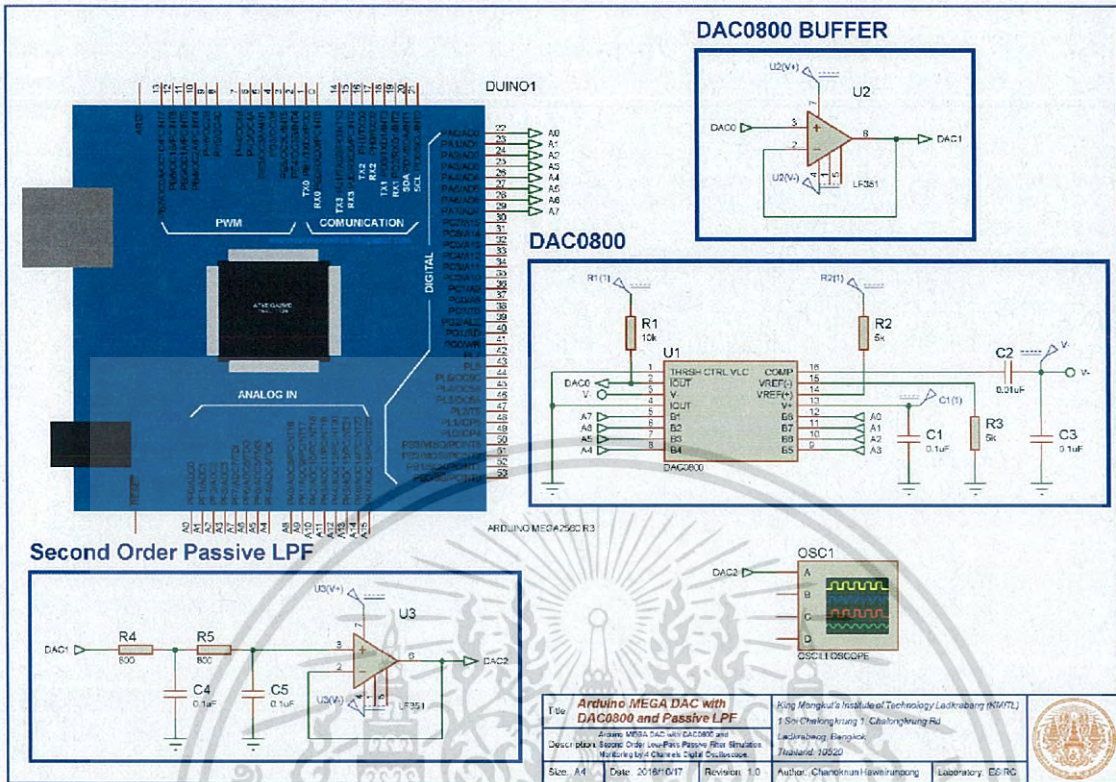
ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองการทำงานในแต่ละส่วนของระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทาน การต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์พีที่ออกแบบและประกอบสร้างขึ้น ประกอบด้วย 3 ส่วนการทดลองหลัก ดังนี้ ส่วนแรกคือการทดลองส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน เป็นการจำลองการทำงานในส่วนต่างๆ ของส่วนการวัด การทวนสอบความเที่ยงตรงของความต้านทานการต่อลงดินจำลอง รวมถึงการทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองและค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สถานที่จริงของต้นแบบเครื่องวัดที่ประกอบสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องวัดที่ได้มาตรฐาน ส่วนที่สองคือการทดลองส่วนเครือข่ายการสื่อสาร เป็นการทดลองการติดต่อสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างโมดูลเอ็กซ์พี และส่วนสุดท้ายคือการทดลองส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน เป็นการทดลองการแสดงผลข้อมูลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

4.1 การทดลองส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

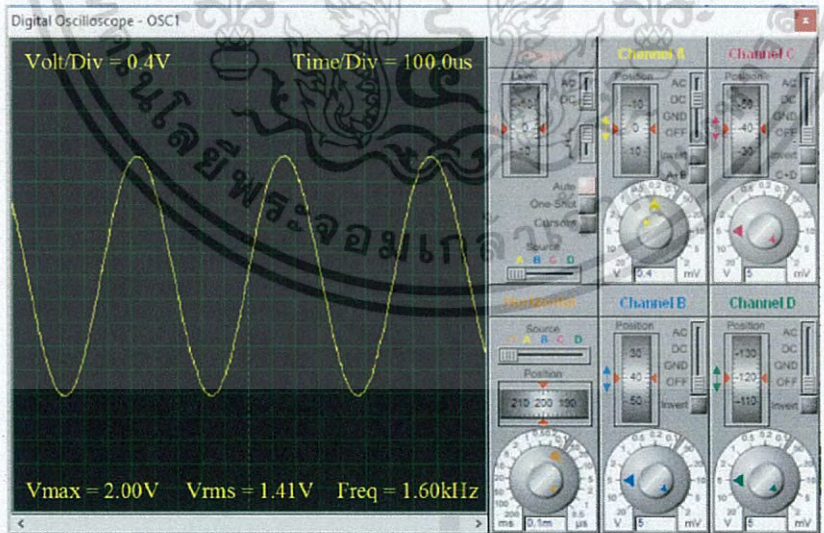
การทดลองในหัวข้อนี้นี้เป็นการจำลองการทำงานในส่วนต่างๆ ของส่วนการวัด การทวนสอบความเที่ยงตรงของความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยเครื่องวัดที่ได้มาตรฐาน รวมถึงการทดสอบความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานเมื่อนำแต่ละส่วนมาประกอบสร้างเป็นต้นแบบเครื่องวัด โดยโปรแกรมหลักที่ใช้ในการประมวลผลและจำลองมี 2 โปรแกรม ได้แก่ Proteus และ Multisim รายละเอียดการทดลองส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินอธิบายดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

4.1.1 การจำลองส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม Proteus

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำในการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ของส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ในต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น โดยนำเอาโปรแกรม Proteus 8 Intelligent Schematic Input System (ISIS) มาจำลองการทำงานของวงจรในส่วนดังกล่าว ซึ่งสัญญาณที่ต้องการสร้างคือสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 1.6 KHz และแอมพลิจูด 1 V_{rms} แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม Proteus และผลลัพธ์ของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองพบว่ารูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus มีความถี่ตามที่ต้องการ แต่ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณยังคงมีค่าสูงกว่าค่าที่ต้องการ เนื่องจากในแผนผังการเขียนวงจรจำลองดังกล่าวยังไม่มีส่วนใดควบคุมค่าแอมพลิจูด แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงสัญญาณดังกล่าวจะถูกนำไปผ่านวงจรขยายกำลังไฟฟ้า (Power Amplifier) เพื่อขยายกำลังและปรับลดค่าแอมพลิจูดลงมาให้ได้ค่าตามที่ต้องการต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ด้วยโปรแกรม Proteus



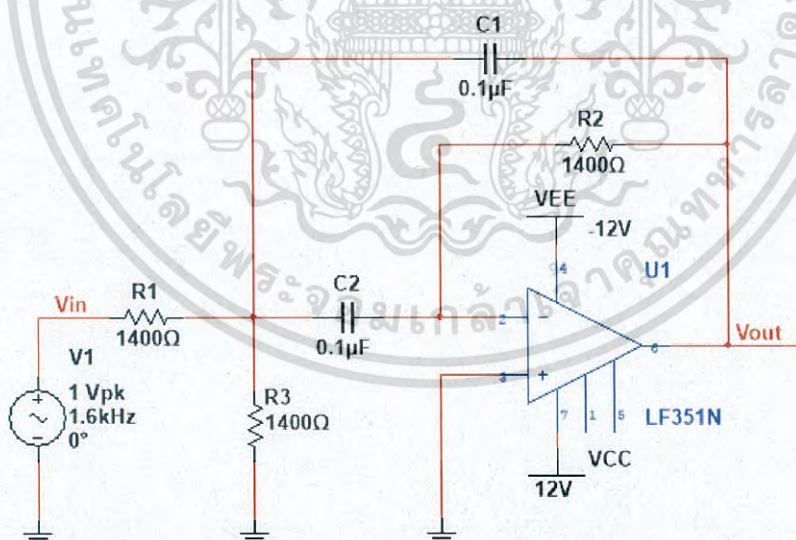
รูปที่ 4.2 ผลลัพธ์รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

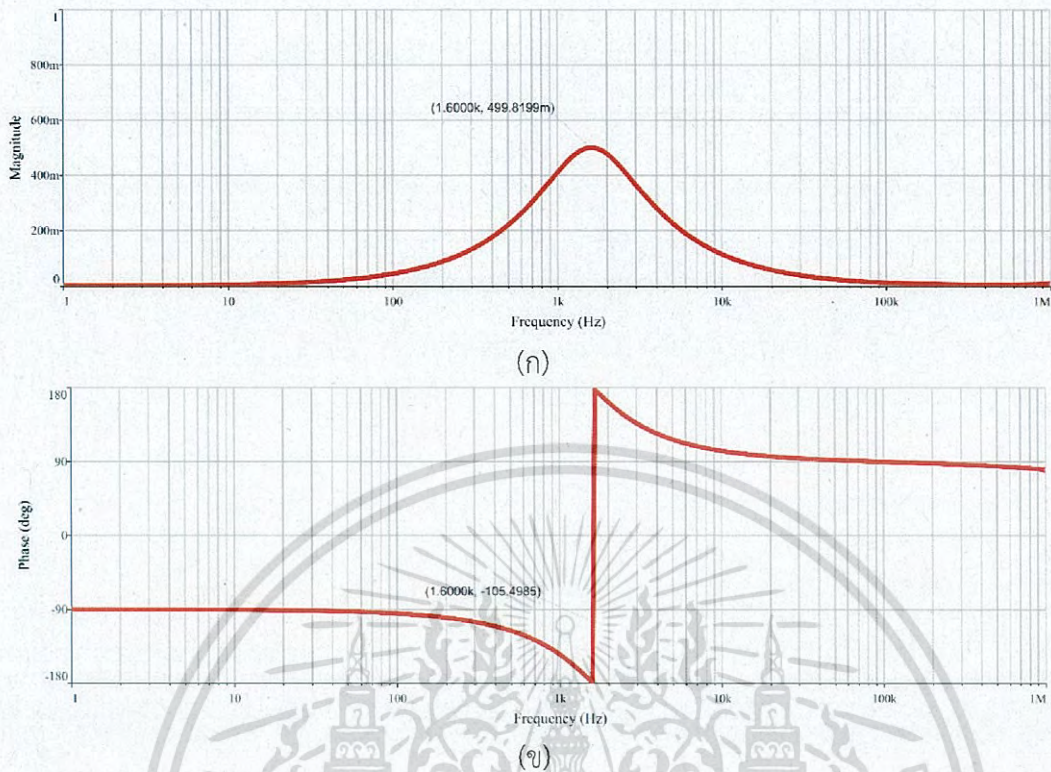
4.1.2 การจำลองวงจรกรองแถบความถี่ผ่านด้วยโปรแกรม Multisim

จากที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อย่อยที่ 3.1.4 เมื่อนำเครื่องวัดไปใช้งานจริง สัญญาณที่ได้ในการวัดจากอุปกรณ์ต้านทานการต่อลงดินอาจมีสัญญาณที่ความถี่อื่นปะปนมากับสัญญาณที่ต้องการวัด จึงต้องกรองสัญญาณที่ปะปนมาออกก่อนเพื่อความถูกต้องเที่ยงตรงในการวัด โดยชนิดของวงจรกรองความถี่ที่เลือกใช้คือวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ซึ่งวงจรกรองแถบความถี่ผ่านสามารถแบ่งตามรูปแบบการเชื่อมต่อออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology (SK) และรูปแบบการเชื่อมต่อ Multiple Feedback Topology (MFB) ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อย่อยที่ 2.4.2 การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูดและมุมเฟสของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านทั้งสองรูปแบบ โดยนำเอาโปรแกรม NI Multisim 12.0 มาใช้ในการจำลอง เพื่อเลือกวงจรกรองแถบความถี่ผ่านรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัด

แผนผังการเขียนวงจรจำลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB ด้วยโปรแกรม Multisim แสดงดังรูปที่ 4.3 และการตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูดและมุมเฟสของวงจรดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองพบว่าสัญญาณที่ความถี่ที่ใช้ในการวัดหรือที่ความถี่ตัด (1.6 kHz) มีค่าแมกนิจูดลดลงเป็น 0.4998 เท่า และมีมุมเฟสลดลงเป็น -105.4985 องศา ซึ่งถือได้ว่าสัญญาณที่ความถี่ดังกล่าวมีค่าแมกนิจูดและมุมเฟสเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก แต่สัญญาณที่ความถี่ 1 MHz ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวน (Noise) ได้รับการกรองออกไปด้วย

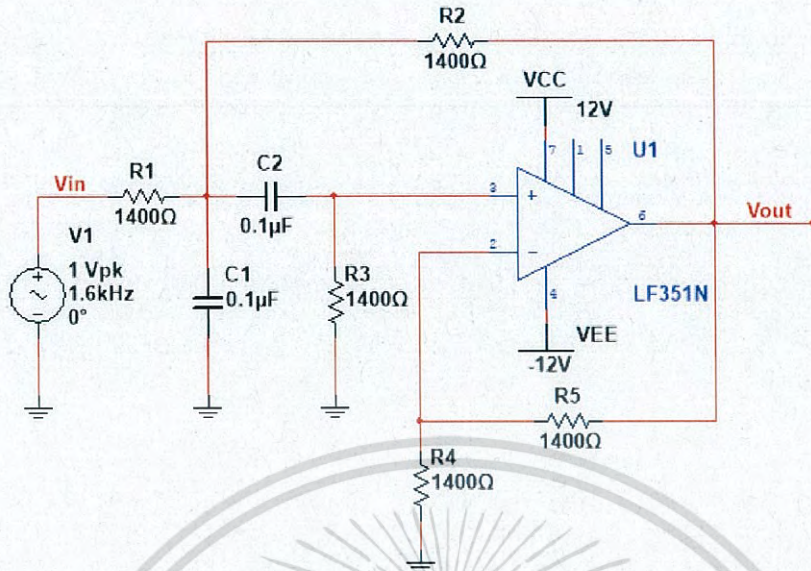


รูปที่ 4.3 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB ด้วยโปรแกรม Multisim

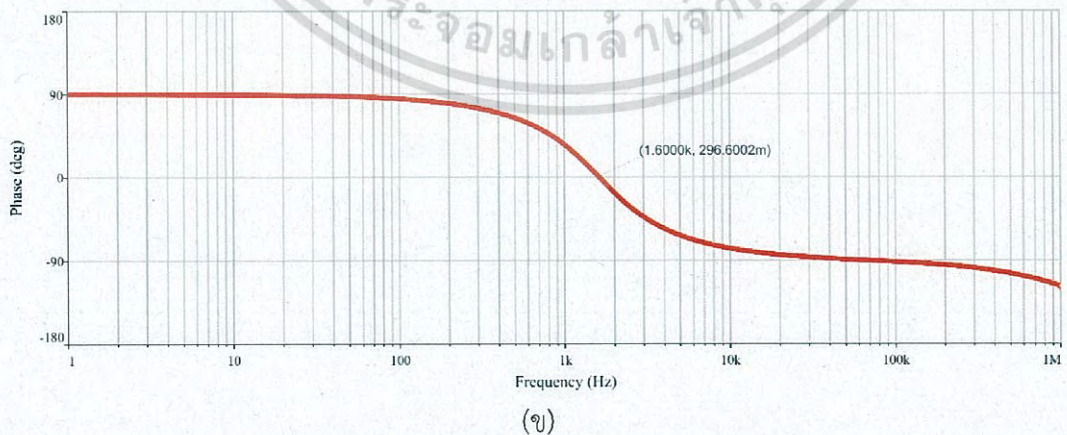
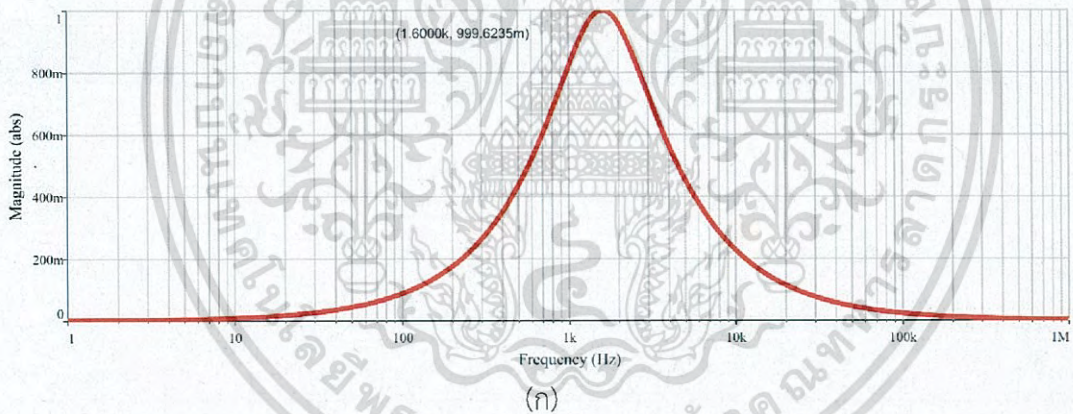


รูปที่ 4.4 การตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูด (ก) และมุมเฟส (ข) ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ MFB

แผนผังการเขียนวงจรจำลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK ด้วยโปรแกรม Multisim แสดงดังรูปที่ 4.5 และการตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูดและมุมเฟสของวงจรดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยจากผลการจำลองพบว่าสัญญาณที่ความถี่ที่ใช้ในการวัดหรือที่ความถี่ตัด (1.6 kHz) มีค่าแมกนิจูดลดลงเป็น 0.9996 เท่า และมีมุมเฟสเพิ่มขึ้นเป็น 0.2966 องศา ซึ่งถือได้ว่าสัญญาณที่ความถี่ดังกล่าวมีค่าแมกนิจูดและมุมเฟสเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย และสัญญาณที่ความถี่ 1 MHz ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวน (Noise) ได้รับการกรองออกไปด้วย ดังนั้นจึงเลือกวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK สำหรับการนำไปประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัด เนื่องจากการตอบสนองเชิงความถี่ที่ดีกว่ารูปแบบการเชื่อมต่อ MFB



รูปที่ 4.5 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK ด้วยโปรแกรม Multisim

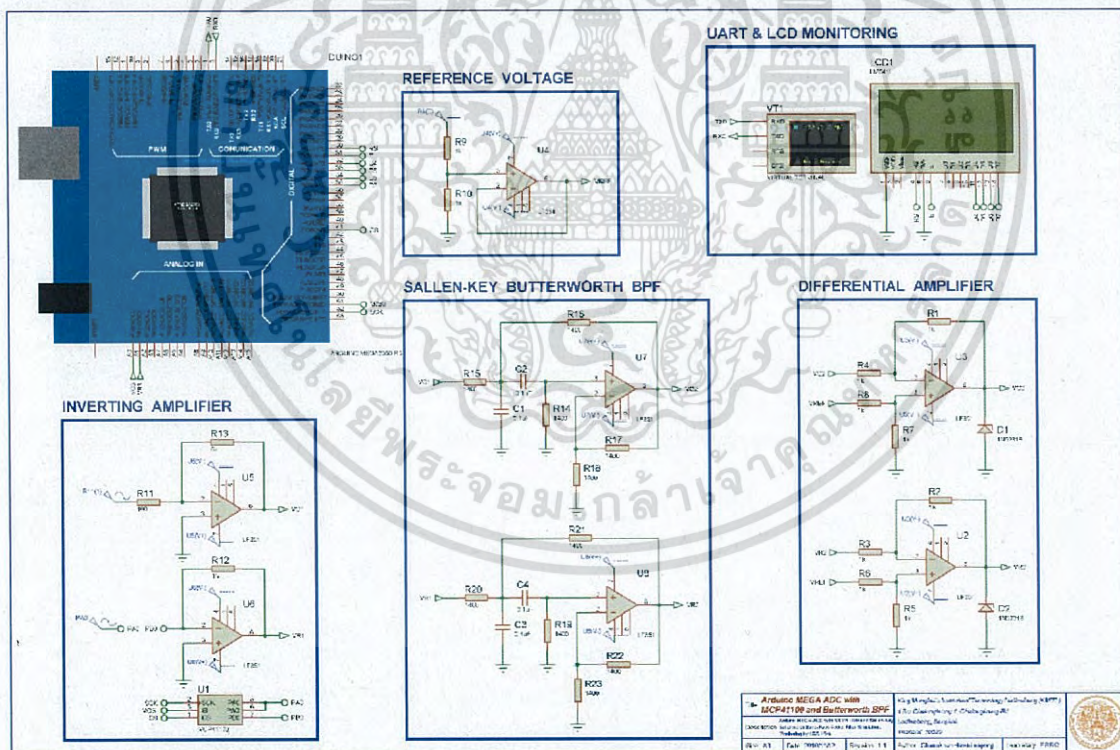


รูปที่ 4.6 การตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูด (ก) และมุมเฟส (ข) ของวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอกทีฟอันดับสองที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ SK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การจำลองส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานด้วยโปรแกรม Proteus

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดและคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ของสัญญาณรูปคลื่นไซน์ขาออกจากแกนแม่เหล็ก (V_{out} และ $V_{R(burden)}$) ของส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานในต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น โดยนำเอาโปรแกรม Proteus 8 Intelligent Schematic Input System (ISIS) มาจำลองการทำงานของวงจรในส่วนดังกล่าว แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานด้วยโปรแกรม Proteus แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยกำหนดให้สัญญาณ V_{out} มีค่าเท่ากับ 20 mV $V_{R(burden)}$ มีค่าตั้งแต่ 1.6 ถึง 160 mV และค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ 8.0 และใช้สมการที่ 3.9 ในการคำนวณค่าความต้านทาน ผลการวัดและคำนวณค่าความต้านทานจากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus แสดงดังตารางที่ 4.1 และกราฟเปรียบเทียบและกราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่จำลองขึ้นกับค่าความต้านทานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานสามารถวัดค่าความต้านทานในช่วง 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 1.43 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความต้านทาน 69.9 โอห์ม



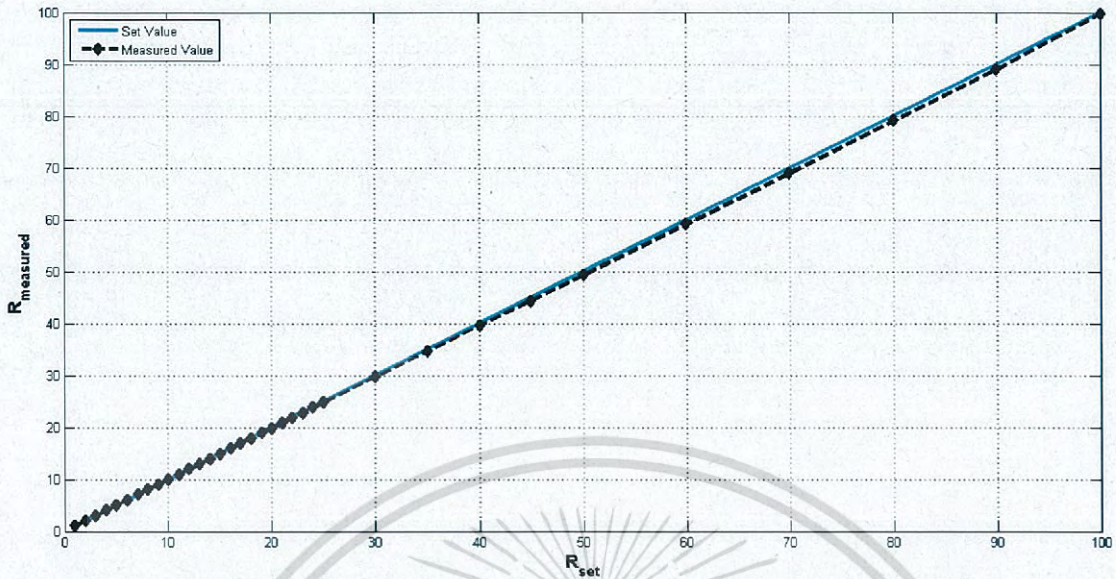
รูปที่ 4.7 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานด้วยโปรแกรม Proteus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

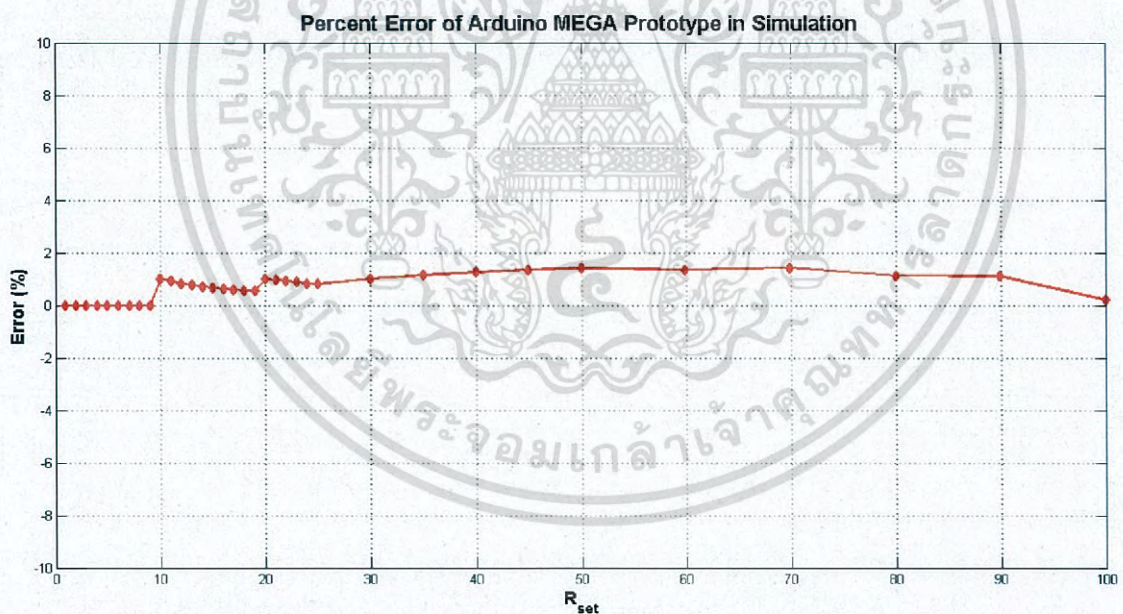
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดและคำนวณค่าความต้านทานจากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus

Set Value			Measured Value			Error (%)
V_{out} (mV)	$V_{R(burden)}$ (mV)	R (Ω)	V_{out} (mV)	$V_{R(burden)}$ (mV)	R (Ω)	
20.00	160.00	1.0	19.90	159.50	1.0	0.00
20.00	80.00	2.0	19.89	79.71	2.0	0.00
20.00	53.33	3.0	19.89	53.16	3.0	0.00
20.00	40.00	4.0	19.89	39.89	4.0	0.00
20.00	32.00	5.0	19.89	31.92	5.0	0.00
20.00	26.67	6.0	19.89	26.61	6.0	0.00
20.00	22.86	7.0	19.89	22.82	7.0	0.00
20.00	20.00	8.0	19.89	19.97	8.0	0.00
20.00	17.78	9.0	19.89	17.76	9.0	0.00
20.00	16.00	10.0	19.89	15.99	9.9	1.00
20.00	14.55	11.0	19.89	14.55	10.9	0.91
20.00	13.33	12.0	19.89	13.33	11.9	0.83
20.00	12.31	13.0	19.89	12.32	12.9	0.77
20.00	11.43	14.0	19.89	11.44	13.9	0.71
20.00	10.67	15.0	19.89	10.68	14.9	0.67
20.00	10.00	16.0	19.89	10.01	15.9	0.62
20.00	9.41	17.0	19.89	9.43	16.9	0.59
20.00	8.89	18.0	19.89	8.91	17.9	0.56
20.00	8.42	19.0	19.89	8.44	18.9	0.53
20.00	8.00	20.0	19.89	8.02	19.8	1.00
20.00	7.62	21.0	19.89	7.64	20.8	0.95
20.00	7.27	22.0	19.89	7.29	21.8	0.91
20.00	6.96	23.0	19.89	6.99	22.8	0.87
20.00	6.67	24.0	19.89	6.70	23.8	0.83
20.00	6.40	25.0	19.89	6.43	24.8	0.80
20.00	5.33	30.0	19.89	5.36	29.7	1.00
20.00	4.57	35.0	19.89	4.60	34.6	1.14
20.00	4.00	40.0	19.89	4.03	39.5	1.25
20.00	3.56	44.9	19.89	3.59	44.3	1.34
20.00	3.20	50.0	19.89	3.23	49.3	1.40
20.00	2.67	59.9	19.89	2.69	59.1	1.34
20.00	2.29	69.9	19.89	2.31	68.9	1.43
20.00	2.00	80.0	19.89	2.01	79.1	1.13
20.00	1.78	89.9	19.89	1.79	88.9	1.11
20.00	1.60	100.0	19.90	1.59	99.8	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่จำลองขึ้นกับค่าความต้านทานที่กำหนด

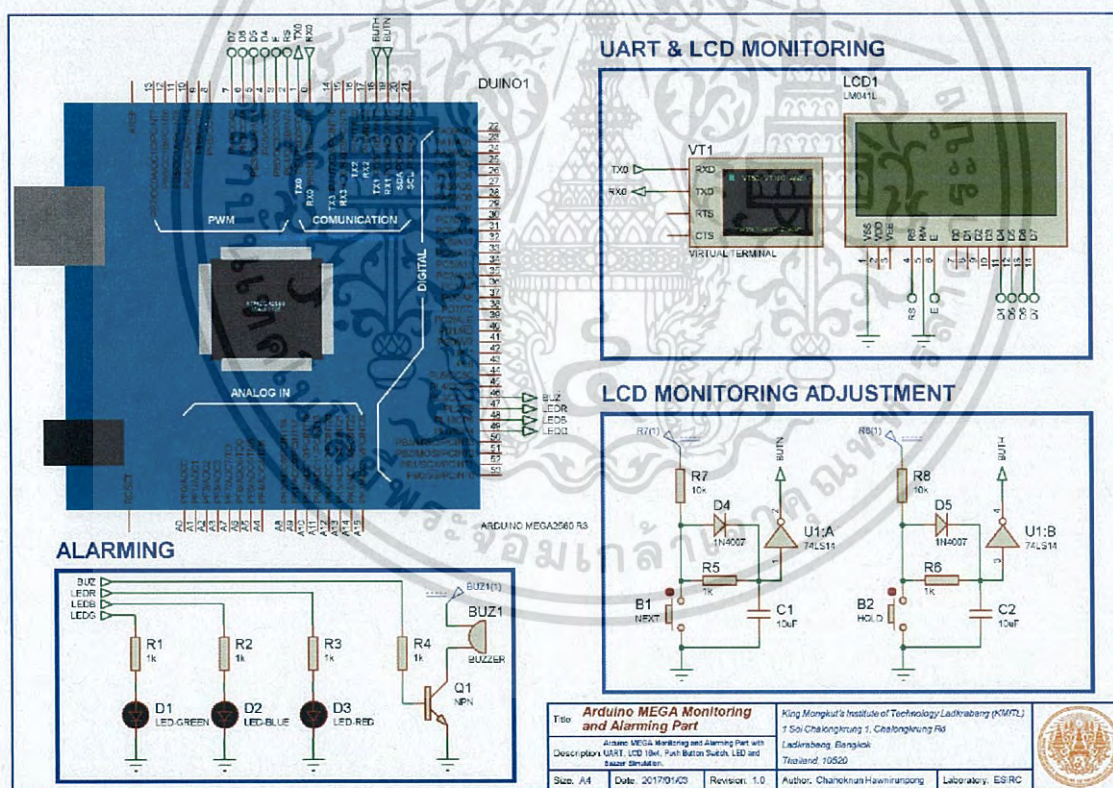


รูปที่ 4.9 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่จำลองขึ้นกับค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การจำลองส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือนด้วยโปรแกรม Proteus

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์แจ้งเตือน แอลอีดี (LED) และกริ่ง (Buzzer) ตามเงื่อนไขในหัวข้อย่อยที่ 3.1.5 การทำงานของสวิตช์ปุ่มกด (Push Button) รวมถึงการแสดงผลค่าความต้านทานที่วัดได้บนหน้าจอแอลซีดี (LCD) และการส่งค่าดังกล่าวผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) ด้วยการเฝ้าสังเกตผ่านอุปกรณ์ชื่อว่า Virtual Terminal ในโปรแกรม Proteus แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือนด้วยโปรแกรม Proteus แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยโปรแกรมให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ทำการวนลูปค่าความต้านทานที่กำหนดขึ้นตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม แล้วตรวจสอบการทำงานของแต่ละส่วนที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลการแจ้งเตือนจากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus แสดงดังตารางที่ 4.2 จากผลการจำลองพบว่าแอลอีดีและกริ่งทำงานได้ตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการ สวิตช์ปุ่มกดสามารถคงค่าที่อ่านและเปลี่ยนหน้าจอแสดงผลได้ รวมถึงหน้าจอแอลซีดีและพอร์ตอนุกรมสามารถแสดงผลและส่งข้อมูลได้ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 แผนผังการเขียนวงจรจำลองของส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือนด้วยโปรแกรม Proteus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

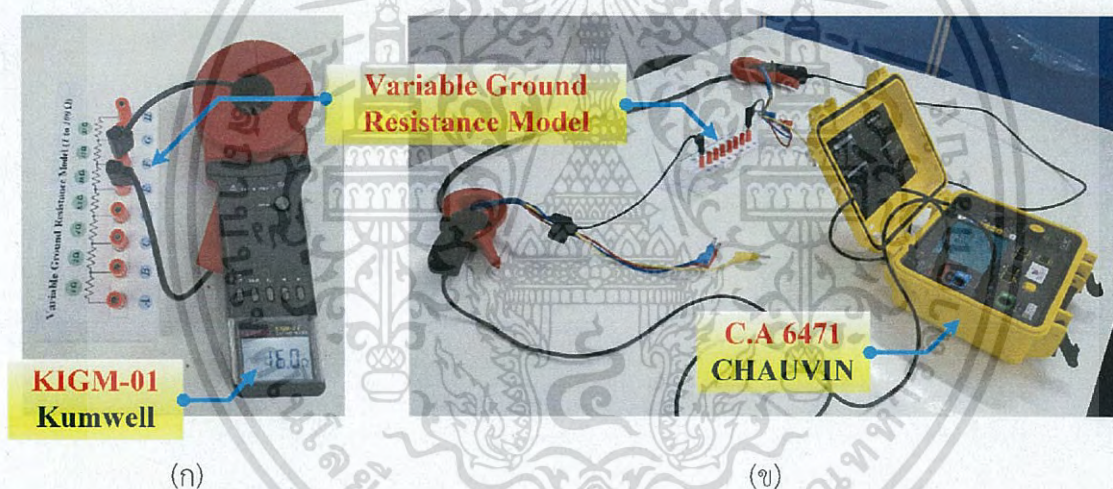
ตารางที่ 4.2 ผลการแจ้งเตือนจากการจำลองด้วยโปรแกรม Proteus

Resistance (Ω)	Devices			
	Green LED	Blue LED	Red LED	Buzzer
1.00	ON	OFF	OFF	OFF
2.00	ON	OFF	OFF	OFF
3.00	ON	OFF	OFF	OFF
4.00	ON	OFF	OFF	OFF
5.00	ON	OFF	OFF	OFF
6.00	OFF	ON	OFF	OFF
7.00	OFF	ON	OFF	OFF
8.00	OFF	ON	OFF	OFF
9.00	OFF	ON	OFF	OFF
10.00	OFF	ON	OFF	OFF
11.00	OFF	ON	OFF	OFF
12.00	OFF	ON	OFF	OFF
13.00	OFF	ON	OFF	OFF
14.00	OFF	ON	OFF	OFF
15.00	OFF	ON	OFF	OFF
16.00	OFF	ON	OFF	OFF
17.00	OFF	ON	OFF	OFF
18.00	OFF	ON	OFF	OFF
19.00	OFF	ON	OFF	OFF
20.00	OFF	ON	OFF	OFF
21.00	OFF	ON	OFF	OFF
22.00	OFF	ON	OFF	OFF
23.00	OFF	ON	OFF	OFF
24.00	OFF	ON	OFF	OFF
25.00	OFF	ON	OFF	OFF
30.00	OFF	OFF	ON	ON
35.00	OFF	OFF	ON	ON
40.00	OFF	OFF	ON	ON
45.00	OFF	OFF	ON	ON
50.00	OFF	OFF	ON	ON
60.00	OFF	OFF	ON	ON
70.00	OFF	OFF	ON	ON
80.00	OFF	OFF	ON	ON
90.00	OFF	OFF	ON	ON
100.00	OFF	OFF	ON	ON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 การทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้น

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นในหัวข้อย่อยที่ 3.1.3 โดยใช้เครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 วัดค่าความต้านทานจากกลุ่มความต้านทานการต่อลงดินจำลองดังกล่าวตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม จากผลการทดลองพบว่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อวัดด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 เท่ากับ 2.00 และ 2.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ รูปการทวนสอบในห้องปฏิบัติการและผลการทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ กราฟเปรียบเทียบและกราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 กับค่าความต้านทานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 การทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 (ก) และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 (ข)

ตารางที่ 4.3 ผลการทวนสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471

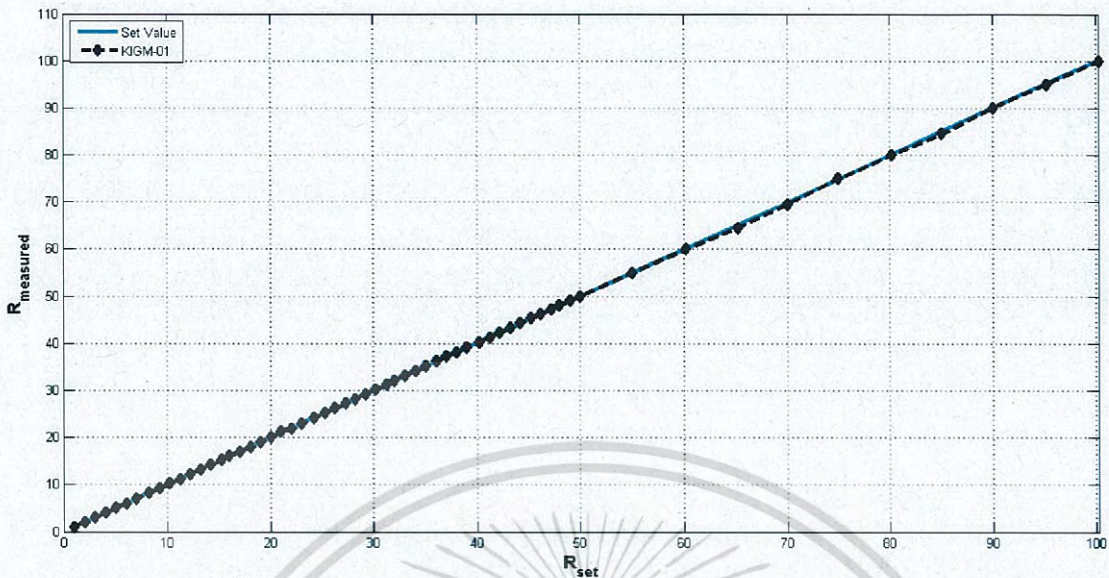
Resistance (Ω)		KIGM-01		C.A 6471			
Value	Tolerance	R (Ω)	Error (%)	u (mV)	i (mA)	R (Ω)	Error (%)
1.00	± 0.010	1.0	0.00	220.32	216.00	1.02	2.00
2.00	± 0.020	2.0	0.00	225.50	110.00	2.05	2.50
3.00	± 0.030	3.0	0.00	225.83	73.80	3.06	2.00
4.00	± 0.040	4.0	0.00	226.55	55.80	4.06	1.50
5.00	± 0.050	5.1	2.00	227.01	44.60	5.09	1.80
6.00	± 0.060	6.0	0.00	227.02	37.40	6.07	1.17
7.00	± 0.070	7.0	0.00	227.27	32.10	7.08	1.14
8.20	± 0.082	8.2	0.00	227.42	27.70	8.21	0.12
9.20	± 0.092	9.2	0.00	227.30	24.60	9.24	0.43
10.20	± 0.102	10.2	0.00	226.44	22.20	10.2	0.00
11.20	± 0.112	11.2	0.00	228.26	20.20	11.3	0.89
12.20	± 0.122	12.2	0.00	226.92	18.60	12.2	0.00
13.20	± 0.132	13.2	0.00	228.76	17.20	13.3	0.76
14.20	± 0.142	14.2	0.00	227.20	16.00	14.2	0.00
15.20	± 0.152	15.2	0.00	227.97	14.90	15.3	0.66
16.00	± 0.160	16.0	0.00	227.20	14.20	16.0	0.00
17.00	± 0.170	17.0	0.00	227.43	13.30	17.1	0.59
18.00	± 0.180	18.0	0.00	228.06	12.60	18.1	0.56
19.00	± 0.190	19.0	0.00	227.29	11.90	19.1	0.53
20.00	± 0.200	20.0	0.00	227.13	11.30	20.1	0.50
21.00	± 0.210	21.2	0.95	227.88	10.80	21.1	0.48
22.00	± 0.220	22.0	0.00	227.63	10.30	22.1	0.45
23.00	± 0.230	23.0	0.00	227.77	9.86	23.1	0.43
24.20	± 0.242	24.1	0.41	227.72	9.41	24.2	0.00
25.20	± 0.252	25.2	0.00	227.56	9.03	25.2	0.00
26.20	± 0.262	26.2	0.00	227.68	8.69	26.2	0.00
27.20	± 0.272	27.2	0.00	227.39	8.36	27.2	0.00
28.20	± 0.282	28.2	0.00	227.57	8.07	28.2	0.00
29.20	± 0.292	29.2	0.00	227.47	7.79	29.2	0.00
30.20	± 0.302	30.2	0.00	227.71	7.54	30.2	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

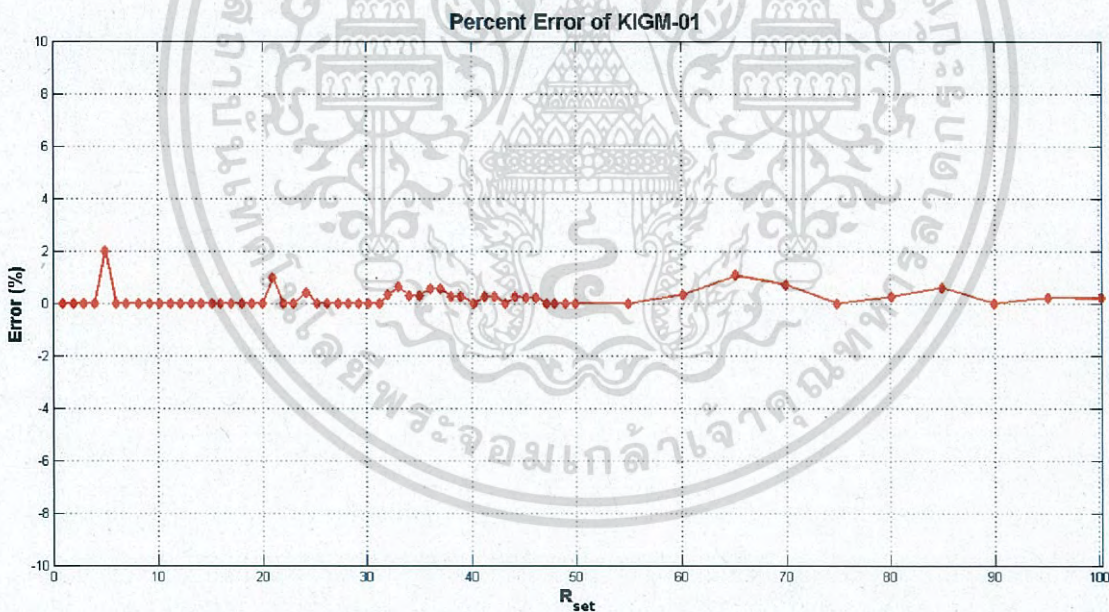
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความถูกต้องของความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 (ต่อ)

Resistance (Ω)		KIGM-01		C.A 6471			
Value	Tolerance	R (Ω)	Error (%)	u (mV)	i (mA)	R (Ω)	Error (%)
31.20	± 0.312	31.2	0.00	227.76	7.30	31.2	0.00
32.00	± 0.320	32.1	0.31	227.91	7.10	32.1	0.31
33.00	± 0.330	33.2	0.61	227.73	6.88	33.1	0.30
34.00	± 0.340	34.1	0.29	227.79	6.68	34.1	0.29
35.00	± 0.350	35.1	0.29	227.80	6.49	35.1	0.29
36.00	± 0.360	36.2	0.56	227.79	6.31	36.1	0.28
37.00	± 0.370	37.2	0.54	227.42	6.13	37.1	0.27
38.00	± 0.380	38.1	0.26	227.84	5.98	38.1	0.26
39.00	± 0.390	39.1	0.26	227.56	5.82	39.1	0.26
40.20	± 0.402	40.2	0.00	227.53	5.66	40.2	0.00
41.20	± 0.412	41.3	0.24	227.98	5.52	41.3	0.24
42.20	± 0.422	42.3	0.24	228.00	5.39	42.3	0.24
43.20	± 0.432	43.2	0.00	227.76	5.26	43.3	0.23
44.20	± 0.442	44.3	0.23	227.63	5.15	44.2	0.00
45.20	± 0.452	45.3	0.22	227.86	5.03	45.3	0.22
46.20	± 0.462	46.1	0.22	227.77	4.93	46.2	0.00
47.20	± 0.472	47.2	0.00	227.50	4.82	47.2	0.00
48.00	± 0.480	48.0	0.00	227.52	4.74	48.0	0.00
49.00	± 0.490	49.0	0.00	227.85	4.65	49.0	0.00
50.00	± 0.500	50.0	0.00	227.50	4.55	50.0	0.00
55.00	± 0.550	55.0	0.00	227.70	4.14	55.0	0.00
60.20	± 0.602	60.0	0.33	227.78	3.79	60.1	0.17
65.20	± 0.652	64.5	1.07	227.80	3.51	64.9	0.46
70.00	± 0.700	69.5	0.71	228.25	3.27	69.8	0.29
75.00	± 0.750	75.0	0.00	227.84	3.05	74.7	0.40
80.20	± 0.802	80.0	0.25	227.43	2.85	79.8	0.50
85.00	± 0.850	84.5	0.59	227.31	2.69	84.5	0.59
90.00	± 0.900	90.0	0.00	228.23	2.55	89.5	0.56
95.20	± 0.952	95.0	0.21	227.99	2.41	94.6	0.63
100.20	± 1.002	100.0	0.20	227.86	2.29	99.5	0.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

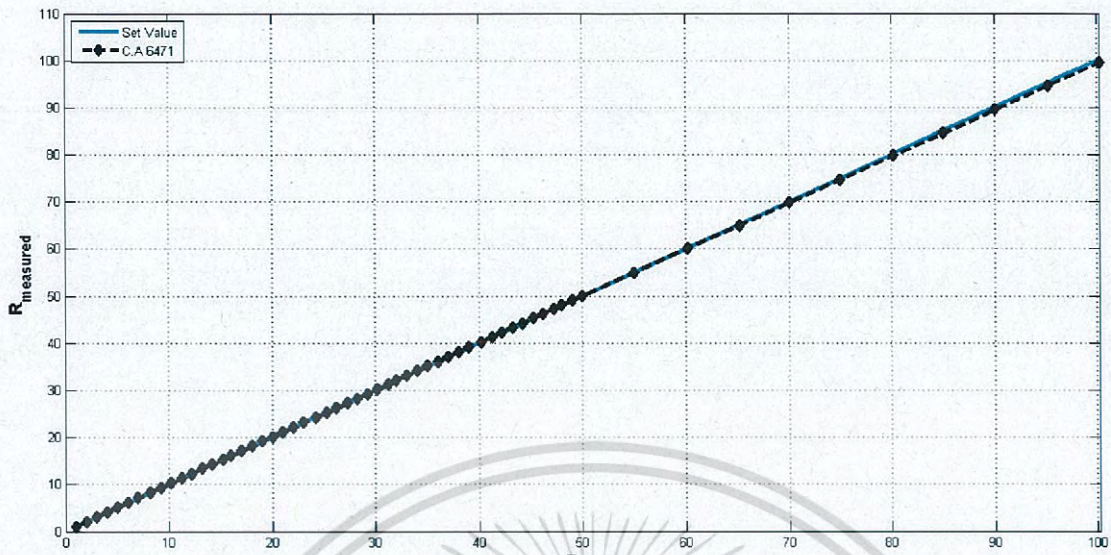


รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

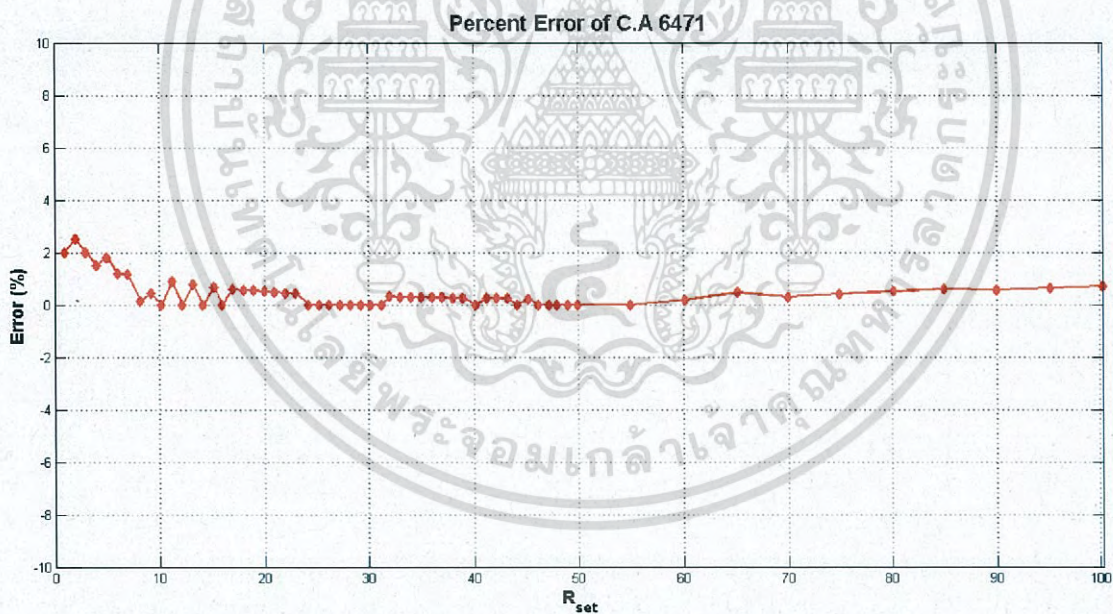


รูปที่ 4.13 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

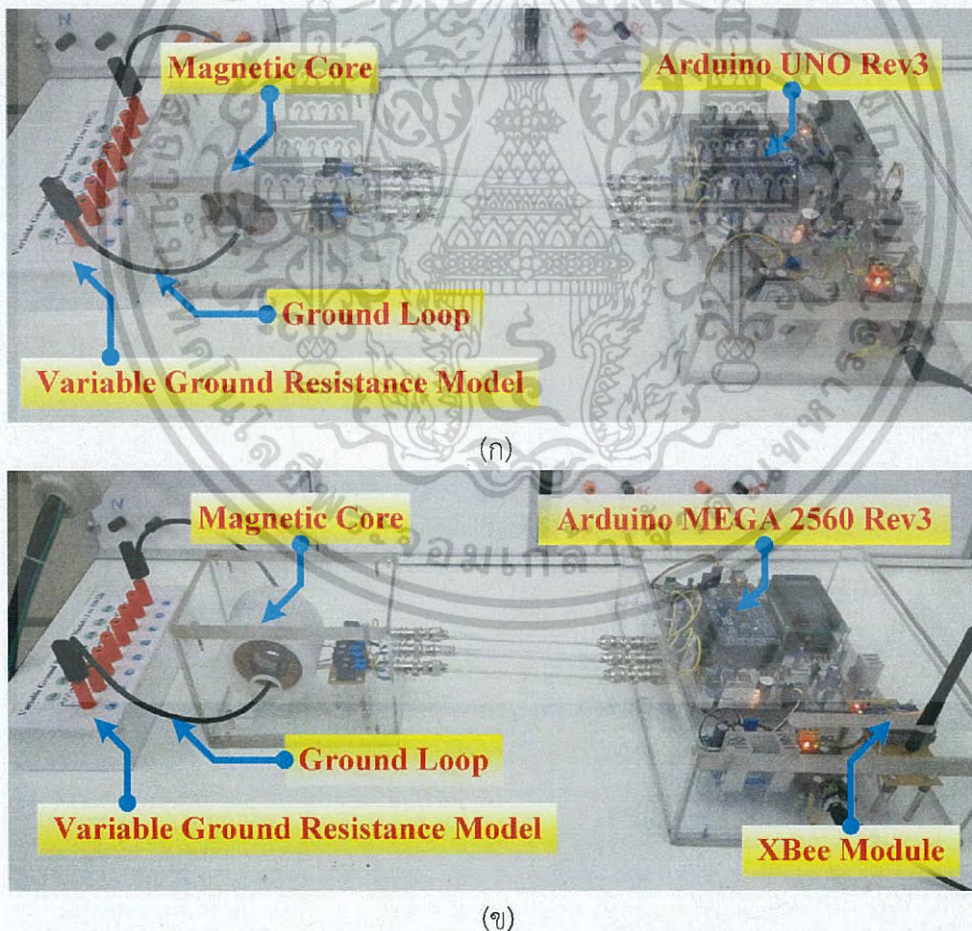


รูปที่ 4.15 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานของต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 จากลูปความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นในหัวข้อย่อยที่ 3.1.3 โดยทำการวัดในช่วงค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม จากผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 มีค่า k เฉลี่ยเท่ากับ 7.80 และ 8.40 ตามลำดับ และเมื่อนำค่า k เฉลี่ยดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานในแต่ละต้นแบบพบว่าสามารถวัดค่าความต้านทานจากลูปความต้านทานการต่อลงดินจำลองได้อย่างแม่นยำโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 2.99 และ 2.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ค่าความต้านทาน 100.2 โอห์ม รูปการทดลองในห้องปฏิบัติการและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ กราฟเปรียบเทียบและกราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 การทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 (ก) และรุ่น MEGA 2560 Rev3 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3

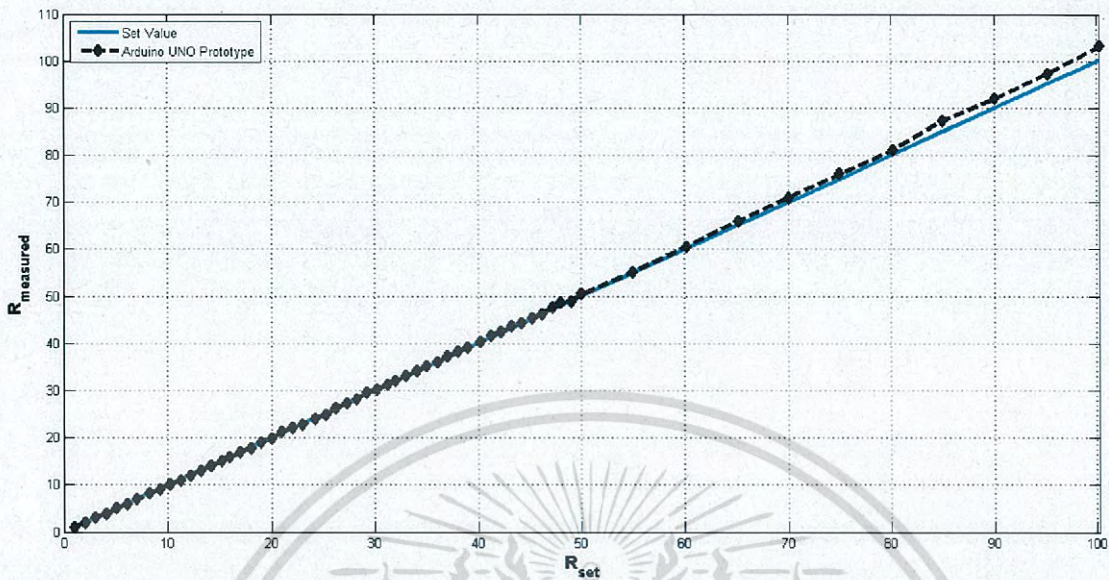
Resistance (Ω)		Arduino UNO Prototype					Arduino MEGA Prototype				
Value	Tolerance	V_{out} (mV)	$V_{R(burden)}$ (mV)	k	R (Ω)	Error (%)	V_{out} (mV)	$V_{R(burden)}$ (mV)	k	R (Ω)	Error (%)
1.00	± 0.010	19.28	149.28	7.74	1.0	0.00	18.01	146.07	8.11	1.0	0.00
2.00	± 0.020	19.65	77.16	7.85	2.0	0.00	18.40	76.92	8.36	2.0	0.00
3.00	± 0.030	19.96	52.58	7.90	3.0	0.00	18.71	51.98	8.33	3.0	0.00
4.00	± 0.040	20.19	40.11	7.95	3.9	2.50	19.10	40.39	8.46	4.0	0.00
5.00	± 0.050	20.45	31.93	7.81	5.0	0.00	19.46	32.57	8.37	5.0	0.00
6.00	± 0.060	20.69	27.28	7.91	5.9	1.67	19.98	28.14	8.45	6.0	0.00
7.00	± 0.070	20.83	23.46	7.88	6.9	1.43	20.28	24.49	8.45	7.0	0.00
8.20	± 0.082	20.91	20.26	7.95	8.1	1.22	20.37	21.22	8.54	8.1	1.22
9.20	± 0.092	21.09	18.17	7.93	9.1	1.09	21.13	19.49	8.49	9.1	1.09
10.20	± 0.102	21.22	16.46	7.91	10.1	0.98	21.37	17.68	8.44	10.2	0.00
11.20	± 0.112	21.24	15.04	7.93	11.0	1.79	22.80	17.24	8.47	11.1	0.89
12.20	± 0.122	21.35	13.91	7.95	12.0	1.64	22.39	15.62	8.51	12.1	0.82
13.20	± 0.132	21.47	12.84	7.89	13.0	1.52	22.54	14.43	8.45	13.2	0.00
14.20	± 0.142	21.52	12.02	7.93	14.0	1.41	22.57	13.55	8.53	14.0	1.41
15.20	± 0.152	21.61	11.25	7.91	15.0	1.32	22.53	12.57	8.48	15.1	0.66
16.00	± 0.160	21.74	10.76	7.92	15.8	1.25	22.64	12.05	8.52	15.8	1.25
17.00	± 0.170	21.85	10.11	7.87	16.9	0.59	22.57	11.24	8.47	16.9	0.59
18.00	± 0.180	21.86	9.57	7.88	17.8	1.11	22.78	10.77	8.51	17.8	1.11
19.00	± 0.190	21.87	9.03	7.84	18.9	0.53	22.93	10.25	8.49	18.9	0.53
20.00	± 0.200	21.92	8.63	7.87	19.8	1.00	22.94	9.71	8.47	19.9	0.50
21.00	± 0.210	22.03	8.09	7.71	21.2	0.95	22.87	9.19	8.44	21.0	0.00
22.00	± 0.220	22.05	7.79	7.77	22.1	0.45	22.87	8.83	8.49	21.8	0.91
23.00	± 0.230	22.05	7.57	7.90	22.7	1.30	22.87	8.45	8.50	22.8	0.87
24.20	± 0.242	22.14	7.21	7.88	24.0	0.83	22.90	8.00	8.45	24.1	0.41
25.20	± 0.252	22.14	6.94	7.90	24.9	1.19	23.03	7.72	8.45	25.1	0.40
26.20	± 0.262	22.14	6.59	7.80	26.2	0.00	23.07	7.50	8.52	25.9	1.15
27.20	± 0.272	22.17	6.33	7.77	27.3	0.37	23.22	7.27	8.52	26.9	1.10
28.20	± 0.282	22.22	6.16	7.82	28.1	0.35	23.24	7.04	8.54	27.8	1.42
29.20	± 0.292	22.21	5.88	7.73	29.5	1.03	23.43	6.77	8.44	29.2	0.00
30.20	± 0.302	22.17	5.70	7.76	30.3	0.33	23.45	6.56	8.45	30.1	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

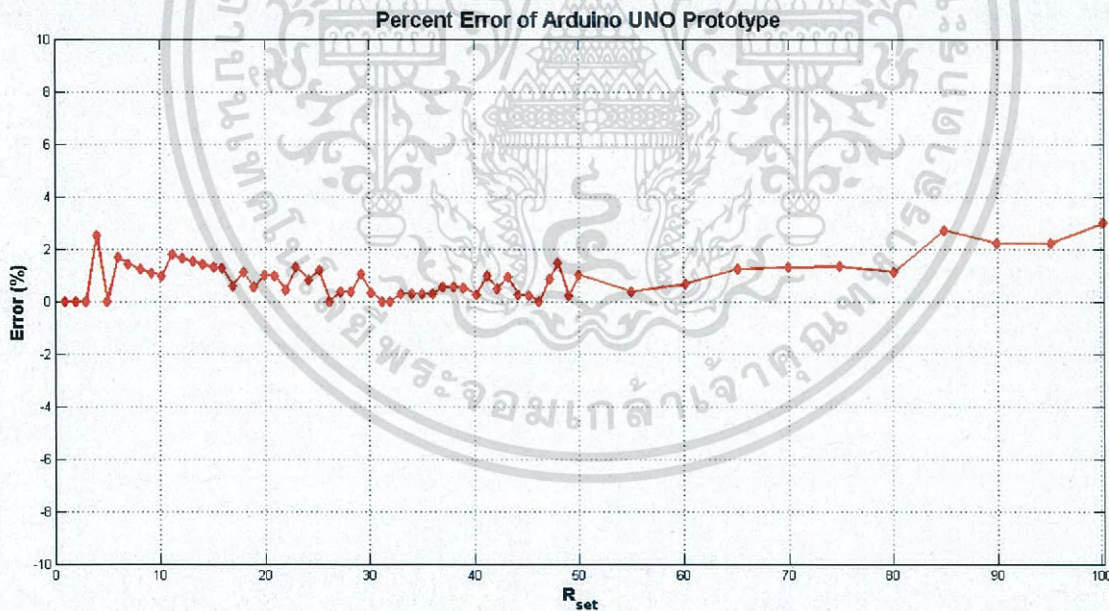
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินจำลองด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 (ต่อ)

Resistance (Ω)		Arduino UNO Prototype					Arduino MEGA Prototype				
Value	Tolerance	V_{out} (mV)	$V_{R(burden)}$ (mV)	k	R (Ω)	Error (%)	V_{out} (mV)	$V_{R(burden)}$ (mV)	k	R (Ω)	Error (%)
31.20	± 0.312	22.15	5.53	7.79	31.2	0.00	23.41	6.40	8.53	30.8	1.28
32.00	± 0.320	22.16	5.40	7.80	32.0	0.00	23.44	6.17	8.42	32.0	0.00
33.00	± 0.330	22.09	5.21	7.78	33.1	0.30	23.44	6.00	8.45	32.9	0.30
34.00	± 0.340	22.11	5.06	7.78	34.1	0.29	23.44	5.81	8.43	34.0	0.00
35.00	± 0.350	22.13	4.92	7.78	35.1	0.29	23.44	5.66	8.45	34.9	0.29
36.00	± 0.360	22.13	4.78	7.78	36.1	0.28	23.36	5.46	8.41	36.1	0.28
37.00	± 0.370	22.03	4.62	7.76	37.2	0.54	22.99	5.26	8.47	36.8	0.54
38.00	± 0.380	22.03	4.50	7.76	38.2	0.53	23.16	5.16	8.47	37.8	0.53
39.00	± 0.390	22.06	4.39	7.76	39.2	0.51	23.19	5.03	8.46	38.9	0.26
40.20	± 0.402	22.03	4.26	7.77	40.3	0.25	23.08	4.83	8.41	40.3	0.25
41.20	± 0.412	22.03	4.13	7.72	41.6	0.97	22.88	4.69	8.45	41.1	0.24
42.20	± 0.422	21.94	4.04	7.77	42.4	0.47	22.99	4.62	8.48	41.9	0.71
43.20	± 0.432	21.93	3.92	7.72	43.6	0.93	23.21	4.55	8.47	43.0	0.46
44.20	± 0.442	21.96	3.87	7.79	44.3	0.23	23.11	4.42	8.45	44.1	0.23
45.20	± 0.452	22.03	3.79	7.78	45.3	0.22	23.89	4.43	8.38	45.5	0.66
46.20	± 0.462	22.05	3.72	7.79	46.2	0.00	23.23	4.25	8.45	46.1	0.22
47.20	± 0.472	21.97	3.60	7.73	47.6	0.85	23.28	4.13	8.37	47.5	0.64
48.00	± 0.480	22.02	3.53	7.69	48.7	1.46	23.41	4.09	8.39	48.3	0.62
49.00	± 0.490	21.96	3.50	7.81	48.9	0.20	23.87	4.11	8.44	49.0	0.00
50.00	± 0.500	21.90	3.38	7.72	50.5	1.00	23.26	3.93	8.45	49.9	0.20
55.00	± 0.550	21.94	3.10	7.77	55.2	0.36	23.11	3.55	8.45	54.9	0.18
60.20	± 0.602	21.92	2.82	7.74	60.6	0.66	23.11	3.24	8.44	60.1	0.17
65.20	± 0.652	21.93	2.59	7.70	66.0	1.23	23.43	3.00	8.35	65.8	0.92
70.00	± 0.700	21.91	2.41	7.70	70.9	1.29	23.71	2.82	8.33	70.9	1.29
75.00	± 0.750	21.92	2.25	7.70	76.0	1.33	23.58	2.66	8.46	74.7	0.40
80.20	± 0.802	21.93	2.11	7.72	81.1	1.12	23.89	2.48	8.33	81.2	1.25
85.00	± 0.850	21.94	1.96	7.59	87.3	2.71	23.96	2.36	8.37	85.6	0.71
90.00	± 0.900	21.94	1.86	7.63	92.0	2.22	23.51	2.16	8.27	91.8	2.00
95.20	± 0.952	21.95	1.76	7.63	97.3	2.21	23.93	2.08	8.27	97.0	1.89
100.20	± 1.002	21.97	1.66	7.57	103.2	2.99	23.92	1.97	8.25	102.4	2.20
				7.80					8.43		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

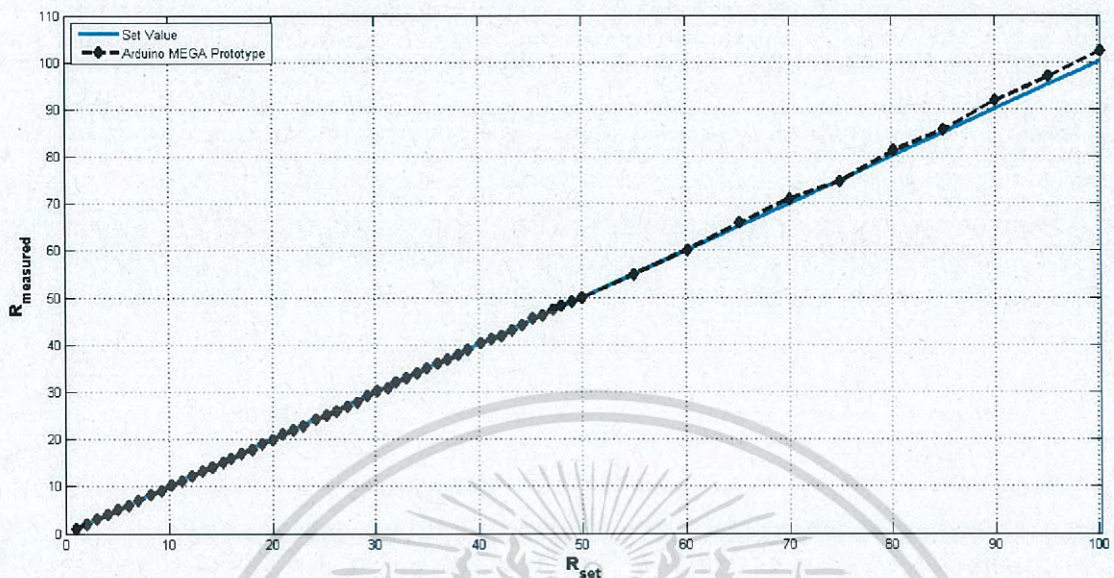


รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

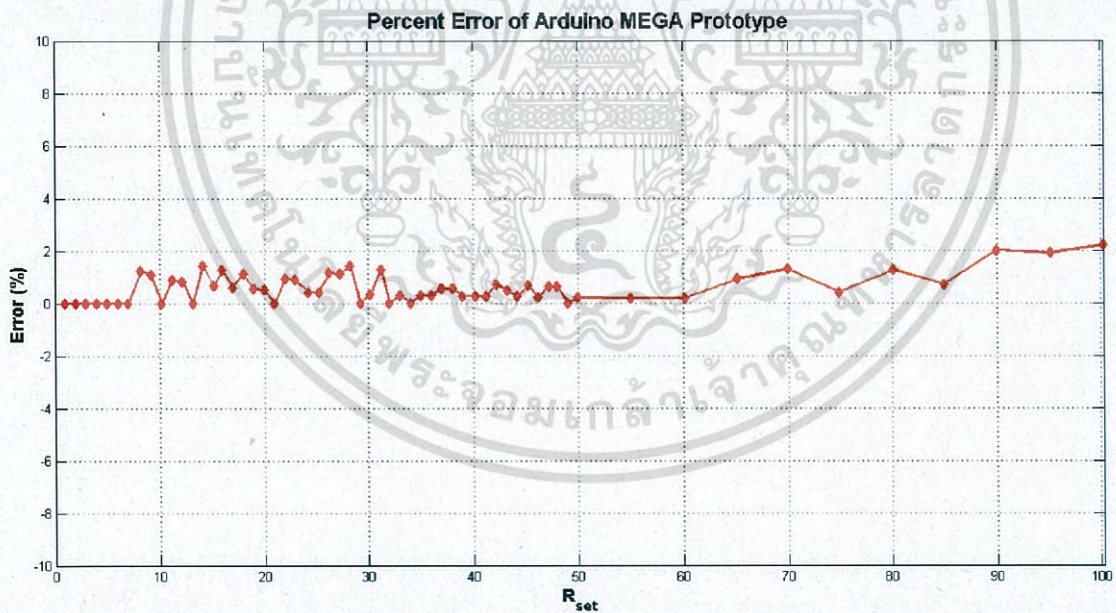


รูปที่ 4.18 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

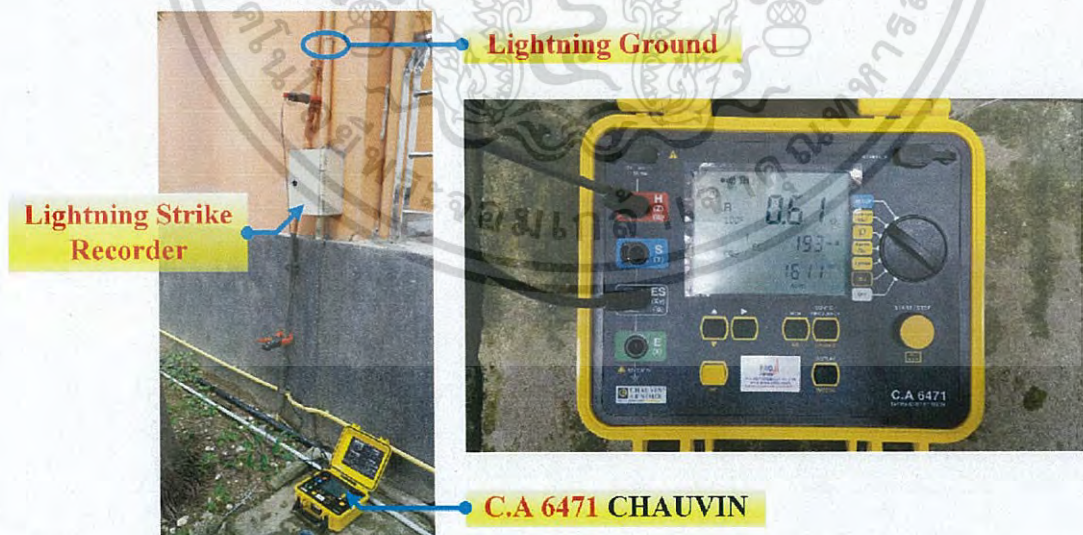


รูปที่ 4.20 กราฟร้อยละความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานที่วัดได้จากต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 กับค่าความต้านทานที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

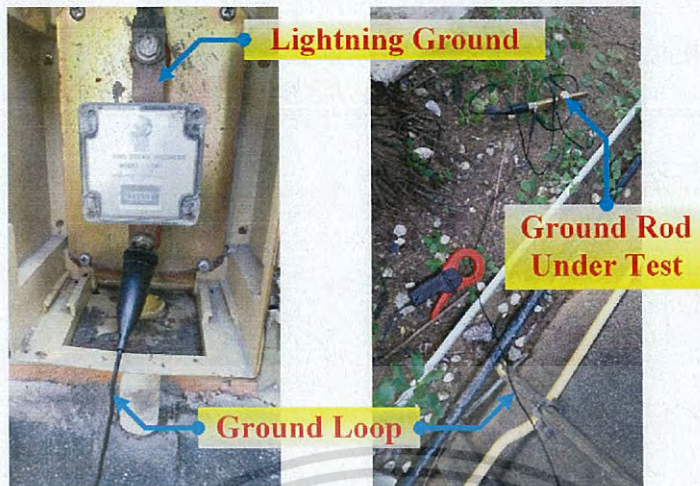
4.1.7 การทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สภาวะจริง (Real Condition) ของต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และรุ่น MEGA 2560 Rev3 เปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบการต่อลงดินที่ได้มาตรฐาน สถานที่ทำการทดลองคือ อาคารเฉลิมพระเกียรติ ๕๕ พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 โดยทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Ground) ของอาคารดังกล่าวด้วยเครื่องวัดที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นพบว่า เครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 เป็นเพียงเครื่องวัดเดียวที่สามารถวัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เนื่องจากสายต่อหลักดินอยู่ในท่อพีวีซีซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้น จึงไม่สามารถคล้องแคลมป์ของเครื่องวัดดังกล่าวที่สายต่อหลักดินเพื่อวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน จึงต้องสร้างรูปความต้านทานการต่อลงดินด้วยการเชื่อมต่อสายไฟระหว่างขั้วต่อสายต่อหลักดินภายในตู้เครื่องนับจำนวนเสิร์ชฟ้าผ่า (Lightning Strike Recorder) กับหลักดินที่ทำการทดสอบ (Ground Rod Under Test) ซึ่งทำการปักบริเวณใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เพื่อใช้เปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดทั้ง 4 เครื่อง จากผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับเครื่องทดสอบการต่อลงดินที่ได้มาตรฐาน รูปและผลการทดลองวัดค่าความต้านทานจากรูปความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 Kumwell รุ่น KIGM-01 และต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino ทั้งสองรุ่น แสดงดังรูปที่ 4.23 (ก) (ข) และ (ค) และตารางที่ 4.5 ตามลำดับ

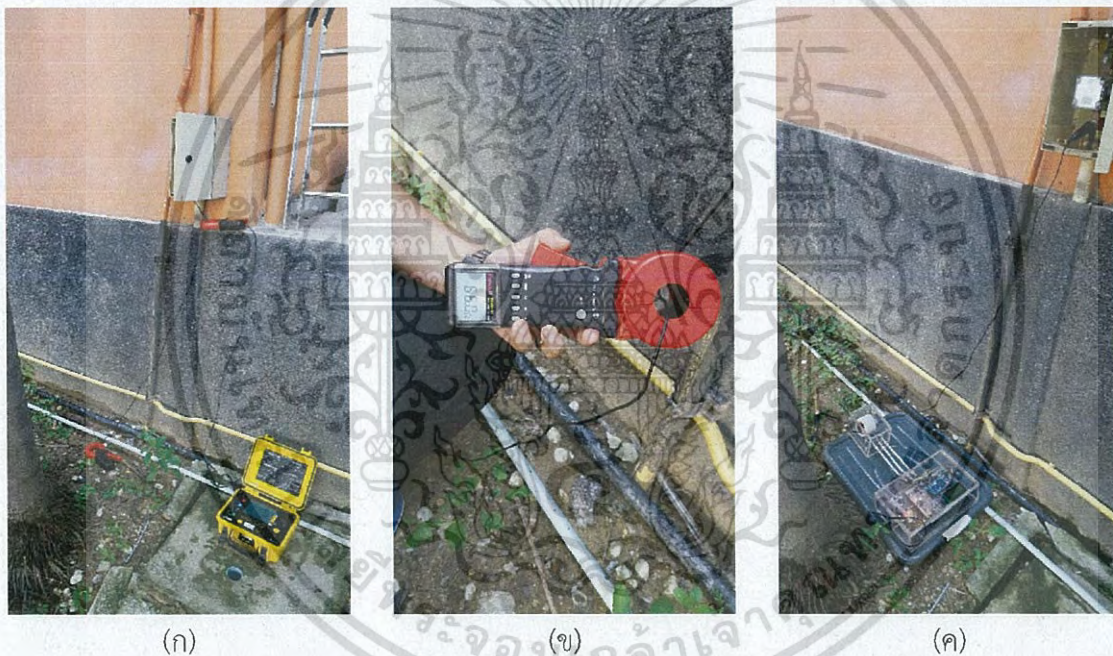


รูปที่ 4.21 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การสร้างลูปความต้านทานการต่อลงดิน



รูปที่ 4.23 การทดสอบวัดค่าความต้านทานจากลูปความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 (ก) Kumwell รุ่น KIGM-01 (ข) และต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino ทั้งสองรุ่น (ค)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานจากลูปความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 Kumwell รุ่น KIGM-01 และต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino ทั้งสองรุ่น

C.A 6471 CHAUVIN	KIGM-01 Kumwell	Arduino UNO Prototype	Arduino MEGA Prototype
65.4 Ω	66.0 Ω	67.8 Ω	65.1 Ω

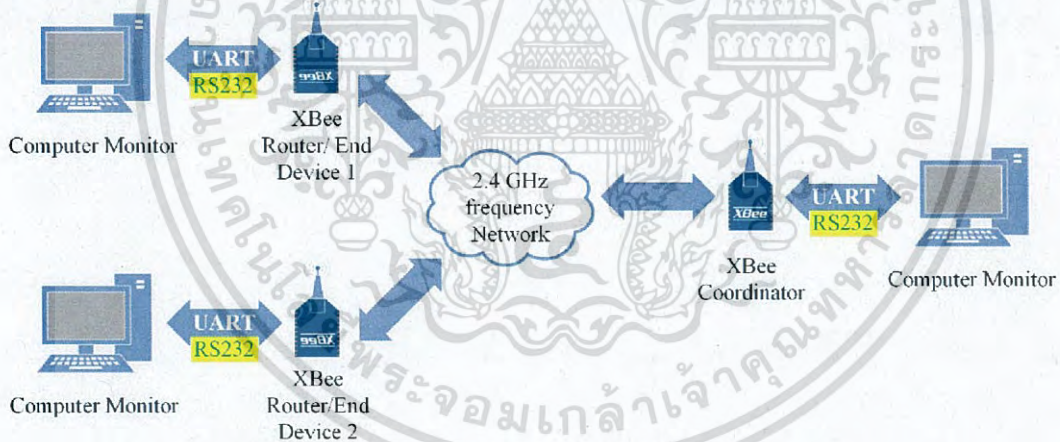
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองส่วนเครือข่ายการสื่อสาร

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองการทำงานของส่วนเครือข่ายการสื่อสารโดยใช้โมดูลเอ็กซ์บี สร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ประกอบด้วย 2 การทดลอง คือ การทดลองการติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บี และการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลของโมดูลเอ็กซ์บีรุ่น XBee-PRO Series 1 รายละเอียดการทดลองส่วนเครือข่ายการสื่อสารอธิบายดังหัวข้อย่อต่อไปนี้

4.2.1 การทดลองการติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บี

การทดลองนี้เป็นการทดลองการติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บี โดยนำเอาโปรแกรม X-CTU มาใช้ในการตั้งค่าโมดูลเอ็กซ์บี (Module Configuration) ให้เชื่อมต่อในรูปแบบดาว (Star, Broadcast) ซึ่งเป็นการตั้งค่าโมดูลเอ็กซ์บีเบื้องต้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการตั้งค่าแบบโครงข่ายที่ซับซ้อนในอนาคต ซึ่งในการทดลองนี้ได้เน้นการตั้งค่า Destination Address High (DH) และ Destination Address Low (DL) เป็นหลัก โดย DH และ DL คือรหัสชื่อของโมดูลเอ็กซ์บีตัวที่เราต้องการติดต่อสื่อสารหรือรับส่งข้อมูลด้วย และ Serial Number High (SH) และ Serial Number Low (SL) คือรหัสชื่อของโมดูลเอ็กซ์บีตัวที่ทำกรตั้งค่า ซึ่ง SH และ SL ของ Coordinator ในการทดลองนี้คือ 13A200 และ 4033F477 ตามลำดับ ดังนั้น DH และ DL ของ End Device/Router 1 และ 2 จึงต้องตั้งค่าเป็น 13A200 และ 4033F477 ตามลำดับ แผนผังการทดลองติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บีในรูปแบบดาว แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนผังการทดลองติดต่อสื่อสารระหว่างโมดูลเอ็กซ์บีในรูปแบบดาว

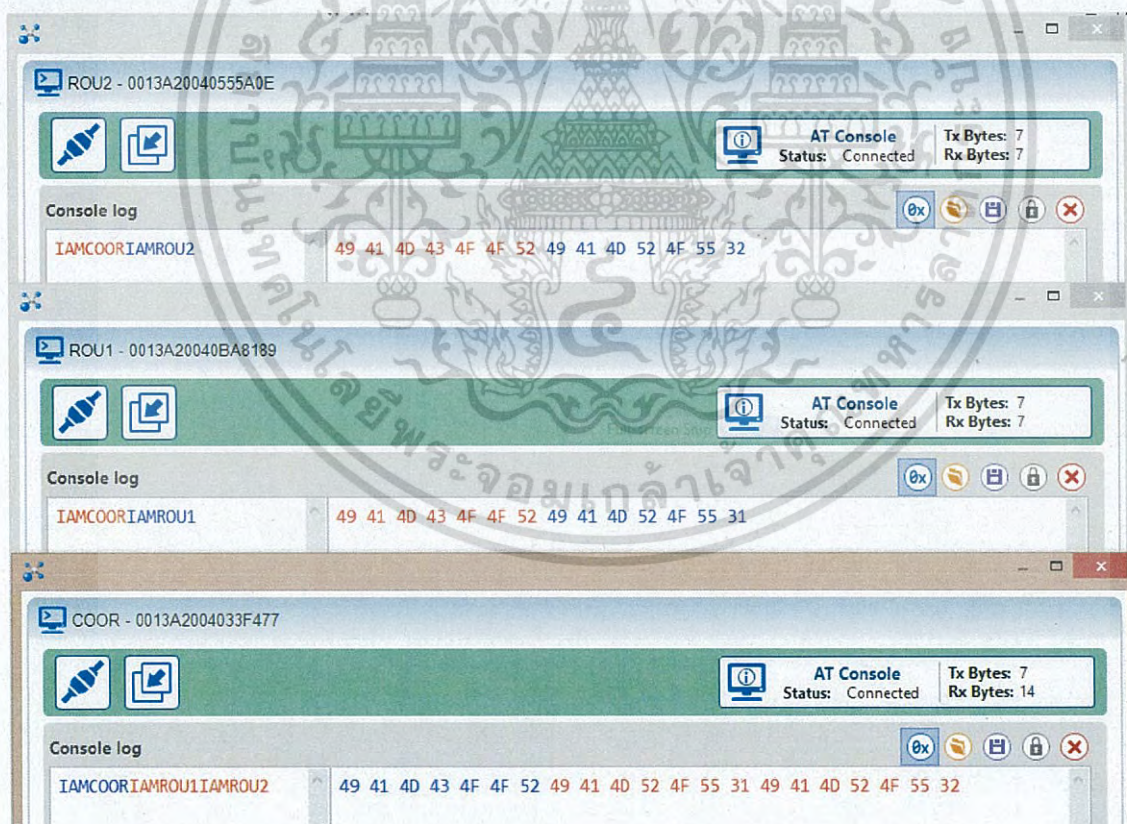
เมื่อทำการตั้งค่า DL และ DH ของ End Device/Router ดังค่าตามตารางที่ 4.6 ด้วยโปรแกรม X-CTU แล้วทำการพิมพ์ตัวอักษรใน Terminal ของโปรแกรมของโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละตัว ผลลัพธ์ของการรับส่งข้อมูลระหว่าง Router 1 Router 2 และ Coordinator แสดงดังรูปที่ 4.25 โดยหัวหน้าต่างมุมซ้ายบนของแต่ละหน้าต่างแสดงชื่อที่กำหนดขึ้น SH และ SL ของโมดูลเอ็กซ์บีแต่ละตัว ข้อความสีน้ำเงินเป็นข้อความที่พิมพ์ลงไปในหน้าต่างโปรแกรม ข้อความสีแดงเป็นข้อความที่ได้รับ และหัวหน้าต่างมุมขวาบนของแต่ละหน้าต่างแสดงถึงจำนวนไบต์ที่ส่งออกไป (Tx Bytes) และจำนวนไบต์ที่ได้รับ (Rx Bytes) จากผลการทดลองรับส่งข้อมูลระหว่าง Router 1 Router 2 และ Coordinator ดังแสดงในรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการตั้งค่า DH และ DL ของ Coordinator เป็น 0 และ FFFF ตามลำดับ ทำให้ Coordinator ทำงานในโหมดประกาศข้อมูล นั่นคือ Coordinator สามารถรับส่งข้อมูลกับ Router/End Device ทุกตัวที่อยู่ในเครือข่าย (PAN ID) เดียวกัน โดย PAN ID คือ รหัสของเครือข่ายที่สร้างขึ้น สามารถเปลี่ยนแปลงรหัสได้ตามความต้องการของผู้สร้างเครือข่าย และโมดูลเอ็กซ์บีทีใช้รหัสของเครือข่ายต่างกัน ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ และหากทำการตั้งค่า DH และ DL ของ Router เป็น SH และ SL ของ Coordinator ซึ่งในการทดลองนี้คือ 13A200 และ 4033F477 ตามลำดับ ทำให้ Router สามารถรับส่งข้อมูลกับ Coordinator ได้เพียงตัวเดียว

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ในการตั้งค่าโมดูลเอ็กซ์บีทีให้เชื่อมต่อในรูปแบบดาว

XBee	Parameter	SH	SL	DH	DL	PAN ID
Router 1 (ROU1)			40BA8189	13A200	4033F477	8144
Router 2 (ROU2)		13A200	40555A0E			
Coordinator (COOR)			4033F477	0	FFFF	
Communication		ROU1 ↔ COOR ↔ ROU2				

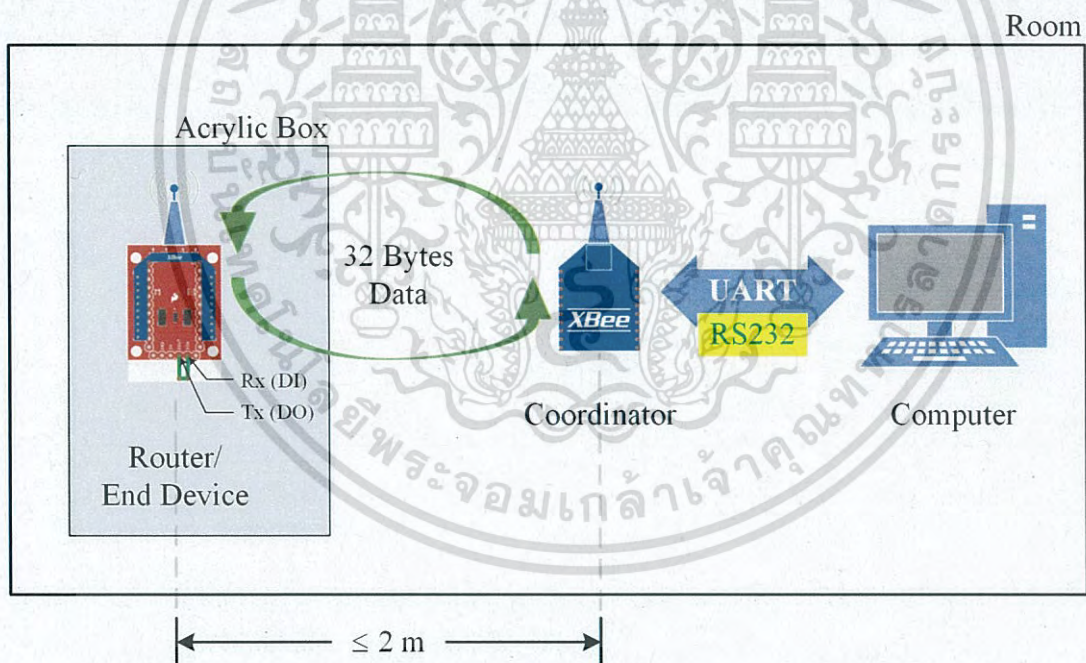


รูปที่ 4.25 ผลการทดลองรับส่งข้อมูลระหว่าง Router 1 Router 2 และ Coordinator

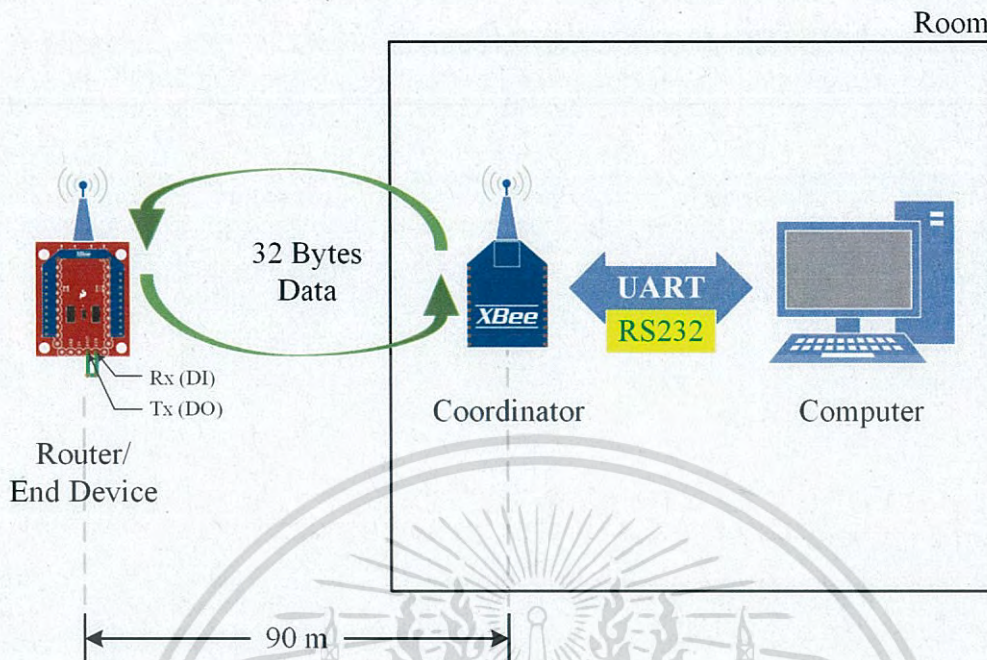
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลของโมดูลเอ็กซ์บีรูน XBee-PRO Series 1

การทดลองนี้เป็นการทดสอบเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลของโมดูลเอ็กซ์บีรูน XBee-PRO Series 1 ที่ระยะทางและเงื่อนไขต่างๆ โดยใช้หน้าต่างฟังก์ชันในโปรแกรม X-CTU ชื่อว่า XBee Range Test ซึ่งเป็นการทดลองรับส่งข้อมูลประเภทตัวอักษร (Char) ขนาด 32 ไบต์ เริ่มจาก Coordinator ทำการส่งข้อมูลดังกล่าวไปให้กับ Router/End Device ที่ติดต่อสื่อสารด้วย แล้วให้ Router/End Device ตัวดังกล่าว ทำการส่งกลับข้อมูลที่ได้รับคืนให้กับ Coordinator หากในระยะเวลา 1 วินาทีนับจากที่ Coordinator ส่งข้อมูลออกไปไม่ได้รับข้อมูลดังกล่าวกลับมาให้นับว่าเป็น ข้อมูลเสีย (Bad Data) แต่หากได้รับข้อมูลกลับมาให้นับว่าเป็น ข้อมูลดี (Good Data) โดยในการทดลองนี้ได้ทำการทดลอง 2 กรณีดังนี้ กรณีที่ 1 คือ Coordinator เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์อยู่ในห้องปฏิบัติการ แล้วให้ติดต่อสื่อสารกับ Router/End Device ซึ่งถูกรอบด้วยกล่องอะคริลิกทรงลูกบาศก์ที่อยู่ใกล้กับ Coordinator โดยมีระยะห่างกันไม่เกิน 2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และกรณีที่ 2 คือ Coordinator เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์อยู่ในห้องปฏิบัติการเช่นเดิม แต่ให้ติดต่อสื่อสารกับ Router/End Device ที่อยู่นอกห้องปฏิบัติการดังกล่าวออกไปเป็นระยะ 90 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.27

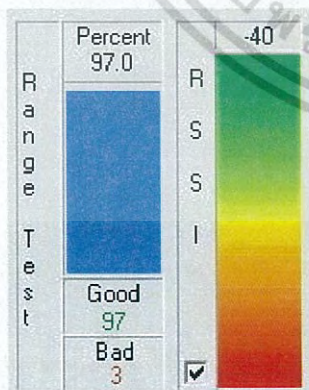


รูปที่ 4.26 แผนผังการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายกรณีที่ 1

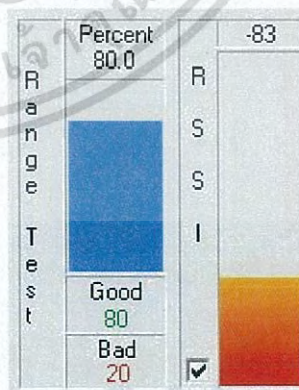


รูปที่ 4.27 แผนผังการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายกรณีที่ 2

ผลการทดลองของกรณีที่ 1 และ 2 แสดงบนหน้าต่างโปรแกรม X-CTU ดังรูปที่ 4.28 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าข้อมูลดี (Good Data) และข้อมูลเสีย (Bad Data) ของการทดลอง ในกรณีที่ 1 มีข้อมูลดี 97 เปอร์เซ็นต์ และข้อมูลเสีย 3 เปอร์เซ็นต์ และสำหรับกรณีที่ 2 มีข้อมูลดี 80 เปอร์เซ็นต์ และข้อมูลเสีย 20 เปอร์เซ็นต์ โดยทั้ง 2 กรณี ใช้การส่งข้อมูลออกจาก Coordinator ทั้งสิ้น 100 ครั้ง ส่วนแถบสี (RSSI) ที่อยู่ด้านขวาของแต่ละรูปแสดงถึงความแรงของสัญญาณที่สื่อสารกันระหว่าง Coordinator และ Router/End Device หากแถบสีแสดงสีเขียวหมายถึงสัญญาณมีความแรงสูง หากแถบสีแสดงเพียงสีแดงหมายถึงสัญญาณมีความแรงต่ำ



(ก)



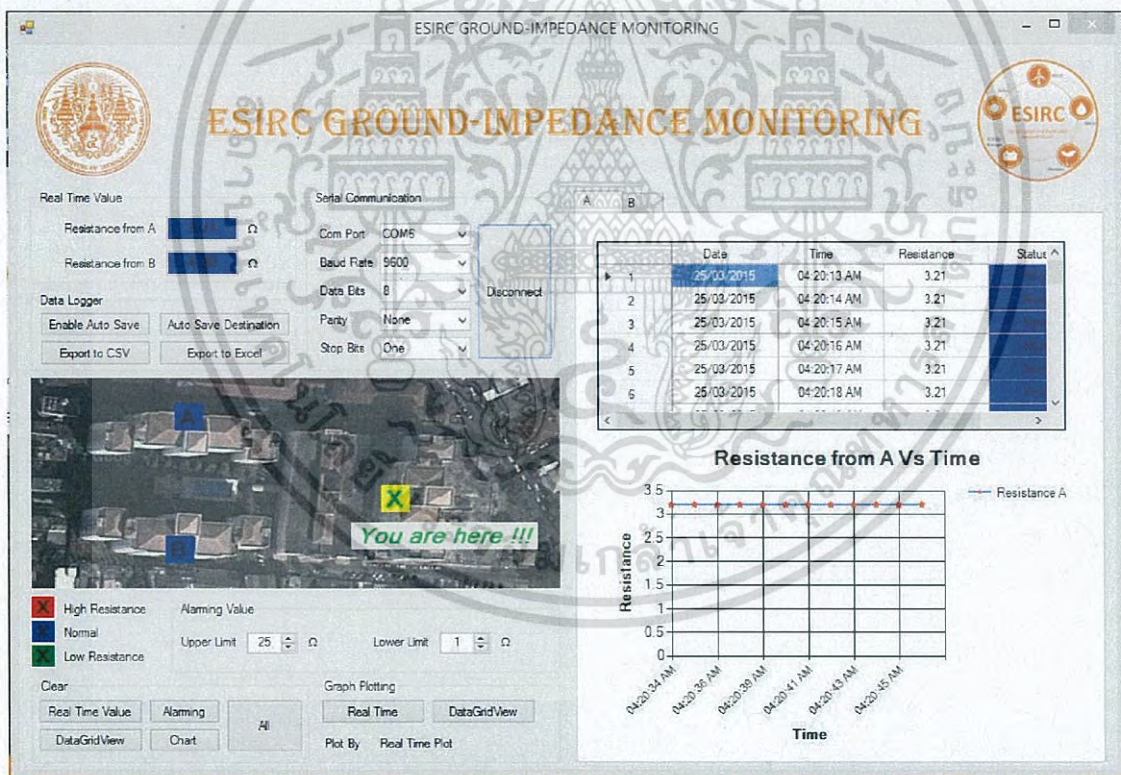
(ข)

รูปที่ 4.28 ผลการทดลองเสถียรภาพการรับส่งข้อมูลแบบไร้สายกรณีที่ 1 (ก) และกรณีที่ 2 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

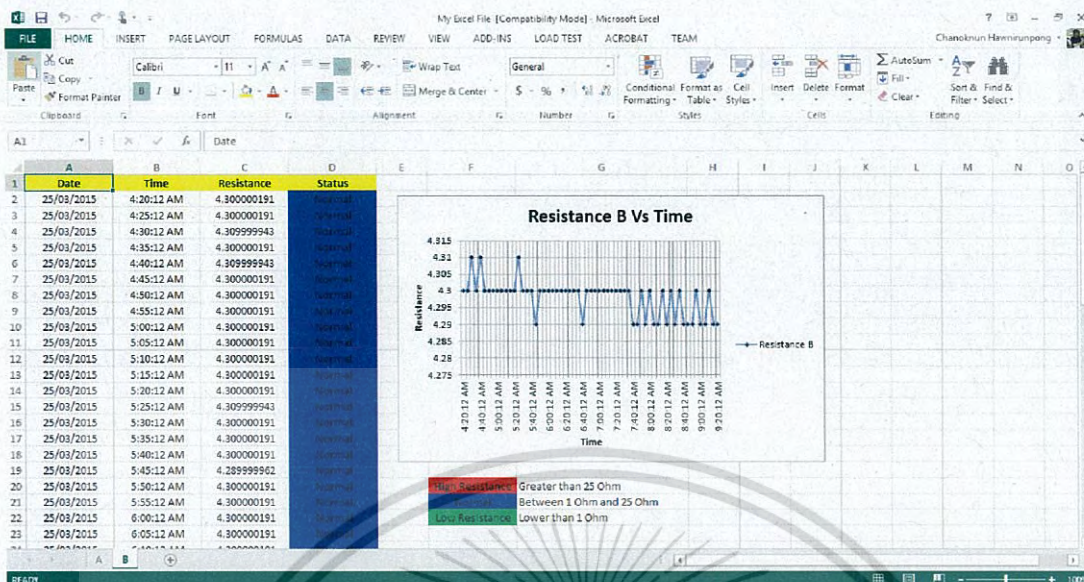
4.3 การทดลองส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

การทดลองนี้เป็นการทดลองการแสดงผลข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ได้รับจากต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นผ่านการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้โมดูลเอ็กซ์บีมาแสดงผลบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ด้วยหน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อย่อยที่ 3.3 การแสดงผลของหน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4.29 จากผลการทดลองพบว่าหน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานสามารถแสดงผลข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ได้รับแบบเวลาจริง แบบตาราง และแบบกราฟ พร้อมทั้งแจ้งเตือนด้วยสีถึงช่วงหรือขอบเขตบน-ล่าง (Upper and Lower Limit) ของค่าความต้านทานที่กำหนดโดยผู้ใช้งาน ในการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความต้านทานที่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 ถึง 25 โอห์ม เป็นค่าความต้านทานปกติ (Normal Resistance) และแจ้งเตือนด้วยสีน้ำเงิน นอกจากนี้หน้าต่างโปรแกรมหายังสามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์แบบ Microsoft Excel 97-2003 Worksheet (.xls) เมื่อกดปุ่ม Export to Excel และแบบ Microsoft Excel Comma Separated Values File (.csv) เมื่อกดปุ่ม Export to CSV บันทึกไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 การแสดงผลของหน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

Date	Time	Resistance	Status
25/03/201	4:20:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	4:25:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	4:30:12 AM	3.21 Normal	4.31 Normal
25/03/201	4:35:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	4:40:12 AM	3.21 Normal	4.31 Normal
25/03/201	4:45:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	4:50:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	4:55:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:00:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:05:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:10:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:15:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:20:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:25:12 AM	3.21 Normal	4.31 Normal
25/03/201	5:30:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:35:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:40:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:45:12 AM	3.21 Normal	4.29 Normal
25/03/201	5:50:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	5:55:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal
25/03/201	6:00:12 AM	3.21 Normal	4.3 Normal

(ข)

รูปที่ 4.30 ไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ .xls (ก) และ .csv (ข) ที่บันทึกจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอหลักการและวิธีการในการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คูโดยใช้เทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บีซีสร้างเป็นระบบโครงข่ายการวัด ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measuring Part) ส่วนเครือข่ายการสื่อสาร (Communication Network) และส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Friendly Interface) ในส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) โดยออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน 2 แบบ ได้แก่ แบบพกพาที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 และแบบระบบโครงข่ายการวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 จากผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องวัดทั้ง 2 แบบ สามารถวัดค่าความต้านทานจากอุปกรณ์ความต้านทานการต่อลงดินจำลองในช่วงค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 2.99 และ 2.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลการทดลองวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สภาวะจริงเปรียบเทียบกับเครื่องทดสอบการต่อลงดินของ Kumwell รุ่น KIGM-01 และ CHAUVIN รุ่น C.A 6471 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบการต่อลงดินที่ได้มาตรฐาน พบว่าต้นแบบเครื่องวัดทั้ง 2 แบบ สามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับเครื่องทดสอบการต่อลงดินที่ได้มาตรฐานดังกล่าว ข้อดีของต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ที่เหนือกว่ารุ่น UNO Rev3 คือ มีขาใช้งานที่เพียงพอสำหรับ สร้างสวิตช์ปุ่มกดเพื่อคงค่าที่อ่าน (Hold Button) สร้างสวิตช์ปุ่มกดเพื่อเปลี่ยนหน้าจอแสดงผล (Next Button) และเชื่อมต่อกับเอ็กซ์บีซีเพื่อส่งข้อมูลแบบไร้สาย ซึ่งต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น UNO Rev3 ไม่มีฟังก์ชันการทำงานเสริมดังกล่าว ในส่วนเครือข่ายการสื่อสารนำเอาโมดูลเอ็กซ์บีซีรุ่น XBee-PRO Series 1 จำนวน 3 ตัว มาใช้สร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ด้วยเครือข่ายการสื่อสารรูปแบบดาว (Star, Broadcast) โดยโมดูลเอ็กซ์บีซี 2 ตัวแรกทำหน้าที่เป็น End Device รับค่าความต้านทานการต่อลงดินที่คำนวณได้จากต้นแบบเครื่องวัดแต่ละเครื่องและส่งข้อมูลของค่าดังกล่าวแบบไร้สายผ่านย่านความถี่ 2.4 GHz อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011) ไปยังเอ็กซ์บีซีตัวรับอีกตัวซึ่งทำหน้าที่เป็น Coordinator ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ จากผลการทดลองพบว่าโมดูลเอ็กซ์บีซีสามารถรับส่งข้อมูลแบบไร้สายภายในอาคาร (Indoor) ที่ระยะ 90 เมตร โดยมีเสถียรภาพในการรับส่งข้อมูลอยู่ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานนำเอาโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 มาใช้เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C# ในโหมดการทำงานแบบหน้าต่างโปรแกรม (Window Application) จากผลการทดลองพบว่าหน้าต่างโปรแกรมสามารถแสดงผลและแจ้งเตือนค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ได้รับแบบเวลาจริง (Real Time) รวมถึงสามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์แบบ Microsoft Excel 97-2003 Worksheet (.xls) และแบบ Microsoft Excel Comma Separated Values File (.csv)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาต่อยอดงานวิจัยในอนาคต ในส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินทำได้โดยการ ออกแบบแกนแม่เหล็กให้สามารถแบ่งครึ่งแกนทำเป็นปากอ้าเปิด-ปิดเพื่อความสะดวกในการคล้องหลักดิน ออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัลให้สามารถปรับกำลังขยายให้ได้ช่วงที่ กว้างและละเอียดขึ้นหรือหาแนวทางใหม่ในการขยายสัญญาณ และออกแบบบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ให้ เหมาะสมและกระชับรัดสำหรับการนำไปใช้งานจริง ในส่วนเครือข่ายการสื่อสารอาจเปลี่ยนมาใช้โมดูล เอ็กซ์ปรีรุ่น XBee-PRO Series 2 มาสร้างเป็นรูปแบบของเครือข่ายการสื่อสารรูปแบบเมช (Mesh) เนื่องจากโมดูลเอ็กซ์ปรีรุ่น XBee-PRO Series 1 ไม่สามารถตั้งค่าให้ทำงานในรูปแบบดังกล่าวได้ เพื่อเพิ่ม เสถียรภาพให้กับระบบโครงข่ายการสื่อสารแบบไร้สาย และในส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานต้องปรับปรุงให้ โปรแกรมสามารถบันทึกไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างอัตโนมัติ โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดเงื่อนไขการ บันทึกไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ได้ และพัฒนาเป็นแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจดูค่า ความต้านทานการต่อลงดินและรับการแจ้งเตือนได้ตลอดเวลาเมื่อค่าดังกล่าวสูงกว่าขอบเขตของค่าที่ กำหนด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Guide to Clamp-on Ground Testing, Megger Group Limited, 2013.
- [2] Earth Ground Resistance Principles, testing methods and applications, Fluke Corporation, 2010.
- [3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, “มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556”, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) 2556.
- [4] สภาวิศวกร, “ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพ ด้าน การออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบการต่อลงดิน”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สภาวิศวกร 2554.
- [5] IEEE-81 Standard, 2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, in Ground impedance, ed. United States of America, 2012, pp. 19 – 30.
- [6] IEEE-142 Standard, 2007: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, in Connection to earth, ed. United States of America, 2007, pp. 161 – 185.
- [7] ชนกนันท์ หอนรินทร์พงศ์, ฉัตรชัย จิรพัชรศิริเลิศ, ชลวีร์ วัฒนกิจเจริญ และชัยพงษ์ ลากอภารัตน์, “ต้นแบบเครื่องมือวัดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์”, ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556.
- [8] Arjunsingh A. Mehta, S. N. Singh and M. K. Singhal, “Earthing System Design for Small Hydropower (SHP) Station – A Review”, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 3, June 2012, pp. 275 – 278.
- [9] J. He, R. Zeng, *et al.*, “Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, July 2003, pp. 788 – 795.
- [10] R. Zeng, *et al.*, “Analysis on Influence of Long Vertical Grounding Electrodes on Grounding System for Substation”, *2000 International Conference on Power System Technology (PowerCon 2000)*, Vol. 3, 2000, pp. 1475 – 1480.
- [11] L. Li, J. Zou, and H. Sun, “Research on the New Clamp-on Ground Resistance On-line Tester Based on AC Variable Frequency”, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, June 2006, pp. 5286 – 5289.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] C. Hawnurunpong, S. Potivejjakul and C. Chompoo-inwai, "Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology", *The International Conference on Electrical Engineering 2015 (ICEE 2015)*, The University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong, July 2015.
- [13] C. Hawnurunpong, M. Leelajindakraierk, S. Potivejjakul and C. Chompoo-inwai, "The Accuracy and Measuring Range Improvements on Measuring Part of a Ground-Impedance Monitoring Network Prototype", *The International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE 2016)*, Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan, July 2016.
- [14] M. Matsumoto, T. Haeiwa, H. Inoue, and S. Tanaka, "Application of MR Element to Clamp-on Type Current Meter", *IEEE Translation Journal on Magnetics In Japan*, Vol 7, No.5, May 1992, pp. 413 – 417.
- [15] J. Song, P. G. McLaren, D. J. Thomson and R. L. Middleton, "A Prototype Clamp-on Magneto-optical Current Transducer for Power System Metering and Relaying", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 4, October 1995, pp. 1764 – 1770.
- [16] F. Galliana and P. P. Capra, "Traceable Technique to Calibrate Clamp Meters in AC Current from 100 to 1500 A", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 9, September 2012, pp. 2512 – 2518.
- [17] K. Draxler and R. Styblíková, "Calibration of AC Clamp Meters", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 65, No. 5, May 2016, pp. 1156 – 1162.
- [18] J. M. R. Ascariz and L. Boquete, "System for Measuring Power Supply Parameters with ZigBee Connectivity", *Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2007)*, Warsaw, Poland, May 2007, pp. 1 – 5.
- [19] R. Vishnubhotla, P. S. Rao, *et al.*, "ZigBee Based Multi-Level Parking Vacancy Monitoring System", *2010 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT 2010)*, United States, May 2010, pp. 1 – 4.
- [20] Y. Yussoff, H. Z. Abidin, *et al.*, "Development of a PIC- Based Wireless Sensor Node Utilizing XBee Technology", *2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, Chengdu, Sichuan, China, April 2010, pp. 116 – 120.
- [21] J. Han, C. Choi, *et al.*, "Smart Home Energy Management System Including Renewable Energy Based on ZigBee and PLC", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 60, No. 2, May 2014, pp. 198 – 202.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

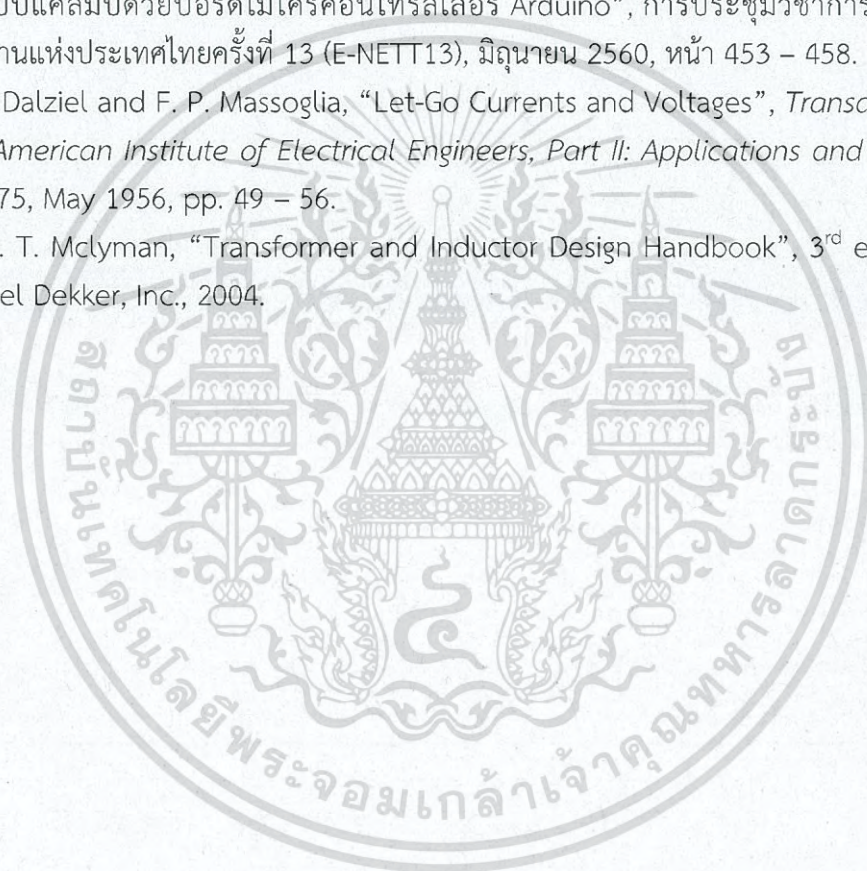
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] N. Agrawal and S. Singhal, "Smart Drip Irrigation System using Raspberry pi and Arduino", *International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2015)*, Greater Noida, Uttar Pradesh, India, May 2015, pp. 928 – 932.
- [23] J. Y. Tan, P. J. Ker and A. Abdullah, "Smart Home Design with XBee Wi-Fi and Android– based Graphical User Interface", *2016 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, Sepang Utara, Putrajaya, Malaysia, Dec 2016, pp. 1 – 5.
- [24] Wikipedia, "Ohm's law", Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Ohm%27s_law
- [25] รศ. พิชิต ล้ายอง, "เครื่องจักรกลไฟฟ้า Electrical Machines", พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: มีนเซอร์วิส ซัพพลาย, 2554.
- [26] C. P. Steinmetz, "Theory and Calculation of Electrical Circuits", New York, McGraw-Hill, 1917.
- [27] นุชทิศา สุทธิสินทอง และมณฑล สีสลาจินดาไกรฤกษ์, "การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ", *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, กันยายน 2549, หน้า 36 – 42.
- [28] B. Carter and R. Mancini, "Op Amps for Everyone", 3rd ed. UK: Elsevier Inc., 2009
- [29] เอกชัย จันทร์พุด, "ต้นแบบมิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะ 3 เฟส สำหรับระบบโครงข่ายไฟฟ้าสมัยใหม่" *วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง* 2556.
- [30] สุธรรม ศรีเกษม, เมรินทร์ ทรงชัยกุล และสง่า ศรีศุภปริดา, "MATLAB เพื่อการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม", กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต, 2521, หน้า 254 – 278.
- [31] F. Wenner, "A Method of Measuring Earth Resistivity", *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 12, July 1915, pp. 469 – 478.
- [32] A practical guide to earth resistance testing, Megger Group Limited, 2010.
- [33] P. Gill, "Electrical Power Equipment Maintenance and Testing", 2nd ed. U.S.A.: Taylor & Francis Group, 2009.
- [34] M. Banzi, "Getting Started with Arduino", 2nd ed. U.S.A.: O'Reilly Media, Inc., 2011.
- [35] IEEE-802.15.4 Standard, 2011: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), ed. United States of America, 2011.
- [36] Digi International. "XBee® /XBee-PRO® OEM RF Modules" Product Manual v1.xCx - 802.15.4 Protocol. Available: <http://www.digi.com>, Digi International, Inc., 2008.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [37] Thaeasyelec, “XBee Learning Practice with XBee Series 2 Starter Kit” Available: <http://thaeasyelec.com/article-wiki/embedded-electronics-application/learning-xbee-with-xbee-series-2-starter-kit.html>
- [38] สัจจะ จรัสรุ่งรวีวร, “เริ่มต้น Visual C# 2008 ฉบับสมบูรณ์”, พิมพ์ครั้งที่ 1, นนทบุรี: ไอทีซี อินโฟ ดิสทริบิวเตอร์ เซ็นเตอร์, 2552.
- [39] ชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์ และเชาว์ ชมภูอินทไหว, “ต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการตอลงดินแบบแคลมป์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 (E-NETT13), มิถุนายน 2560, หน้า 453 – 458.
- [40] C. F. Dalziel and F. P. Massoglia, “Let-Go Currents and Voltages”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, Vol. 75, May 1956, pp. 49 – 56.
- [41] C. W. T. Mclyman, “Transformer and Inductor Design Handbook”, 3rd ed. U.S.A.: Marcel Dekker, Inc., 2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

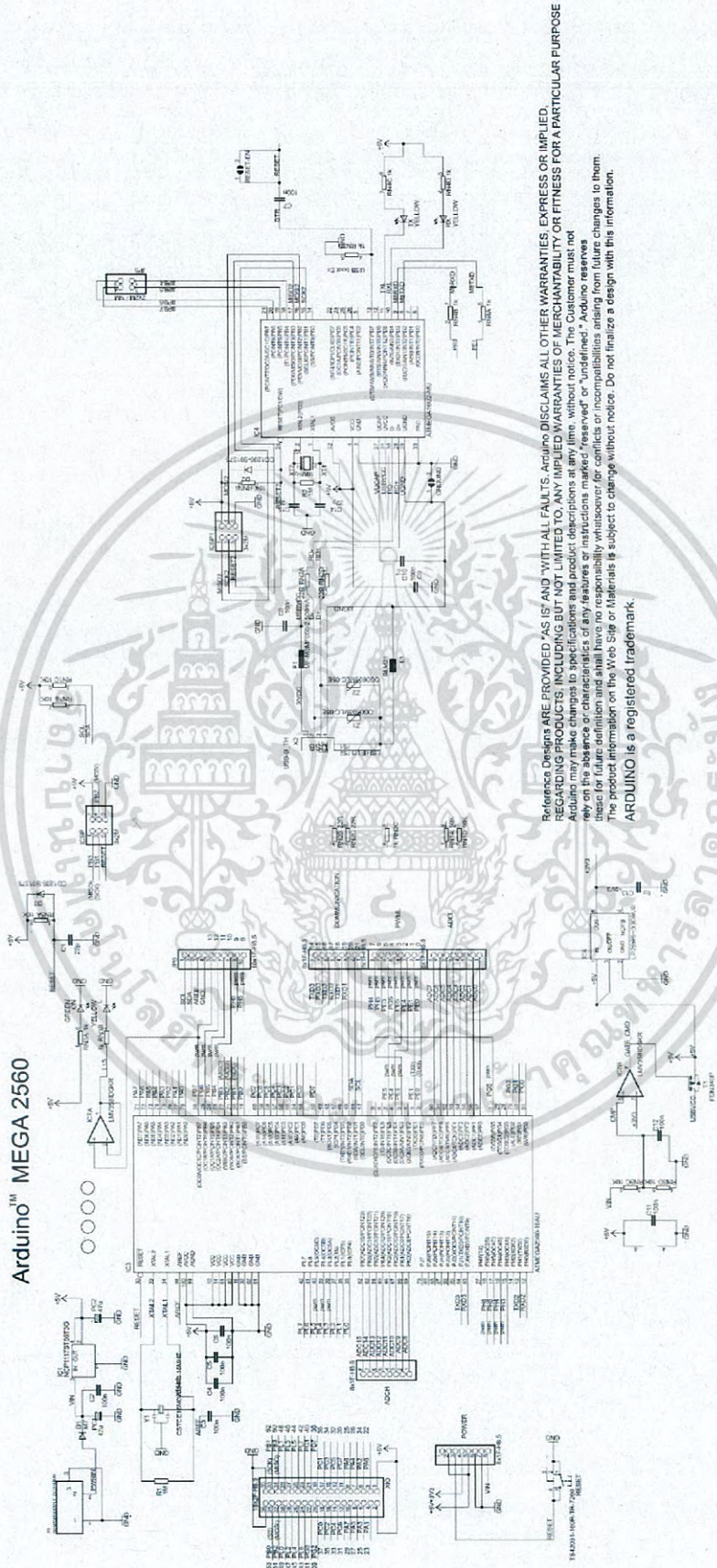
The seal of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a Thai character '๒'. The entire emblem is surrounded by a circular border containing the university's name in Thai script: 'มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์'.

ภาคผนวก ก

แผนผังวงจรบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ที่ใช้ในงานวิจัย

- ก.1 แผนผังวงจรบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3
- ก.2 แผนผังวงจรบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO Rev3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Arduino[™] MEGA 2560

Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Any use of the reference designs is subject to the applicable terms and conditions of the license. The Customer must not rely on the balance or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves the right to change the product definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



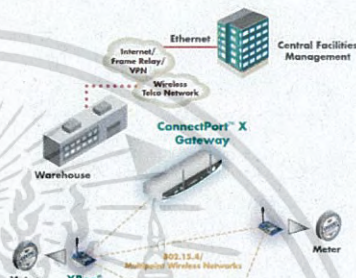
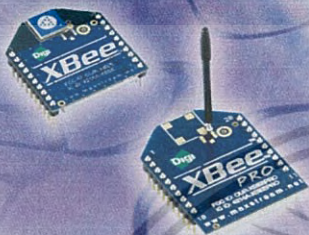
ภาคผนวก ข
Datasheet ของโมดูลเอ็กซ์บี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XBee® Multipoint RF Modules

Embedded RF Modules for OEMs

Providing critical end-point connectivity to Digi's Drop-in Networking product family, XBee multipoint RF modules are low-cost and easy to deploy.



Features/Benefits

- 802.15.4/Multipoint network topologies
- 2.4 GHz for worldwide deployment
- 900 MHz for long-range deployment
- Fully interoperable with other Digi Drop-in Networking products, including gateways, device adapters and extenders
- Common XBee footprint for a variety of RF modules
- Low-power sleep modes
- Multiple antenna options
- Industrial temperature rating (-40° C to 85° C)
- Low power and long range variants available

Overview

XBee Product Family

The XBee family of embedded RF modules provides OEMs with a common footprint shared by multiple platforms, including multipoint and ZigBee/Mesh topologies, and both 2.4 GHz and 900 MHz solutions, OEMs deploying the XBee can substitute one XBee for another, depending upon dynamic application needs, with minimal development, reduced risk and shorter time-to-market.

Why XBee Multipoint RF Modules?

XBee multipoint RF modules are ideal for applications requiring low latency and predictable communication timing. Providing quick, robust communication in point-to-point, peer-to-peer, and multipoint/star configurations, XBee multipoint products enable robust end-point connectivity with ease. Whether deployed as a pure cable replacement for simple serial communication, or as part of a more complex hub-and-spoke network of sensors, XBee multipoint RF modules maximize wireless performance and ease of development.

Drop-in Networking End-Point Connectivity

XBee OEM RF modules are part of Digi's Drop-in Networking family of end-to-end connectivity solutions. By seamlessly interfacing with compatible gateways, device adapters and extenders, XBee embedded RF modules provide developers with true beyond-the-horizon connectivity.

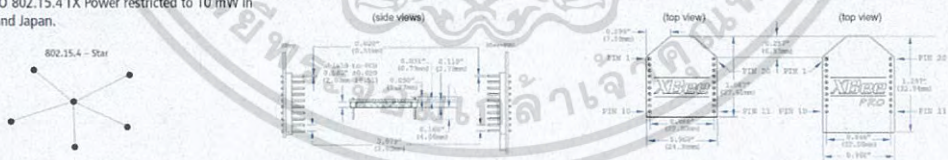
www.digi.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Platform	XBee® 802.15.4 (Series 1)	XBee-PRO® 802.15.4 (Series 1)	XBee-PRO® XSC
Performance			
RF Data Rate	250 kbps	250 kbps	10 kbps / 9.6 kbps
Indoor/Urban Range	100 ft (30 m)	300 ft (100 m)	Up to 1200 ft (370 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	300 ft (100 m)	1 mi (1.6 km)	Up to 6 mi (9.6 km)
Transmit Power	1 mW (+0 dBm)	60 mW (+18 dBm)*	100 mW (+20 dBm)
Receiver Sensitivity (1% PER)	-92 dBm	-100 dBm	-106 dBm
Features			
Serial Data Interface	3.3V CMOS UART	3.3V CMOS UART	3.3V CMOS UART (5V Tolerant)
Configuration Method	API or AT Commands, local or over-the-air	API or AT Commands, local or over-the-air	AT Commands
Frequency Band	2.4 GHz	2.4 GHz	902 MHz to 928 MHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 250 kbps	1200 bps - 250 kbps	1200 bps - 57.6 kbps
ADC Inputs	(6) 10-bit ADC inputs	(6) 10-bit ADC inputs	None
Digital I/O	8	8	None
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.F.L. & RPSMA	Chip, Wire Whip, U.F.L. & RPSMA	Wire Whip, U.F.L. RPSMA
Networking & Security			
Encryption	128-bit AES	128-bit AES	No
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgements
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 12 Channels	PAN ID, 32-bit Address, 7 Channels
Power Requirements			
Supply Voltage	2.8 - 3.4VDC	2.8 - 3.4VDC	3.0 - 3.6VDC
Transmit Current	45 mA @ 3.3VDC	215 mA @ 3.3VDC	265 mA typical
Receive Current	50 mA @ 3.3VDC	55 mA @ 3.3VDC	65 mA typical
Power-Down Current	<10 uA @ 25° C	<10 uA @ 25° C	45 uA pin Sleep
Regulatory Approvals			
FCC (USA)	OJR-XBEE	OJR-XBEEPRO	MCO-XBEE XSC
IC (Canada)	4214A-XBEE	4214A-XBEEPRO	1646A-XBEE XSC
ETSI (Europe)	Yes	Yes* Max TX 10 mW	No
C-TICK Australia	Yes	Yes	No
Telec (Japan)	Yes	Yes*	No

* XBee-PRO 802.15.4 TX Power restricted to 10 mW in Europe and Japan.



Please visit www.digi.com for part numbers.

DIGI SERVICE AND SUPPORT - You can purchase with confidence knowing that Digi is here to support you with expert technical support and a one-year warranty. www.digi.com/support

WHEN RELIABILITY MATTERS™

Digi International
11001 Bren Road E
Minnetonka, MN 55343
U.S.A.
PH: 877-912-3444
952-912-3444
FX: 952-912-4952
email: info@digi.com

Digi International France
31 rue des Poissonniers
92700 Neuilly sur Seine
PH: +33-1-55-61-98-98
FX: +33-1-55-61-98-99
www.digi.fr

Digi International KK
NES Building South 8F
22-14 Sakuragaoka-cho,
Shibuya-ku
Tokyo 150-0031, Japan
PH: +81-3-5428-0261
FX: +81-3-5428-0262
www.digi-intl.co.jp

Digi International (HK) Limited
Suite 1703-05, 17/F,
K Wah Centre
191 Java Road
North Point, Hong Kong
PH: +852-2833-1008
FX: +852-2572-9989
www.digi.cn

Digi International, the leader in device networking for business, develops reliable products and technologies to connect and securely manage local or remote electronic devices over the network or via the web. With over 20 million ports shipped worldwide since 1985, Digi offers the highest levels of performance, flexibility and quality.

www.digi.com

© 2006-2008 Digi International Inc. All rights reserved. Digi, Digi International, the Digi logo, the When Reliability Matters logo, XBee and XBee-PRO are trademarks or registered trademarks of Digi International Inc. in the United States and other countries worldwide. All other trademarks are the property of their respective owners.

91001412
81/308



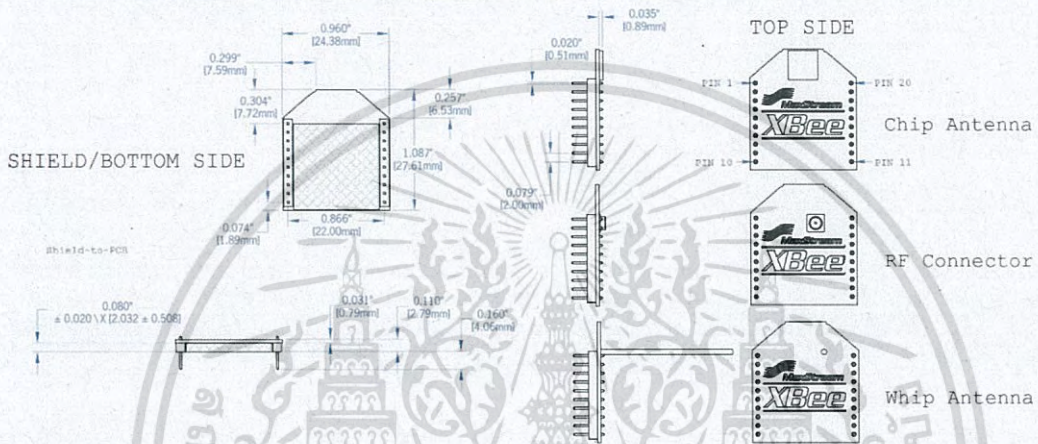
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XBee Mechanical Drawings

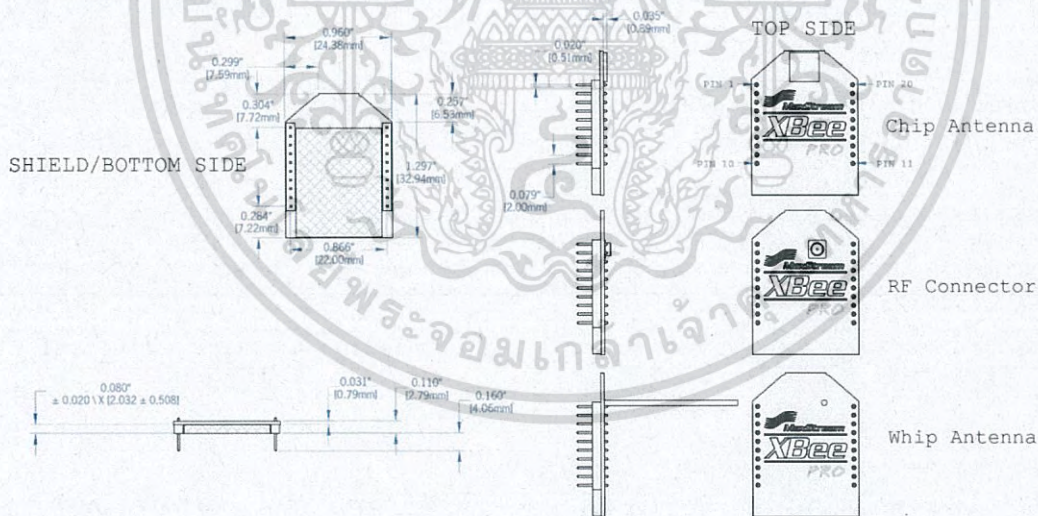


XBee and XBee-PRO OEM RF Modules are pin-for-pin compatible with each other.

XBee OEM RF Module



XBee-PRO OEM RF Module




M100427 [2006.06.28]



www.maxstream.net
© 2006 MaxStream, Inc. All rights reserved.

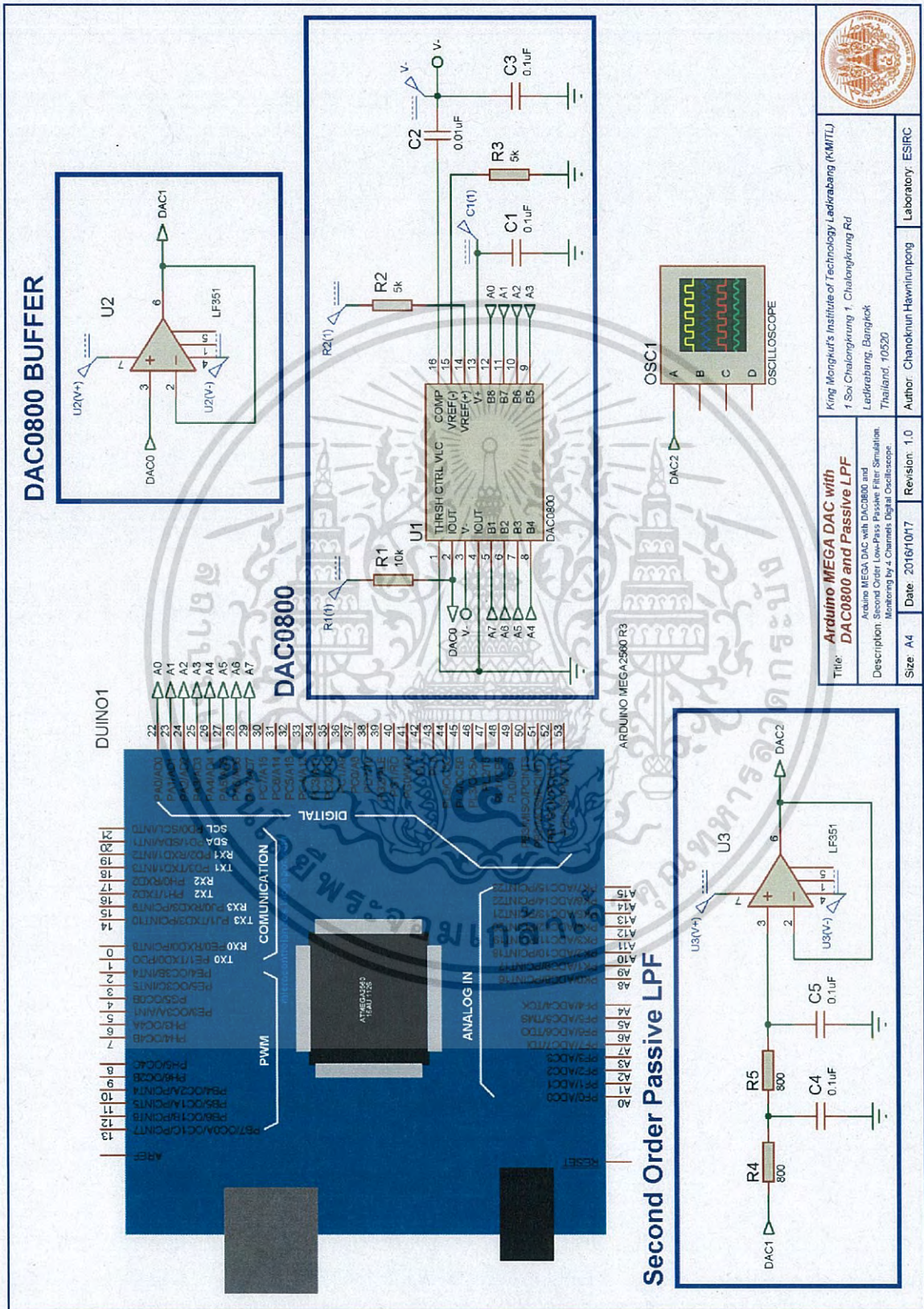
Phone: (866) 765-9885 Toll-free in U.S. & Canada
(801) 765-9885 Worldwide
Live Chat: www.maxstream.net
E-mail: rf-xperts@maxstream.net

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
แผนผังการเขียนวงจรจำลองด้วยโปรแกรม Proteus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



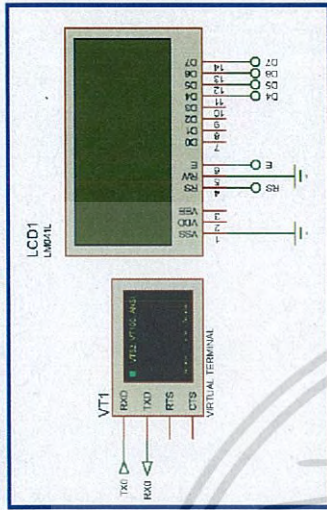
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) 1 Soi Chalalongkrong 1, Chalalongkrong Rd Ladkrabang, Bangkok Thailand, 10520	
Title: Arduino MEGA DAC with DAC0800 and Passive LFP Avative MEGA DAC with DAC0800 and Passive LFP Description: Second Order Low-Pass Passive Filter Simulation, Monitoring by 4 Channels Digital Oscilloscope.	Author: Chanoknun Hawinunpong Laboratory: ESIRC
Size: A4 Date: 2016/10/17	Revision: 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

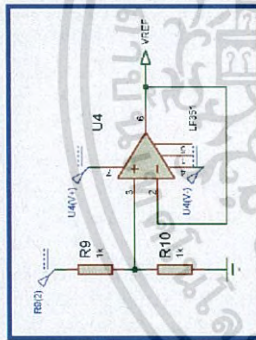


Arduino MEGA ADC with MCP4710 and Butterworth BPF	
Title Arduino MEGA ADC with MCP4710 and Butterworth BPF	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) 1. Size: Chalongkrung 1, Chalongkrung Rd Lat Krabang, Bangkok Thailand: 10520
Description Arduino Mega ADC with MCP4710 and Butterworth BPF	Author: Chanokwan-Hawinunpong Laboratory: EBRC
Size: A3	Date: 2018/11/12 Revision: 1.1

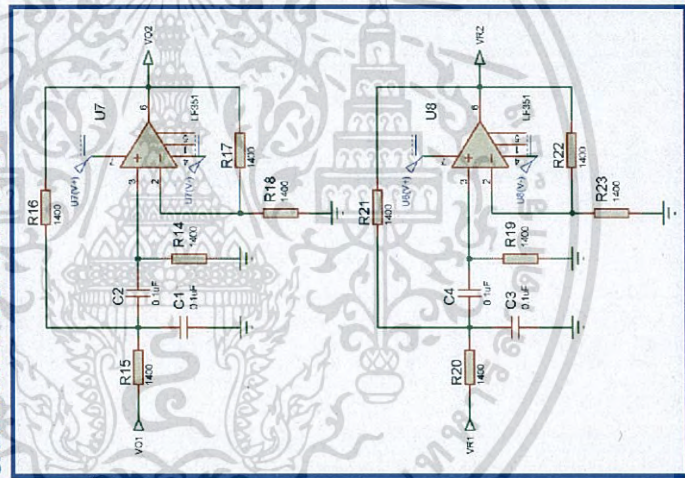
UART & LCD MONITORING



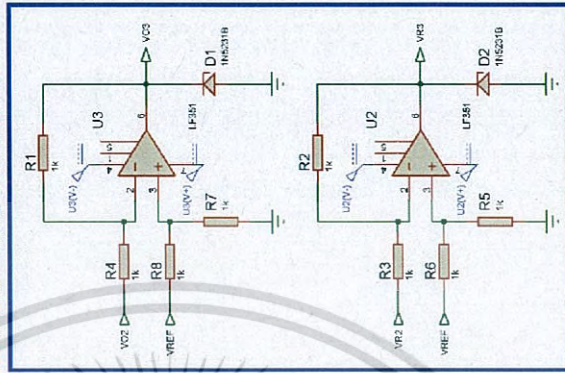
REFERENCE VOLTAGE



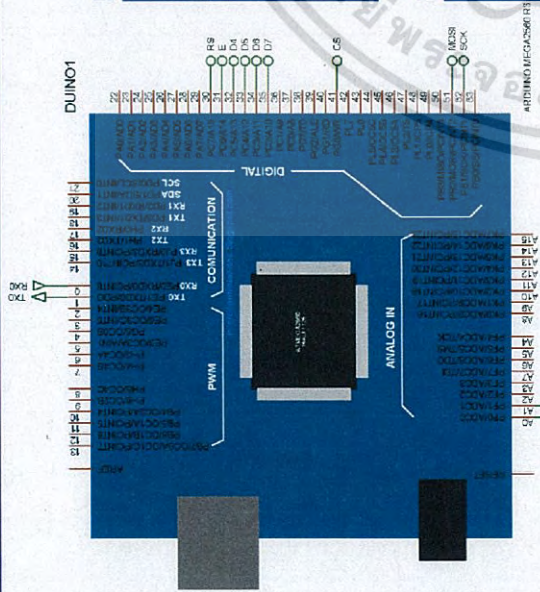
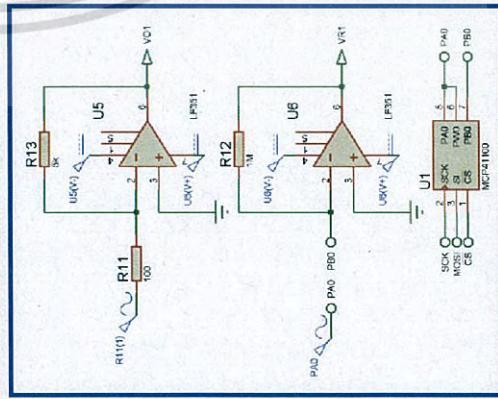
SALLEN-KEY BUTTERWORTH BPF



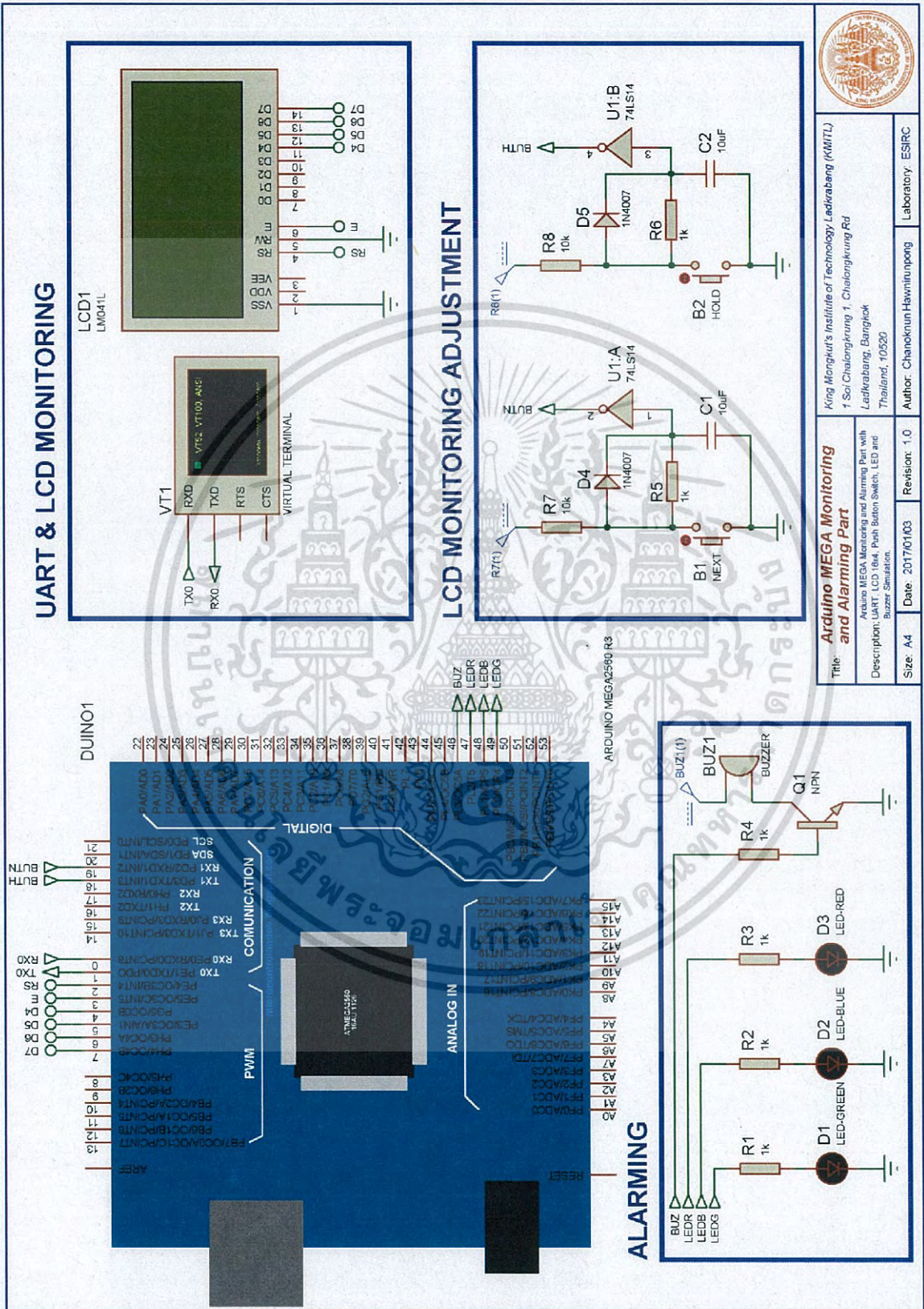
DIFFERENTIAL AMPLIFIER



INVERTING AMPLIFIER

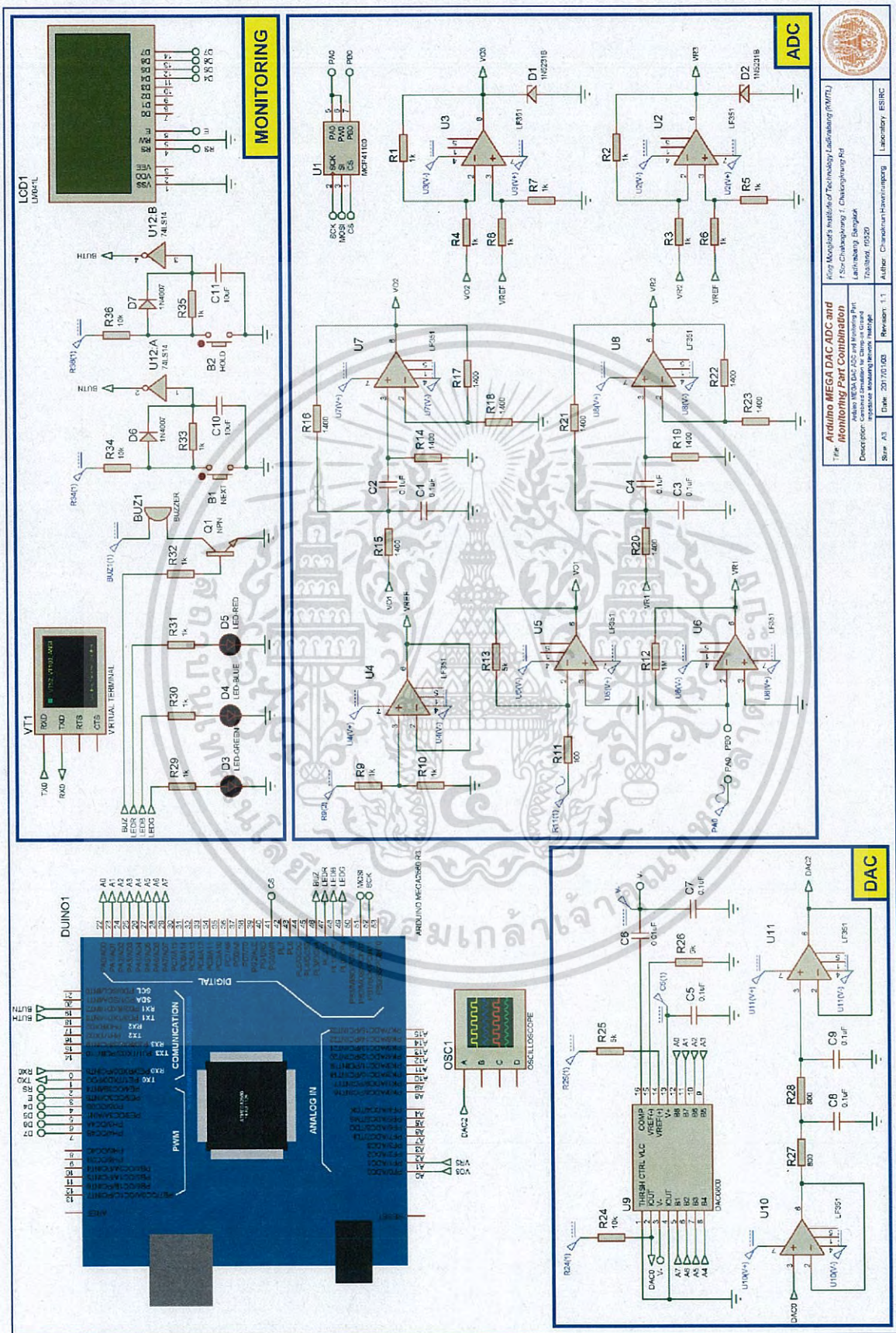


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



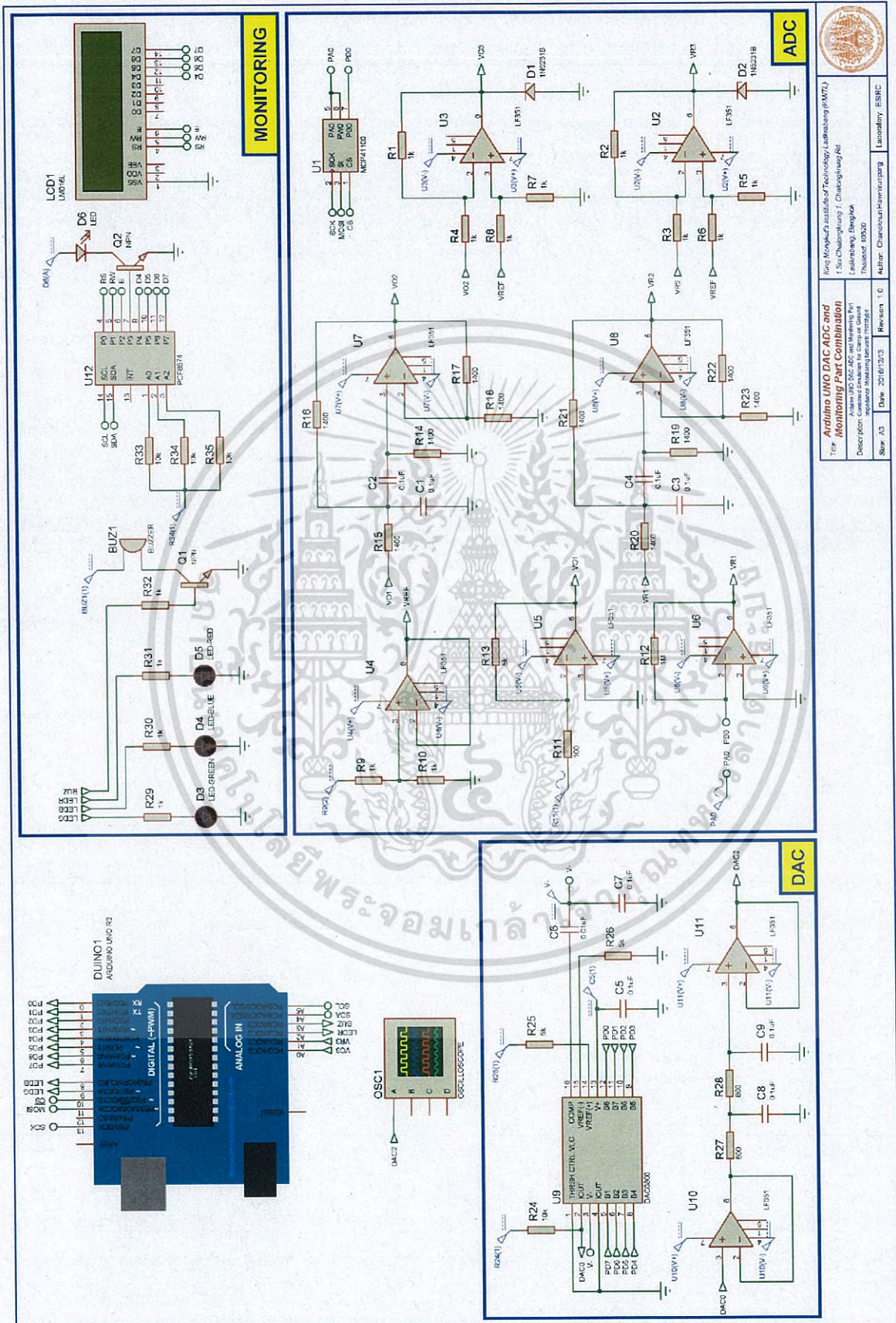
	Arduino MEGA Monitoring and Alarming Part	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) 1 Soi Chalalongkrong 1, Chalalongkrong Rd Ladkrabang, Bangkok Thailand, 10520
	Title: Arduino MEGA Monitoring and Alarming Part Arduino MEGA Monitoring and Alarming Part with LCD, LCD 1604, Push Button Switch, LED and Buzzer Simulation.	Author: Chanoknun Hawinunpong Laboratory: ESIRC
Size: A4	Date: 2017/01/03	Revision: 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



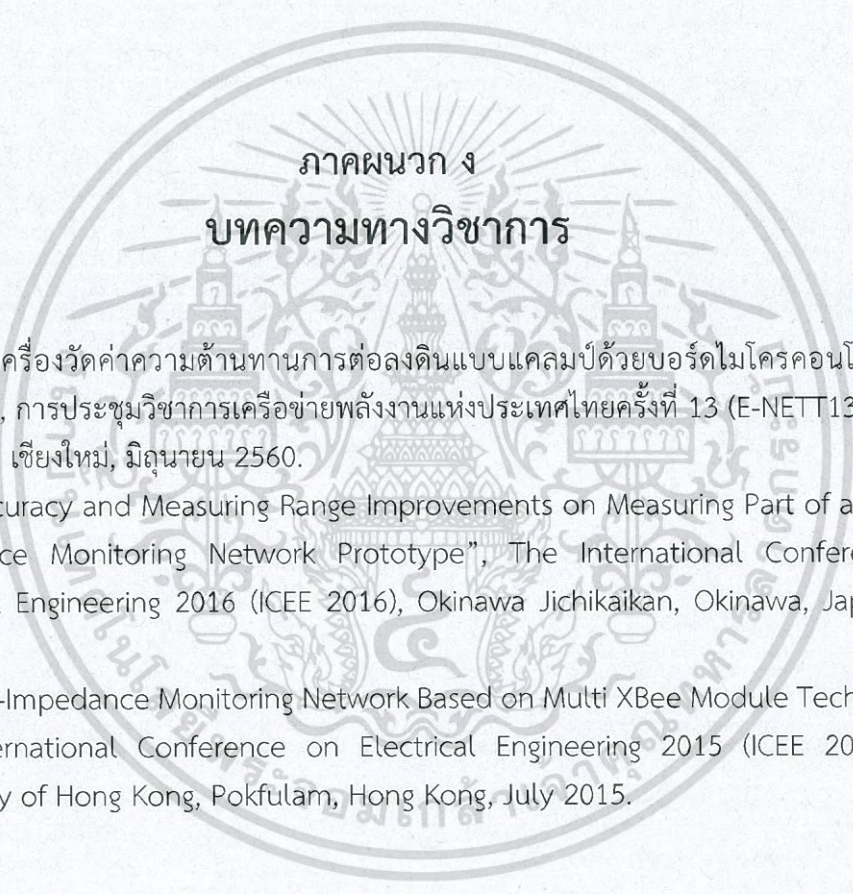
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)	
7/Soi-Chakongwong 1, Chalongkrung Rd	
Ladkrabang, Bangkok	
Institute of Electronic and Computer Engineering	
Institute Learning Network Bridge	
File Name	Revision
Score A3	Date: 2017/02/08
Author	Laboratory
Chandimon-Haverinpong	ESIRC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



		Arduino Uno DAC and ADC and Monitoring Part Combination	
		Address: KMUTL, ADC and Monitoring Part Ladkrabang, Bangkok Institute: KMUTL Institute: KMUTL	
Title:	Author:	Date: 2016/12/13	Revision: 1.0
Description:	Laboratory:	Date:	Revision:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
บทความทางวิชาการ

- ง.1 “ต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 (E-NETT13), โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่, มิถุนายน 2560.
- ง.2 “The Accuracy and Measuring Range Improvements on Measuring Part of a Ground-Impedance Monitoring Network Prototype”, The International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE 2016), Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan, July 2016.
- ง.3 “Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology”, The International Conference on Electrical Engineering 2015 (ICEE 2015), The University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong, July 2015.

E-NETT 13TH

การประชุมวิชาการ

เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13

13TH CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND

“ Sustainable Energy Development for Community and Innovation ”

31 พ.ค. - 2 มิ.ย. 2560 ณ โรงแรม ทีเอ็มเพรส เชียงใหม่



**MAEJO
GO ECO
UNIVERSITY**



cristalia
TCC Energy Services



จัดการประชุมโดย : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



www.e-nett.org



Enett13.mju@gmail.com



053 875590



fax : 053 875599

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino A. Prototype of Clamp-on Ground-Impedance Meter Using Arduino Microcontroller Board

ชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์^{1*}, สุทธิพงษ์ บุญทากลาง¹ และ เซาว์ ชมภูอินไหว¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ผู้ติดต่อ: gan_chanoknun@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอหลักการและวิธีการในการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวประมวลผลหลัก ประกอบด้วย 5 ส่วนหลักดังนี้ ส่วนแรกคือส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ทำงานร่วมกับชิป DAC0800 ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC) เพื่อสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1.6 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามมาตรฐาน IEEE-81 ส่วนที่สองคือแกนแม่เหล็ก ใช้แกนแม่เหล็ก 2 แกน แกนแรกสำหรับเหนี่ยวนำแรงดันเพื่อให้เกิดกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน และแกนที่สองสำหรับวัดกระแสไหลในลูปดังกล่าวเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานการต่อลงดิน ส่วนที่สามคือความต้านทานการต่อลงดินจำลอง ส่วนที่สี่คือส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวเดียวกันในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) เพื่อวัดและคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของแรงดันและกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดิน และส่วนสุดท้ายคือส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน ใช้จอแอลซีดี (LCD) ในการแสดงผลค่าความต้านทานที่คำนวณได้และส่งค่าดังกล่าวผ่านพอร์ตอนุกรม (UART) ให้โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module) และใช้แอลอีดีทำงานร่วมกับกริ่งในการแจ้งเตือนเมื่อค่าความต้านทานที่วัดได้ต่ำกว่าหรือสูงกว่าช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนด จากผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำในช่วงค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ 3.69 เปอร์เซ็นต์

คำหลัก: เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน, เครื่องมือวัดแบบแคลมป์, บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino, IEEE-81

Abstract

This paper proposes the design and implementation of A Prototype of Clamp-on Ground-Impedance Meter Using Arduino Microcontroller Board. The proposed system consists of 5 major sections. The first part is the Sinusoidal Waveform Generator, the Arduino microcontroller board and DAC0800 chip have been used for digital-to-analog converter (DAC) to generate 1.6 kHz frequency sinusoidal waveform in ground loop complying with IEEE-81 (2012) Standard. The second part is the Magnetic Core, 2 cores have been used, the first one has a duty to perform an induced voltage in ground loop and the other has a duty to measure an injected current in such a loop for ground-impedance calculation. The third part is the Variable Ground Resistance Model. The fourth part is the Ground-Impedance Measurement and Calculation, the same board is also doing the analog-to-digital converter (ADC) job to measure and calculate a root-mean-square (RMS) value of the induced voltage and injected current in ground loop. The last part is the Monitoring and Alarming Part, the measuring value will be displaying via LCD monitor and sending to XBee module through serial port (UART). In addition, LED and Buzzer work coordinately to alarming when the measuring ground-impedance values are outside the preset critical range. After the completion of design and implementing, the extensive experimental results confirms that the proposed prototype works accurately at an impedance range of 1 to 100 Ohms with a maximum percent error at 3.69%.

Keywords: Ground-Impedance Meter, Clamp-on Measuring Device, Arduino Microcontroller Board, IEEE-81

1. บทนำ

ระบบการต่อลงดิน (Grounding System) ทำหน้าที่เป็นเส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าเมื่อเกิดสภาวะผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้า เช่น กระแสฟ้าผ่า (Lightning Strikes) กระแสลัดวงจร (Short-Circuit Current) กระแสรั่วไหล (Leakage Current) หรือความผิดปกติอื่นๆ ให้ไหลผ่านลงสู่ดิน เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

[1] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) กำหนดไว้ว่า “ค่าความต้านทานการต่อลงดินต้องมีค่าไม่เกิน 5 โอห์ม ยกเว้น พื้นที่ที่ยากในการปฏิบัติและการไฟฟ้าฯ เห็นชอบ ยอมให้ค่าความต้านทานของหลักดินกับดินต้องไม่เกิน 25 โอห์ม หากทำการวัดแล้วยังมีค่าเกิน ให้ปักหลักดินเพิ่มอีก 1 แห่ง” [2-3]

ในความเป็นจริงนั้นค่าความต้านทานการต่อลงดินอาจเปลี่ยนแปลงได้อยู่เสมอขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความแน่นของดิน (Compactness) ความชื้นในดิน (Moisture) และฤดูกาล (Weather Conditions) เป็นต้น [4] ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการตรวจวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินอยู่เสมอ ทำให้ต้องมีระบบการวัดและแสดงผลค่าดังกล่าว และแจ้งเตือนเมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินสูงกว่ามาตรฐาน

ปัจจุบันเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ (Clamp-on Ground-Impedance Tester) ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้งานง่ายและประหยัดเวลาในการวัด แต่เครื่องวัดดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้านราคาของผลิตภัณฑ์และไม่มีฟังก์ชันการทำงานเสริมที่สามารถส่งข้อมูลของค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้แบบไร้สายไปแสดงผลและเก็บข้อมูล ณ ห้องควบคุม งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อแก้ข้อจำกัดดังกล่าว

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance/Resistance Tester) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเมกเกอร์ แบบดั้งเดิม (Traditional Megger) แบบแคลมป์เดี่ยว (Single Clamp) และแบบแคลมป์คู่ (Double Clamp) [5] ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ

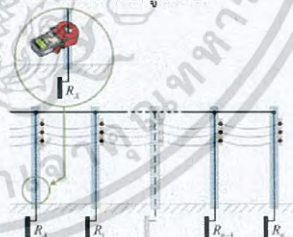


รูปที่ 1 เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน เมกเกอร์แบบดั้งเดิม (ก) แบบแคลมป์เดี่ยว (ข) และแบบแคลมป์คู่ (ค)

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเมกเกอร์แบบดั้งเดิม มีข้อจำกัดสำคัญอยู่ 3 ข้อดังนี้ ข้อแรกคือต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในการวัด ทำให้การวัดแต่ละครั้งกินเวลานาน ข้อต่อมาคือต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด ทำให้ต้องหยุดการทำงานของระบบขณะที่ทำการวัด และข้อสุดท้ายคือการวัดต้องอาศัยมนุษย์ในการสร้างหลักดินช่วย ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดได้

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์เดี่ยว เป็นเครื่องวัดที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ข้อจำกัดข้างต้น มีข้อดีที่เหนือกว่าเมกเกอร์แบบดั้งเดิมคือ ไม่ต้องมีการสร้างหลักดินช่วยในการวัด ไม่ต้องมีการตัดต่อหลักดินออกจากระบบก่อนทำการวัด นั่นคือสามารถวัดขณะที่ระบบยังทำงานอยู่ได้ โดยทำการคล้องเครื่องวัดเข้ากับหลักดินจากนั้นค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้จะแสดงบนหน้าจอของเครื่องวัดในเวลาอันสั้น แต่อย่างไรก็ตามเครื่องวัดแบบแคลมป์เดี่ยวยังคงมีข้อจำกัดอยู่คือ มีความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดต่ำ เนื่องจากแกนแม่เหล็กหรือแคลมป์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันในลูปความต้านทานการต่อลงดิน (Voltage Clamp) กับแคลมป์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแส (Current Clamp) ใช้แคลมป์เดียวกัน

ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ขึ้น ซึ่งไม่เพียงแต่มีข้อดีเหมือนกับเครื่องวัดแบบแคลมป์เดี่ยวทุกประการแล้วยังมีข้อดีที่เหนือกว่าคือมีความเที่ยงตรงแม่นยำในการวัดสูง เพราะแคลมป์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำแรงดันกับแคลมป์ที่ใช้ในการวัดค่ากระแสแยกแกัน [5] ลักษณะการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์คู่ แสดงดังรูปที่ 2

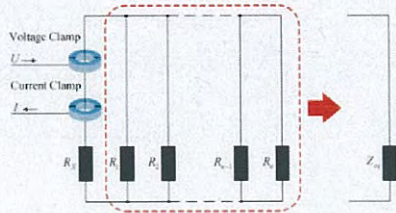


รูปที่ 2 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินของเครื่องวัดแบบแคลมป์คู่

2.2 หลักการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

ระบบการต่อลงดินของโรงไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าย่อย โดยทั่วไปเป็นแบบระบบมีลัดกราวด์นิวตรอน (Multi-grounded Neutral System) [5] แสดงดังวงจรสมมูลในรูปที่ 3 ตัวแปร U และ I แทนแรงดันป้อนเข้าแคลมป์แรงดันและกระแสเหนี่ยวนำจากการวัดของแคลมป์กระแสตามลำดับ R_x คือความต้านทานการต่อลงดินของแท่งหลักดินที่เราต้องการทราบค่า และ $R_1, R_2 \dots R_n$ คือความต้านทานการต่อลงดินของแท่งหลักดินในตำแหน่งอื่นๆ ของระบบมีลัดกราวด์

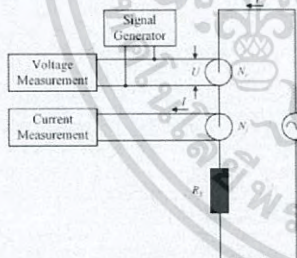
นิเวตรอน Z_{eq} คือผลรวมแบบขนานของค่าความต้านทานการต่อลงดิน $R_1, R_2 \dots R_n$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของระบบมีดักกราวด์นิเวตรอน

$$Z_{eq} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} \quad (1)$$

วิธีการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) [6] ในหัวข้อย่อยที่ 8.2.2.5 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินโดยใช้วิธีทดสอบแบบไม่ต้องปักแท่งโลหะ (Resistance measurements by clamp-on or stakeless method) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ผลรวมแบบขนานของค่าความต้านทานการต่อลงดินในตำแหน่งอื่นๆ นอกเหนือจากตำแหน่งของแท่งหลักดินที่ทำการวัดของระบบการต่อลงดินแบบระบบมีดักกราวด์นิเวตรอนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานการต่อลงดินของแท่งหลักดินที่ทำการวัดจึงอนุมานได้ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ ($Z_{eq} = 0$) และสามารถลดรูปวงจรมูลจากรูปที่ 3 เขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่

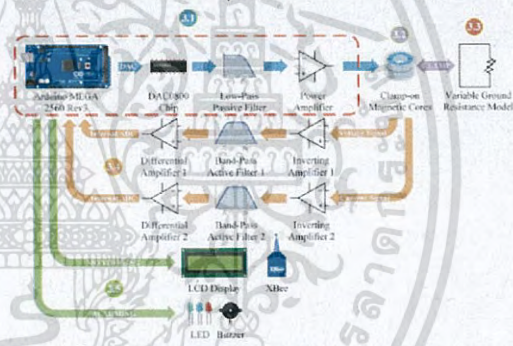
จากรูปที่ 4 ตัวแปร N_1 และ N_2 แทนจำนวนรอบของขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดันและแคลมป์กระแสตามลำดับ ขั้นตอนในการวัดเริ่มจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำคงที่ค่าหนึ่ง U ให้กับขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดัน ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน u ขึ้นในลูปความต้านทานการต่อลงดินผ่านการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดันเหนี่ยวนำ u ทำให้เกิดกระแส i และกระแส I ที่กระแสสที่ไหลในขดลวดที่พันรอบแคลมป์กระแส และค่าความต้านทานการต่อลงดิน R_x สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3 [5,7]

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kU}{I} \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{N_v N_i} \quad (3)$$

3. การออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัด

โครงสร้างของต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 5 แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Waveform Generator) แกนแม่เหล็ก (Magnetic Core) ความต้านทานการต่อลงดินจำลอง (Variable Ground Resistance Model) ส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measurement and Calculation) และส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน (Monitoring and Alarming Part) [8] โดยงานวิจัยนี้อธิบายถึงเฉพาะบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 [9] เป็นหลัก



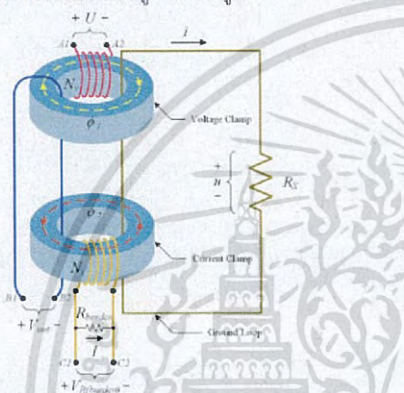
รูปที่ 5 โครงสร้างของต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินในงานวิจัยนี้

3.1 ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์

ขั้นตอนในการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์เริ่มต้นจากบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ส่งสัญญาณลอจิกดิจิทัลขนาด 8 บิต ผ่านพอร์ตเอ (PORTA) ที่เชื่อมต่ออยู่กับชิปแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC Chip) ชื่อว่า DAC0800 โดยค่าของสัญญาณลอจิกดิจิทัลดังกล่าวถูกกำหนดด้วยค่าในตารางอ้างอิง (Lookup Table) ที่ได้ทำการรหัสโปรแกรมไว้ในหน่วยความจำแฟลช (Flash Memory) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้รีจิสเตอร์การขัดจังหวะเวลา (Timer Interrupt Register) ชื่อว่า TIMER2 เป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณที่สร้างขึ้น โดยงานวิจัยนี้สร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ (Signal Frequency, f) 1.6 kHz อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) $1 V_{rms}$ ที่ความละเอียด 32 จุดต่อลูกคลื่น (Sample per Cycle)

3.2 แกนแม่เหล็ก

แกนแม่เหล็กของเครื่องวัดที่สร้างขึ้นใช้แกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่ โดยทำการคล้องแกนแม่เหล็กเข้ากับหลักดิน (Ground Rod) หรือลูปความต้านทานการต่อลงดิน (Ground Loop) ที่ต้องการทราบค่าความต้านทาน ซึ่งแกนแม่เหล็กแบบนี้ประกอบด้วย แคลมป์แรงดันและแคลมป์กระแสที่แยกอิสระต่อกันและมีฉนวนห่อหุ้มเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกและระหว่างแคลมป์ด้วยกันเอง องค์ประกอบภายในของแกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 องค์ประกอบภายในของแกนแม่เหล็กแบบแคลมป์คู่

จากรูปที่ 6 $A1$ และ $A2$ คือขั้วต่อของขดลวดที่พันรอบแคลมป์แรงดันซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำคงที่ค่าหนึ่ง (U) เพื่อทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน (u) โดยสามารถวัดค่าได้จาก $B1$ และ $B2$ คือขั้วต่อของขดลวดที่คล้องผ่านแคลมป์คู่หนึ่งรอบซึ่งอนุมาณว่าเป็นลูปความต้านทานการต่อลงดินเนื่องจากลูปความต้านทานการต่อลงดินนั้นมีจำนวนรอบหนึ่งรอบเสมอ ดังนั้นแรงดันตกคร่อมขาของขดลวดดังกล่าว (V_{out}) จึงเท่ากับหรือสมมูลกับแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานการต่อลงดิน (u) และกระแสเหนี่ยวนำ (i) สามารถคำนวณได้จากการวัดค่าแรงดันตกคร่อม $C1$ และ $C2$ ($V_{R(burden)}$) คือขั้วต่อของขดลวดที่พันรอบแคลมป์กระแส และค่าความต้านทานการต่อลงดิน (R_x) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และ 5

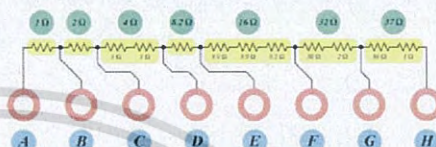
$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{k V_{out}}{V_{R(burden)}} \quad (4)$$

$$k = \frac{R_{burden}}{N_i} \quad (5)$$

3.3 ความต้านทานการต่อลงดินจำลอง

ความต้านทานการต่อลงดินจำลองใช้ตัวต้านทานขนาด 2^n โอห์ม (เมื่อ $n = 0, 1, 2 \dots$) ที่มีค่าความผิดพลาด (Tolerance) $\pm 1\%$ ต่ออนุกรมกัน เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานที่ต้องการตั้งแต่ 1 ถึง $2^{n+1}-1$ โอห์ม ในงานวิจัยนี้มีขอบเขตการ

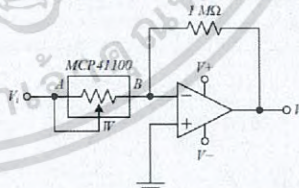
วัดค่าของความต้านทานการต่อลงดินอยู่ที่ 1 ถึง 100 โอห์ม จึงใช้ตัวต้านทานขนาด 2^n โอห์ม ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ $n = 0$ ถึง 6 ทำให้ความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 127 ($2^{6+1}-1$) โอห์ม แต่เนื่องจากต้องการวัดมากที่สุดที่ 100 โอห์ม จึงต้องทำการปรับลดค่าของตัวต้านทานตัวสุดท้ายจาก 64 (2^6) โอห์ม เป็น 37 (2^6-27) โอห์ม ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

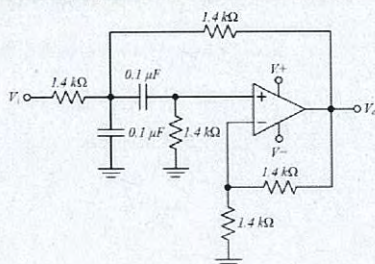
3.4 ส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทาน

ขั้นตอนในการวัดเริ่มต้นจากนำสัญญาณแรงดันตกคร่อมขั้วต่อ $B1$ และ $B2$ กับ $C1$ และ $C2$ นั้นคือสัญญาณ V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ตามลำดับ ไปผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) เพื่อขยายแอมพลิจูดของสัญญาณให้เพียงพอสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่า และเนื่องจากค่า V_{out} เป็นค่าคงที่ จึงทำให้สามารถคำนวณกำลังขยาย (Gain) ที่คงที่สำหรับวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสของสัญญาณ V_{out} ได้ แต่กำลังขยายสำหรับสัญญาณ $V_{R(burden)}$ นั้นแตกต่างออกไป เนื่องจากสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปจึงทำให้กำลังขยายต้องเปลี่ยนแปลงตามด้วย ดังนั้นจึงนำตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิตอล (Digital Potentiometer) ชื่อว่า MCP41100 มาใช้แทนตัวต้านทานแบบธรรมดาในการสร้างวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ดังแสดงในรูปที่ 8 ทำให้วงจรดังกล่าวมีกำลังขยายตั้งแต่ 10 ถึง 1,000 เท่า



รูปที่ 8 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่สามารถปรับกำลังขยายได้

หลังจากสัญญาณ V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ได้รับการขยายสัญญาณจนมีค่าแอมพลิจูดที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำสัญญาณทั้งสองไปผ่านวงจรกรองความถี่เพื่อกรองเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ตามต้องการ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอคทีฟอันดับสองชนิด Butterworth ที่ใช้รูปแบบการเชื่อมต่อ Sallen-Key Topology (Sallen-Key Butterworth Second Order Active Band-Pass Filter) ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบแอดที่พอน์ดับสองชนิด Butterworth ที่ใช้ในงานวิจัย

สัญญาณขาออกจากรวมกรองแถบความถี่ถูกนำไปผ่านวงจรเลื่อนระดับแรงดัน (Voltage Level Shifter Circuits) เป็นขั้นตอนต่อไป เพื่อเลื่อนระดับแรงดันขึ้น 2.5 V แล้วจึงนำมาประมวลผลและคำนวณค่าในบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ผ่านขา A0 และ A1 ซึ่งเป็นขาอินพุตของสัญญาณอนาล็อก (Analog Input Pins) ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ความละเอียด 10 บิต ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง 8 จุดต่อลูกคลื่น โดยใช้รีจิสเตอร์การขัดจังหวะเวลา ชื่อว่า TIMER1 เป็นตัวกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่าง มีหน้าที่ในการกำหนดว่าเมื่อใด ADC Interrupt Register เริ่มขัดจังหวะการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ซึ่งสัญญาณแรงดัน V_{out} และ $V_{R(burden)}$ ที่วัดได้เป็นกลุ่มของตัวเลข 10 บิต (0 ถึง 1023) จึงต้องนำมาแปลงเป็นค่าแรงดันแล้วนำไปสลับกับระดับแรงดันที่เลื่อนขึ้น (2.5 V) ในตอนต้น จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS) ตามสมการที่ 6

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{n-1}^2 + V_n^2}{n}} \quad (6)$$

3.5 ส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน

ส่วนการแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินใช้แอลซีดี (LCD) ขนาด 16x4 (16 ตัวอักษร 4 บรรทัด) ด้วยการเชื่อมต่อแบบขนาน (Parallel) โดยมีฟังก์ชันการทำงานเสริมสำหรับผู้ใช้งานให้สามารถกดสวิตช์ปุ่มกดเพื่อคงค่าที่อ่านได้ (Hold Button) และสวิตช์ปุ่มกดเพื่อเปลี่ยนหน้าจอแสดงผล (Next Button) ให้แสดงรายละเอียดและข้อมูลต่างๆ ของเครื่องวัด และสามารถส่งค่าความต้านทานที่วัดได้ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port, UART) ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับโมดูลเอ็กซ์บีผ่านบอร์ดที่ใช้ในการโปรแกรมเอ็กซ์บี (XBee Breakout Board) เพื่อส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านย่านความถี่ 2.4 GHz ไปยังเอ็กซ์บีตัวรับอีกตัวที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลและเก็บข้อมูล ส่วนการแจ้งเตือนใช้แอลอีดี (LED) 3 ตัว ทำงานร่วมกับกริ่ง (Buzzer) 1 ตัว โดยมีเงื่อนไขการแจ้งเตือน ดังแสดงในตารางที่ 1

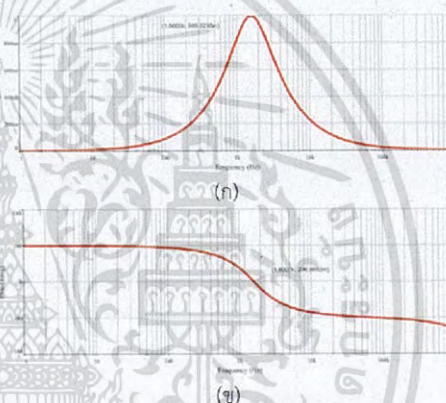
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการแจ้งเตือนของอุปกรณ์แจ้งเตือน

Resistance	Devices	Green LED	Blue LED	Red LED	Buzzer
$1 \leq R_x \leq 5 \Omega$		ON	OFF	OFF	OFF
$5 < R_x \leq 25 \Omega$		OFF	ON	OFF	OFF
$R_x > 25 \Omega$		OFF	OFF	ON	ON

4. ผลการทดลอง

4.1 การจำลองวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

จากวงจรในรูปที่ 9 เมื่อนำไปจำลองด้วยโปรแกรม NI Multisim 12.0 เพื่อการตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) เทียบกับแมกนิจูดและมุมเฟส ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 10 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

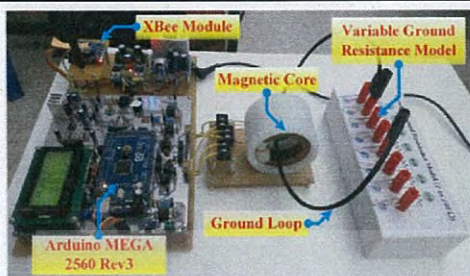


รูปที่ 10 การตอบสนองเชิงความถี่เทียบกับแมกนิจูด (ก) และมุมเฟส (ข) ของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบ

พบว่าสัญญาณที่ความถี่ที่ใช้ในการวัดหรือที่ความถี่ตัด (1.6 kHz) มีค่าแมกนิจูดลดลงเป็น 0.9996 เท่า และมีมุมเฟสเพิ่มขึ้นเป็น 0.2966 องศา ซึ่งถือได้ว่าสัญญาณที่ความถี่ดังกล่าวมีค่าแมกนิจูดและมุมเฟสเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย และสัญญาณที่ความถี่ 1 MHz ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงความถี่ของสัญญาณรบกวน (Noise) ได้รับการกรองออกไปด้วย

4.2 การทดลองวัดค่าความต้านทานด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานของต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 จากกลุ่มความต้านทานการต่อลงดินจำลองที่สร้างขึ้นในหัวข้อ 3.3 โดยทำการวัดในช่วงค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม จากผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องวัดสามารถวัดค่าความต้านทานในช่วงดังกล่าวโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 3.69 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความต้านทาน 100.2 โอห์ม รูปและผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 11 และตารางที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 11 การทดลองวัดค่าความต้านทานด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

ตารางที่ 2 ผลการทดลองวัดค่าความต้านทานด้วยต้นแบบเครื่องวัดที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3

Resistance (Ω)	Tolerance	V_{out} (mV)	$V_{Reference}$ (mV)	$R_{measured}$ (Ω)	Error (%)
1.00	± 0.010	19.33	160.65	1.0	0.00
2.00	± 0.020	19.63	82.23	2.0	0.00
3.00	± 0.030	19.90	55.75	3.0	0.00
4.00	± 0.040	20.02	42.67	4.0	0.00
5.00	± 0.050	20.07	33.55	5.1	2.00
10.20	± 0.102	20.13	16.92	10.1	0.98
15.20	± 0.152	20.06	11.26	15.1	0.66
20.00	± 0.200	20.37	8.67	19.8	1.00
25.20	± 0.252	20.45	6.92	24.9	1.19
30.20	± 0.302	20.44	5.79	29.8	1.32
40.20	± 0.402	20.41	4.29	40.2	0.00
50.00	± 0.500	20.58	3.48	50.0	0.00
60.20	± 0.602	20.56	2.87	60.5	0.50
70.00	± 0.700	20.44	2.41	71.6	2.29
80.20	± 0.802	20.64	2.13	82.0	2.24
90.00	± 0.900	20.44	1.89	91.4	1.56
100.20	± 1.002	20.66	1.68	103.9	3.69

5. บทสรุป

ต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ใช้บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 สามารถวัดค่าความต้านทานจากกลุ่มความต้านทานการต่อลงดินจำลองในช่วงค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 3.69 เปอร์เซ็นต์ และต้นแบบดังกล่าวยังมีใช้งานที่เพียงพอสำหรับสร้างสวิตช์ปุ่มกดเพื่อคงค่าที่อ่านและยังสามารถเชื่อมต่อกับเอ็กซ์บีเพื่อส่งข้อมูลแบบไร้สายได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจาก โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.): ระดับปริญญาโท (Research and Researchers for Industries: RRI) และขอขอบคุณศูนย์วิจัยพลังงานและวิศวกรรมการส่องสว่าง (ESIRC) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMITL) ที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fluke Corporation (2010). Earth Ground Resistance Principles, testing methods and applications.
- [2] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (2556). มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.).
- [3] สภาวิศวกร (2554). ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพ ด้าน การออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบการต่อลงดิน, พิมพ์ครั้งที่ 1, สภาวิศวกร.
- [4] He, J., Zeng, R., et al. (2003). Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, July 2003, pp. 788 – 795.
- [5] Li, L., Zou, J. and Sun, H. (2006). Research on the New Clamp-on Ground Resistance On-line Tester Based on AC Variable Frequency, paper presented in the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 – 23, 2006, Dalian, China, pp. 5286 – 5289.
- [6] IEEE-81 standard (2012). IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, in Ground impedance, ed. United States of America, 2012, pp. 19 – 30.
- [7] Hawwirunpong, C., Potivejjakul, S. and Chompoo-inwai C. (2015). Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology, paper presented in the *International Conference on Electrical Engineering 2015*, July 5 – 9, 2015, The University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong.
- [8] Hawwirunpong, C., Leelajindakrairerk, M., Potivejjakul, S. and Chompoo-inwai, C. (2016). The Accuracy and Measuring Range Improvements on Measuring Part of a Ground-Impedance Monitoring Network Prototype, paper presented in the *International Conference on Electrical Engineering 2016*, July 3 – 7, 2016, Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan.
- [9] Banzai, M. (2011). *Getting Started with Arduino*, 2nd edition, ISBN: 978-1-449-309879, O'Reilly Media, Inc., United States of America.



ICEE 2016 Okinawa

The International Conference on Electrical Engineering 2016
3 - 7 July 2016, Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan

ICEE 2016 Okinawa Japan



一般社団法人電気学会
The Institute of Electrical Engineers of Japan



中国电机工程学会
CSEE



HKIE

The theme of ICEE 2016 is "Future Technology for Bridging Nations"

Welcome Message Committee Full Paper ACKNOWLEDGEMENTS

Organized by:
The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)
Co-organized by:
The Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE)
The Hong Kong Institution of Engineers (HKIE)
The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)

This conference is supported by JSPS KAKENHI Grant No. 15HP0702.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ID 90507

The Accuracy and Measuring Range Improvements on Measuring Part of a Ground-Impedance Monitoring Network Prototype

Chanoknun HAWNIRUNPONG, Monthon LEELAJINDAKRAIRERK,
Siriwat POTIVEJJAKUL and Chow CHOMPOO-INWAI
Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520

Abstract

The previous year article, related to the design and implementation of the Ground-Impedance monitoring network prototype based on two microcontrollers and multi-XBee module technology, has some drawbacks that leaves some rooms for improvements i.e., the narrow range of measuring capability, the inaccurate measuring values inside and outside the measuring range, the redundancy of using two separately-worked units of microcontrollers which effected the overall system performance. This article proposed the concept solutions, the implementations and the experimental results for resolving those aforementioned problems. In addition, this paper also elaborates two new system capabilities that have been added to make the system better. Recalling that most of the drawbacks from last year prototype came from the measuring part that comprises of a clamp-on magnetic core and two Arduino microcontrollers: one to generate the sinusoidal waveform, and another to read and calculate the acquired ground-impedance values. The key ideas to improve the overall system while using the same clamp-on magnetic core are to make a better and smarter waveform generator and improve how to compute the measuring ground-impedance values afterward using Timer Interrupt technique. Starting from the waveform generator, to generate better sinusoidal signals supplied to the magnetic core; instead of using an 8 bit R-2R Resistor Ladder circuit as a digital-to-analog converter (DAC), the DAC0800 chip and a Band-Pass Filter circuit had been utilized to generate the more precise 1.6kHz sinusoidal waveform with a resolution of 64 samples per cycle complying to IEEE-81 standard. By applying this strategy, we now can use the same microcontroller analog-to-digital converter (ADC) ports to acquire the returning values from the magnetic core simultaneously. The methodology of using ten cycles of acquiring data to compute the ground-impedance value instead of just one cycle of data from the previous year prototype is also applied here. By applying the above mentioned solutions, the positive consequences are that we get better accuracy, faster system performance and the use of two Arduino microcontrollers can be cut down to just one unit in the same time. Another positive side is that the accurate measuring range is now extended from 1-10 ohm from last year prototype to 1-100 ohm with this proposed system solutions. The additional and useful functions that have been added to improve the overall system are the LED indicator and the buzzer which will be functioned (blinking and buzzing) when the measuring ground-impedance values are outside the pre-set critical range. After completion of the design and implementation, the extensive experiments had been done in the strictly-controlled environment. The experimental results confirmed the improvements of the overall system performance over the last year model with the maximum error of less than ten percent.

Keywords: Clamp-on magnetic core, Ground-Impedance measuring device, Arduino microcontroller, IEEE-81

1 INTRODUCTION

Grounding system is the fundamental insurance of system reliability and protection. Good grounding system could protect the risk of electric shock, harmonic distortion issues, instrumentation errors, power factor problems and ensure personnel and equipment safety. Because a grounding system serves as a safe path for the dissipation of fault currents, static discharges, lightning strikes, EMI and RFI signals and other interferences to flow when faults occurred in the system [1]. Therefore, a ground-impedance or ground-resistance must be

as low value as possibly could. Ideally, a system ground resistance should be of zero ohms, but in the real world there are many factors that not likely to lead it to be in that way. Both of The National Electrical Code (NEC) and The National Electrical Safety Code (NESC) require the ground electrode resistance to be 25 ohms or less for facilities and systems. Military grounding standards, bonding and shielding for communication systems (MIL-STD-188-124B) require a ground electrode resistance of less than 10 ohms and Telecommunications Industry Association (TIA) standards require the ground electrode resistance of 5 ohms [1-4]. In

Thailand, there is a grounding code of practice [5] saying that "the ground-impedance shall be less than or at least equal to 5 Ohm. Except in the area of grid-defined difficulties or the area that get special approval from the national grid, the ground-impedance then might be acceptable for the value of less than 25 Ohm..."

Ground-impedance values could be changed depending on the seasonal [6-7] or external factors such as soil compositions, size particles, compactness, moisture, saline water, temperature, weather conditions, number of ground electrodes and so on [3-4]. Therefore, a repeatedly inspections of ground-impedance are necessary. There are four types of earth ground testing methods available today which are soil resistivity, fall-of-potential, selective and stakeless methods [2]. The first three methods requiring an extra auxiliary pole for each measurement and some are requiring to disconnecting ground before measurement so the popular and save-time choice is then stakeless method which allow user to clamping directly to the ground electrode using clamp-on ground impedance measuring device and the result will then show on LCD display in seconds.

The key concept for this research is to redesign and improve on measuring part of a ground-impedance monitoring network prototype from the previous year article (ICEF-2015) namely "Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology [8]" in order that the new design will be capable of measuring more accurate and wider that measuring range from last year model (1-25 ohms) to this year model range of 1-100 ohms. The measuring and computing principle will be elaborated later in this paper. Typical clamp-on ground-impedance tester is shown in Figure 1.

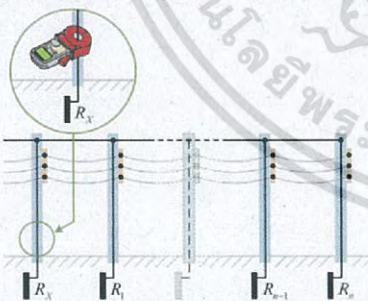


Figure 1. Typical Clamp-on Ground-Impedance Tester

2 RELATED PRINCIPLES AND BASIC THEORIES

2.1 Clamp-on Ground-Impedance Measuring Principle

This research measuring process is basically based on the resistance measurements by clamp-on or stakeless method stated in IEEE-81 (2012) standard [3]. The grounding system of the typical power systems i.e., the power plant, the

substation and individual power apparatus commonly are multi-grounded neutral systems. The equivalent circuit of such a system is shown in the Figure 2.

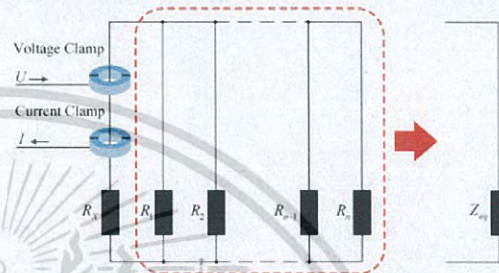


Figure 2. Equivalent circuit of the multi-grounded system

In Figure 2, U and I represent the supplied voltage of voltage clamp and Measured induced current of current clamp respectively. R_x is the ground resistance of the ground electrode under the test. R_1, R_2, \dots, R_n are the ground resistance of the other rods of the multi-grounded neutral system. Z_{eq} is the summation of those R_1, R_2, \dots, R_n after their parallel connection which can be computed from Equation 1.

$$Z_{eq} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} \tag{1}$$

The ground-impedance measuring method used in this paper is based on an assumption that the impedance of the multi-grounded neutral system excluding the ground electrode under the test is so small compared to the ground electrode under the test that it can be assumed to be zero ($Z_{eq} = 0$) [3]. Therefore, the measuring equivalent circuit can be simplified as shown in Figure 3.

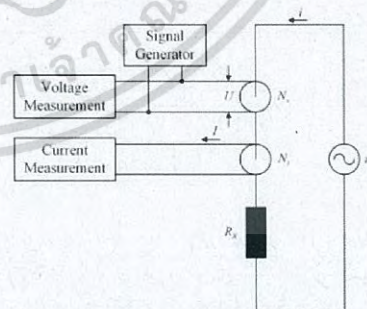


Figure 3. Simplified equivalent circuit of Figure 2

The variable N_v shown in Figure 3 stands for the turn number of voltage generator coil wound around the voltage clamp and similarly, a variable N_i stands for the turn number of current measurement coil wound around the current clamp.

During the measuring process, the voltage generator coil is generated a known low frequency constant AC voltage called U signal. A small voltage u is then induced in the circuit. This small u signal then produces electric current i in the ground loop which can be measured through the current coil. The ground resistance R_x is then generally be derived from Equation 2 and Equation 3 [8-9].

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kU}{I} \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{N_s N_p} \quad (3)$$

2.2 Arduino UNO Microcontroller

The Arduino UNO is a microcontroller board running on Atmel 8-bit chipset (ATmega328). There are fourteen usable digital-input/output pins (D0–D13), six analog-input pins (A0–A5), one 16-MHz crystal oscillator, one USB interface port, one power jack, two In-Circuit Serial Programming (ICSP) headers, and a reset button. The ATmega328 chipset on Arduino UNO comes pre-burned with a boot-loader that allowed uploading a new code without the use of an external hardware programmer. The Arduino UNO can be programmed with the Arduino software (IDE) which the latest version is IDE 1.6.8. Figure 4 below illustrates the composition of Arduino UNO [10].

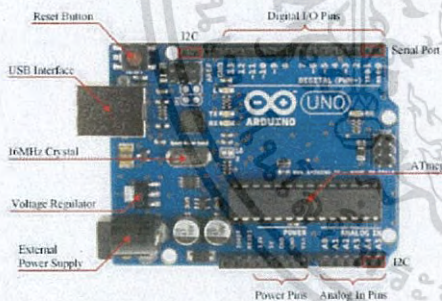


Figure 4. Composition of Arduino UNO

3 THE PROPOSED SYSTEM DESIGN

The overall system of a proposed Ground-Impedance Measuring Device in this research as can be seen in Figure 5 consists of five sections: (3.1) Sinusoidal Waveform Generator, (3.2) Clamp-on Measuring Magnetic Core, (3.3) Variable Ground Resistance Model, (3.4) Ground-Impedance Measurement and Calculation and (3.5) Displaying and Alarming Section. According to the previous year article, all these sections are to be improved for higher performance except for the clamp-on measuring magnetic core section. The proposed system overview can be seen in Figure 5.

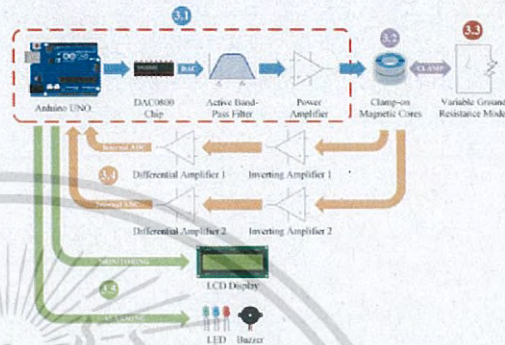


Figure 5. The proposed system overview

3.1 Sinusoidal Waveform Generator

In this process, Arduino UNO generates an 8 bits digital logic through PORTD (pin D0–D7) which is connected to Digital-to-Analog Converter (DAC) chip named DAC0800. The DAC0800 chip serves as a converter that converts digital logic to the analog sinusoidal waveform signal. The output logic of each pin in PORTD was generated using already programmed value in flash memory lookup table. The frequency of such a signal will be determined by delay time setting for timer interrupt register named TIMER2. It should be noted here that TIMER2 has higher priority than TIMER1 so that it shall be chosen to use in this important process. The sinusoidal frequency of 1.6 kHz was chosen here according to IEEE-81 (2012) standard with the RMS voltage amplitude of 1 Volt. The active band-pass filter shown in Figure 5 and Figure 6 was added to this process to smooth out and refine the distortion from sinusoidal generating steps. Equation (4) – (6) shows how to compute the voltage gain, a lower cut-off frequency and an upper cut-off frequency, respectively. The filtered signal will then be passed through a power amplifier before supplying such a signal to a measuring magnetic core.

$$G = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (5)$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (6)$$

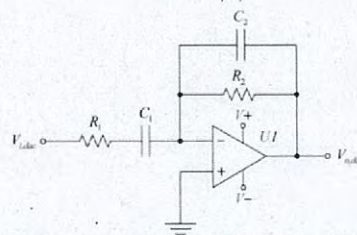


Figure 6. Active band-pass filter circuit of DAC

3.2 Clamp-on Measuring Magnetic Core

Both of the voltage clamp and current clamp used in this paper are the open-ended magnetic cores. Figure 7 and Figure 8 illustrates the external and internal appearance of both magnetic cores, respectively. Physically, both magnetic cores are absolutely separated from each other using material shielding technique to protect interferences between the two.

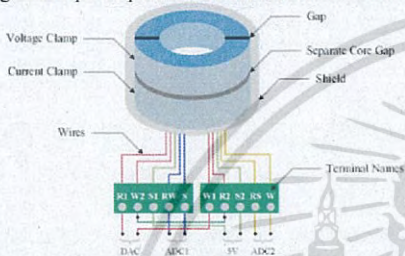


Figure 7. The external of both Clamp-on Magnetic Core

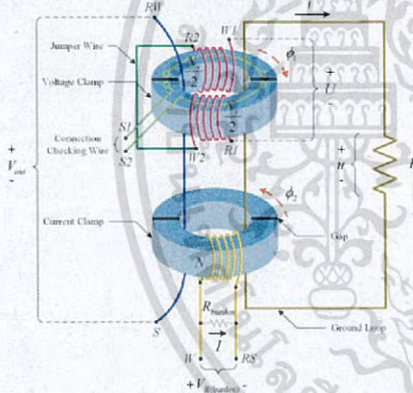


Figure 8. The internal of both Clamp-on Magnetic Core

The parameters from the above Figure, $S1, S2$ are air gap terminals of a wire for connection checking. $R2, W2$ are connected terminals of wire. $W1, R1$ are terminals of a voltage generator coil, which connect to a sinusoidal waveform generator (DAC) that generate voltage U . The induced voltage can be measured from RW, S terminals which are terminals of one turn wire assumed to be similar to a ground loop, which always has one turn, therefore a voltage between these terminals, V_{out} , is then equal/equivalent to a voltage drop in R_s , u as shown in Equation 7.

$$u \cong V_{out} \tag{7}$$

The induced current i can be calculated using voltage between W, RS terminals, $V_{R(burden)}$ and because R_{burden} is known, the current I can be computed from Equation (8).

$$I = \frac{V_{R(burden)}}{R_{burden}} \tag{8}$$

The induced current i can be derived from Equation (9).

$$i = N_i \cdot I \tag{9}$$

The ground resistance R_x can then be derived from Equation (10) and Equation (11).

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kV_{out}}{V_{R(burden)}} \tag{10}$$

$$k = \frac{R_{burden}}{N_i} \tag{11}$$

3.3 Variable Ground Resistance Model

The variable ground resistance model used in this work was delicately designed using a series of 2^n ohm resistor with tolerance of $\pm 1\%$ (where $n = 0, 1, 2 \dots$). It was designed such that it is able to cope with all the range required in the experiment from one to one hundred ohm and the number of resistance used must be minimal. The schematic of such a model are shown in Figure 9. To vary the resistance as desired are simply plug in the wire jumper between terminals. Table 1 illustrates how to set the wire jumper to achieve the desired resistance value for experiments.

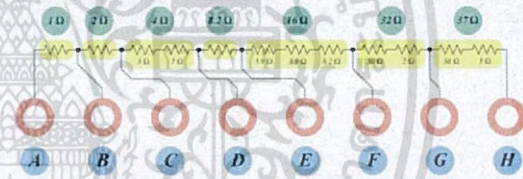


Figure 9. Variable ground resistance model used in this research

Table 1. Example of variable ground resistance connection

Resistance (Ω)	Measurement Terminal (-)	Auxiliary Terminal				
Value	Tolerance	1 st Jumper	2 nd Jumper			
1.00	± 0.010	A	B	-	-	-
2.00	± 0.020	B	C	-	-	-
3.00	± 0.030	A	C	-	-	-
4.00	± 0.040	C	D	-	-	-
5.00	± 0.050	A	D	B	C	-
10.20	± 0.102	B	E	C	D	-
15.20	± 0.152	A	E	-	-	-
20.00	± 0.200	C	F	D	E	-
25.20	± 0.252	A	F	B	D	-
30.20	± 0.302	B	F	-	-	-
40.20	± 0.402	D	G	E	F	-
50.00	± 0.500	B	G	C	E	-
60.20	± 0.602	C	G	-	-	-
70.00	± 0.700	A	H	B	F	-
80.20	± 0.802	A	H	C	D	E
90.00	± 0.900	A	H	B	C	D
100.20	± 1.002	A	H	-	-	-

3.4 Ground-Impedance Measurement and Calculation

In order to compute a ground-impedance value, accurately measurement of V_{out} and $V_{R(burden)}$ from magnetic core are mandatory, see Figure 5 and Figure 8. These two signals are generally small in millivolt scale. Two amplifiers are added to increase the amplitude of those signals before sending to compute in microcontroller. A simple level-shift circuit is also

added to this process to transform those two signals (by adding 2.5 volt DC offset) into just on the positive side in order that it can be readable by microcontroller. Figure 10 illustrates the level-shift circuit used in this work.

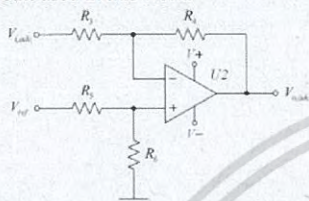


Figure 10. Level shift circuit of ADC

The aforementioned signals, V_{out} and $V_{R(burden)}$, will then be passed through as inputs of Arduino UNO in pin A0 and pin A1, respectively. The accuracy of this process depends on a sampling rate which was determined by timer interrupt register named TIMER1. Because of the overall process operate by just one microcontroller, therefore, TIMER1 and TIMER2 interrupt register must work together for the best system performance. The root mean square (RMS) value of V_{out} and $V_{R(burden)}$ can then be calculated from Equation 12 and the ground resistance will be computed from Equation 10.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_{n-1}^2 + V_n^2}{n}} \quad (12)$$

3.5 Displaying and Alarming Section

The measuring values computed from the Arduino UNO will finally be displayed via the 16 characters 2 lines LCD monitor matrix display using the Inter-Integrated Circuit (I2C) bus connection through the LCD Serial Interface Module (LCM1602 IIC) to economize pin/port of the microcontroller. This type of connection allows Arduino UNO to communicate with LCD display by using just two wires, one is a Serial Data Line (SDA) and another is a Serial Clock Line (SCL) which normally located at pin A4 and pin A5 of Arduino UNO. The wiring diagram and system integration are shown in Figure 11.

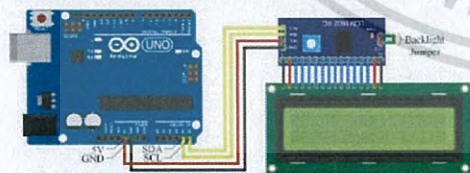


Figure 11. Arduino UNO and LCD display connection

There are also three LED indicators and buzzer in this work. They were programmed to be blinking and alarming when the measuring values are in the range of three preset values:

- Low resistance (Green light $\rightarrow 1 \leq R_x \leq 5$ ohms)
- Normal resistance (Blue light $\rightarrow 5 < R_x \leq 25$ ohms)
- High resistance (Red light $\rightarrow R_x > 25$ ohms + Beep)

The wiring diagram of alarming part can be seen in Figure 12.

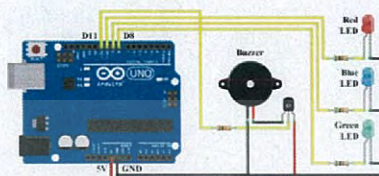


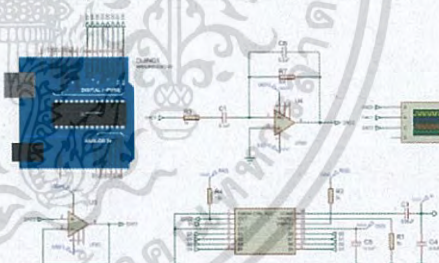
Figure 12. Arduino UNO and alarming devices connection

4 EXPERIMENTAL RESULTS

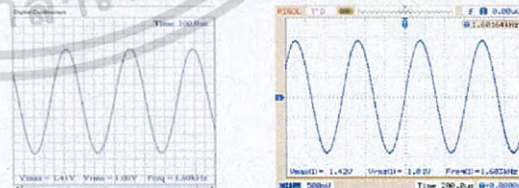
Two main experiments were set up to realize how well the proposed system implementation works. The first experiment (4.1) in this section is to simulate and reconstruct the proposed sinusoidal waveform generator (DAC). The second experiment (4.2) is to verify the accuracy of the ground-impedance measurement and calculation (ADC) including the overall system integration.

4.1 DAC Simulation and Actual Test Results

This research applied Proteus 7 Intelligent Schematic Input System (ISIS) in order to operate the system. A 1.6 kHz sinusoidal waveform with the amplitude of 1 Volt (RMS) is set to be the desired signal for this test. The schematic diagram of Proteus 7 ISIS set up is shown in Figure 13(a). The simulation result and a signal generated from the proposed device are illustrated in Figure 13(b.1) and 13(b.2) below.



(a) Schematic of sinusoidal waveform generator in this work



(b.1) Result from Proteus 7 - ISIS (b.2) Result from oscilloscope

Figure 13. Simulation and actual results of DAC

4.2 Accuracy Testing of Ground-Impedance Measurement

As mentioned before, the required variables are V_{out} and $V_{R(burden)}$ which equivalent to voltage and current in ground loop respectively. Arduino UNO has feature of ADC interrupt register that allow user to choose an ADC resolution of either

8 or 10 bits. This research uses 10 bits resolution with sampling rate of 16 samples per cycle by using TIMER1 interrupt register. This TIMER1 work using compare match interrupt mode, which is different from TIMER2 such that TIMER1 act as the time controller that informs ADC when to interrupt, so TIMER1 and ADC interrupt need to work simultaneously in this case. The 10 bits value of both required variables will then be received in 16 columns 10 rows array which is 10 cycles for each. After that the main microcontroller will then calculate RMS value of both variables by Equation 12 as mentioned-above and then be displayed via LCD monitor. Figure 14 presents the experimental set up. These experimental results can be seen from Table 2.



Figure 14. The experimental set up for accuracy testing

Table 2. The experimental results and related parameters value

Resistance (Ω)		Last year model		This year model				
Value	Tolerance	R (Ω)	Error (%)	U (V)	V _{out} (mV)	V _{injection} (mV)	R (Ω)	Error (%)
1.00	± 0.010	1.28	6.67	0.996	20.43	144.45	1.1	10.00
2.00	± 0.020	2.17	1.36	1.010	20.59	75.88	2.0	0.00
3.00	± 0.030	2.96	4.52	1.000	20.56	50.98	3.0	0.00
4.00	± 0.040	3.85	3.75	1.000	20.81	38.42	4.1	2.50
5.00	± 0.050	4.73	5.40	1.000	20.74	30.85	5.0	0.00
6.00	± 0.060	5.57	5.59	0.999	20.76	25.94	6.0	0.00
7.00	± 0.070	6.67	4.71	0.996	20.82	22.11	7.1	1.43
8.20	± 0.082	7.46	5.57	0.999	20.76	19.20	8.1	1.22
9.20	± 0.092	8.65	2.81	0.999	20.70	16.64	9.3	1.09
10.20	± 0.102	10.84	8.40	0.999	20.58	15.38	10.0	1.96
11.20	± 0.112	9.75	11.36	0.999	20.76	13.65	11.4	1.79
12.20	± 0.122	11.38	5.95	0.999	20.77	12.57	12.4	1.64
13.20	± 0.132	12.74	3.48	0.996	20.75	11.43	13.6	3.03
14.20	± 0.142	13.04	9.44	1.000	20.83	10.90	14.3	0.70
15.20	± 0.152	13.52	12.21	1.000	20.69	9.92	15.6	2.63
16.00	± 0.160	12.91	21.28	1.000	20.66	9.93	15.6	2.50
17.00	± 0.170	13.52	22.30	1.000	20.42	8.93	17.2	1.18
18.00	± 0.180	14.28	22.39	1.010	20.66	8.16	19.0	5.56
19.00	± 0.190	14.24	26.60	1.000	20.91	7.89	19.9	4.74
20.00	± 0.200	15.07	25.76	1.010	20.43	7.37	20.8	4.00
21.00	± 0.210			1.010	20.89	7.22	21.7	3.33
22.00	± 0.220			1.010	20.43	6.95	22.0	0.00
23.00	± 0.230			1.010	20.64	6.76	22.9	0.43
24.20	± 0.242			1.010	20.99	6.74	23.4	3.31
25.20	± 0.252			1.010	20.98	6.50	24.2	3.97
30.20	± 0.302			1.010	20.02	5.19	28.9	4.30
35.00	± 0.350			1.010	20.63	4.65	33.3	4.86
40.20	± 0.402			1.010	20.39	4.16	36.8	8.46
45.20	± 0.452			1.010	20.52	3.16	48.7	7.74
50.00	± 0.500			1.000	20.61	2.82	54.8	9.60
60.20	± 0.602			1.010	20.56	2.44	63.2	4.98
70.00	± 0.700			1.010	20.68	2.26	68.6	2.00
80.20	± 0.802			1.000	20.59	2.16	71.5	10.85
90.00	± 0.900			1.000	20.67	1.89	82.0	8.89
100.20	± 1.002			1.000	20.53	1.68	91.7	8.48

The results show that the proposed clamp-on ground-impedance measuring device in this research can work properly with the minimal percent error of ±10.85% in the range of 1-100 ohms resistance. However during the measurement of 50-100 ohms resistance, the results value swing rather much so some stability improvement are needed for the higher resistance range.

5 CONCLUSIONS

From the experimental results, it is clear that the proposed clamp-on ground-impedance measuring device in this paper works acceptably well with adequate efficient to measure in the range of 100 ohms resistance. The proposed method is capable of accurately performing with the maximum percentage of error at ±10.85% in the range of 1-100 ohms and ±5.56% in the range of 1-25 ohms. The experimental result has improved from the last year model, which can only measure in the range of 1-15 ohms with the maximum percentage of error at ±12.21%. The improved sections of this year model are: first is sinusoidal waveform generator section using DAC0800 chip combined with timer interrupt technique, second is variable ground resistance model using the low tolerance resistors and economize the use of them, third is ground-impedance measurement and calculation using ADC and timer interrupt technique and the last one is displaying and alarming section which is the combination of LCD with I2C connection and the LED and buzzer alarm.

ACKNOWLEDGMENT

This work is fully supported by Research and Researchers for Industries (RRI, TRF) scholarship. The authors would also like to thank parents and all Energy System and Illumination Research Center (ESIRC) members from KMITL for their support and valuable advices until this research is achieved.

REFERENCES

- [1] Guide to clamp-on ground testing, Megger Group Limited, 2013.
- [2] Principles, testing methods and applications, Fluke Corporation, 2010.
- [3] IEEE-81 standard, 2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, in Ground impedance, ed. United States of America, 2012, pp. 19-30.
- [4] IEEE-142 standard, 2007: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, in Connection to earth, ed. United States of America, 2007, pp. 161-185.
- [5] EIT Standard 2001-56, 2013: Thai electrical code, 2013.
- [6] J. He, R. Zeng, et al., Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 788-795, July 2003.
- [7] C. Hawrunpong, et al., A Prototype of Ground-Impedance Meter, Bachelor Degree, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.
- [8] C. Hawrunpong, S. Potvijajakul, and C. Chompoo-inwai, Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology, presented at *The International Conference on Electrical Engineering 2015*, The University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong, 2015.
- [9] L. Li, J. Zou, and H. Sun, Research on the New Clamp-on Ground Resistance On-line Tester Based on AC Variable Frequency, in *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006, pp. 5286-5289.
- [10] M. Banzl, *Getting Started with Arduino*, 2nd ed. U.S.A.: O'Reilly Media, Inc., 2011.

Contact E-mail Address: gan_chanoknun@hotmail.com, chompoooc@gmail.com



ICEE 2015

**The International Conference on
Electrical Engineering**
5 - 9 July 2015 Hong Kong

**Sustainable Electrical Engineering to
Third Industrial Revolution**



Organised by
HKIE HK E

Co-organised by
CSEE IEEJ KIEE



HKIE
HKIE

CO-ORGANISED BY
The Chinese Society for Electrical Engineering (CSEE)
The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ)
The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)

SPONSORED BY
CLP Power Hong Kong Limited
The Hongkong Electric Co Ltd
The MTR Corporation Limited

CLP 中電 **港燈 HK Electric** **MTR**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology

HAWNIRUNPONG, Chanoknun POTIVEJJAKUL, Siriwat CHOMPOO-INWAI, Chow

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok, THAILAND, 10520
gan_chanoknun@hotmail.com, chompoooc@gmail.com

Abstract

This paper proposed the design and implementation of the Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Modules Technology. Three major sections will be elaborated in this article. The first part is the ground-impedance measuring device which applies the open-ended clamp on magnetic core and Arduino microcontroller board as a central processing unit (CPU) for achieving ground-impedance parameters. The second part is the communication network based on XBee module technology. Three XBee-PRO Series 1 modules have been used in this work. The first two XBee modules act as routers receiving data from serial port (UART) of Arduino board and sending out to the network coordinator. Another XBee module acts as a network coordinator. The operating frequency of the proposed XBee network is at 2.4 GHz according to IEEE-802.15.4. The last section elaborates the user interface (UI) and the proposed system functionalities. Microsoft Visual Studio 2013 version is used for this. The user interface was designed such that it is simple, user-friendly, rich of features and customizable. After the completion of design and implementing, the extensive experimental results confirm the accuracy of the overall proposed design.

Keywords

Ground-Impedance measuring device, Arduino board, XBee Module, IEEE-802.15.4

1. INTRODUCTION

A general power system consists of three major systems i.e., Generation, Transmission and Distribution systems. A very good grounding system is a must for each system according to global standard. In general, a grounding system serves as the vital route for current to flow when faults occurred in the system for example lighting strike current, short circuit current and leakage current. It is crucial to have as low ground impedance value as possible just in case an unexpected severe fault does occur in the system. It is stated in Thailand code of practice [EIT-2001-50, 2013] "the ground impedance shall be less than or at least equal to 5 Ohm. Except in the area of grid-defined difficulties or the area that get special approval from the national grid, the ground impedance then might be acceptable for the value of less than 25 Ohm..."

Ground impedance values could be changed depending on the weather or external factors [HAWNIRUNPONG et al., 2013]. Therefore, regular inspections are

necessary. The key concept for this research is to design and create a prototype device such that it can perform like a smart electrical system grounding guard. This device shall be able to real-time check a ground impedance values of any power system. It should also be capable of doing the automatic alarm and notification when something wrong happens to the grounding system in order to protect the more valuable system. Nowadays, there are three types of the popularly-used ground impedance measuring devices: (1) the old-fashioned Megger type, (2) the single-clamp type and (3) the double-clamp type. The traditional Megger has several disadvantages i.e., requiring two extra auxiliary poles for each measurement, disconnecting circuit is a must for this type of measuring device, unreliable accuracy due to the use of only single low frequency in the measuring process and the last one is that the high possibility of human errors using the device. The key idea of the single-clamp type is trying to resolve the aforementioned problems of the tradition Megger. Neither two auxiliary poles nor circuit disconnection before measuring is required. However, the single-clamp type still applies a single low frequency method; therefore, the immature precision is still existed due to the V/I loop and environmental disturbances.

Today's, the double-clamp type becomes more and more popular and plays very significant roles in ground impedance measurements. The key idea of this method is quite similar to those of the single-clamp type but trying to improve the accuracy using separated current and voltage clamps to resolve the voltage/current loop problem. Another improvement is that the double-clamp type device applies automatically selected multi frequencies to be used in the measuring circuit to guarantee even more accuracy [LI et al., 2006]. Typical ground impedance measuring device with double-clamp methodology is shown in Figure 1 below.

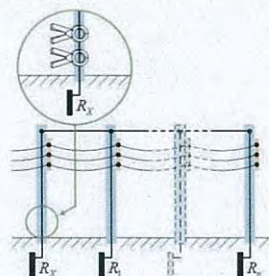


Fig.1 Typical ground-impedance measuring device with double-clamp methodology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The overall idea of this research paper is to develop the prototype of a ground-impedance monitoring network based on the double-clamp type concept for the measuring part and based on multi XBee module for the communication part. The system integration details and a variety of system capabilities and functionalities will be explained later in this paper.

2. PRINCIPLES AND RELATED THEORIES

2.1 Ground-Impedance Measuring Principle

This research measuring process is basically based on the ground-impedance methodology stated in IEEE standard [IEEE-81, 2012]. The grounding system of the typical power systems i.e., the power plant, the substation and individual power apparatus usually are multi-ground type neutral systems. The equivalent circuit of such a system can be seen in Figure 2.

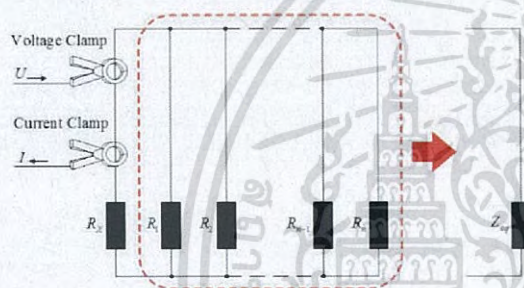


Fig.2 Equivalent circuit of the multi-ground neutral system

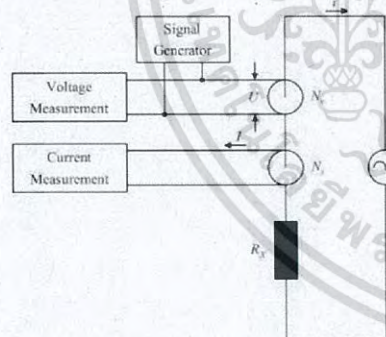


Fig.3 Simplified equivalent circuit of Figure 2

In Figure 2, U and I represent voltage clamp and current clamp respectively. R_x is the ground resistance of the ground electrode under the test. R_1, R_2, \dots, R_n are the ground resistance of the other rods of multi-ground neutral system. Z_{eq} is the summation of those R_1, R_2, \dots, R_n . The ground-impedance measuring method used in this paper is based on the assumption that $R_x \gg Z_{eq}$. Therefore, the measuring equivalent circuit can be simplified as shown in Figure 3. The variable N_v shown in Figure 3 stands for the turn number of voltage generator coil wound around the voltage clamp and similarly, N_i stands for the turn number of coil wound around the current clamp. During the measuring

process, the voltage generator coil generates a known low frequency constant AC voltage called U . A small voltage u is then induced in the circuit and can be computed from Equation 1.

$$u = \frac{U}{N_v} \tag{1}$$

The current i in the loop can be computed as Equation 2.

$$i = \frac{u}{R_x} \tag{2}$$

The current coil current I will be derived by Equation 3.

$$I = \frac{i}{N_i} \tag{3}$$

Finally, the ground resistance R_x is derived from Equation 4 and Equation 5.

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kU}{I} \tag{4}$$

$$k = \frac{1}{N_v N_i} \tag{5}$$

2.2 XBee Module Network

XBee module is the compatible radio device designed for wireless network communication. It was developed to be used in wireless communication that has low to medium data transfer rate. It usually is very low cost, low power consumption, and capable of installing for both indoor and outdoor uses [JUNPUT, 2013].

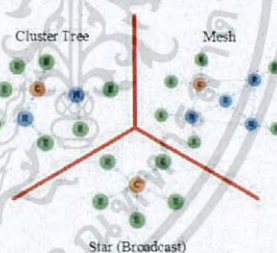


Fig.4 Three possible topologies of XBee module networks

XBee module or sometimes called ZigBee module defines the network layer and the application layer in the protocol stack. The nominal operating frequency of XBee network is at 2.4 GHz according to IEEE-802.15.4 (2011) Standard. There are three types of device in an XBee module network: a coordinator, a router, and an end device. An XBee module network is comprised of an XBee coordinator and multiple XBee routers/end-devices. The coordinator provides the initialization, maintenance, and control functions for the network. The router has a forwarding capability to route sensed data to a sink node. The end device lacks such a forwarding capability. XBee module supports three kinds of network topology, namely, Star (Broadcast), Cluster-Tree, and Mesh topologies. All three illustrations for each topology can be seen in Figure 4. In a Star network, multiple XBee end devices

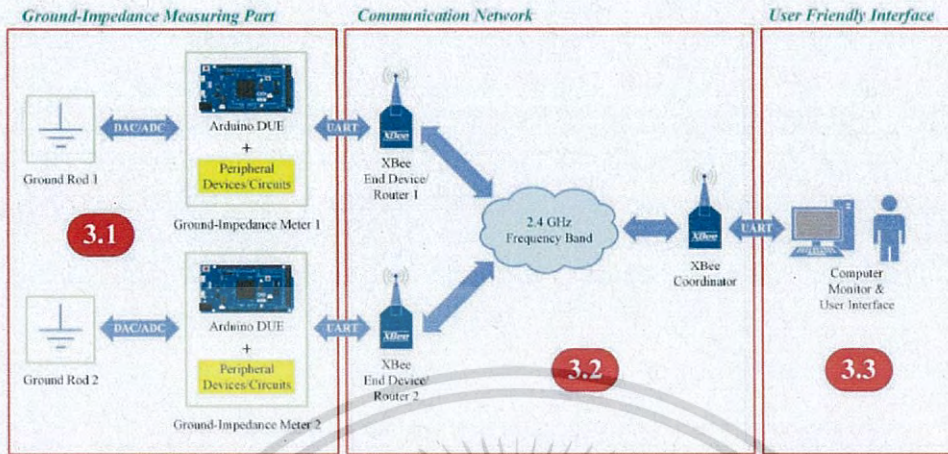


Fig.5 The proposed System Design for Ground-Impedance Monitoring Network in this work

connect directly to a single XBee coordinator. For Cluster-tree network and Mesh network, communications can be conducted in a multi-hop fashion through XBee routers. In a Cluster-Tree network, each XBee router with its surrounding devices is regarded as a respective cluster, and each cluster operates individually as a star network. Keep in mind that although the XBee Cluster-Tree network usually provides an effective solution for low power and low cost wireless sensor networking, the rigidity of the topology makes it vulnerable to link failures [KOUBAA A. et al., 2006].

3. THE PROPOSED SYSTEM DESIGN

The overall scope of work in this research for the proposed Ground-Impedance Monitoring Network consists of three major parts: (3.1) Ground-Impedance measuring part, (3.2) Communication network and (3.3) User friendly interface shown in Figure 5.

3.1 Ground-Impedance measuring part

3.1.1 Clamp-on Magnetic Core

Both of the voltage clamp and current clamp used in this paper are the open-ended magnetic cores. Figure 6 and 7 illustrates the external and internal physics of both magnetic cores, respectively. Both magnetic cores are physically separated from each other to protect the interferences between the two.

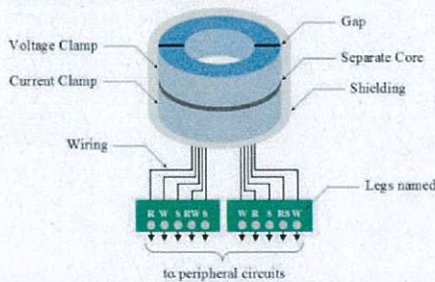


Fig.6 The external of both Clamp-on magnetic cores

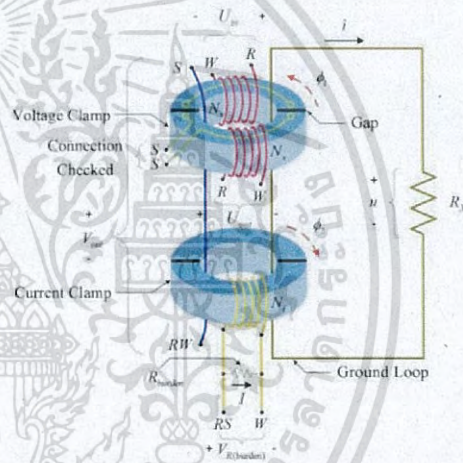


Fig.7 The internal of both Clamp-on magnetic cores

The basic idea is exactly according to the principles mentioned before in the previous section. Nevertheless, some parameters cannot be derived or computed directly in practice. The set of equations to compute the ground-impedance values then needs a little bit of modifications. A set of Equation 6 to Equation 11 will be applied in this paper instead.

$$\%Eff = \frac{U_{out}}{U_{in}} \cdot 100 \tag{6}$$

$$u \cong V_{out} \tag{7}$$

$$I = \frac{V_{R(burden)}}{R_{burden}} \tag{8}$$

$$i = N_i \cdot I \tag{9}$$

$$R_x = \frac{u}{i} = \frac{kV_{out}}{V_{R(burden)}} \tag{10}$$

$$k = \frac{R_{burden}}{N_i} \tag{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 Sinusoidal wave generator

In order to create the induced voltage and current in the ground loop under the test, the initial sinusoidal of known and fixed frequency must be feed into such a circuit through the voltage coil. In this research, a selection of the 2 kHz sinusoidal wave has been picked according to IEEE-81(2012) standard (recommended value between 1 kHz to 3.4 kHz).

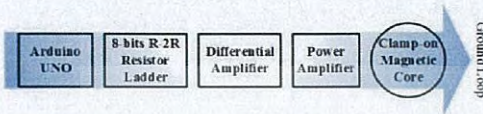


Fig.8 Block diagram of sinusoidal wave generator

Arduino UNO microcontroller board is used to generate digital type 2 kHz sinusoidal signal. An 8 bit R-2R resistance ladder circuit has been connected to serve as a digital to analog converter. A differential amplifier is then utilized to refine the DC offset issue from the microcontroller board. The clean sinusoidal signal will then be amplified by power amplifier circuit before feeding into the voltage magnetic coil to initiate the entire process mentioned in the previous section. Figure 8 illustrates the forwarding diagram of this flow.

3.1.3 Ground-Impedance Calculation

Figure 9 shows the flow diagram of ground-impedance calculation. The algorithm starts with condition checking of the magnetic core gap by microcontroller board called Arduino DUE. The command to generate a 2 kHz sinusoidal signal will then be sent to the Arduino UNO board via I2C bus. The root mean square (RMS) value of V_{out} and $V_{R(burden)}$ can then be calculated from Equation 12 and the ground resistance will be computed from Equation 10 mentioned before.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n-1}^2 + x_n^2}{n}} \quad (12)$$

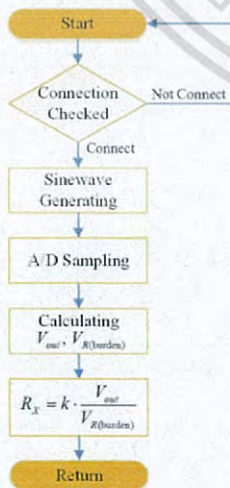


Fig.9 Flow chart of ground-impedance calculation

3.1.4 LCD Monitoring Display

The real-time measuring ground-impedance values computed from the Arduino DUE in this work will be displayed via the two lines LCD matrix display. The wiring diagram and system integration are shown as in Figure 10 below.

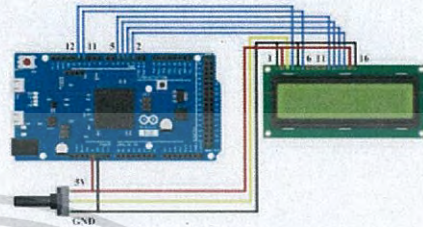


Fig.10 Arduino DUE and LCD display used in this work

3.2 XBee Communication Network Design

3.2.1 Star Network Configuration

The XBee module network in this work has been carefully chosen to use the Star network. Three XBee modules (XBee-Pro Series 1) have been utilized to form the operating network at the frequency range set to be 2.4 GHz. One of the three was set to be the coordinator. And the other two XBee modules were set to work as routers/end devices. The setting parameters for this configuration by X-CTU program are shown in Table 1 below. It should be noted here that the PAN-ID in Table 1 represents the network security code.

Parameters	DH	DL	PAN ID
Router 1	13A200	4033F477	8144
Router 2			
Coordinator	0	FFFF	
Communication	ROU1 ↔ COOR ↔ ROU2		

Table 1 XBee parameters setting

3.2.2 XBee Network Structure and Connections

The XBee network configuration in this work was constructed as shown in Figure 5 (part 3.2). Three XBee modules were used in this setting up. One is set to be the coordinator while the other two modules are set to be the routers/end devices. The wireless network is set to be the communication protocol among the three. The connection between the measuring part and the proposed XBee network uses the UART port between the Arduino DUE and the XBee breakout board as shown in Figure 11.

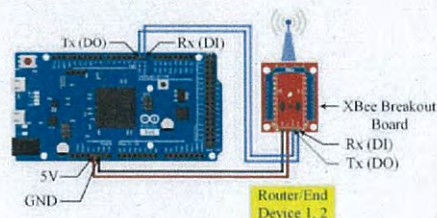


Fig.11 Arduino DUE and XBee module connection

Figure 12 illustrates the connection between the XBee coordinator (XBee USB Dongle) and the personal computer user interface via UART port also.



Fig.12 Computer and XBee module connection

3.3 User Friendly Interface Design

The user friendly interface design in this work has been written with the Visual Studio C# 2013 version. It can be seen in Figure 13. There are four key capabilities of this design:

- *Real-time display* for monitoring the measured ground-impedance value in both numeric and graphics forms.
- *Real-time monitoring status: low, normal and high* impedance stages (*low* status is shown when the ground impedance is lower than 1 ohm, *normal* status is set when the ground impedance is between 1-25 ohm and *high* status will be set when the ground impedance is higher than 25 ohms).
- *Customizable Alarm Function:* This feature is customizable. The range of when to alarm can be changed as desired.
- *Automatic Data Recorder:* This user interface was designed such that it is able to record the measuring ground-impedance values in both the spreadsheet form factor and also the comma separated values (CSV) file format.

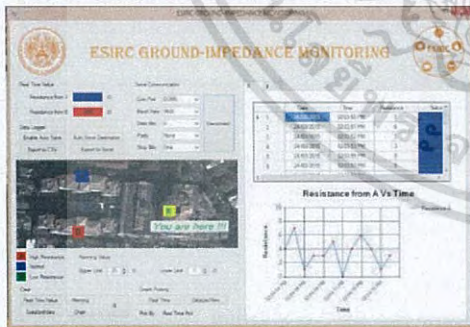


Fig.13 The user friendly interface window design

4. EXPERIMENTAL RESULTS

Three experiments were set up here to realize how well the system implementation works. The most important point here is to verify the accuracy of the proposed prototype. Then, how good is the network verified by the data transfer rate test (XBee range test). The last experimental results are to prove the proposed system reliability.

4.1 Verification of Ground-Impedance Measurement

This experiment has been done in the laboratory with strictly controlled conditions. The imitated ground resistance was simulated using a series of 25 one-ohm resistors. The proposed ground-impedance device is then connected to the system separately. The calibrated digital oscilloscope has been used to verify the relevant output parameters from the measuring circuit. The imitated ground resistance was varied from one to twenty five ohm gradually (one ohm increasing for each step of the experiment). Figure 14 below presents the experimental set up. These experimental results can be seen from Table 2.

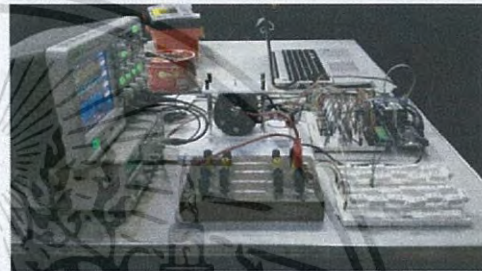


Fig.14 The experiment set up for accuracy verification

R (Ω)	U_{in} (R, W) (V)	U_{out} (W, R) (V)	V_{out} (RW, S) (mV)	$V_{R(burden)}$ (RS, W) (mV)	V_{out} (Read) (mV)	$V_{R(burden)}$ (Read) (mV)	R (Read) (Ω)	Erro (%)
1.20	1.98	1.86	81.60	453.00	82.69	452.30	1.28	6.6
2.20	1.97	1.83	81.20	277.00	83.42	268.99	2.17	1.3
3.10	1.98	1.84	82.00	208.00	83.69	197.74	2.96	4.5
4.00	1.99	1.86	82.00	165.00	83.88	152.70	3.85	3.7
5.00	1.94	1.82	80.40	133.00	82.61	122.36	4.73	5.4
5.90	1.94	1.82	80.00	122.00	81.86	102.81	5.57	5.5
7.00	1.94	1.82	80.40	100.00	81.72	85.70	6.67	4.7
7.90	1.96	1.84	80.80	84.70	81.88	76.82	7.46	5.5
8.90	1.96	1.84	80.80	73.30	81.20	65.73	8.65	2.8
10.00	1.97	1.86	81.20	63.50	81.19	52.41	10.84	8.4
11.00	1.97	1.86	81.20	57.70	81.28	58.38	9.75	11.3
12.10	1.97	1.86	81.20	48.70	81.76	50.31	11.38	5.9
13.20	1.96	1.86	81.60	45.30	81.42	44.75	12.74	3.4
14.40	1.96	1.84	80.80	41.60	81.39	43.68	13.04	9.4
15.40	1.94	1.84	80.80	38.40	81.55	42.22	13.52	12.2
16.40	1.95	1.86	81.60	35.80	82.62	44.81	12.91	21.2
17.40	1.96	1.84	81.20	32.00	82.86	42.89	13.52	22.3
18.40	1.97	1.86	81.60	30.70	82.96	40.67	14.28	22.3
19.40	1.97	1.87	81.60	29.10	82.91	40.76	14.24	26.6
20.30	1.98	1.87	81.60	27.10	82.71	38.41	15.07	25.7

Table 2 The experimental results where the resistance varies

It can be seen from the experimental results that the proposed ground-impedance measuring device works very well with the minimal %error in the range of low to medium resistance (1-10 ohm). There are of course some rooms for improvements here. The acceptable range of measuring from the experimental results yields the maximum of 8.40% error.

4.2 Data Transfer Rate (XBee Range Test)

This experiment main idea is to test the stability of the data transfer rate of the proposed configured network when performing under a variety conditions. One popularly used methodology is called the range test. Three XBee modules were set up as in Figure 5 (part 3.2). One acts as a coordinator and the other two

functions as the end device 1 and the end device 2. The criterion of the test is that the coordinator will send out 32 bytes signal via wireless network. After receiving signal; if any end device send the signal back to coordinator within one second, it will be counted as "Good", otherwise it will be counted as "Bad". The RSSI is another indicator to show signal strength. The X-CTU program will than compute the percentage of "Good" and "Bad" signals.

In this test setup, the coordinator is located inside the closed concrete room. One end device locates adjacent to the coordinator inside the closed acrylic box. And another end device locates about 300 feet outside such a room. The range test results are shown in Figure 15. The transfer rate of "Good" and "Bad" for the one near the coordinator is around 97 percent and the transfer rate for the one outside the room is around 80 percent. Both data transfer rates are quite acceptable and insure the stability of the proposed network configuration.

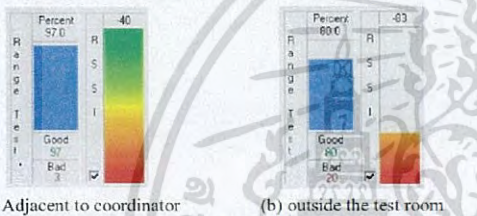
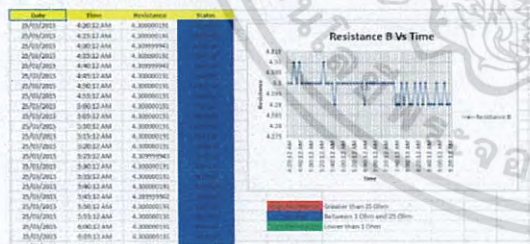


Fig.15 The range test result of end device 1 (a) and 2 (b)

4.3 The System Reliability and User Interface Test

After two verifications mentioned in 4.1 and 4.2, this test has been done to see if the proposed system is reliable enough to continuously perform. It is also to prove the data recording capability of this prototype in the same time.



(a) Excel file format example recorded for the proposed device

Date	Time	Resistance	Status	Date	Time	Resistance	Status
25/03/2012	4:20:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:20:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:25:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:25:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:30:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:30:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:35:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:35:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:40:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:40:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:45:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:45:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:50:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:50:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	4:55:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	4:55:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:00:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:00:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:05:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:05:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:10:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:10:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:15:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:15:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:20:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:20:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:25:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:25:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:30:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:30:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:35:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:35:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:40:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:40:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:45:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:45:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:50:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:50:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	5:55:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	5:55:12 AM	4.3	Normal
25/03/2012	6:00:12 AM	4.3	Normal	25/03/2012	6:00:12 AM	4.3	Normal

(b) CSV file format example recorded for the proposed device

Fig.16 Examples of the experimental results of reliability test

The test setup is that to continuously operate the proposed system for quite a long period of time (in this test about five hours, Figure 16 (a)). Let the system run in the real-time monitoring and recording mode. The date, time, ground resistance values and status will be recorded as a CSV file format for this test. The real-time graphical display is also test under the same condition. The statuses of the real-time measuring ground impedance are illustrated in colors: **Blue** means normal status, **Green** means low resistance status and **Red** means high resistance status which will need immediate attention from a system administrator. Figure 16 exemplifies of these experimental results.

5. CONCLUSIONS

It is clear from the experimental results that the proposed ground-impedance monitoring network in this paper works acceptably well with adequate efficient and reliable performances. The proposed method for ground-impedance measuring is capable of accurately performing with the maximum percentage of error at $\pm 8.40\%$ in the range of one to ten ohm. The star network configuration for the XBee module wireless communication is reliable and properly working as desired. The user friendly interface and relevant designed features are all able to get their job done. Since this work is still in the middle of the development, there are still plenty of rooms for improvements here. One possibility is to add the new feature to support the remote control and monitor via a today's popular smartphone or a tablet PC. Another possibility is that to utilize the higher grade of all the equipment for higher stability and reliability to be commercially used in the near future.

REFERENCES

EIT Standard 2001-50, 2013: Thai electrical code, 2013.

HAWNIRUNPONG, et al., A Prototype of Ground-Impedance Meter, Bachelor Degree, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.

LI, L., ZOU, J., and SUN, H., 2006, Research on the New Clamp-on Ground Resistance On-line Tester Based on AC Variable Frequency, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 2006: p5286-5289.

IEEE-81 standard, 2012: IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, in *Ground impedance*, ed. United States of America, 2012: p19-30.

JUNPUT, E., 2013, A Prototype of Three-Phase Smart Meter for Modern Grid Network, Master Degree, Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2013.

IEEE-802.15.4 standard, 2011: IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), ed. United States of America, 2011.

KOUBAA A., ALVES M., and TOVAR E., "Modeling and Worst-Case Dimensioning of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks," *Proceeding on IEEE Int'l Real-Time Systems Symp. (RTSS)*, Dec. 2006.

JUNPUT, E., BOONRUANGSRI, T., JITCHOBJAI, S., and CHOMPOO-INWAI, C.C., 2014, A Prototype of Three-Phase Smart Meter for Modern Grid Network, *The 20th International Conference on Electrical Engineering*, Jeju, Korea, 2014: p324-329.

ภาคผนวก จ

การเข้าร่วมประชุมเสนอผลงานและนิทรรศการที่จัดโดย สกว.

- จ.1 กิจกรรม RRI University Forum 2017 (กลุ่มอุตสาหกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์) วันจันทร์ที่ 6 กุมภาพันธ์ 2560 เวลา 08.30 – 16.00 น. ณ ห้องจามจุรีบอลรูม ชั้น M โรงแรมปทุมวัน ปริ้นเซส กรุงเทพมหานคร
- จ.2 งานประชุมวิชาการ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม ครั้งที่ 3 (RRI Congress III) วันจันทร์ที่ 24 กรกฎาคม 2560 เวลา 08.00 –16.00 น. ณ ห้องบอลรูม โซน A ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดประกายความคิด
สร้างเศรษฐกิจ ด้วย
พลังงานวิจัย
 Fueling Innovative Economy with R&D

วันที่ 24 กรกฎาคม 2560
 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

25th Anniversary
 ส.อ.ว. 2535-2560
 TRF 1992-2017

RRI
 ส.อ.ว.

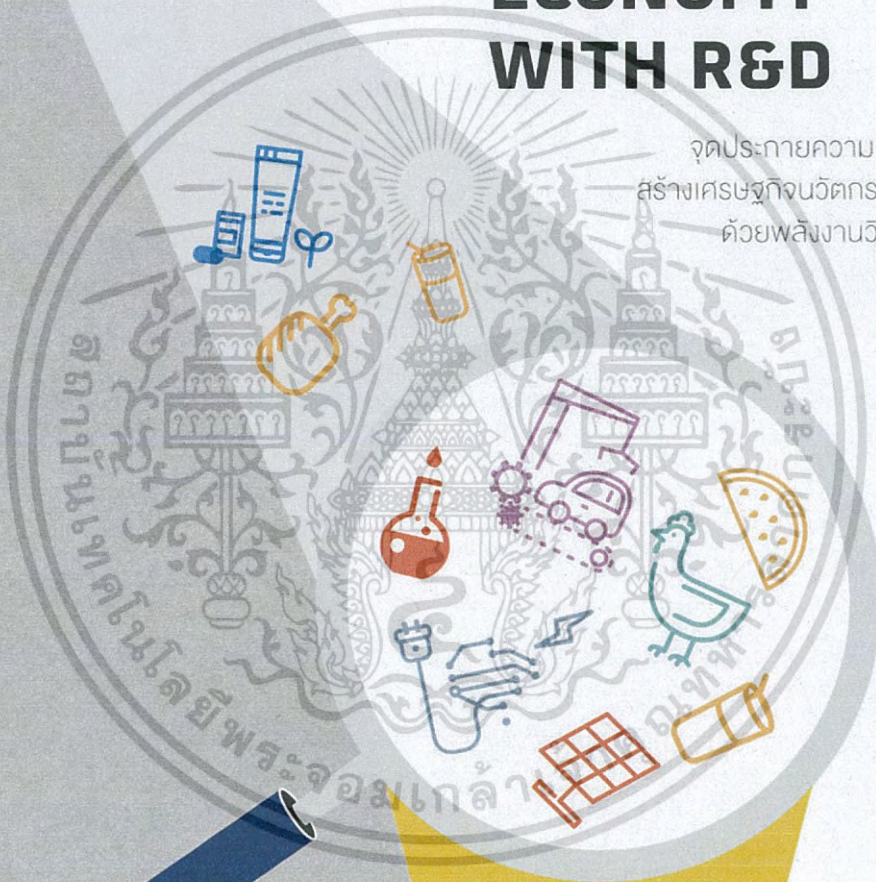
BETAGRO SEAGATE King CR8UP SCG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FUELING INNOVATIVE ECONOMY WITH R&D

จุดประกายความคิด
สร้างเศรษฐกิจนวัตกรรม
ด้วยพลังงานวิจัย



ประชุมวิชาการโครงการพัฒนานักวิจัย
และงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม
ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์

ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี	108
Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology	
การออกแบบวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของตัวจับเร้าแบบสองสถานะที่จับด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	114
Design Analysis and Performance Evaluation of Piezoelectric PMN-PT based Dual-Stage Actuator for Hard Disk Drives	
การพัฒนาโลหะผสมทองขาว 18 กะรัต ไม่มีนิกเกิล สำหรับงานหล่อเครื่องประดับมีค่า	116
Development of 18 Karat Ni-free White Gold Alloys for Precious Jewelry Casting	
สัมมนาพิเศษ	
นวัตกรรมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์แห่งอนาคต	118
เล่นแร่แปรทองขาว	126

โลหะ ยานยนต์ ขนส่ง และโลจิสติกส์

การวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากผลต่างความดัน และสัญญาณของหัวฉีดเชื้อเพลิง	138
Metering Fuel Consumption from Pressure Difference and Signal of Fuel Injector	
การลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตเครื่องเคลือบสีลาดลโดยใช้เทคนิคซิกมาซิกม่า	143
Reduction of Defective Products in Glaze Production Process Using Six Sigma Technique	
การพัฒนาต้นแบบรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน สำหรับประเทศไทย	145
Development of an Electric Bus Prototype Using Lithium-Ion Battery for Thailand	

พลังงาน สิ่งแวดล้อม และปิโตรเคมี

การผลิตและการใช้เอนไซม์เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบนเส้นใยสับปะรด	150
Production and Application of Multi-Enzyme for Pineapple Fiber Scouring	
โรงงานต้นแบบการบำบัดน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิงจากการแปรรูปยางแผ่นด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบกุ่มลอย	154
Plant Prototype of Sulfide Contamination Wastewater Treatment from Rubber Sheet Process by Float Cathode Microbial Fuel Cell	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน ด้วยเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี

Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology

ผู้ทำวิจัย

นายชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์
ผศ.ดร.เชาว์ ชมภูอินไหว

ที่อยู่ผู้ทำวิจัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำสำคัญ

เครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์, บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino, โมดูลเอ็กซ์บี, มาตรฐาน IEEE-81 (2012), มาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011)

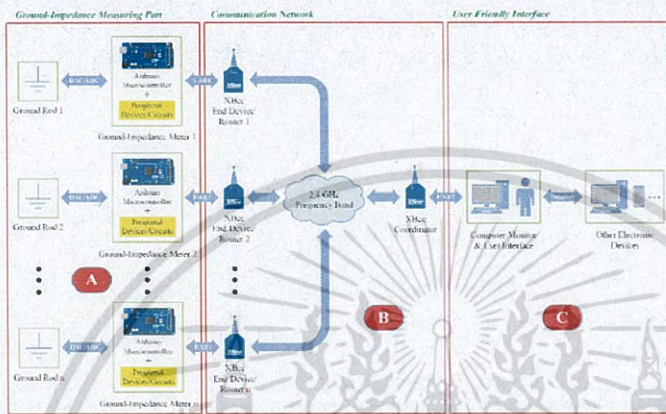
สรุปรายละเอียดงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอหลักการและวิธีการในการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์คู่ โดยใช้เทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บีสร้างเป็นระบบโครงข่ายการวัดประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรกคือ ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measuring Part) ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวประมวลผลหลักในการทำงาน อันได้แก่ การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก (DAC) สร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1.6 kHz เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลภายในลูปค่าความต้านทานการต่อลงดิน ตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC) เพื่อวัดค่ากระแสที่ไหลภายในลูปค่าความต้านทานการต่อลงดิน การติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม (UART) กับโมดูลเอ็กซ์บี และการแสดงผลค่าความต้านทานการต่อลงดินรวมถึงการแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์ภายนอก

ส่วนที่สองคือ ส่วนเครือข่ายการสื่อสาร (Communication Network) นำเอาเทคโนโลยีของโมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module Technology) มาใช้ เพื่อสร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ภาพรวมของระบบโครงข่ายการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

Network) ที่สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินกับคอมพิวเตอร์ หอควบคุม โดยทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011) และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Friendly Interface) นำเอาโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 มาใช้เขียนหน้าต่างโปรแกรมในการจัดการและแสดงผลข้อมูลต่อผู้ใช้งาน

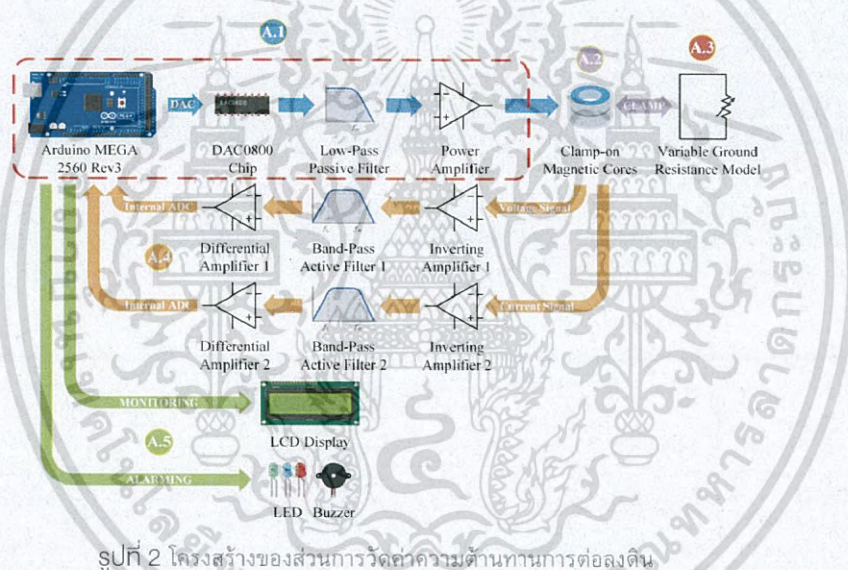
จากผลการทดลองพบว่า ต้นแบบเครื่องวัดที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าความต้านทานได้ตั้งแต่ 1 ถึง 100 โอห์ม โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน $\pm 5.00\%$ และสามารถส่งข้อมูลของค่าความต้านทานที่วัดได้แบบไร้สายไปแสดงผลแบบเรียลไทม์ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ และแจ้งเตือนเมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงที่กำหนด นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนขอบเขตบน-ล่างในการแจ้งเตือน และสามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์ต่อไป

ส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดิน

โครงสร้างของส่วนการวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินในรูปที่ 1 ส่วน A แบ่งออกเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 ส่วนย่อย ได้แก่ ส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Waveform Generator) แทนเป็น A.1 แกนแม่เหล็ก (Measuring Magnetic Core) แทนเป็น A.2 ความต้านทานการต่อลงดินจำลอง (Variable Ground Resistance Model) แทนเป็น A.3 ส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดิน (Ground-Impedance Measurement and Calculation) แทนเป็น A.4 และส่วนการแสดงผลและแจ้งเตือน (Monitoring and Alarming Section) แทนเป็น A.5 ดังแสดงในรูปที่ 2



องค์ประกอบของโครงสร้างในแต่ละส่วนต้องทำงานสอดคล้องกัน เริ่มจากส่วนกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์สร้างแรงดันรูปคลื่นไซน์ความถี่ 1.6 kHz อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-81 (2012) ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) $1 V_{rms}$ ที่ความละเอียด 32 จุดต่อลูกคลื่น ผ่านชิปแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (Digital-to-Analog Converter: DAC) วงจรรองความถี่ (Filter) และวงจรรขยายกำลัง (Power Amplifier) จ่ายให้กับขดลวดที่พันรอบแกนแม่เหล็กแรงดัน เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในลูปความต้านทานการต่อลงดินจำลอง จากนั้นส่วนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานการต่อลงดินจะตรวจจับกระแสดังกล่าวผ่านขดลวดที่พันรอบแกนแม่เหล็กเพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter: ADC) และคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS) ของสัญญาณ

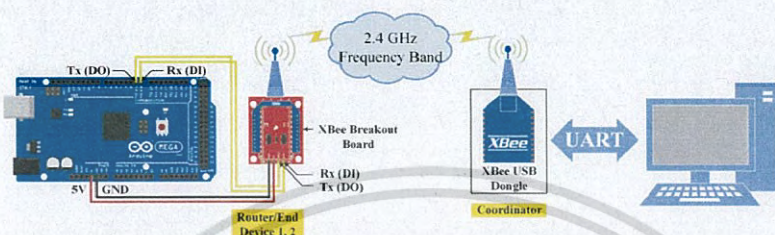
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันและกระแสที่ไหลในรูปความต้านทานการต่อลงดินด้วยความละเอียด 10 บิต อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) 8 จุดต่อลูกคลื่น แล้วนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณค่าความต้านทานในไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นจึงแสดงผลบนจอแอลซีดี (LCD) และส่งค่าความต้านทานที่คำนวณได้ผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) ให้โมดูลเอ็กซ์บี (XBee Module) และใช้แอลอีดี (LED) ทำงานร่วมกับกริ่ง (Buzzer) ในการแจ้งเตือนเมื่อค่าที่วัดได้มีค่าเกินเหนือจากช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนด

ส่วนเครื่องข่ายการสื่อสาร

ส่วนเครื่องข่ายการสื่อสารในรูปที่ 1 ส่วน B ใช้รูปแบบของเครื่องข่ายการสื่อสารรูปแบบดาว (Star, Broadcast) อย่างง่ายเพื่อเป็นการศึกษาโมดูลเอ็กซ์บีเบื้องต้น โดยนำเอาโมดูลเอ็กซ์บี 3 ตัวมาใช้สร้างเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) โมดูลเอ็กซ์บี 2 ตัวแรกทำหน้าที่เป็น End Device รับค่าความต้านทานการต่อลงดินที่คำนวณได้จากต้นแบบเครื่องวัดแต่ละเครื่องผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port Communication, UART) ซึ่งคือขาใช้งานที่ D1 (Digital I/O Pin 1) ของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 Rev3 ทำหน้าที่เป็น DO (Digital Output) หรือ Tx (Transmitter) เชื่อมต่ออยู่กับขา DI (Digital Input) หรือ Rx (Receiver) ของโมดูลเอ็กซ์บีผ่านบอร์ดที่ใช้ในการโปรแกรมเอ็กซ์บี (XBee Breakout Board) เพื่อแปลงระดับแรงดันจาก 5 V เป็น 3.3 V จากนั้นข้อมูลค่าความต้านทานการต่อลงดินจึงถูกส่งแบบไร้สายผ่านย่านความถี่ 2.4 GHz อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-802.15.4 (2011) ไปยังเอ็กซ์บีตัวรับอีกตัว ซึ่งทำหน้าที่เป็น Coordinator ที่เชื่อมต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ผ่านตัวแปลงยูเอสบีของเอ็กซ์บี (XBee USB Dongle) เพื่อแสดงผลและเก็บข้อมูลค่าดังกล่าวต่อไป แผนผังการเชื่อมต่อและการทำงานของเครื่องข่ายแบบไร้สายด้วยโมดูลเอ็กซ์บี แสดงดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

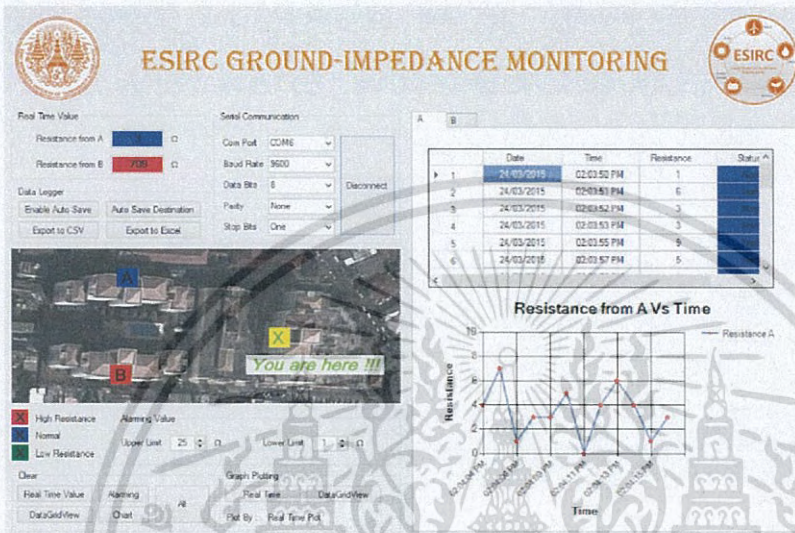


รูปที่ 3 แผนผังการเชื่อมต่อและการทำงานของ การสื่อสารแบบไร้สายด้วยโมดูลเอ็กซ์บี

ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

ส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานในรูปแบบที่ 1 ส่วน C นำเอาโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2013 มาใช้เขียนโปรแกรมด้วยภาษา C# ในโหมดการทำงานแบบหน้าต่างโปรแกรม (Window Application) โดยหน้าต่างโปรแกรมที่สร้างขึ้นประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphic User Interface: GUI) ส่วนการจัดการข้อมูล (Data Management System: DMS) ส่วนการแสดงผล (Displaying) และส่วนการแจ้งเตือน (Alarming) ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้งานมีหน้าที่ทำให้ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนการตั้งค่าต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน โดยสามารถกำหนดค่าในการเก็บข้อมูล และสามารถปรับเปลี่ยนขอบเขตบนและล่างของค่าความต้านทานที่ต้องการแจ้งเตือน ส่วนการจัดการข้อมูลมีหน้าที่บันทึกข้อมูลของค่าที่วัดได้เป็นไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ พร้อมทั้งบอกวัน-เวลา-สถานที่ในการเก็บข้อมูล ส่วนการแสดงผลทำหน้าที่แสดงผลค่าที่ได้รับในตารางของข้อมูล และวาดกราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานที่วัดได้กับเวลา และส่วนการแจ้งเตือนทำหน้าที่แจ้งเตือนบนหน้าจอแผนที่ถึงจุดที่เกิดความผิดปกติเมื่อค่าความต้านทานการต่อลงดินที่วัดได้มีค่านอกเหนือจากช่วงของค่าความต้านทานที่กำหนดไว้ หน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานที่ออกแบบขึ้น แสดงดังรูปที่ 4

วิศวกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4 หน้าต่างโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้ซึ่งแสดงผลออกมาเป็น

หน่วยงานที่ร่วมให้การสนับสนุน บริษัท ฟรีโมเทค (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	6 กันยายน 2534 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	207/2 ถนนพัทลุง ตำบลทับเที่ยง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง 92000
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานทางวิชาการ

1. ชนกนันท์ หอนิรันดร์พงศ์ และเชาว์ ชมภูอินไหว, “ต้นแบบเครื่องวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินแบบแคลมป์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 (E-NETT13), โรงแรม ดีเอ็มเพรส เชียงใหม่, มิถุนายน 2560.
2. C. Hawnirunpong, M. Leelajindakraierk, S. Potivejjakul and C. Chompoo-inwai, “The Accuracy and Measuring Range Improvements on Measuring Part of a Ground-Impedance Monitoring Network Prototype”, *The International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE 2016)*, Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan, July 2016.
3. C. Hawnirunpong, S. Potivejjakul and C. Chompoo-inwai, “Ground-Impedance Monitoring Network Based on Multi XBee Module Technology”, *The International Conference on Electrical Engineering 2015 (ICEE 2015)*, The University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong, July 2015.