การพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ขนาดพกพา

DEVELOPMENT OF PORTABLE IMPEDANCE MEASURING DEVICE

ศุภสัณห์ เกียรติบุญศรี
SUPASAN KIATBOONSRI

สรวิชญ์ อุดมเฉลิมเดช
SORAWIT UDOMCHALERMDEJ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

การพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ขนาดพกพา

DEVELOPMENT OF PORTABLE IMPEDANCE MEASURING DEVICE

ศุภสัณห์ เกียรติบุญศรี
SUPASAN KIATBOONSRI

สรวิชญ์ อุดมเฉลิมเดช
SORAWIT UDOMCHALERMDEJ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ขนาดพกพา

DEVELOPMENT OF PORTABLE IMPEDANCE MEASURING DEVICE

โดย

ศุภสัณห์ เกียรติบุญศรี

สรวิชญ์ อุดมเฉลิมเดช

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ยศศิริ อาริยะกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ขนาดพกพา

DEVELOPMENT OF PORTABLE IMPEDANCE MEASURING DEVICE

ผู้จัดทำ นายศุภสัณห์ เกียรติบุญศรี รหัสประจำตัว 56011253

นายสรวิชญ์ อุดมเฉลิมเดช รหัสประจำตัว 56011274

ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(ดร.ยศศิริ อาริยะกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ขนาดพกพา
นักศึกษา	นายศุภสัณห์ เกียรติบุญศรี รหัสประจำตัว 56011253
	นายสรวิชญ์ อุดมเฉลิมเดช รหัสประจำตัว 56011274
ปริญญา	วิศวกรรมบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	ดร.ยศศิริ อาริยะกุล

บทคัดย่อ

อิมพีแดนซ์เป็นหนึ่งในคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญและสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุที่สนใจเพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ อย่างไรก็ตาม เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่มีขายในท้องตลาดนั้นโดยทั่วไปมักเป็นแบบอเนกประสงค์ที่มีขนาดใหญ่และมีราคาสูง เนื่องจากมีการทำงานที่ซับซ้อน สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์หลายค่าในย่านความถี่ได้ในคราวเดียว ในปริญญานิพนธ์นี้จึงทำการพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์อย่างง่ายที่สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้แม่นยำที่ค่าความถี่ที่ต้องการโดยใช้โมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance Measurement 5933-V0.1 ที่ใช้วงจรรวมความละเอียดสูงสำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์เบอร์ AD5933 ส่งผลให้เครื่องมีขนาดเล็กเหมาะสำหรับการนำไปต่อยอดการใช้งานในงานเฉพาะด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Development of Portable Impedance Measuring Device
Student	Mr. Supasan Kiatboonsri Student ID 56011253
	Mr. Sorawit Udomchalermdej Student ID 56011274
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Dr. Yossiri Ariyakul

ABSTRACT

Impedance is an important electrical property that can be used in various applications. For example, measuring impedance of materials to evaluate their properties. Since commercial impedance measuring devices are generally multi-purpose, huge and expensive due to their complex structure and operation to measure multiple point of impedances in a frequency span at once. Thus, a simple impedance measuring device that can measure impedance accurately at a desired frequency was developed in this project by using Impedance Measurement module 5933-V0.1 composed of high precision impedance converter system IC, AD5933. The proposed impedance measuring device is compact and can be used in further applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก ดร.ยศศิริ อาริยะกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งอาจารย์ได้สอนรวมถึงให้คำแนะนำ ตรวจทาน แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เพื่อให้ปริญญานิพนธ์สมบูรณ์ที่สุด รวมถึง ผศ.ดร.ดอน อิศรากร อาจารย์ภาควิชาระบบควบคุมที่ให้ยืมใช้เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ Bode 100 สำหรับเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น อีกทั้งทางผู้จัดทำขอแสดงความขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมดอีกด้วย

ศุภสัณห์ เกียรติบุญศรี
สรวิชญ์ อุดมเฉลิมเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

Abstract II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์และความมุ่งหมายของการศึกษา 1

1.3 สมมุติฐานการทดลอง 1

1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน 1

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 1

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2

2.1 บทนำ 2

2.2 อิมพีแดนซ์ 2

2.3 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ 3

2.3.1 วิธีการวัดแบบ I-V 3

2.3.2 วิธีการวัดค่าแรงดันสองตำแหน่ง 3

2.3.3 วิธีการวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง 5

2.3.4 วิธีการวัดแบบบริดจ์ 6

2.4 Arduino 8

2.5 การสื่อสารแบบ I^2C 8

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 11

3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ 11

3.2 โมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ 11

3.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์ลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 13

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1 การออกแบบขั้นตอนการทำการทดลอง 18
4.2 การทดสอบโดยใช้อิมพีแดนซ์มิเตอร์ 19
4.3 การทดสอบโดยใช้เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น 19
4.4 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง 40
4.5 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดและเฟสของค่าอิมพีแดนซ์ 53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 55
5.1 สรุปผลการทดลอง 55
5.2 ข้อเสนอแนะ 55
บรรณานุกรม 56
ภาคผนวก 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 เวกเตอร์แสดงการหาค่าอิมพีแดนซ์ 2

2.2 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบ I-V 3

2.3 การวัดค่ากระแส I ด้วยตัวต้านทานชันท์และโวลต์มิเตอร์ 4

2.4 การวัดค่ากระแส I ด้วยวงจรขยายค่าความต้านทานทานที่ใช้ตัวต้านทานป้อนกลับและโวลต์มิเตอร์ 4

2.5 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบวัดค่าแรงดันสองตำแหน่ง 5

2.6 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง 5

2.7 เฟสไดอะแกรมของวงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง 5

2.8 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์ 6

2.9 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์ในแบบต่างๆ 7

2.10 วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์บริดจ์แบบสัดส่วน 8

2.11 Timing diagram ของการสื่อสารข้อมูลแบบ I^2C 10

3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ 11

3.2 บล๊อกโครงสร้างภายในชิป AD5933 12

3.3 ส่วน Transmit stage ของวงจรรวม AD5933 12

3.4 ส่วน Receive stage ของวงจรรวม AD5933 13

3.5 การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลวัดอิมพีแดนซ์และไมโครคอนโทรลเลอร์ 13

3.6 ตัวอย่างคำสั่งที่โปรแกรมลงบนบอร์ด Arduino 14

3.7 ตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์ที่ Serial monitor ใน Arduino IDE 15

3.8 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3 15

3.9 ขั้นตอนการตั้งเงื่อนไขสำหรับการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Arduino IDE 16

3.10 ขั้นตอนการคำนวณสำหรับการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Arduino IDE 17

4.1 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 997 Ω 19

4.2 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 1.993 kΩ 20

4.3 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ 20

4.4 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 9.95 kΩ 21

4.5 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 49.9 kΩ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.6 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 99.8 kΩ 22
4.7 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 201.5 kΩ 22
4.8 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 501 kΩ 23
4.9 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 1 MΩ 23
4.10 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5.05 MΩ 24
4.11 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 10.04 MΩ 24
4.12 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 1.5 pF 25
4.13 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 6 pF 25
4.14 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 15 pF 26
4.15 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 20 pF 26
4.16 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 33 pF 27
4.17 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 47 pF 27
4.18 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 68 pF 28
4.19 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 150 pF 28
4.20 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 330 pF 29
4.21 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 470 pF 29
4.22 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 680 pF 30
4.23 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 1500 pF 30
4.24 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 3300 pF 31
4.25 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 4700 pF 31
4.26 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 6800 pF 32
4.27 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 4.99 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 4700 pF 32
4.28 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 1500 pF 33
4.29 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 3300 pF 33
4.30 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 6800 pF 34
4.31 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของบตัวต้านทาน 20.4 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 330 pF 34
4.32 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 50 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 68 pF 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.33 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 99.9 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 33 pF 35

4.34 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 202.3 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 47 pF 36

4.35 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 202.4 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 15 pF 36

4.36 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 202.5 kΩ ต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 33 pF 37

4.37 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 9.95 kΩ ต่อขนานตัวเก็บประจุ 680 pF 37

4.38 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 49.9 kΩ ต่อขนานตัวเก็บประจุ 68 pF 38

4.39 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 50 kΩ ต่อขนานตัวเก็บประจุ 150 pF 38

4.40 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 100.6 kΩ ต่อขนานตัวเก็บประจุ 47 pF 39

4.41 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 201.2 kΩ ต่อขนานตัวเก็บประจุ 20 pF 39

4.42 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 503 kΩ ต่อขนานตัวเก็บประจุ 15pF 40

4.43 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวต้านทาน 41

4.44 รูปขยายรูปที่ 4.43 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 - 100% 42

4.45 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทาน 43

4.46 รูปขยายรูปที่ 4.45 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 - 100% 44

4.47 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวเก็บประจุ 45

4.48 รูปขยายรูปที่ 4.47 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 - 100% 46

4.49 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวเก็บประจุ 47

4.50 รูปขยายรูปที่ 4.50 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 - 100% 48

4.51 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวต้านทานต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ 49

4.52 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 50

4.53 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.54 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 52

4.55 กราฟผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของอิมพีแดนซ์กับช่วงของอิมพีแดนซ์ 53

4.56 รูปขยายรูปที่ 4.55 ในช่วงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 0 - 1000 kΩ 53

4.57 กราฟผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของมุมเฟสกับความถี่ 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปริมาณทางไฟฟ้าทั่วไป เช่น กระแสหรือแรงดัน สามารถถูกอ่านค่าได้โดยใช้ แอมป์มิเตอร์ (Amp meter) หรือ โวลต์มิเตอร์ (Volt meter) เป็นต้น โดยหนึ่งในคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ คือ อิมพิแดนซ์ (Impedance) การวัดค่าอิมพีแดนซ์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้วัดอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ไม่ทราบประเภท ใช้เป็นเครื่องวัดปริมาณไขมันในร่างกายจากค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างแขนและขา เป็นต้น อย่างไรก็ตามเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์ส่วนใหญ่ในปัจจุบันนั้นจะสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้ในช่วงความถี่ที่กว้างมาก ในขณะที่สามารถกวาดความถี่ (Frequency sweep) ได้อย่างละเอียด ทำให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ส่งผลให้ราคาสูง และมีขนาดใหญ่

1.2 วัตถุประสงค์และความมุ่งหมายของการศึกษา

จากข้อจำกัดของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ส่วนใหญ่ดังอธิบายในหัวข้อ 1.1 ในปริญญานิพนธ์นี้จึงจะทำการพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์อย่างง่ายที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถกวาดความถี่ได้อย่างละเอียดในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ เหมาะกับการนำไปใช้ในงานประยุกต์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดอิมพีแดนซ์ต่อไป

1.3 สมมติฐานทางการทดลอง

การพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ขนาดพกพาโดยใช้โมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance Measurement 5933-V0.1 ที่ใช้วงจรรวมความละเอียดสูงสำหรับวัดค่าอิมพีแดนซ์เบอร์ AD5933 จะทำให้สามารถสร้างเป็นเครื่องวัดอิมพีแดนซ์อย่างง่ายที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถกวาดความถี่ได้อย่างละเอียดในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ โดยการเชื่อมต่อโมดูลดังกล่าวเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์และตั้งค่าการสื่อสารให้ถูกต้อง จะทำให้ค่าที่วัดได้สามารถถูกส่งไปประมวลผลในไมโครคอนโทรลเลอร์ และสามารถถูกส่งต่อไปแสดงผลยังส่วนแสดงผลต่อไปได้

1.4 ขอบเขตของการดำเนินงาน

ทำการออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ให้สามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ กล่าวคือ ขนาดของอิมพีแดนซ์ และค่าเฟสของอุปกรณ์ที่นำมาวัดค่าได้ถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ สามารถกวาดความถี่ได้อย่างละเอียดในช่วงความถี่ช่วงหนึ่ง โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่เดือน สิงหาคม 2559 จนถึงเดือน เมษายน 2560

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

เครื่องวัดอิมพีแดนซ์อย่างง่ายที่มีขนาดเล็ก และราคาถูก ที่พัฒนาขึ้น สามารถถูกนำไปใช้ในงานประยุกต์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดอิมพีแดนซ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานในปริญญานิพนธ์นี้ ได้แก่นิยามค่าอิมพีแดนซ์ วิธีต่างๆในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ ไปจนถึงเรื่องของ FPGA รวมถึงการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล และการส่งผ่านข้อมูลผ่าน I^2C Bus

2.2 อิมพีแดนซ์

อิมพีแดนซ์ (impedance : Z) คือค่ารวมขององค์ประกอบทางไฟฟ้าทั้งหมดที่ต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นสิ่งทั้งหมดในวงจรที่ขวาง (impede) การไหลของกระแส มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ค่าอิมพีแดนซ์ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบคือส่วนของค่าความต้านทานและส่วนของค่ารีแอคแตนซ์ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$Z = R + jX \tag{2.1}$$

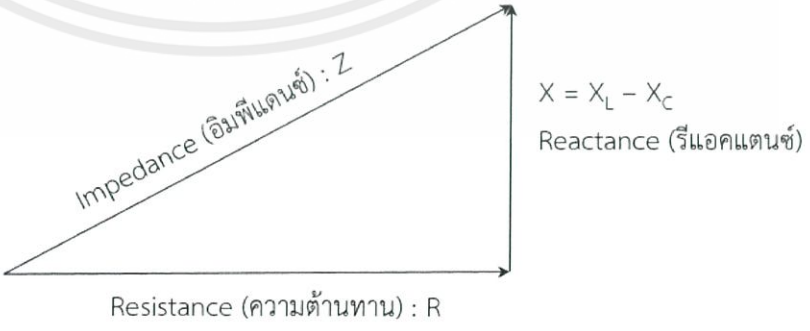
โดยในส่วนของค่าความต้านทานจะมีค่าไม่ขึ้นกับความถี่ ในขณะที่ส่วนของค่ารีแอคแตนซ์จะประกอบ ด้วยส่วนของค่ารีแอคแตนซ์จากความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (X_L) และค่ารีแอคแตซ์จากความจุไฟฟ้า (X_C) โดยค่าของค่ารีแอคแตนซ์นี้จะมีค่าขึ้นกับความถี่ ดังนี้

$$X = X_L - X_C \tag{2.2}$$

$$X_L = \omega L \tag{2.3}$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \tag{2.4}$$

ทั้งนี้สามารถเขียนแสดงค่าอิมพีแดนซ์ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.1 โดยขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ได้จาก $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ และมุมของค่าอิมพีแดนซ์ได้จาก $\emptyset = \tan^{-1}(X/R)$



รูปที่ 2.1 เวกเตอร์แสดงการหาค่าอิมพีแดนซ์

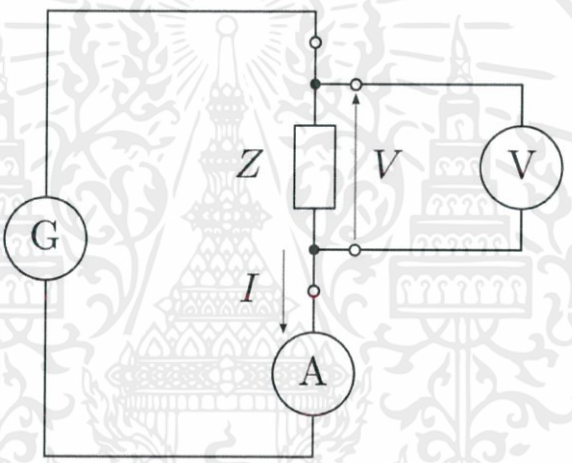
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การวัดค่าอิมพีแดนซ์

การวัดค่าอิมพีแดนซ์นั้นสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

2.3.1 วิธีวัดแบบ I-V

วิธีวัดแบบ I-V (I-V method) เป็นวิธีการที่เรียบง่ายที่สุดในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ เนื่องจากเป็นการวัดค่า V และค่า I จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์โดยตรงดังแสดงในรูปที่ 2.2 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการวัด Z จะถูกนำมาป้อนพลังงานด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน G จากนั้นทำการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่าน Z โดยใช้แอมมิเตอร์ A และวัดค่าที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม Z โดยใช้โวลต์มิเตอร์ V จะสามารถคำนวณหาค่าขนาดของ Z ได้จาก $|Z| = V/I$ ทั้งนี้โวลต์มิเตอร์ V และแอมมิเตอร์ A จะต้องเป็นเครื่องมือวัดแบบเวกเตอร์ที่สามารถวัดค่าเฟสได้ เมื่อ φv และ φi คือความต่างเฟสของแรงดันและกระแสที่วัดได้เมื่อเทียบกับเฟสอ้างอิง (Phase reference) จะสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ได้จาก $Z = \frac{V}{I} e^{[j(\varphi v - \varphi i)]}$



รูปที่ 2.2 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบ I-V

2.3.2 วิธีวัดค่าแรงดันสองตำแหน่ง

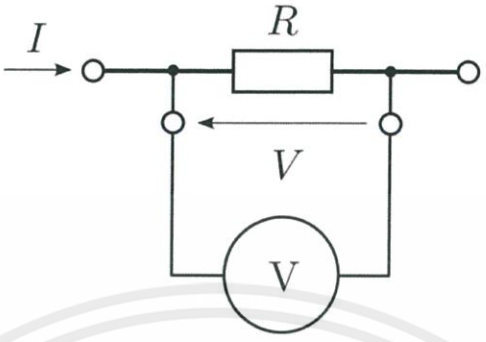
วิธีวัดค่าแรงดันสองตำแหน่ง (Two voltage Method) เป็นวิธีการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน (Current-to-voltage converter) แทนการใช้แอมมิเตอร์ในวิธีการวัดแบบ I-V วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดันดังกล่าวสามารถทำได้ 2 แบบได้แก่

1. โดยการใช้ตัวต้านทานชันท์ (Resistive shunt) ซึ่งเป็นตัวต้านทาน R ที่มีค่าน้อย และมีค่าคงที่ทางเวลา (Time constant) ต่ำมาต่อในเส้นทางที่กระแส I ไหลผ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเรียกแรงดันไฟฟ้า V ที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้ว่าแรงดันเบอร์เดน (Burden voltage) ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยโวลมิเตอร์ จากนั้นทำการคำนวณกลับด้วยกฎของโอห์มเพื่อหาค่ากระแส I ได้

   ทั้งนี้การแปลงกระแสเป็นแรงดันด้วยวิธีนี้ สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนได้จากค่าความต้านทานชันท์และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของโวลต์มิเตอร์ในกรณีที่ไม่ได้คำนึงถึงค่าทั้งสอง

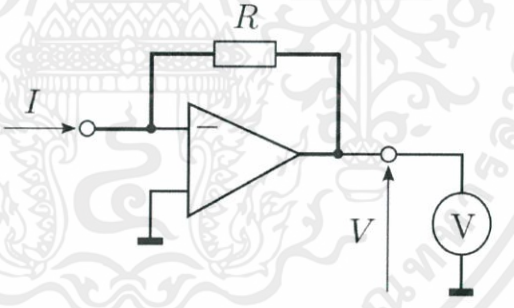
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบวัด และวิธีการใช้ตัวต้านทานชันท์ดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสำหรับการวัดกระแสที่มีค่าต่ำ



รูปที่ 2.3 การวัดค่ากระแส I ด้วยตัวต้านทานชันท์และโวลต์มิเตอร์

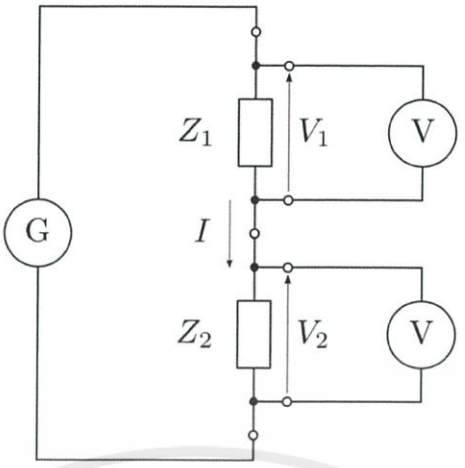
2. การใช้วงจรขยายค่าความต้านทาน (Transresistant amplifier) ซึ่งเป็นการใช้วงจรออปแอมป์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในกรณีที่ออปแอมป์เป็นอุดมคติ จะได้ว่าอัตราขยาย transresistance : G = V/I = -R เมื่อ R เป็นค่าความต้านทานป้อนกลับ (Feedback resistance) อย่างไรก็ตามวงจรขยายค่าความต้านทานในทางปฏิบัติจะมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับศูนย์ และมีผลตอบสนองความถี่ขึ้นกับค่าความจุไฟฟ้าที่ฝั่งขาเข้า ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพในการทำงานของวงจร [1]



รูปที่ 2.4 การวัดค่ากระแส I ด้วยวงจรขยายค่าความตัวต้านทานที่ใช้ตัวต้านทานป้อนกลับและโวลต์มิเตอร์

วิธีการวัดค่าแรงดันสองตำแหน่งนี้มีข้อดีเหนือกว่าวิธีการวัดแบบ I-V คือ สามารถลดความจำเป็นต้องใช้เวกเตอร์โวลต์มิเตอร์และเวกเตอร์แอมป์มิเตอร์อย่างละตัวเป็นการใช้เวกเตอร์โวลมิเตอร์เพียงตัวเดียวโดยออกแบบให้มีการสวิตช์การวัดตำแหน่งของแรงดันให้เหมาะสมพิจารณาวงจรในรูปที่ 2.5 จะได้ว่า $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{V_1}{V_2}$

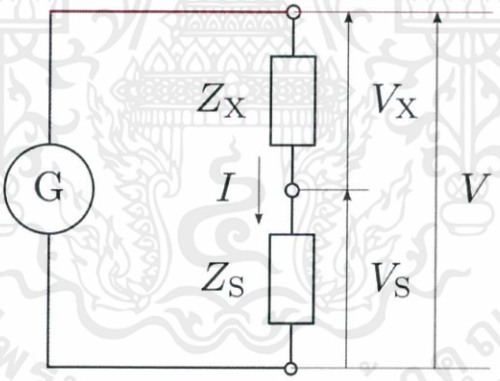
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



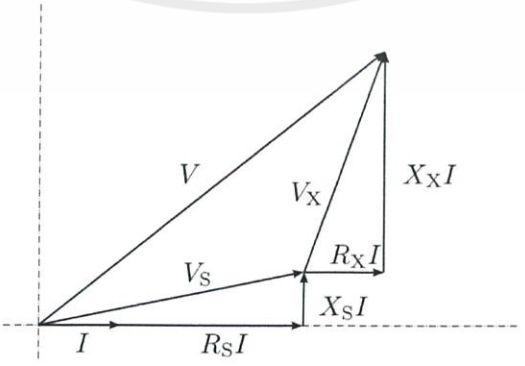
รูปที่ 2.5 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบวัดค่าแรงดันสองตำแหน่ง

2.3.3 วิธีวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง

จะอธิบายการวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง (Three-Voltage Method) ด้วยรูปที่ 2.6 อิมพีแดนซ์ที่ไม่ทราบค่า $Z_x = R_x + jX_x$ จะถูกต่ออนุกรมเข้ากับค่าอิมพีแดนซ์ที่ทราบค่า $Z_s = R_s + jX_s$ เมื่อกระแสเริ่มไหลจะมีแรงดัน V_x และ V_s ตกคร่อมที่ Z_x และ Z_s ตามลำดับ และค่าความต่างศักย์รวม $V = V_x + V_s$ และสามารถวัดค่าแรงดันทั้งสามตำแหน่งได้เป็นแบบ RMS โดยสามารถเขียนรูปของเฟสไดอะแกรมได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง



รูปที่ 2.7 เฟสไดอะแกรมของวงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบวัดค่าแรงดันสามตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 สามารถคำนวนค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$R_x = \alpha_B R_s - \alpha_A X_s \tag{2.5}$$

$$R_x = \alpha_B R_s - \alpha_A X_s \tag{2.6}$$

โดย α_A และ α_B สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{|V|}{|V_s|} \tag{2.7}$$

$$\alpha_x = \frac{|V_x|}{|V_s|} \tag{2.8}$$

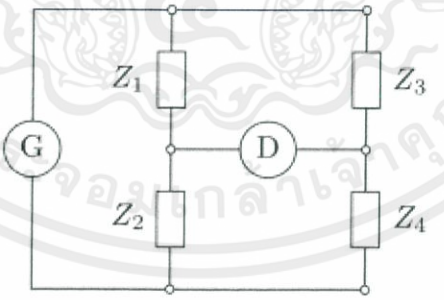
$$\alpha_A = \frac{1}{2}\sqrt{[1-(\alpha-\alpha_x)^2]\cdot[(\alpha+\alpha_x)^2-1]} \tag{2.9}$$

$$\alpha_B = \frac{1}{2}(\alpha^2-\alpha_x^2-1) \tag{2.10}$$

วิธีวัดค่าแรงดันสามตำแหน่งนี้มีข้อดีเหนือกว่าวิธีวัดค่าแรงดันสองตำแหน่งคือค่าแรงดันที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นคือค่าแรงดัน RMS ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยโวลต์มิเตอร์ทั่วไป ในขณะที่วิธีวัดค่าแรงดันสองตำแหน่งต้องการเวกเตอร์โวลต์มิเตอร์ซึ่งสร้างได้ยากกว่า

2.3.4 วิธีการวัดแบบบริดจ์

จากวงจรที่แสดงดังรูปที่ 2.4 การวัดแบบบริดจ์ (Bridges) ค้นพบโดย Christie ในปี 1833 และได้ถูกทำให้เป็นที่รู้จักโดยทั่วไปโดย Wheatstone ในปี1843 จึงเรียกกันทั่วไปว่า Wheatstone bridge โดยใช้องค์ประกอบ Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 จะทำหน้าที่เป็นกิ่งหรือขาของวงจรบริดจ์ ในส่วนของแหล่งจ่าย G จะเป็นตัวขับเคลื่อนวงจร และ D เป็นโวลมิเตอร์หรือแอมป์มิเตอร์



รูปที่ 2.8 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์

เมื่อ D อ่านค่าได้ 0 จะเรียกว่าเป็นบริดจ์สมดุล อ้างอิงจากกฎของโอห์มจะได้ว่า $\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$

โดยในการวัดแบบบริดจ์นี้เป็นหนึ่งในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เราไม่ทราบค่า ที่หาได้จากการใช้หลักการของบริดจ์สมดุล

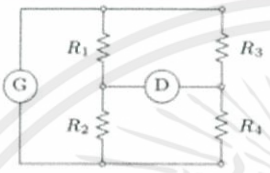
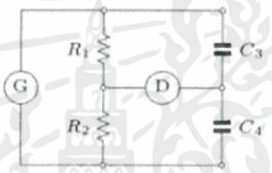
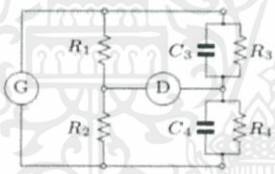
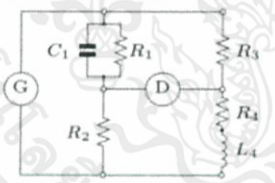
ยกตัวอย่างเช่น Z_4 คืออิมพีแดนซ์ที่ไม่ทราบค่า และ $Z_1,\ Z_2, Z_3$ คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ทราบค่า หรือเรียกว่าค่ามาตรฐาน โดยการออกแบบให้ค่ามาตรฐานค่าใดค่าหนึ่งเป็นอุปกรณ์แบบปรับค่าได้ และทำการปรับค่านั้นจนกระทั่ง D อ่านค่าได้ศูนย์ จะทำให้วงจรบริดจ์เข้าสู่สภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งประเภทของบริดจ์นั้นแบ่งออกได้เป็น แบบ Ratio bridges เมื่ออุปกรณ์มาตรฐานที่ปรับค่าได้มีโหนดร่วมกับอุปกรณ์ที่ไม่ทราบค่า (เช่น Z_2 หรือ Z_3) และ Product bridges เมื่ออุปกรณ์มาตรฐานอยู่ตรงข้ามกับตัวที่ไม่ทราบค่า (ในที่นี้คือ Z_1)

ถ้าสลับตำแหน่งของมิเตอร์ D และแหล่งจ่าย G บริดจ์นั้นก็ยังคงอยู่ในสภาวะสมดุล ด้วยคุณสมบัติแบบเชิงเส้นของวงจรบริดจ์

วงจรที่คล้ายวงจรวีทสโตนบริดจ์มีชื่อเรียกหลากหลายต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ชนิดของอิมพีแดนซ์ที่นำมาประกอบกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

Name	Scheme	Relation(s)		Calibration of
Wheatstone		$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$		pure resistance
De Sauty		$C_4 = C_3 \frac{R_1}{R_2}$		pure capacitance
Wien		$C_4 = C_3 \frac{R_1}{R_2}$	$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}$	lossy capacitance
Maxwell		$L_4 = R_2 R_3 C_1$	$Q_4 = \omega R_1 C_1$	lossy inductance

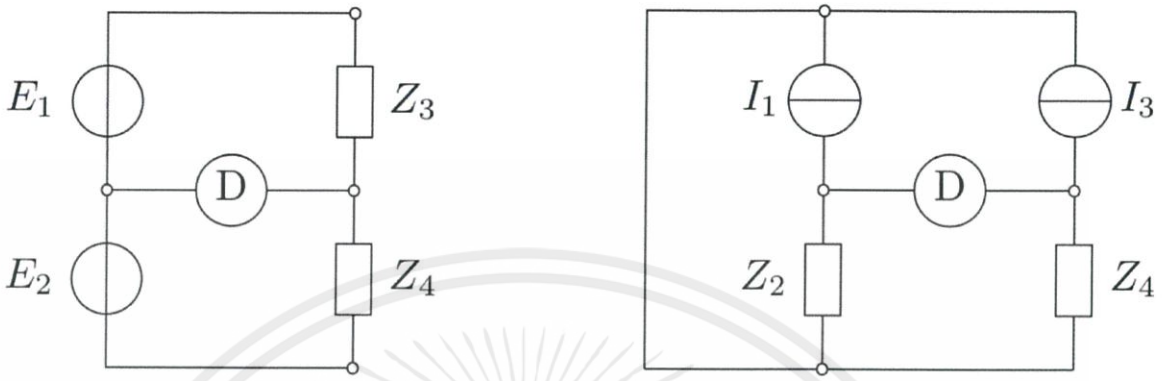
รูปที่ 2.9 วงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์ในแบบต่างๆ

โดยวงจรวัดอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์แบบต่างๆในรูปที่ 2.9 สามารถพิจารณาโดยรวมได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

- วงจรบริดจ์แบบสัดส่วนแรงดัน (Voltage ratio bridge) แสดงในรูปที่ 2.10 (ก) ในวงจรนี้ อิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_2 เป็นองค์ประกอบของการแบ่งแรงดัน โดยที่ค่าแรงดันขาออก E_1 และ E_2 นั้นทราบค่าสัดส่วน โดยได้สมการบริดจ์คือ $\frac{E_1}{E_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรบริดจ์แบบสัดส่วนกระแส (Voltage ratio bridge) แสดงในรูปที่ 2.11 (ข) ในวงจรนี้ อิมพีแดนซ์ Z_1 และ Z_3 เป็นองค์ประกอบของการแบ่งกระแส โดยที่ค่ากระแสขาออก I_1 และ I_3 นั้นทราบค่าสัดส่วน โดยได้สมการบริดจ์คือ $\frac{I_1}{I_3} = \frac{Z_4}{Z_2}$



(ก) (ข)

รูปที่ 2.10 วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์บริดจ์แบบสัดส่วน
(ก) วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์สัดส่วนแรงดัน
(ข) วงจรวัดค่าอิมพีแดนซ์แบบบริดจ์สัดส่วนกระแส

2.4 Arduino

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ขนาดเล็กที่มีการพัฒนาแบบโอเพนซอร์สเป็นตัวประมวลผลและสั่งงาน มีจุดเด่นในเรื่องของความง่ายในการเรียนรู้และการใช้งานเนื่องจากมีการออกแบบคำสั่งต่างๆ ขึ้นมาสนับสนุนการใช้งานด้วยรูปแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน เช่นเดียวกับ ไมโครคอนโทรเลอร์โมดูล เช่น Basic Stamp ของ Parallax, BX-24 ของ Netmedias และ Handy Board ของ MIT แต่มีจุดเด่นที่เหนือกว่า คือ

- มีรูปแบบคำสั่งที่ง่ายต่อการใช้งาน แต่สามารถนำไปใช้งานจริงๆที่มีความซับซ้อนมากๆได้ และยังสามารถสร้างคำสั่งและ Library ใหม่ๆ ขึ้นใช้งานเองได้
- มีการเปิดเผยวงจรและชุดคำสั่งทั้งหมด ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติมได้ตามความต้องการทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์
- รองรับการทำงานทั้ง Windows, Linux และ OS X
- ราคาถูก

ด้วยเหตุนี้ทำให้ Arduino ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย ทั้งในแบบที่เป็นการทำงานตัวเดียวอิสระ หรือเชื่อมต่อให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งแบบดิจิตอลและอนาล็อก

2.5 การสื่อสารแบบ I^2C

Inter Integrate Circuit Bus (I^2C BUS หรือ IIC Bus) ซึ่งนิยมเรียกกันสั้นๆว่า "I^2C"ซึ่งเป็นวิธีการติดต่อสื่อสารอนุกรมแบบหนึ่ง ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Philips Semiconductors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อดีคือ ใช้สัญญาณในการเชื่อมต่อเพียงสองเส้น คือ SCL และ SDA แต่สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายตัวร่วมกัน โดยใช้บัสเพียงบัสเดียวได้ ทำให้เหมาะกับการออกแบบระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ที่มุ่งออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด จะแบ่งอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเป็น Master และ Slave โดยในการส่งและรับข้อมูลระหว่าง Master และ Slave นั้น มีลำดับการทำงาน ดังนี้

1. ในสภาวะที่ยังไม่เริ่มทำงาน อุปกรณ์ทุกตัวจะมีแรงดันระดับสูง (H)

2. เมื่อจะเริ่มส่งข้อมูล SDA จะลดลงไปที่ระดับแรงดันศูนย์ (L) ในขณะที่ SCL ยังอยู่ที่ H โดย SCL จะค้างที่ H นาน 0.6 ไมโครวินาที (t_{HDSTA}: Hold time to start condition) หลังจากผ่านช่วงเวลานี้ไป Master จะเริ่มสั่งการ

3. ตอนนี้ SCL จะลงไปที่ L จากนั้น ระหว่างที่รอสัญญาณนาฬิกาขาขึ้นแรกอีก 1.3 ไมโครวินาที SDA จะเริ่มกำหนดค่าบิตแรก โดย Master จะส่งค่าบิตแรกไปพร้อมกับสัญญาณนาฬิกา และ Slave จะเริ่มอ่านค่าในจังหวะที่ SCL เป็น H

4. จากนั้นจะทำงานในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อส่งค่า Address ของ Slave ที่ต้องการจะติดต่อด้วยไปรวมทั้งสิ้น 7 บิตและตามด้วยบิตที่ 8 โดยจะทำการระบุว่าจะสั่งให้ Slave รอคำสั่ง (Write ระบุโดย SDA เป็น H) หรือจะรออ่านค่าที่ส่งมาจาก Slave (Read ระบุค่าโดย SDA เป็น L)

5. บิตที่ 9 จะเป็นการตอบรับจาก Slave ที่มี Address ตรงกับที่ Master ส่งไป ถ้ามี Slave ตอบรับ โดยการดึงสัญญาณ SDA ลง L ก็แปลได้ว่ามี Slave พร้อมจะสื่อสารด้วย แต่ถ้าไม่มีคือ SDA ค้างที่ H แปลว่า Master ไม่มีอุปกรณ์ใดสื่อสารด้วย

6. หลังจาก Slave ทำการตอบรับ Master เรียบร้อย จะเป็นช่วงเวลาที่ SCL ถูกดึงลง L เป็นเวลาสั้นๆ และ SDA จะถูกปล่อยว่าง ก่อนที่ Slave ที่ติดต่อด้วยจะเริ่มส่งค่าบิตแรกมาที่ SDA

7. จากนั้น Master จะปล่อยสัญญาณ SCL ออกมา เพื่ออ่านค่าสัญญาณบนสาย SDA ในจังหวะที่ SCL เป็น H และรับค่าเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จน Data ครบ 8 บิตแรก ตามจังหวะสัญญาณ SCL

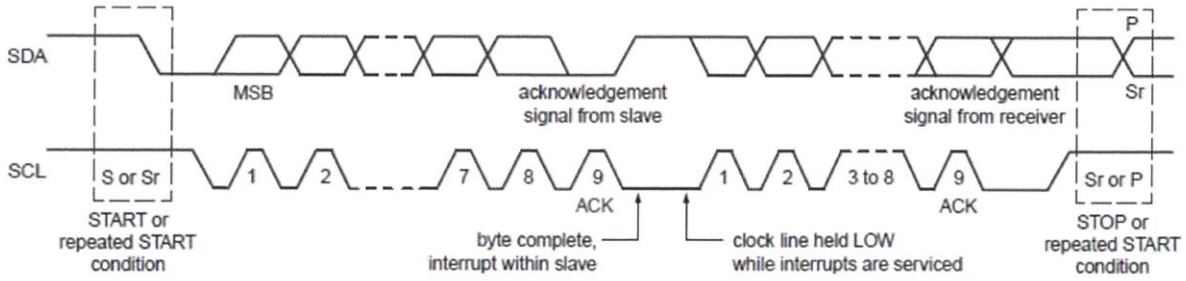
8. เมื่อ Data ครบ 8 บิตแรกแล้ว Master จะให้สัญญาณตอบรับเป็น L เพื่อแสดงให้ Slave รู้ว่า Master จะรอ Data อีก 8 บิตต่อไป (ในกรณีที่ข้อมูลที่ Slave ต้องการส่งเป็นแบบ 16 บิต)

9. จะกลับเข้าการทำงานในข้อ 6 และอ่านข้อมูลไปจนครบบิตที่ 9 - 16

10. จากนั้นเมื่อถึงจังหวะการ Acknowledge ในบิตที่ 9 คราวนี้ Slave ไม่ต้องการส่งข้อมูลต่อแล้ว เพราะครบ 16 บิตแล้ว Slave จะ ไม่ตอบสนองแล้ว สาย SDA จะถูกปล่อยให้เป็น H

11. จากนั้น Master จะรู้แล้วว่าข้อมูลมาครบถ้วน 16 บิต Master ก็จะสั่งหยุดโดยการส่งสัญญาณ ขาขึ้นในสาย SDA พร้อมๆกับ SCL เป็น H คือ Stop bit หมายถึงส่งข้อมูลครบ Byte แรก ซึ่งเป็น Address ของ Slave ตัวที่ Master ต้องการสื่อสารด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 Timing diagram ของการสื่อสารข้อมูลแบบ I^2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

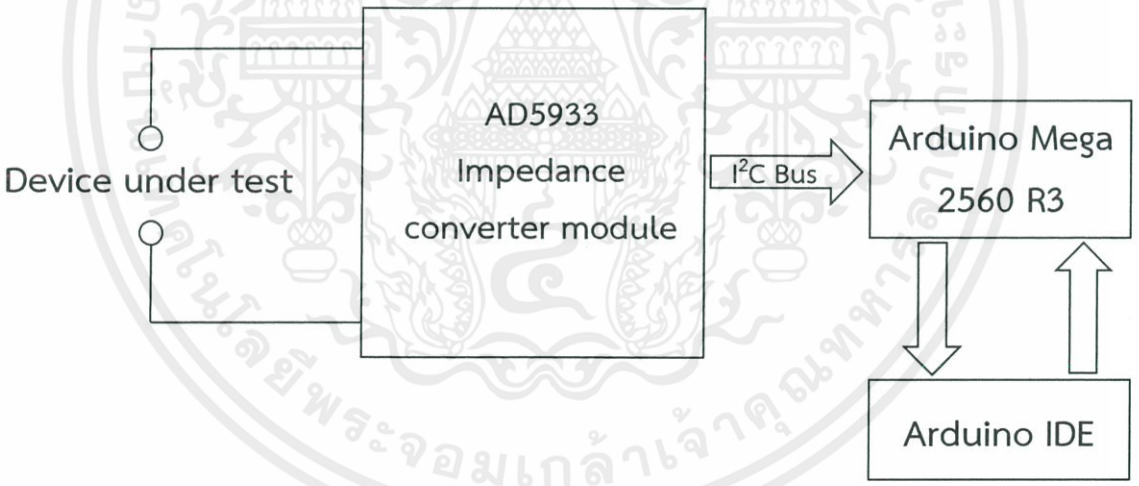
ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นในปริญญานิพนธ์นี้ รายละเอียดของโมดูลวัดอิมพีแดนซ์ที่เลือกใช้ และการพัฒนาซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับสื่อสารกับโมดูลดังกล่าว และนำค่าที่ได้มาทำการประมวลผล

3.1 โครงสร้างของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์

เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

1. วงจรวัดอิมพีแดนซ์ ทำหน้าที่วัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยจะใช้โมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance Measurement 5933-V0.1 ของบริษัท Kangwei ที่ใช้วงจรรวมความแม่นยำสูงเบอร์ AD5933 ซึ่งวงจรรวมดังกล่าวจะมีความสามารถในการแปลงค่าที่วัดได้ในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิตอล และส่งค่าออกในรูปแบบ I^2C

2. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนนี้จะใช้เป็นบอร์ด Arduino Mega 2560 R3 โดยจะทำหน้าที่รับค่าที่ส่งมาจากโมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์มาทำการคำนวณ และส่งผลลัพธ์ไปแสดงผลผ่าน Arduino IDE บนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์

3.2 โมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์

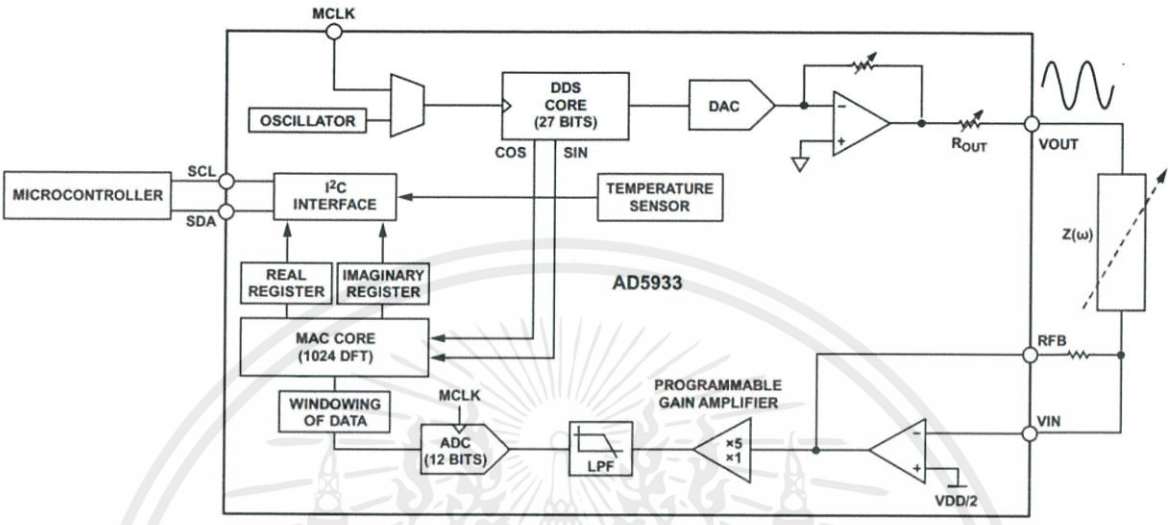
จะใช้โมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance Measurement 5933-V0.1 ของบริษัท Kangwei ที่ใช้วงจรรวมความแม่นยำสูงเบอร์ AD5933 ที่มีส่วนจ่ายความถี่ในตัวพร้อมด้วย ADC 12 bit 1MSPS และสามารถเลือกใช้แหล่งจ่ายความถี่ภายนอกได้เช่นกัน สัญญาณที่ได้จากการวัดอิมพีแดนซ์จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิตอลโดย ADC บนบอร์ดและถูกประมวลผลด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform: DFT) โดยส่วนประมวลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processor : DSP) บนบอร์ด ผลจากการแปลง DFT จะถูกส่งกลับเป็นข้อมูลในรูปของค่าจริง (Real :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R) และค่าจินตภาพ (Imagine: I) ในแต่ละค่าความถี่ ผ่านการสื่อสารข้อมูลแบบ I^2C โดยค่าขนาดและเฟสของอิมพีแดนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

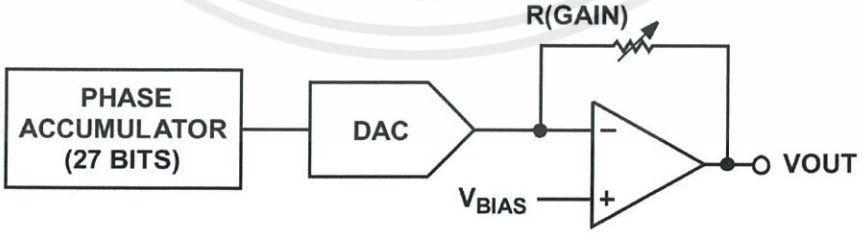
$$Magnitude = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (3.1)$$

$$Phase = \tan^{-1} I/R \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.2 โครงสร้างภายในวงจรรวม AD5933

โครงสร้างภายในวงจรรวม AD5933 แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 วงจร Phase accumulator 27 บิต จะทำหน้าที่สังเคราะห์ความถี่โดยใช้เทคนิคสังเคราะห์สัญญาณโดยใช้วิธีการเชิงเลข (Direct Digital Synthesis : DDS) ที่สามารถสร้างความถี่ได้อย่างแม่นยำและละเอียด สร้างสัญญาณจ่ายให้กับส่วน Transmit stage โดย Transmit stage นี้จะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายความถี่ให้กับ DUT โดยค่าความถี่เริ่มต้น (Start frequency) ความถี่ที่ให้เพิ่มขึ้น (Frequency increment) และจำนวนครั้งในการเพิ่มความถี่ (Number of increment) สามารถถูกกำหนดได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งนี้ DDS สามารถรับสัญญาณนาฬิกาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ภายในหรือจากแหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาภายนอกก็ได้ โดยกำหนดที่บิต D3 ในรีจิสเตอร์ควบคุม ในกรณีที่ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอกสามารถป้อนได้ที่ขา MCLK

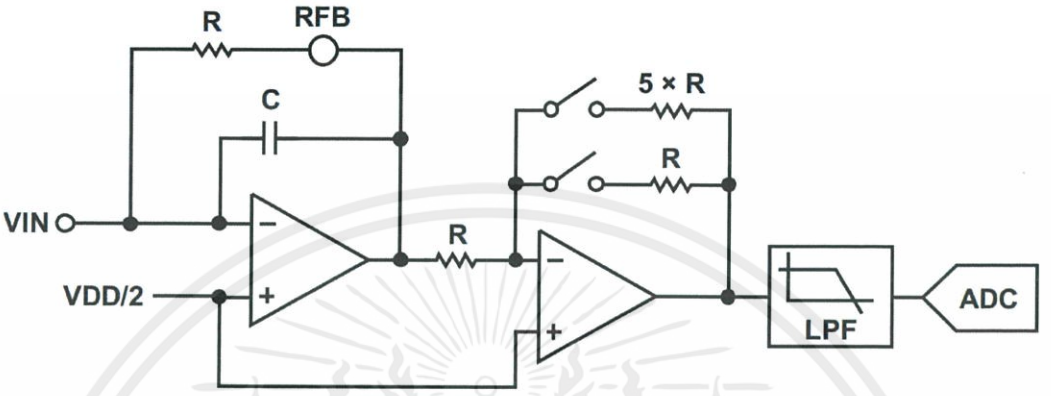


รูปที่ 3.3 ส่วน Transmit stage ของวงจรรวม AD5933

ในส่วนการรับค่านั้นจะรับสัญญาณของกระแสขาเข้ามาจาก DUT ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในรูปดังกล่าว DUT จะต่ออยู่ระหว่างขา V_{in} และ V_{out} กระแสจาก DUT จะไหลเข้าสู่ขา Vin และถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันจากตัวแปลงกระแสเป็นแรงดันโดยใช้วงจรขยายที่สามารถกำหนดอัตราขยายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

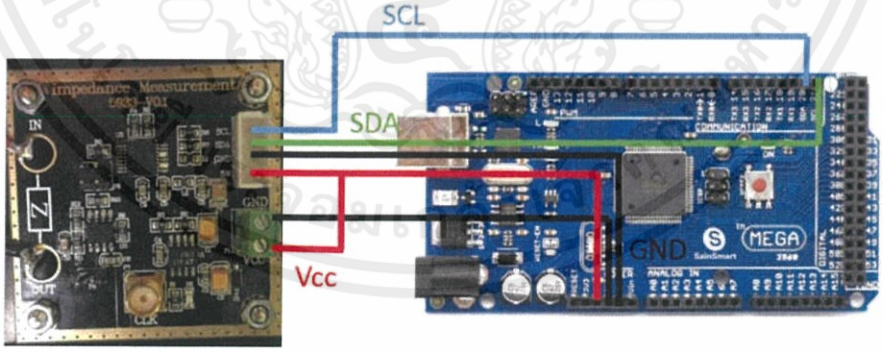
(Programmable Gain Amplifier : PGA) โดยอัตราขยายของการแปลงกระแสเป็นแรงดันนั้นจะกำหนดได้จากการตั้งค่ารีจิสเตอร์และค่าความต้านทานป้อนกลับที่อยู่ระหว่างขา 4 (R_{FB}) และขา 5 (V_{in}) จากนั้นจะเป็นวงจร Anti-aliasing filter ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน และวงจร ADC ขนาด 12 บิต ที่มีอัตราการสุ่ม 1 MSPS ค่าที่ได้จาก ADC จะเป็นสัญญาณดิจิตอลและถูกส่งไปยัง DSP core ของวงจรรวม AD5933 ต่อไป



รูปที่ 3.4 ส่วน Receive stage ของวงจรรวม AD5933

3.3 การเชื่อมต่อและการพัฒนาซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือบอร์ด Arduino Mega 2560 R3 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในส่วนของการกำหนดค่าการเชื่อมต่อระหว่างโมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance Measurement 5933-V0.1 กับบอร์ด Arduino จะกำหนดให้เป็นแบบ 2 ทิศทาง ผ่านการสื่อสารแบบ I^2C โดยในการเชื่อมต่อจะใช้สายสัญญาณ 2 เส้น คือ SCL และ SDA ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อระหว่างโมดูลวัดอิมพีแดนซ์และไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับการพัฒนาชุดคำสั่ง เครื่องมือที่ใช้พัฒนาซอฟแวร์ในที่นี้คือโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งมี 2 องค์ประกอบ คือ ส่วน Source code editor สำหรับเขียนคำสั่งเพื่อควบคุม Arduino และส่วนแสดงผล (Graphic User Interface : GUI) สำหรับแสดงผลลัพธ์ไปยังผู้ใช้

ในส่วนของการพัฒนาชุดคำสั่งสำหรับการสื่อสารแบบ I^2C จะทำบน Source code editor โดยเพิ่มไลบรารีของ Arduino ที่มีชื่อว่า Wire.h โดยเมื่อเริ่มใช้งาน I^2C จะใช้คำสั่ง Wire.begin();

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อเป็นการเริ่มต้นการทำงานของรีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และ Arduino ทำงานเป็น Master ในการสื่อสารแบบ I^2C รวมถึงสร้างบัฟเฟอร์ 12 ไบต์ สำหรับรองรับการใช้งานคำสั่งต่างๆ

ในการเขียนข้อมูลผ่าน I^2C จะใช้คำสั่ง Wire.beginTransmission(); โดยระบุตำแหน่งของแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ต้องการสื่อสาร ในที่นี้คือแอดเดรสของโมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ คือ 0x0D หลังจากนั้น Arduino จะส่งชุดคำสั่ง 8 บิตให้ Slave เพื่อทำการ Block write จากนั้น Slave จะส่ง Acknowledge ซึ่งเป็นสัญญาณตอบรับกลับมาที่ Arduino Arduino จึงจะทำการส่งค่า Data ไปยัง Slave เมื่อ Slave ได้รับข้อมูลครบแล้วก็จะส่ง Acknowledge กลับมาที่ Arduino เมื่อไม่มีการส่งข้อมูลเพิ่มเติม จะจบด้วยคำสั่ง Wire.end Transmission();

การอ่านข้อมูลผ่าน I^2C จะใช้คำสั่ง Wire.beginTransmission(); โดยระบุตำแหน่งของแอดเดรสของอุปกรณ์ ที่ต้องการสื่อสาร คือ 0x0D จากนั้น Arduino จะส่งคำสั่ง 0xB0 ให้ Slave เพื่อเป็นการใช้ Address Pointer ในหน่วยความจำที่ตำแหน่งต่างๆ จากนั้น Arduino จะส่งชุดคำสั่ง 8 บิตให้ Slave เพื่อทำการ Block read จากนั้น Slave จะส่ง Acknowledge กลับมาที่ Arduino เมื่อเรียบร้อยจะใช้คำสั่ง Wire.requestFrom เพื่อรับข้อมูล Address ของอุปกรณ์ที่ต้องการอ่านข้อมูลและระบุจำนวนข้อมูลด้วย เมื่อ Slave ทำการอ่านข้อมูลครบ และไม่มีข้อมูลส่งมาเพิ่มเติม Master จะหยุดกระบวนการอ่านข้อมูล

ค่าที่รับมาจากโมดูลวัดค่าอิมพีแดนซ์ Impedance Measurement 5933-V0.1 จะถูกทำการประมวลผล โดยจะเขียนคำสั่ง Source code editor ให้ Arduino ทำการคำนวณค่าดังกล่าวดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยค่าความถี่ภายในวงจรรวม AD5933 และผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณที่อยู่ในรูปของขนาดและเฟสของค่าอิมพีแดนซ์จะถูกส่งไปแสดงผลที่ Serial monitor ใน Arduino IDE ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์ในส่วนการคำนวณและการแสดงผลอธิบายได้โดยแผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 สำหรับชุดคำสั่งทั้งหมดตั้งแต่การสื่อสารแบบ I^2C การคำนวณ และการแสดงผล สามารถดูได้ในภาคผนวก

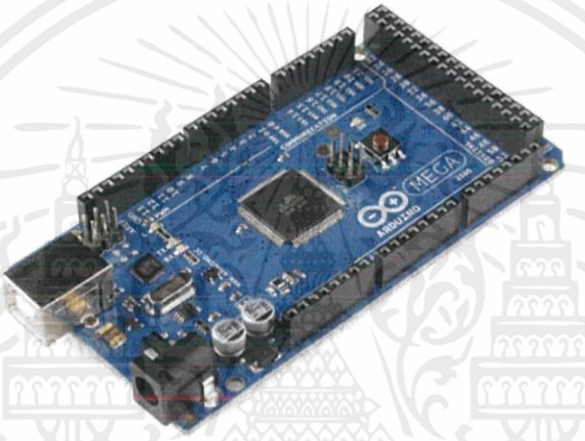
```
void loop(){

  //Read state and enter FSM
    if(Serial.available()>0) {
      state = Serial.read();

      //FSM
      switch(state) {
        case 'A':  //Program Registers
          programReg();
          break;

        case 'B':  //Measure Temperature
          measureTemperature();
          break;

        case 'C':
          runSweep();
          delay(1000);
          break;

      /////Programming Device Registers/////
      }

      Serial.flush();
    }
}
```

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างคำสั่งที่โปรแกรมลงบนบอร์ด Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

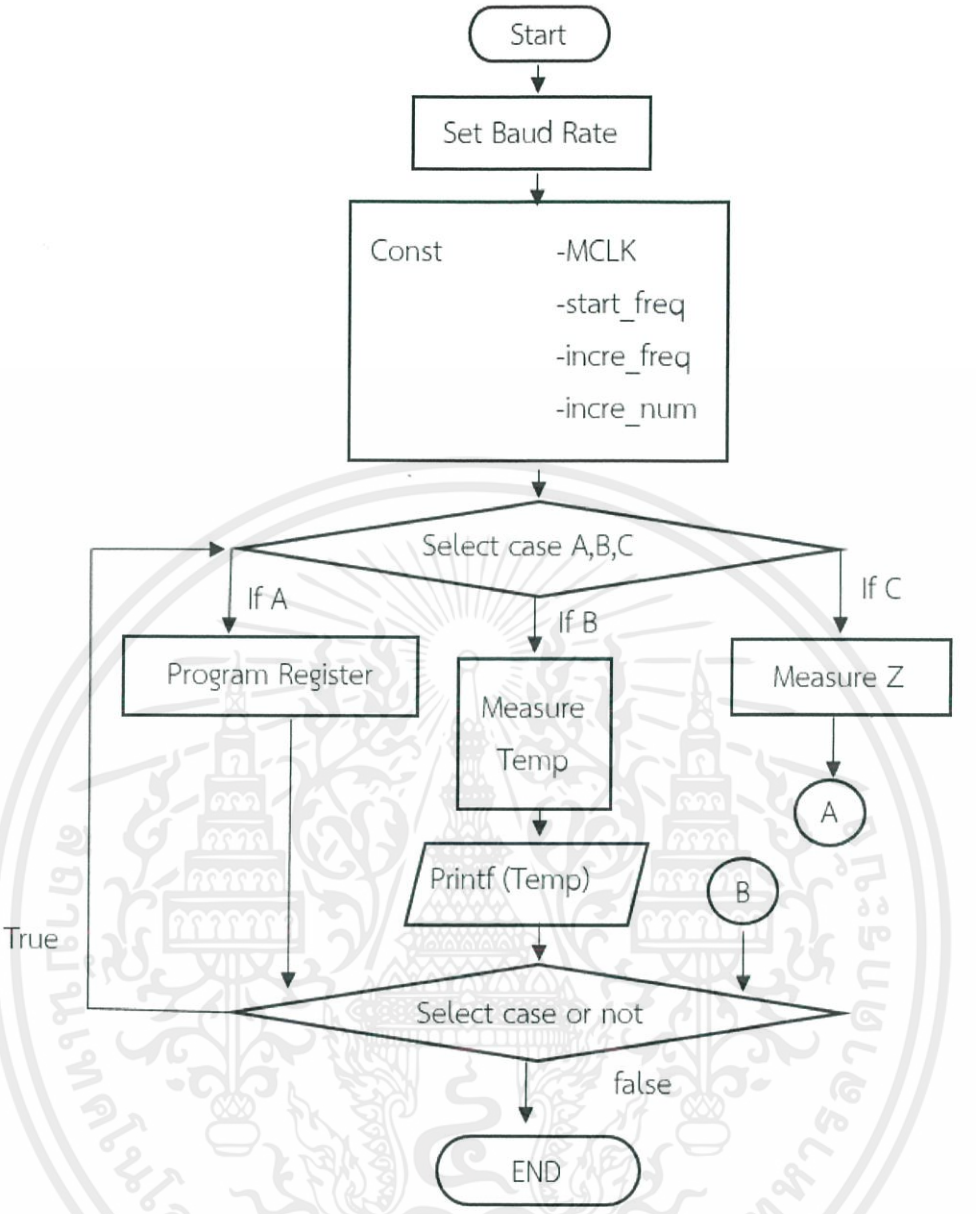
```
Frequency: 6000.00Hz; Magnitude: 1815.03Ohm; Resistance: 1810, Reactance: 135,
 Impedance: 53968.48Ohm;,
 Phase : 4.27sys_phase94.60 Phase : -90.34degree;,
Frequency: 6025.00Hz; Magnitude: 1827.85Ohm; Resistance: 1823, Reactance: 133,
 Impedance: 53590.03Ohm;,
 Phase : 4.17sys_phase94.62 Phase : -90.45degree;,
Frequency: 6050.00Hz; Magnitude: 1827.14Ohm; Resistance: 1822, Reactance: 137,
 Impedance: 53610.61Ohm;,
 Phase : 4.30sys_phase94.64 Phase : -90.34degree;,
Frequency: 6075.00Hz; Magnitude: 1831.99Ohm; Resistance: 1826, Reactance: 148,
 Impedance: 53468.84Ohm;,
 Phase : 4.63sys_phase94.66 Phase : -90.03degree;,
Frequency: 6100.00Hz; Magnitude: 1832.07Ohm; Resistance: 1826, Reactance: 149,
```

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการแสดงผลลัพธ์ที่ Serial monitor ใน Arduino IDE



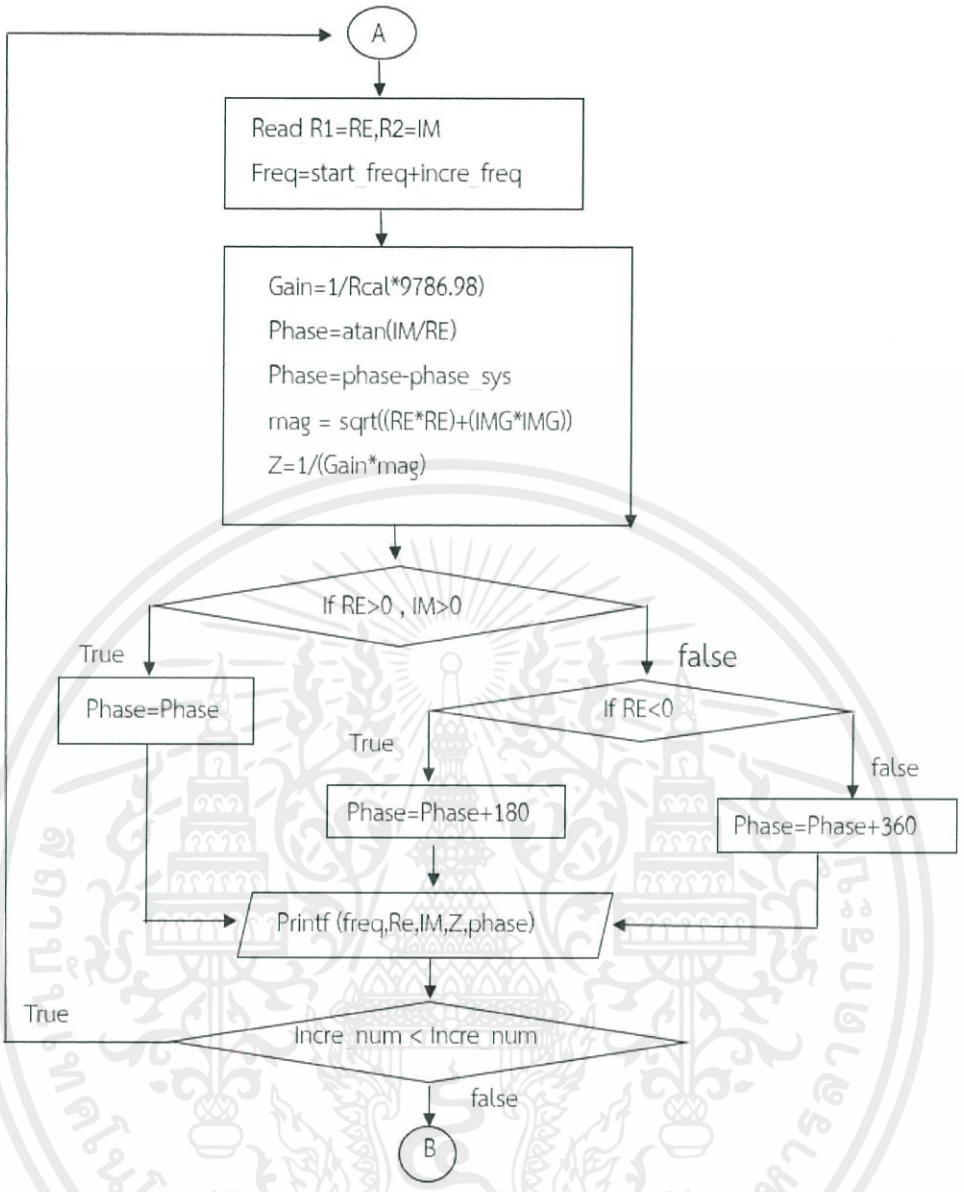
รูปที่ 3.8 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งในส่วนของการคำนวณและการแสดงผลที่พัฒนาขึ้นบน Arduino IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของชุดคำสั่งในส่วนของการคำนวณและการแสดงผลที่พัฒนาขึ้นบน Arduino IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบขั้นตอนการทำการทดลอง และการทำการทดลองเพื่อประเมินการทำงานของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น รวมไปถึงผลการทดลองในแต่ละขั้นตอน

4.1 การออกแบบขั้นตอนการทำการทดลอง

ในการพัฒนาเครื่องมือวัดนั้น เมื่อพัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้ว จำเป็นจะต้องทำการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีความถูกต้องเป็นที่ยอมรับ โดยในปริญญานิพนธ์นี้จะใช้เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ Bode 100 ของบริษัท OMICRON Lab เป็นเครื่องมือวัดเปรียบเทียบ ในการทดลองจึงจะแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. ทำการเตรียมอุปกรณ์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างๆกัน โดยแบ่งออกเป็น 4 ชุด คือ
   - ตัวความต้านทาน: ทำการเตรียมตัวต้านทานทั้งหมด 11 ค่า ดังนี้
   997 Ω, 1.993 KΩ, 5 KΩ, 9.955 KΩ, 49.9 KΩ, 99.8 KΩ, 201.5 KΩ, 501 KΩ, 1 MΩ, 5.05 MΩ, 10 MΩ
   - ตัวเก็บประจุ: ทำการเตรียมตัวต้านทานทั้งหมด 14 ค่า ดังนี้
   6 pF, 15 pF, 20 pF, 33 pF, 47 pF, 68 pF, 150 pF, 330 pF, 470 pF, 680 pF, 1500 pF, 3300 pF, 4700 pF, 6800 pF
   - ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุ: ทำการเตรียมตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเก็บประจุทั้งหมด 9 ค่า ดังนี้
   4.99 KΩ + 4700 pF, 5 KΩ + 1500 pF, 5 KΩ + 3300 pF, 5 KΩ + 6800 pF, 20.4 KΩ + 330 pF, 99.9 KΩ + 33 pF, 202.3 KΩ + 47 pF, 202.4 KΩ + 15 pF, 202.5 KΩ + 33 pF
   - ตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุ: ทำการเตรียมตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุทั้งหมด 6 ค่า ดังนี้
   9.95 KΩ // 680 pF, 49.6 KΩ // 68 pF, 50 KΩ // 150 pF, 100.6 KΩ // 47 pF, 201.2 KΩ // 20 pF, 503 KΩ // 15 pF
2. นำค่าอิมพีแดนซ์ที่เตรียมในข้อ 1 ไปทำการวัดโดยใช้เครื่อง Bode 100 (อธิบายในหัวข้อ 4.2)
3. ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวโดยใช้เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น (อธิบายในหัวข้อ 4.3)
4. ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในข้อ 2 และข้อ 3 สรุปเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอิมพีแดนซ์ กล่าวคือ ขนาด และ เฟส ที่วัดได้จากเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง Bode 100 (อธิบายในหัวข้อ 4.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการวิเคราะห์ว่าความคลาดเคลื่อนของค่า ขนาด และ เฟส ที่วัดได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใด จากนั้นทำการประมวลผลข้อมูล เพื่อสรุปเป็นผลการทดลอง (อธิบายในหัวข้อ 4.5)

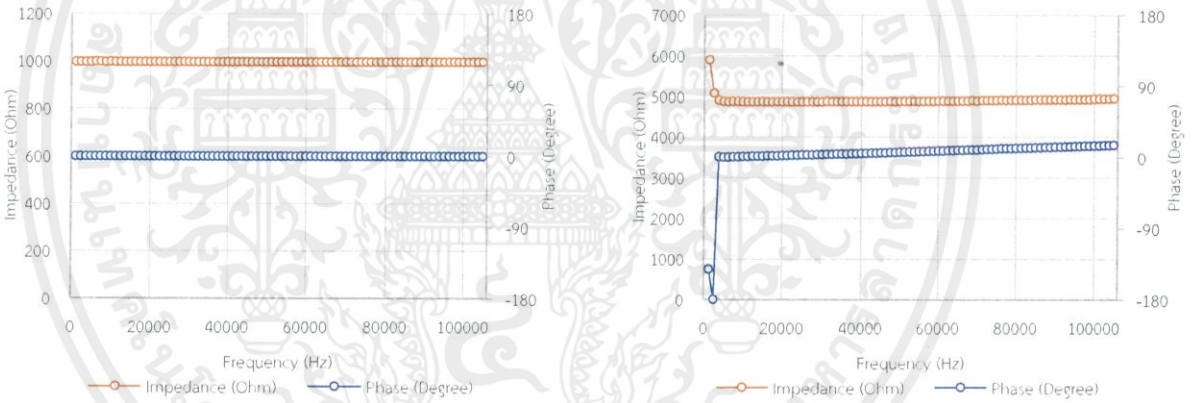
4.2 การทดสอบโดยใช้อิมพีแดนซ์มิเตอร์

ทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่จัดเตรียมไว้ โดยใช้เครื่อง Bode 100 ในช่วงความถี่ 1 – 100 kHz โดยเพิ่มความถี่ครั้งละประมาณ 1.25 KHz ผลการทดลองในส่วนนี้จะถูกแสดงร่วมกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบ ดังจะอธิบายในหัวข้อ 4.3

4.3 การทดสอบโดยใช้เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

การวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่จัดเตรียมไว้ โดยใช้เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น ในช่วงความถี่ 1 – 100 kHz โดยเพิ่มความถี่ครั้งละประมาณ 1.25 KHz ผลการทดลองในส่วนนี้จะถูกแสดงร่วมกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบ

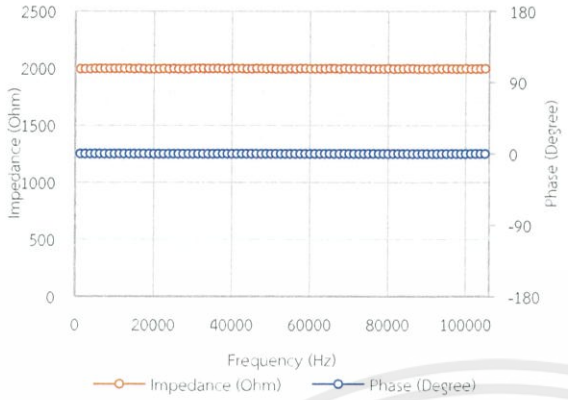
โดยผลการทดลองวัดตัวต้านทานแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.11 ผลการทดลองวัดตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 4.12 - 4.26 ผลการทดลองวัดตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 4.27 - 4.36 ผลการทดลองวัดตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 4.37 - 4.42



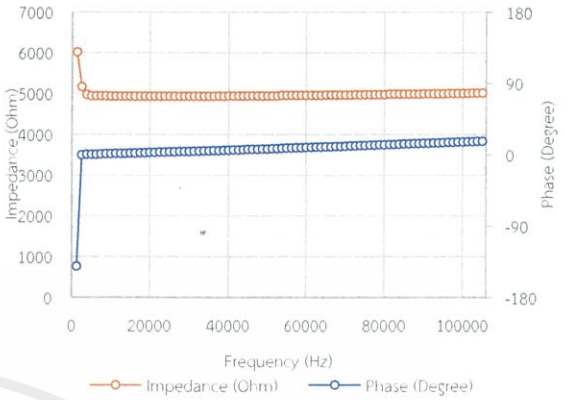
(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 997 Ω โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

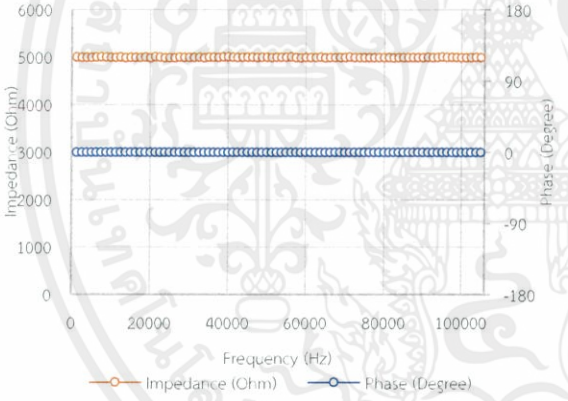


(ก)

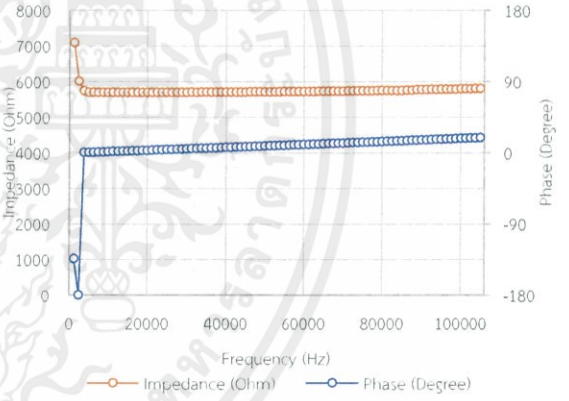


(ข)

รูปที่ 4.2 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 1.993 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



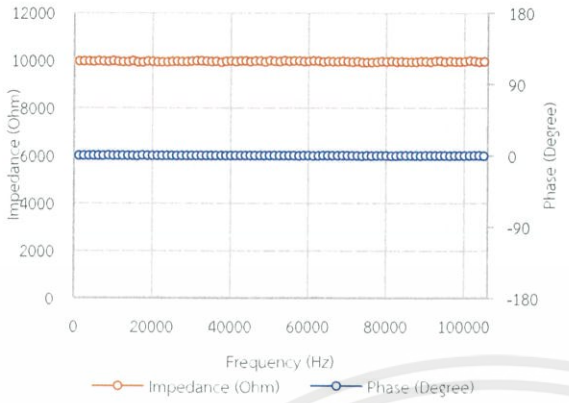
(ก)



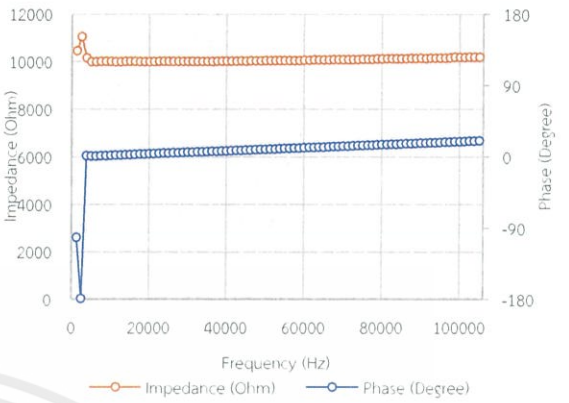
(ข)

รูปที่ 4.3 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

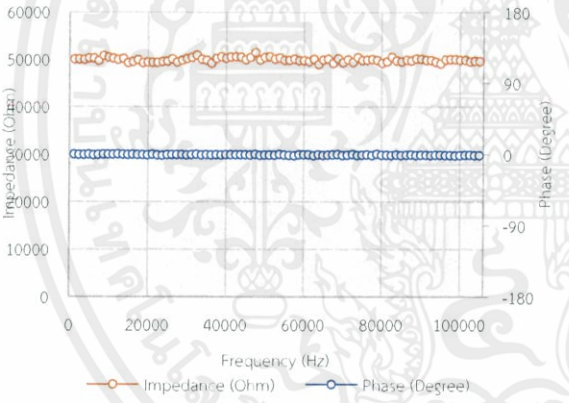


(ก)

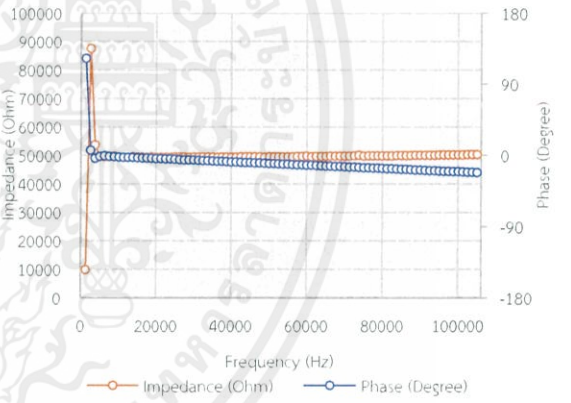


(ข)

รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 9.95 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



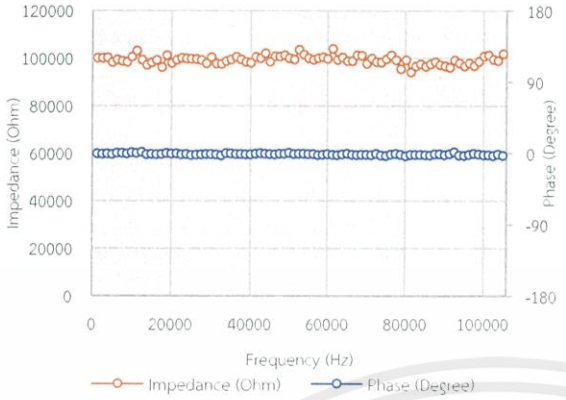
(ก)

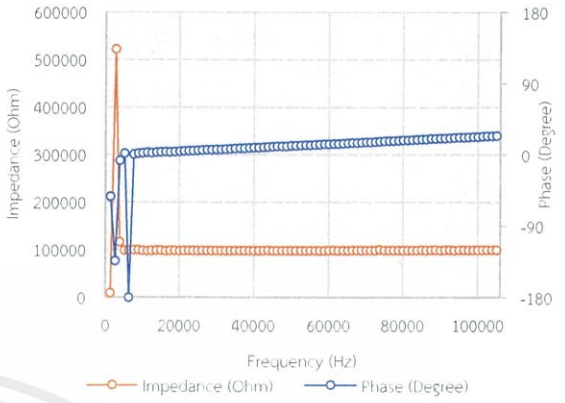


(ข)

รูปที่ 4.5 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 49.9 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

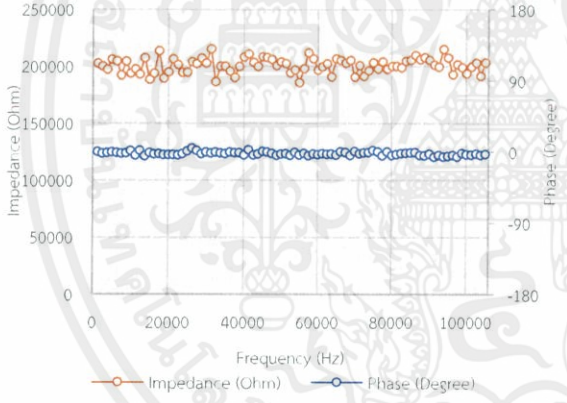
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

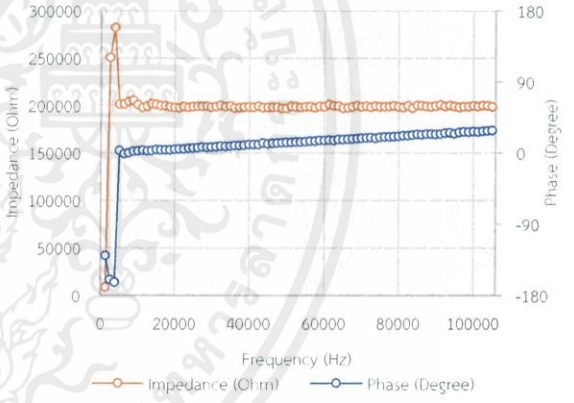




(ก) (ข)

รูปที่ 4.6 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 99.8 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

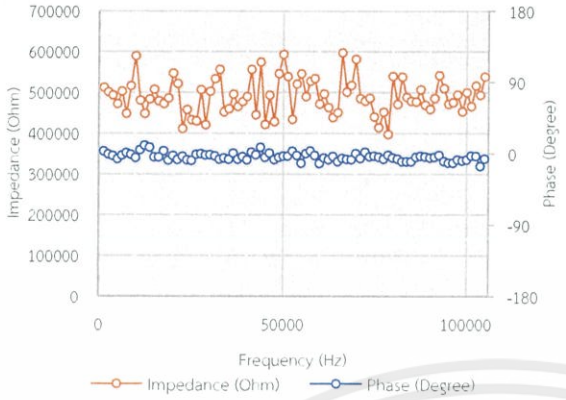


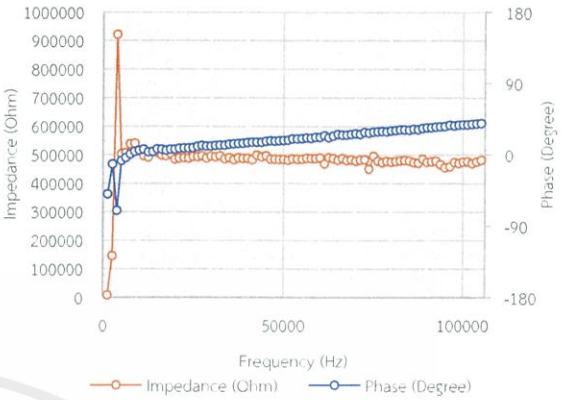


(ก) (ข)

รูปที่ 4.7 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 201.5 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

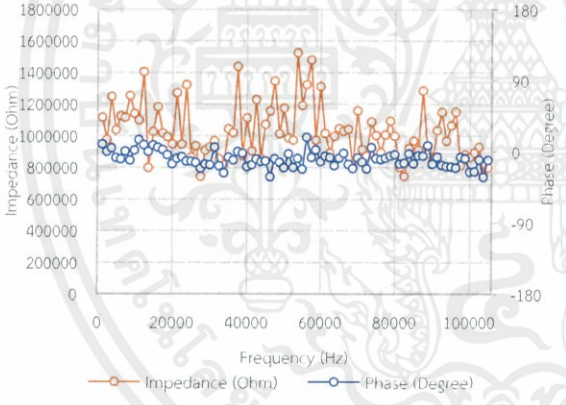
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

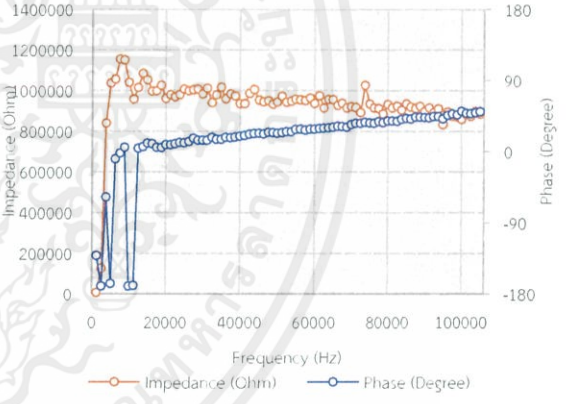




(ก) (ข)

รูปที่ 4.8 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 501 kΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

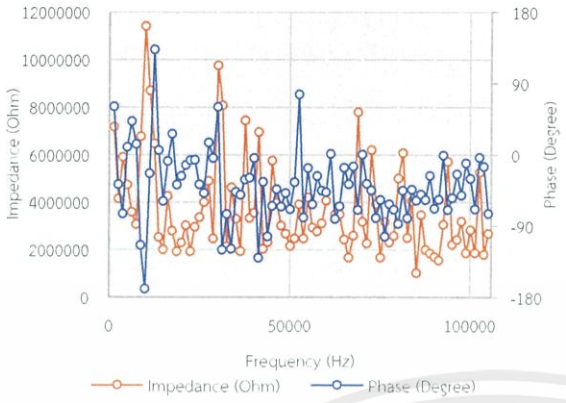


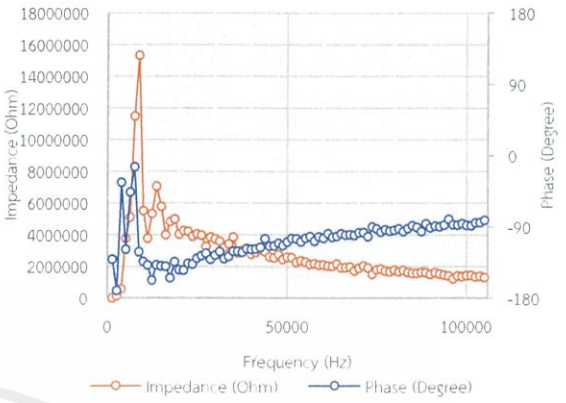


(ก) (ข)

รูปที่ 4.9 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 1 MΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

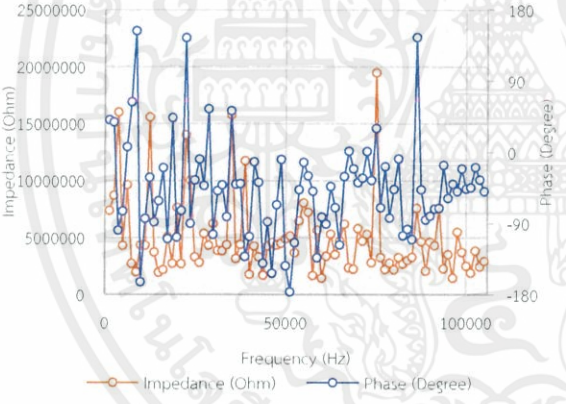
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

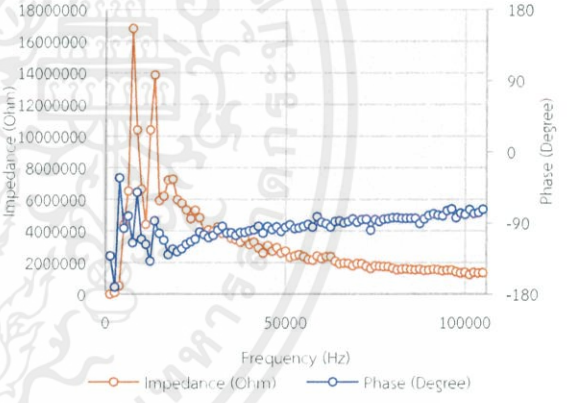




(ก) (ข)

รูปที่ 4.10 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5.05 MΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

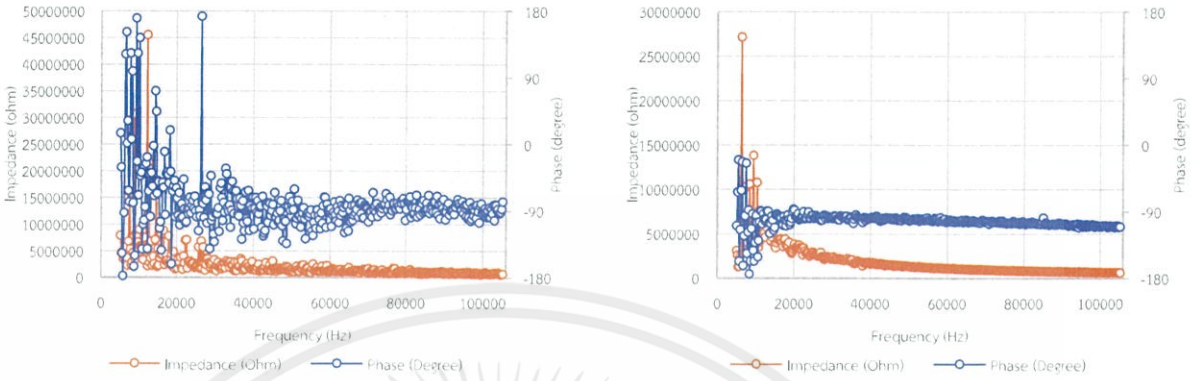




(ก) (ข)

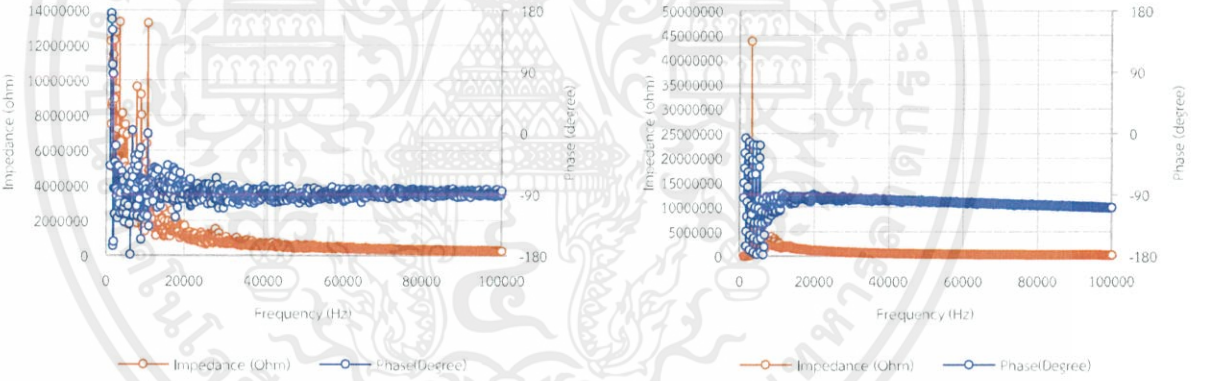
รูปที่ 4.11 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 10.04 MΩ โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

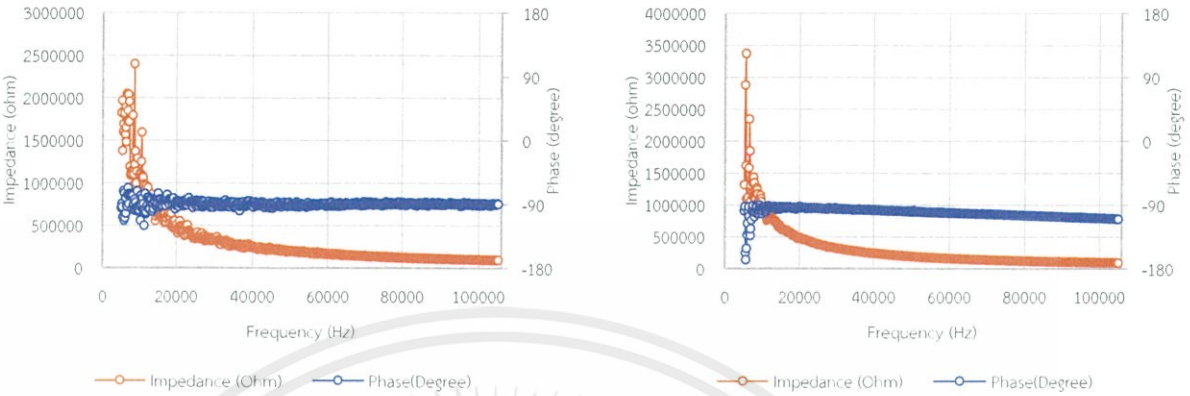
รูปที่ 4.12 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 1.5 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

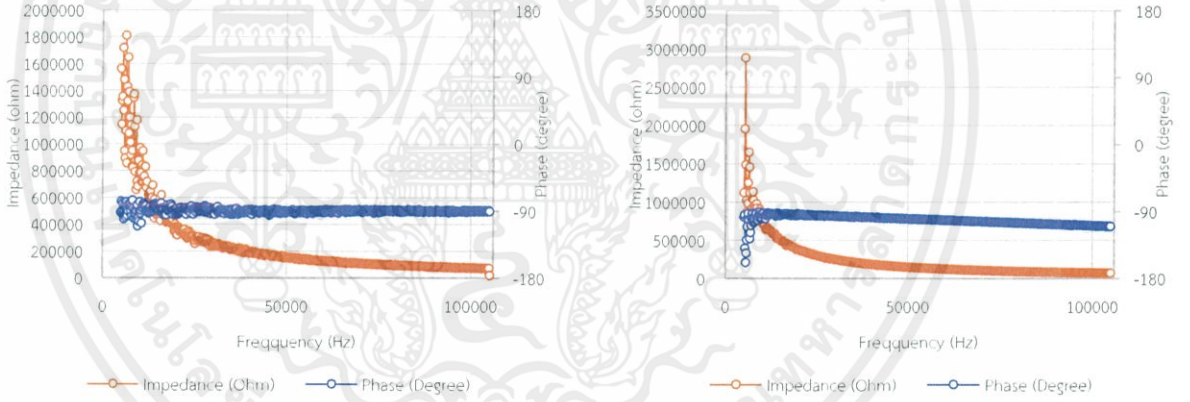
รูปที่ 4.13 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 6 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข)เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

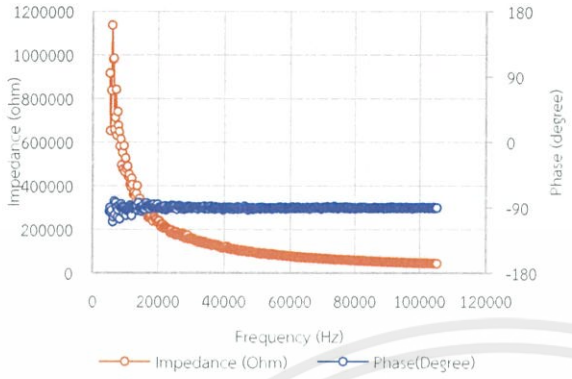
รูปที่ 4.14 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 15 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



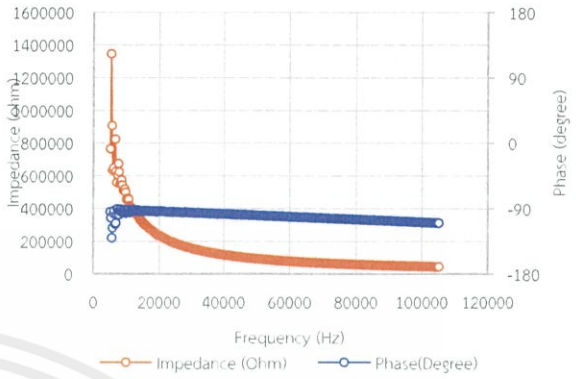
(ก) (ข)

รูปที่ 4.15 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 20 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

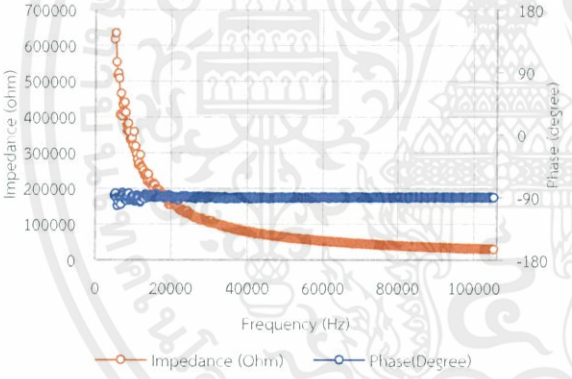


(ก)

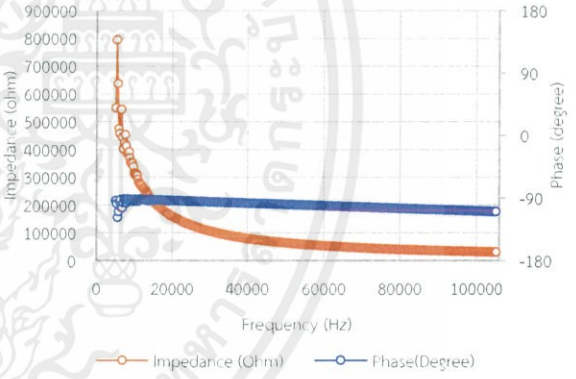


(ข)

รูปที่ 4.16 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 33 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



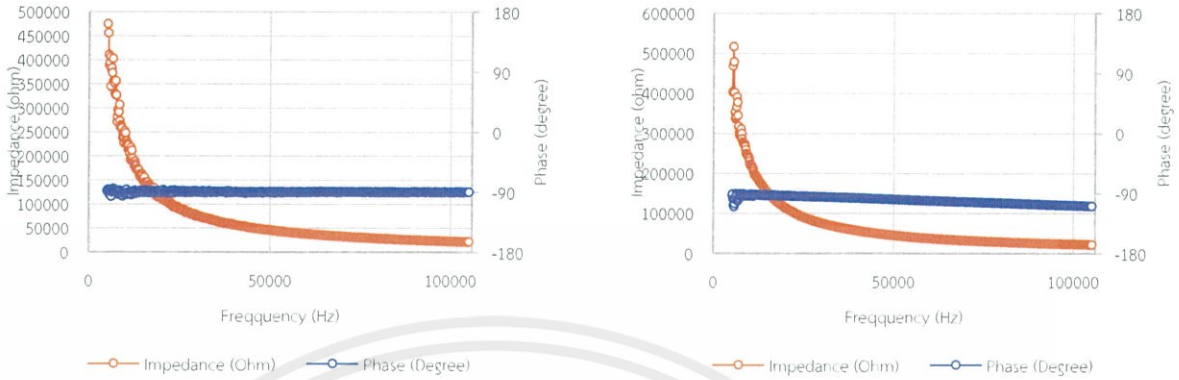
(ก)



(ข)

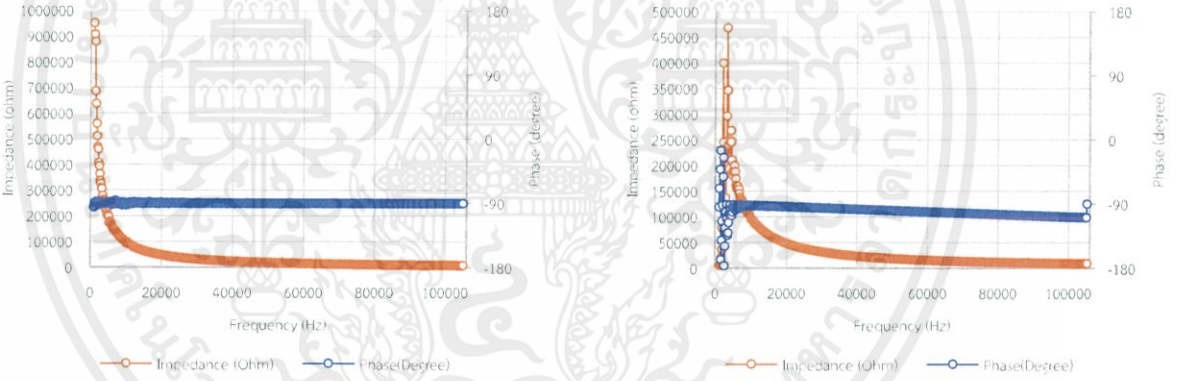
รูปที่ 4.17 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 47 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

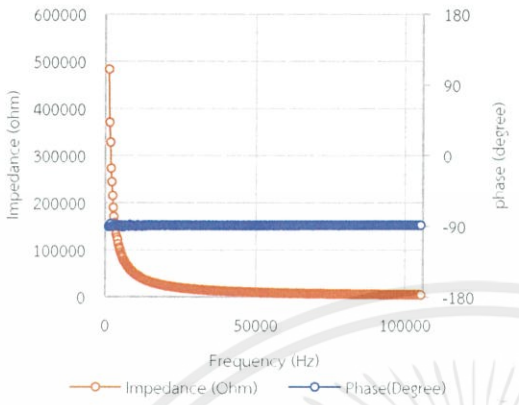
รูปที่ 4.18 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 68 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



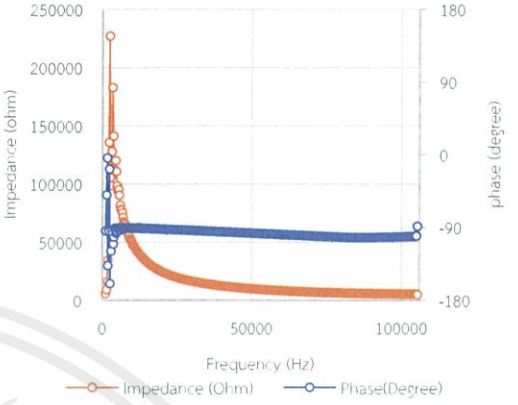
(ก) (ข)

รูปที่ 4.19 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 150 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

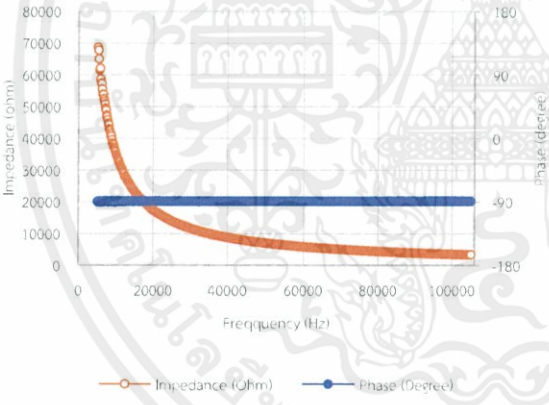


(ก)

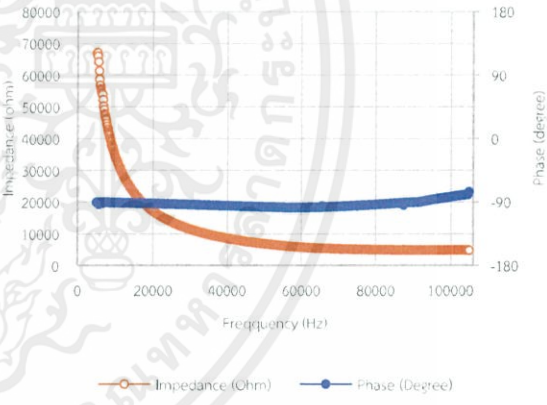


(ข)

รูปที่ 4.20 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 330 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



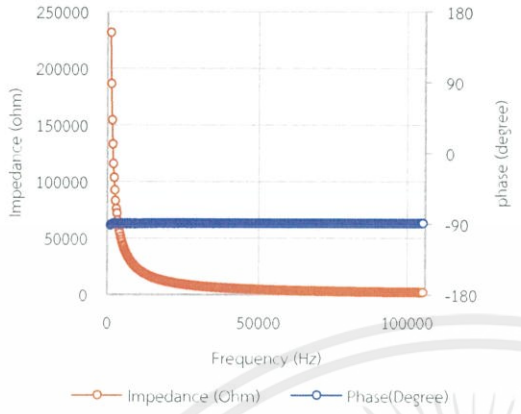
(ก)



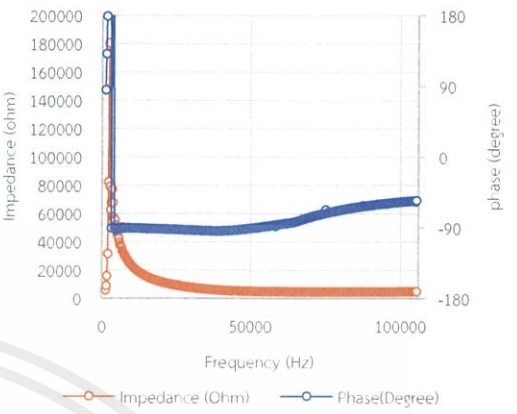
(ข)

รูปที่ 4.21 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 470 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

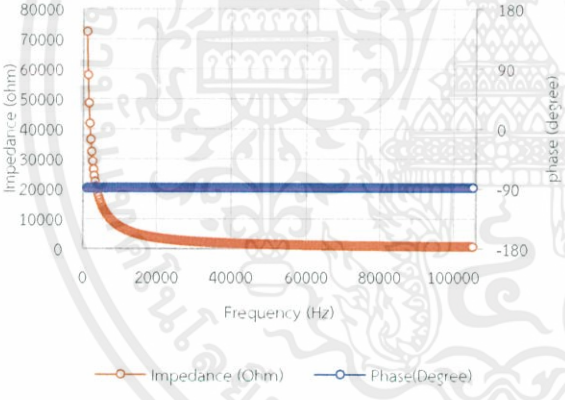


(ก)

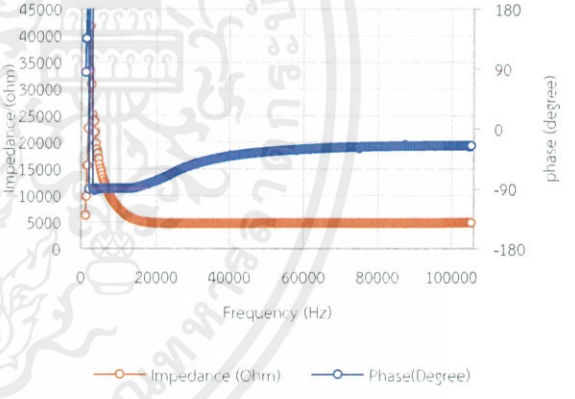


(ข)

รูปที่ 4.22 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 680 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



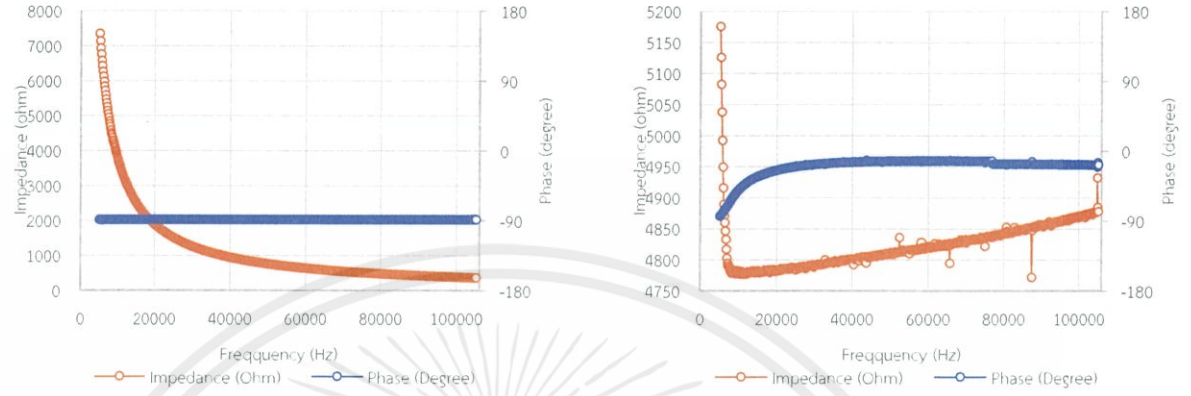
(ก)



(ข)

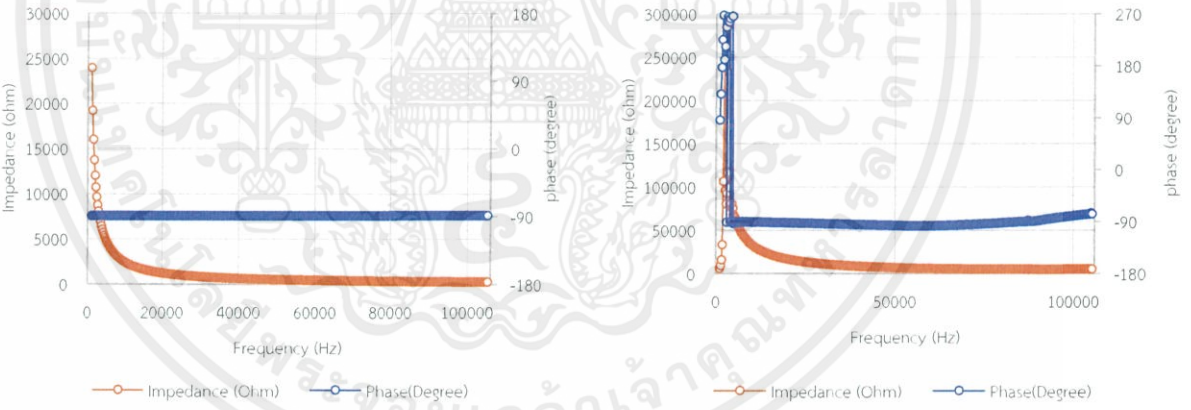
รูปที่ 4.23 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 1500 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

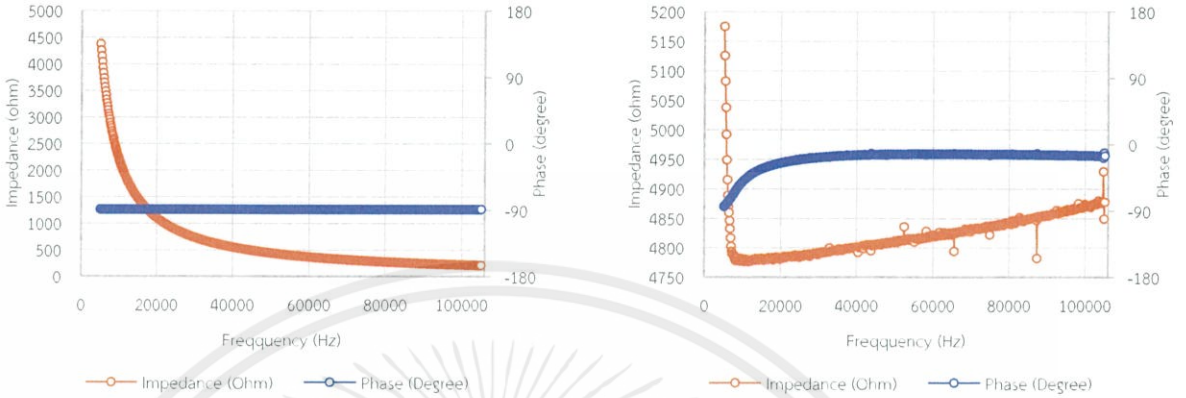
รูปที่ 4.24 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 3300 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

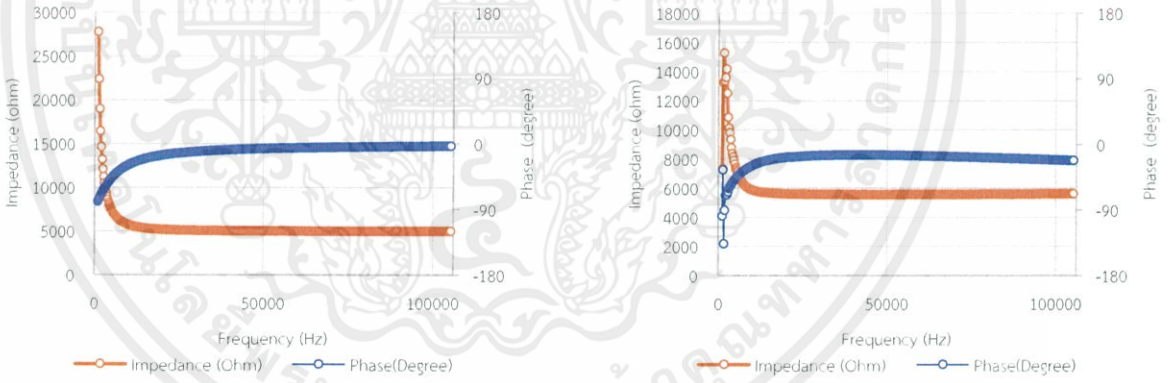
รูปที่ 4.25 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 4700 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

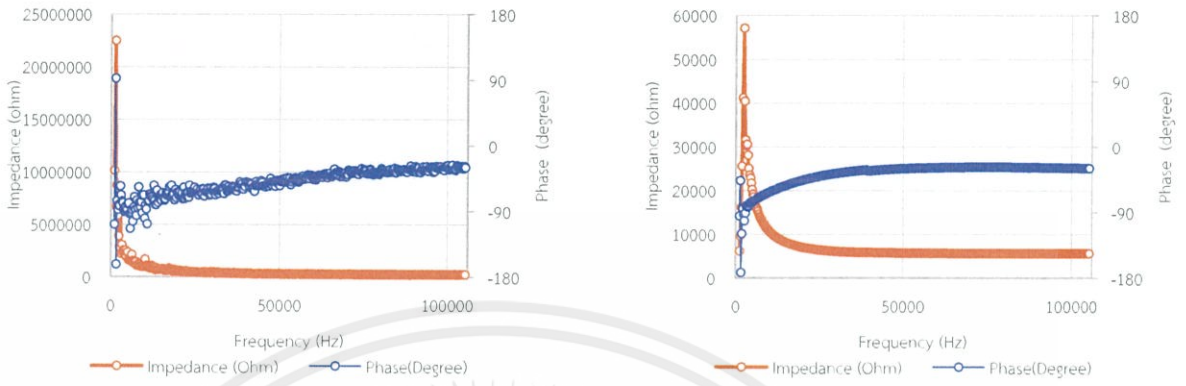
รูปที่ 4.26 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ 6800 pF โดยใช้
(ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

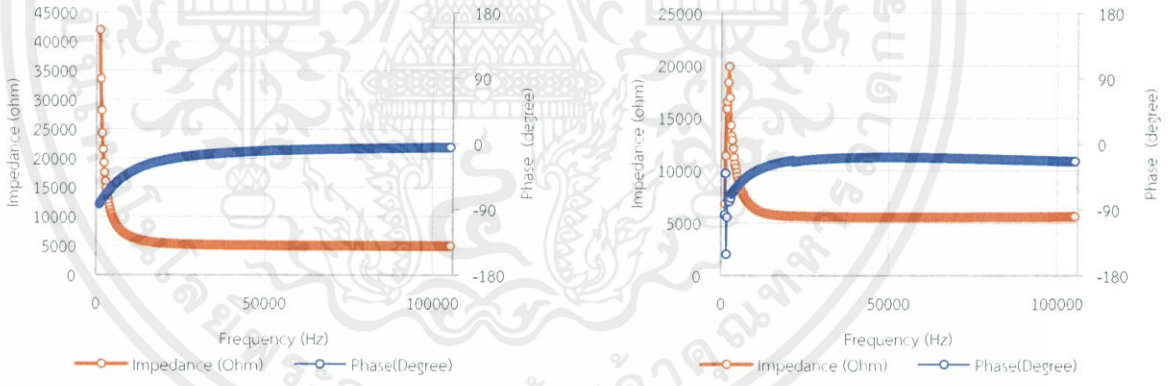
รูปที่ 4.27 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 4.99 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 4700 pF
โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

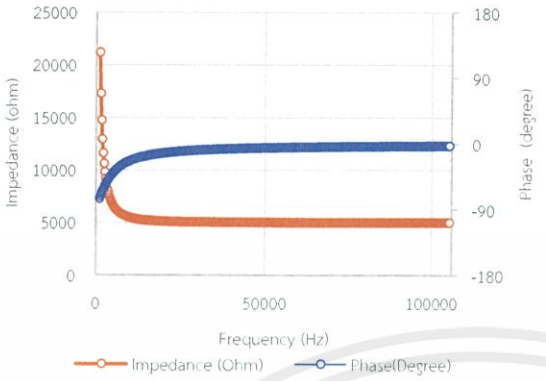
รูปที่ 4.28 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 1500 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

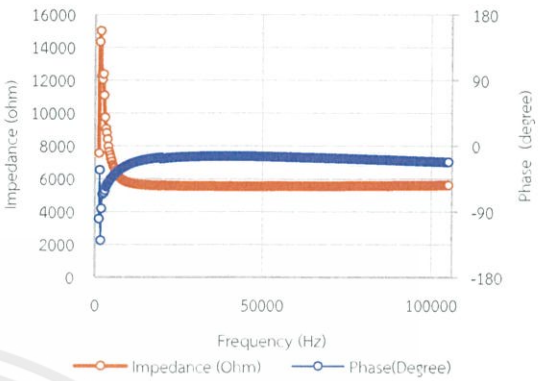


(ก) (ข)

รูปที่ 4.29 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 3300 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

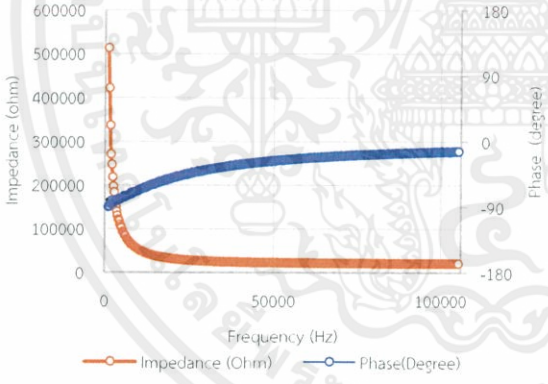
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

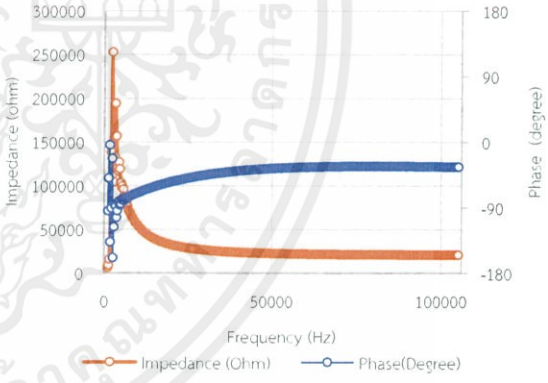




(ก) (ข)

รูปที่ 4.30 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 5 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 6800 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

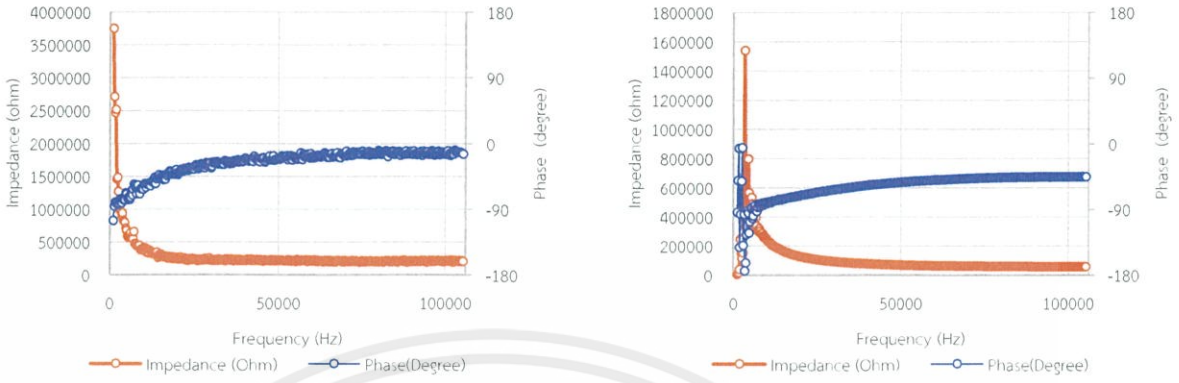




(ก) (ข)

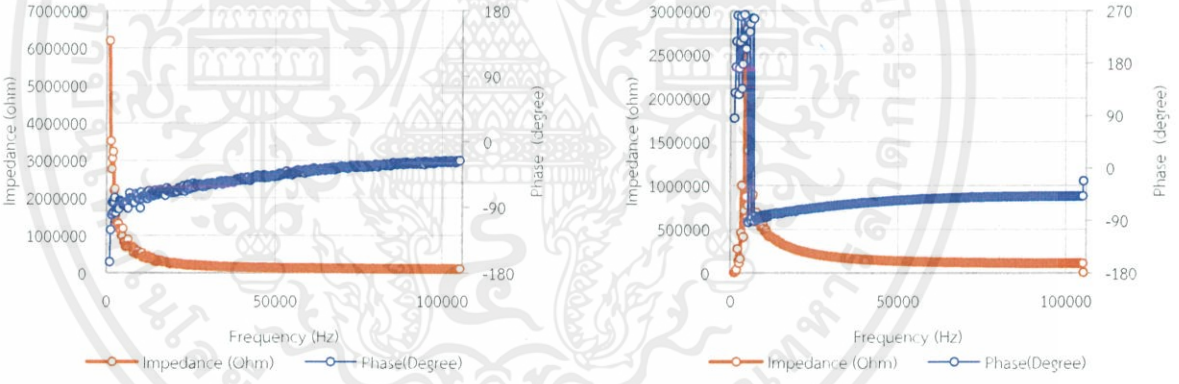
รูปที่ 4.31 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 20.4 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 330 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

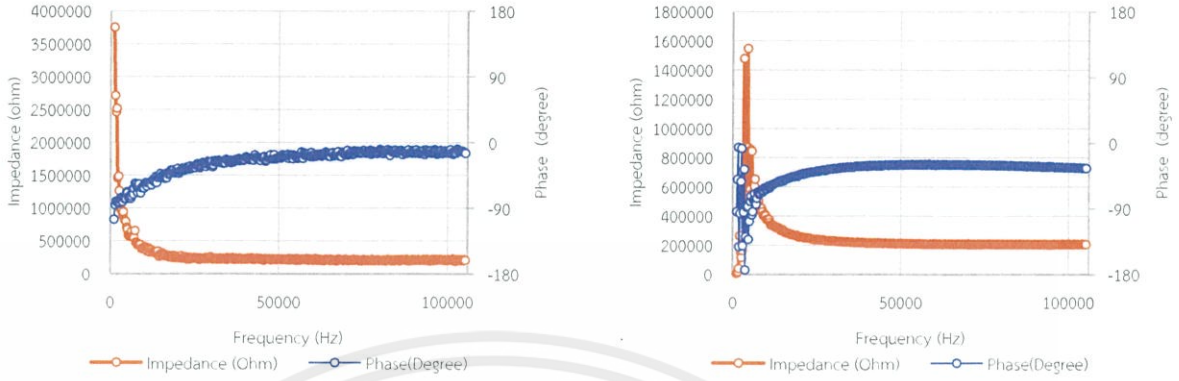
รูปที่ 4.32 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 50 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 68 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

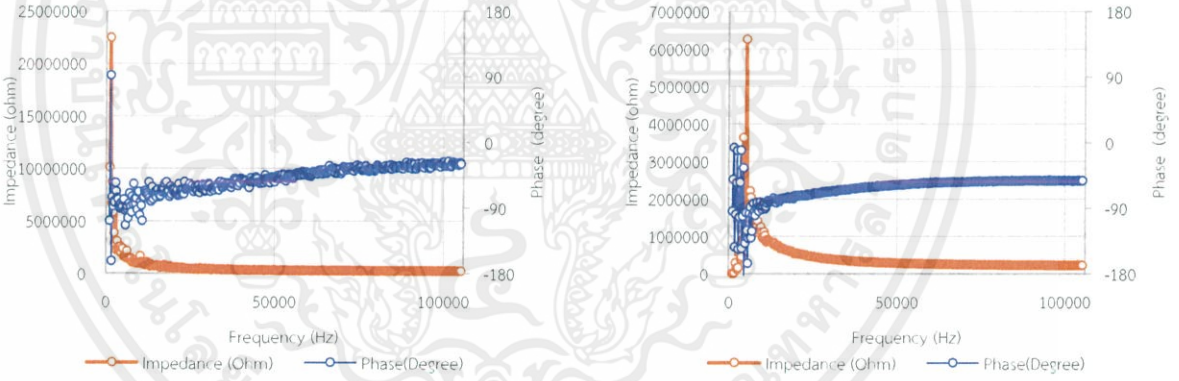
รูปที่ 4.33 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 99.9 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 33 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

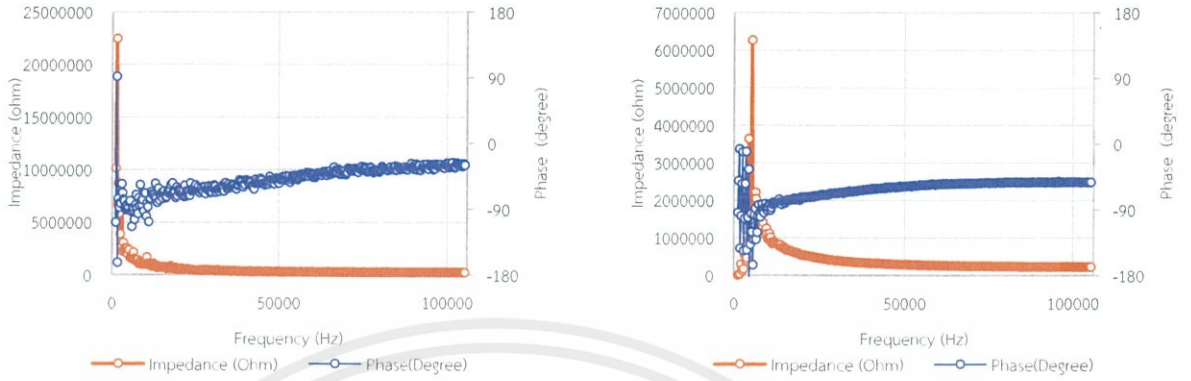
รูปที่ 4.34 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 202.3 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 47 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

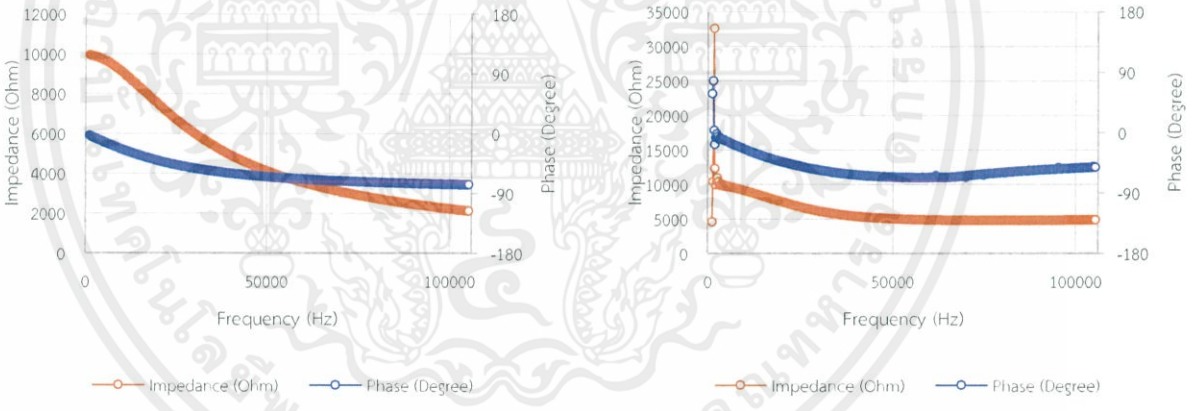
รูปที่ 4.35 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 202.4 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 15 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

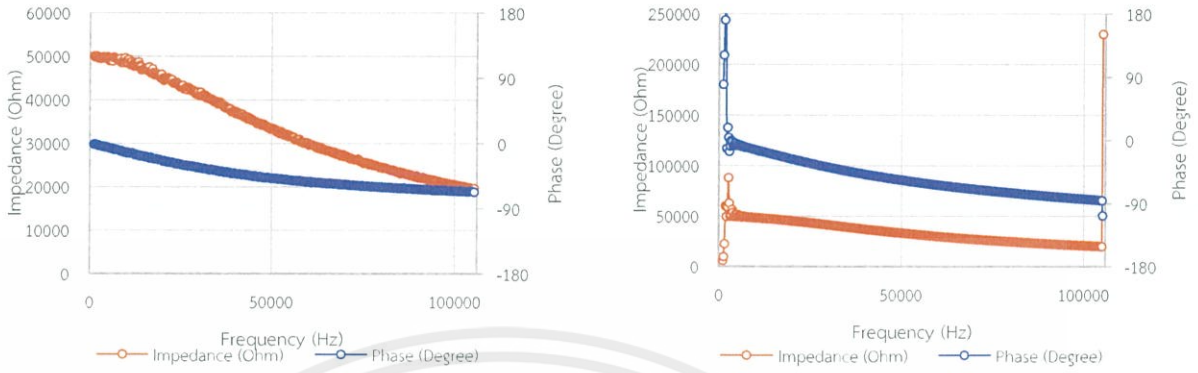
รูปที่ 4.36 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 202.5 kΩ ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ 33 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

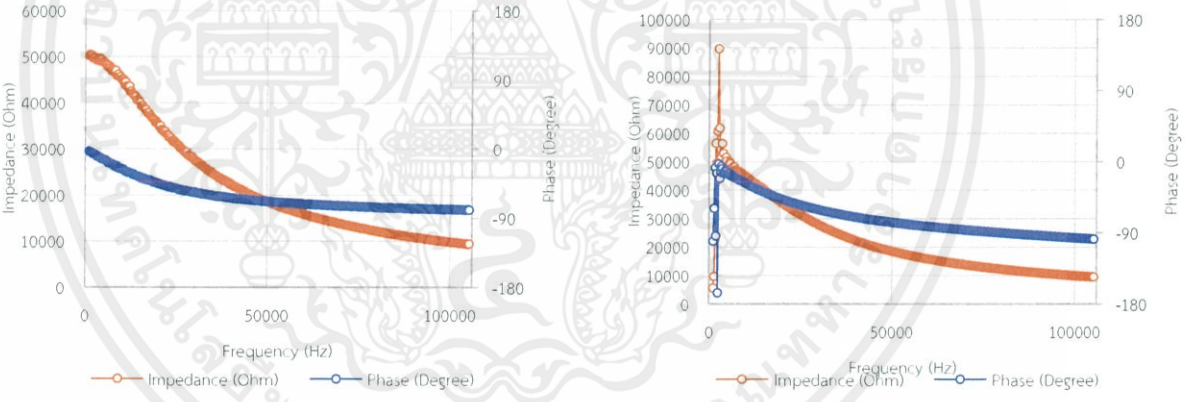
รูปที่ 4.37 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 9.95 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 680 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

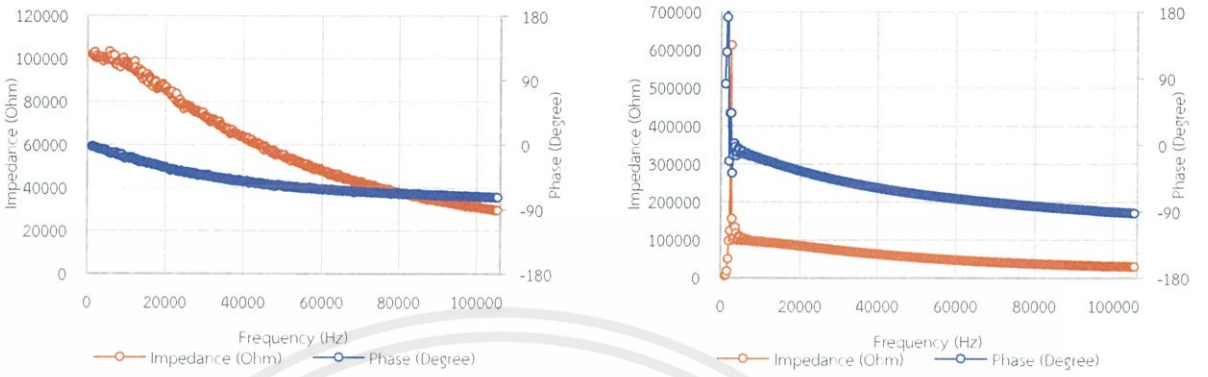
รูปที่ 4.38 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 49.9 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 68 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

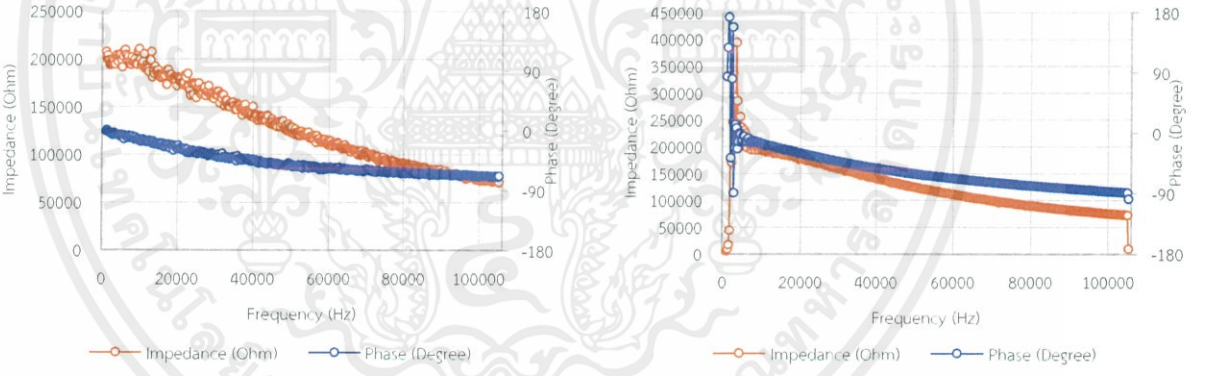
รูปที่ 4.39 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 50 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 150 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

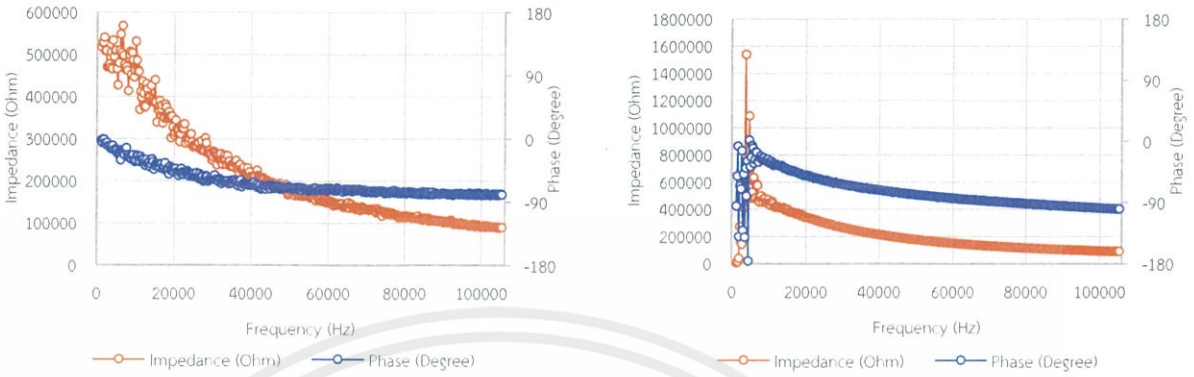
รูปที่ 4.40 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 100.6 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 47 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น



(ก) (ข)

รูปที่ 4.41 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 201.2 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 20 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



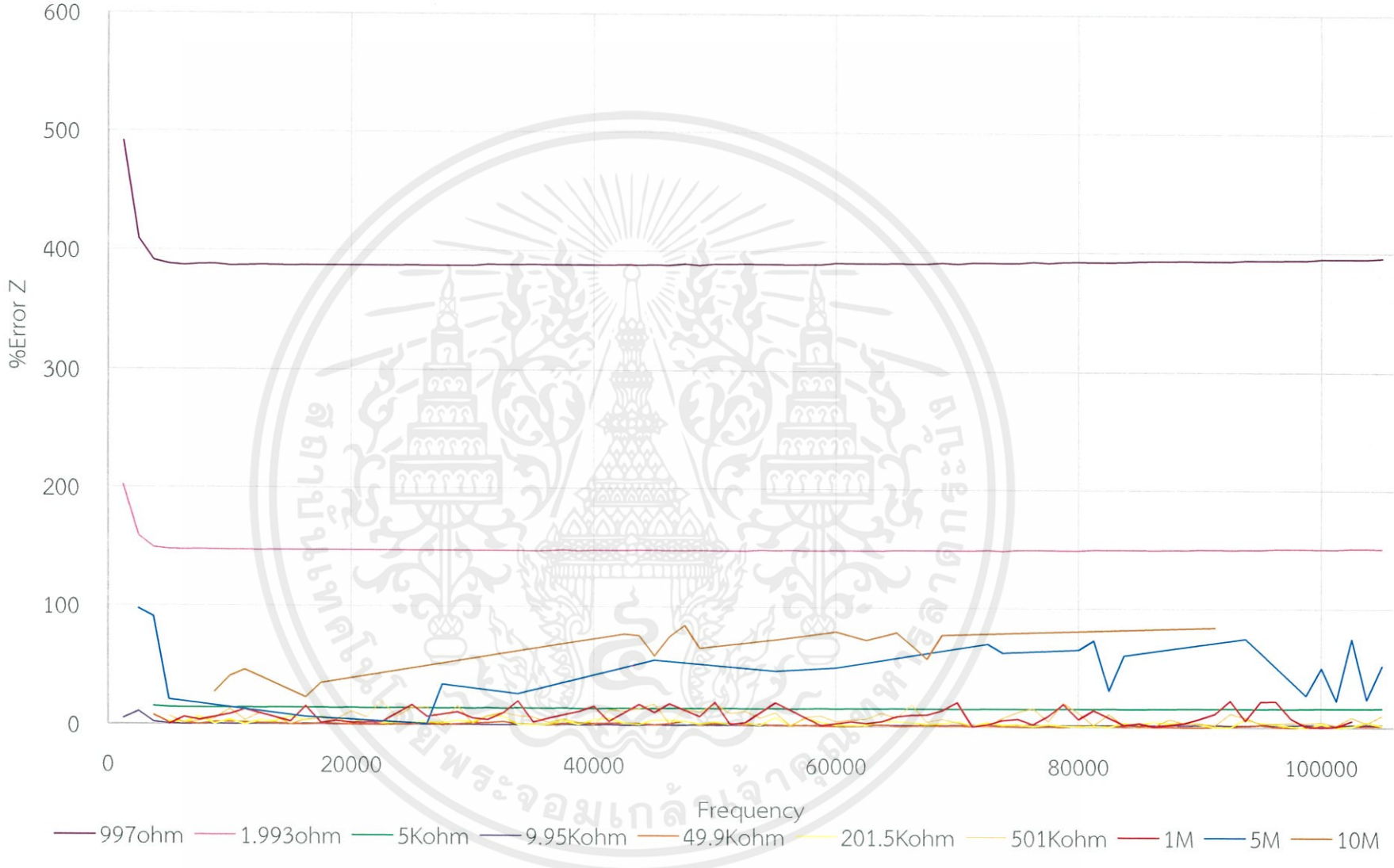
(ก) (ข)

รูปที่ 4.42 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน 503 kΩ ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ 15 pF โดยใช้ (ก) เครื่องอิมพีแดนซ์มิเตอร์ (ข) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้น

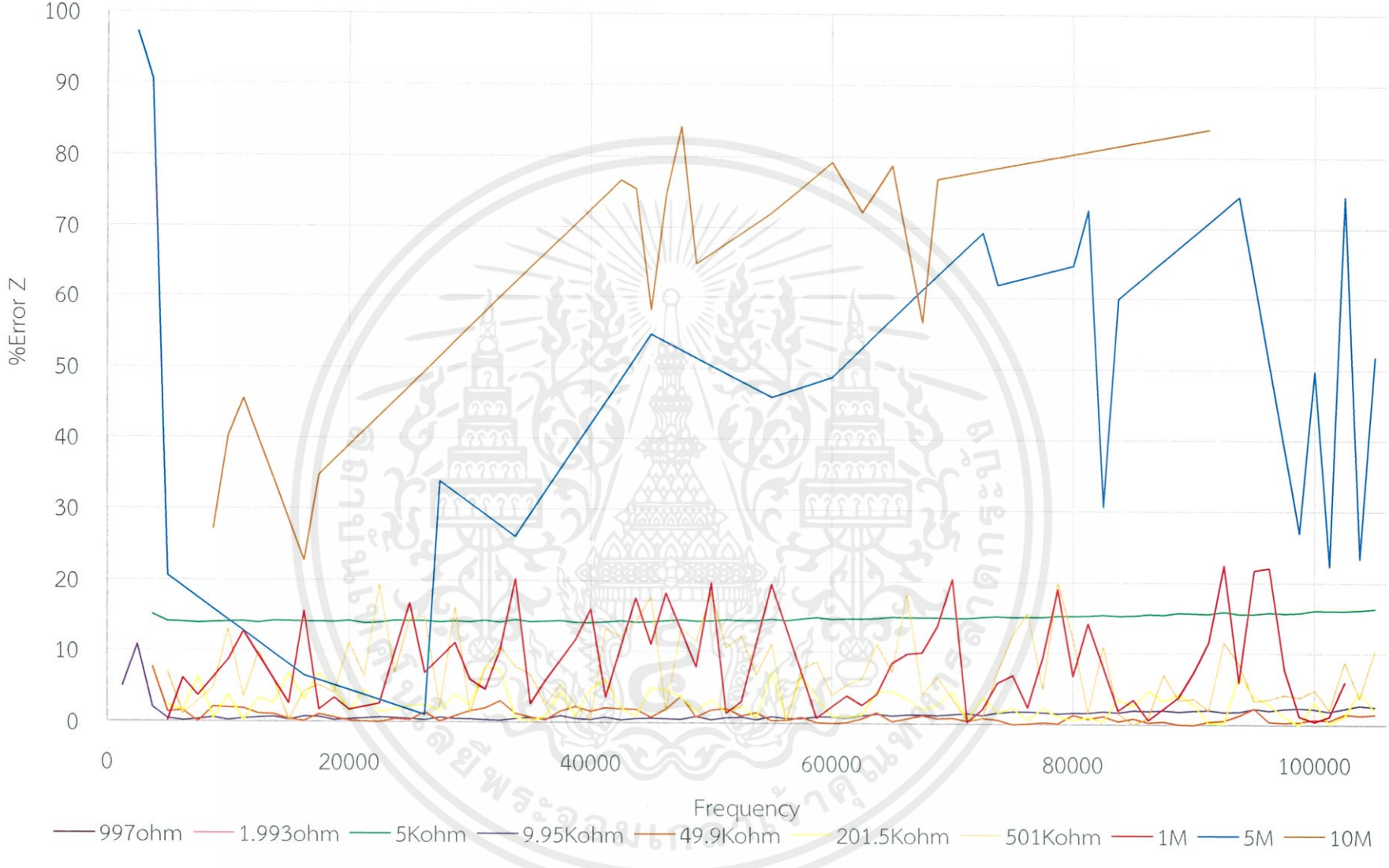
4.4 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง

เนื่องจากในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 มีผลการทดลองเป็นจำนวนมาก จึงทำการรวบรวมผลการทดลองทั้งหมดในหัวข้อดังกล่าวเข้าด้วยกัน สรุปเป็นผลการทดลองที่แสดงความคลาดเคลื่อนของขนาดและเฟสของค่าอิมพีแดนซ์ที่แต่ละค่าความถี่ของอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.43 – 4.54

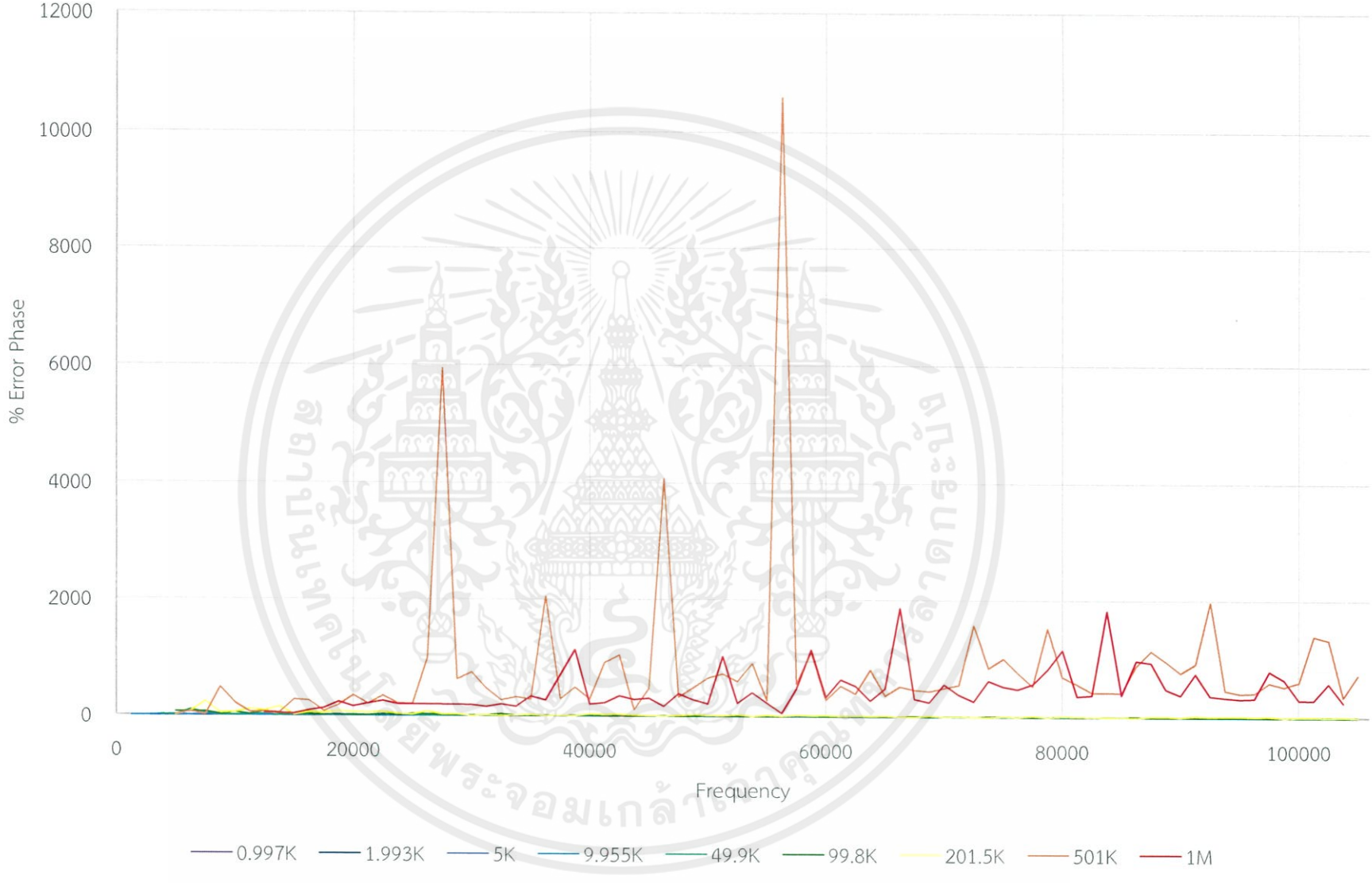
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



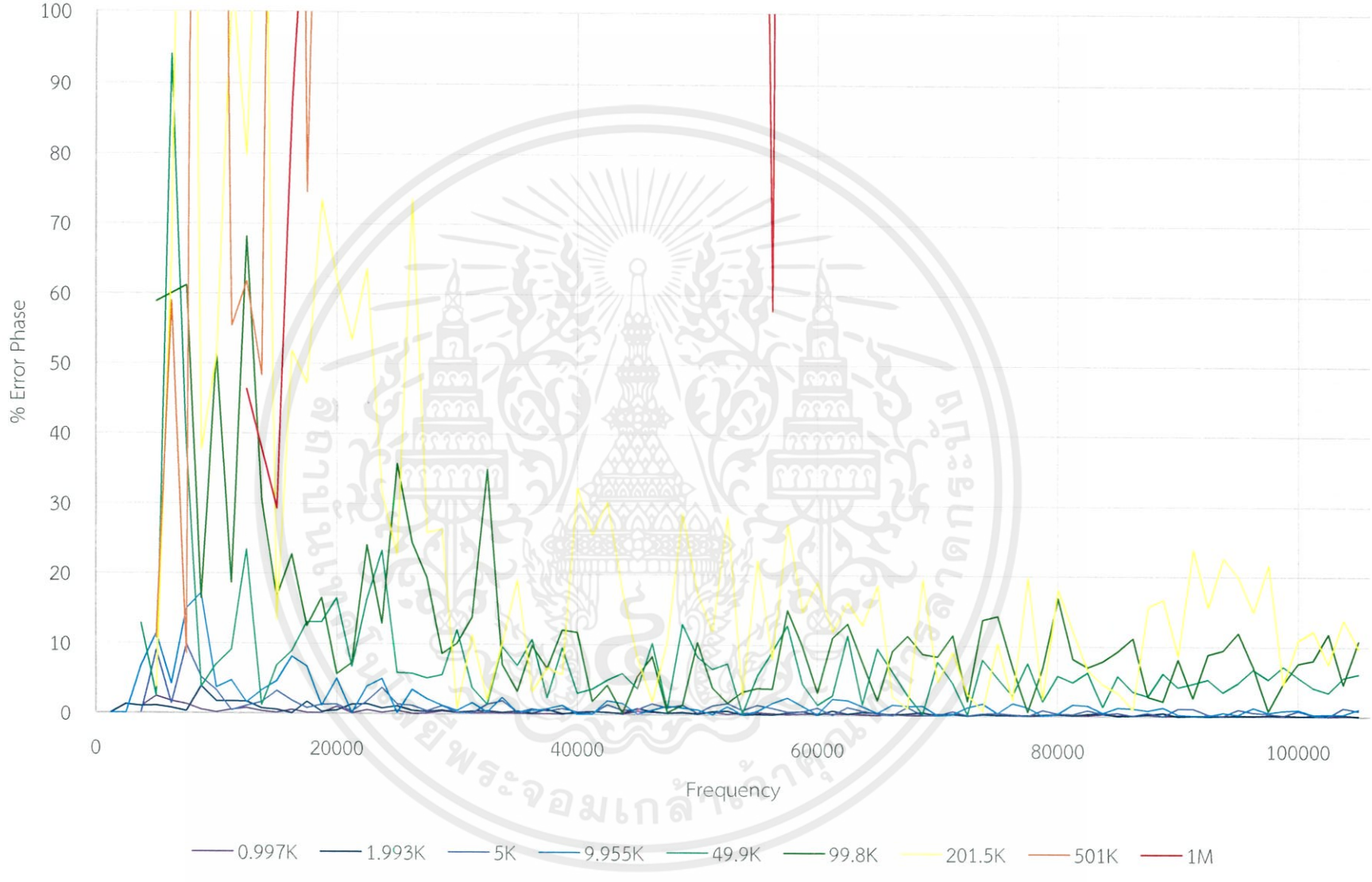
รูปที่ 4.43 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวต้านทาน



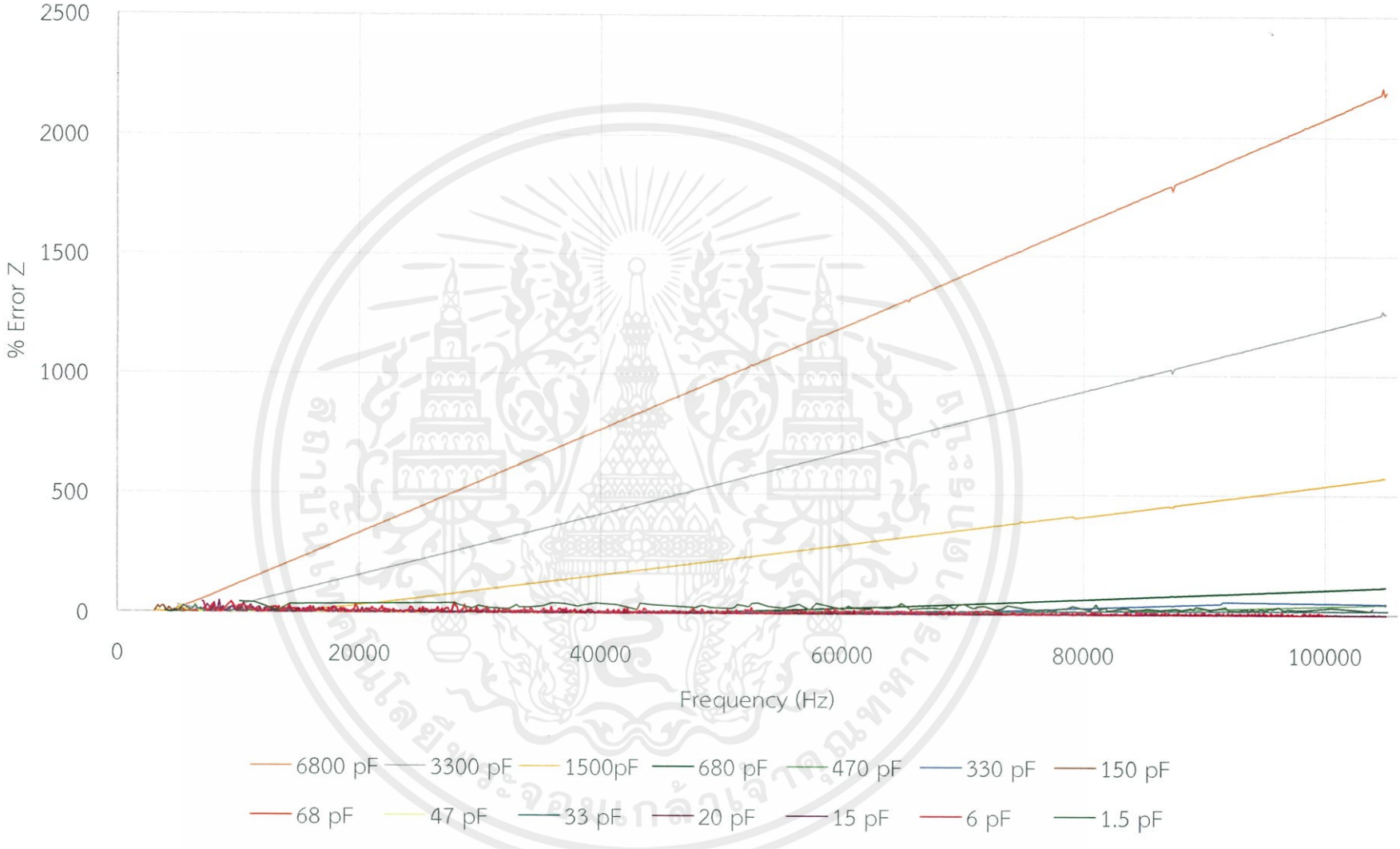
รูปที่ 4.44 รูปขยายรูปที่ 4.43 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 – 100 %



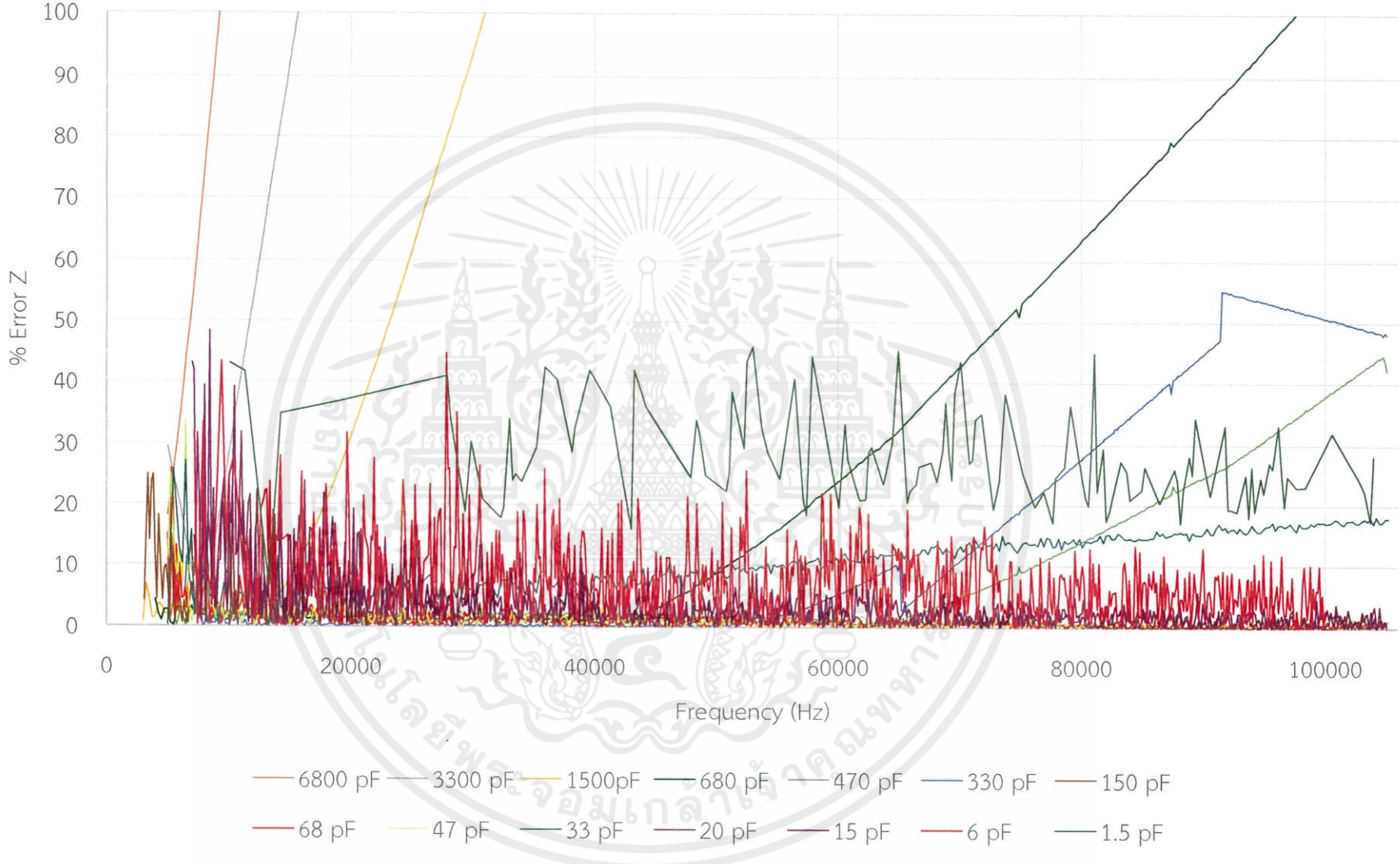
รูปที่ 4.45 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทาน



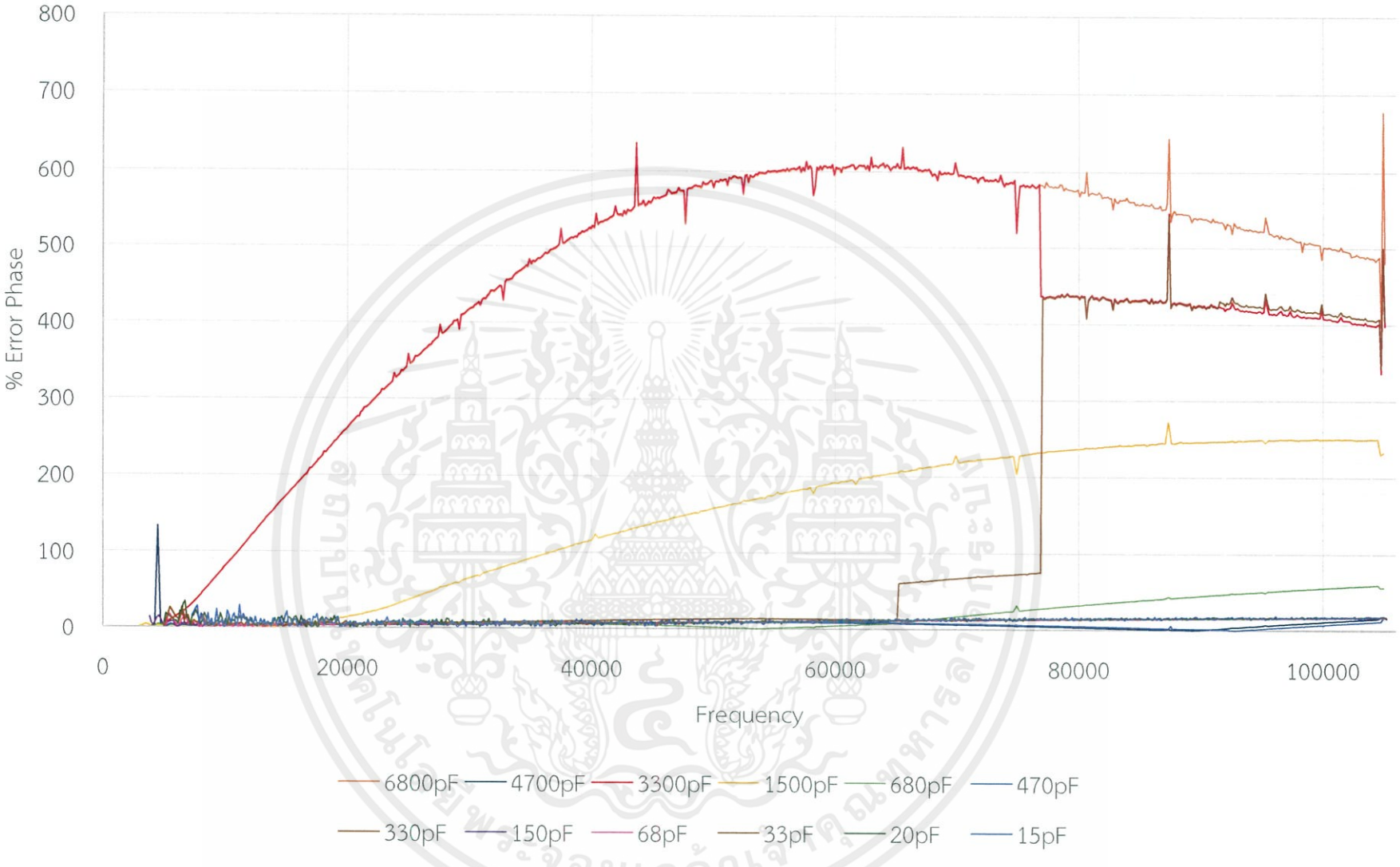
รูปที่ 4.46 รูปขยายรูปที่ 4.45 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 – 100 %



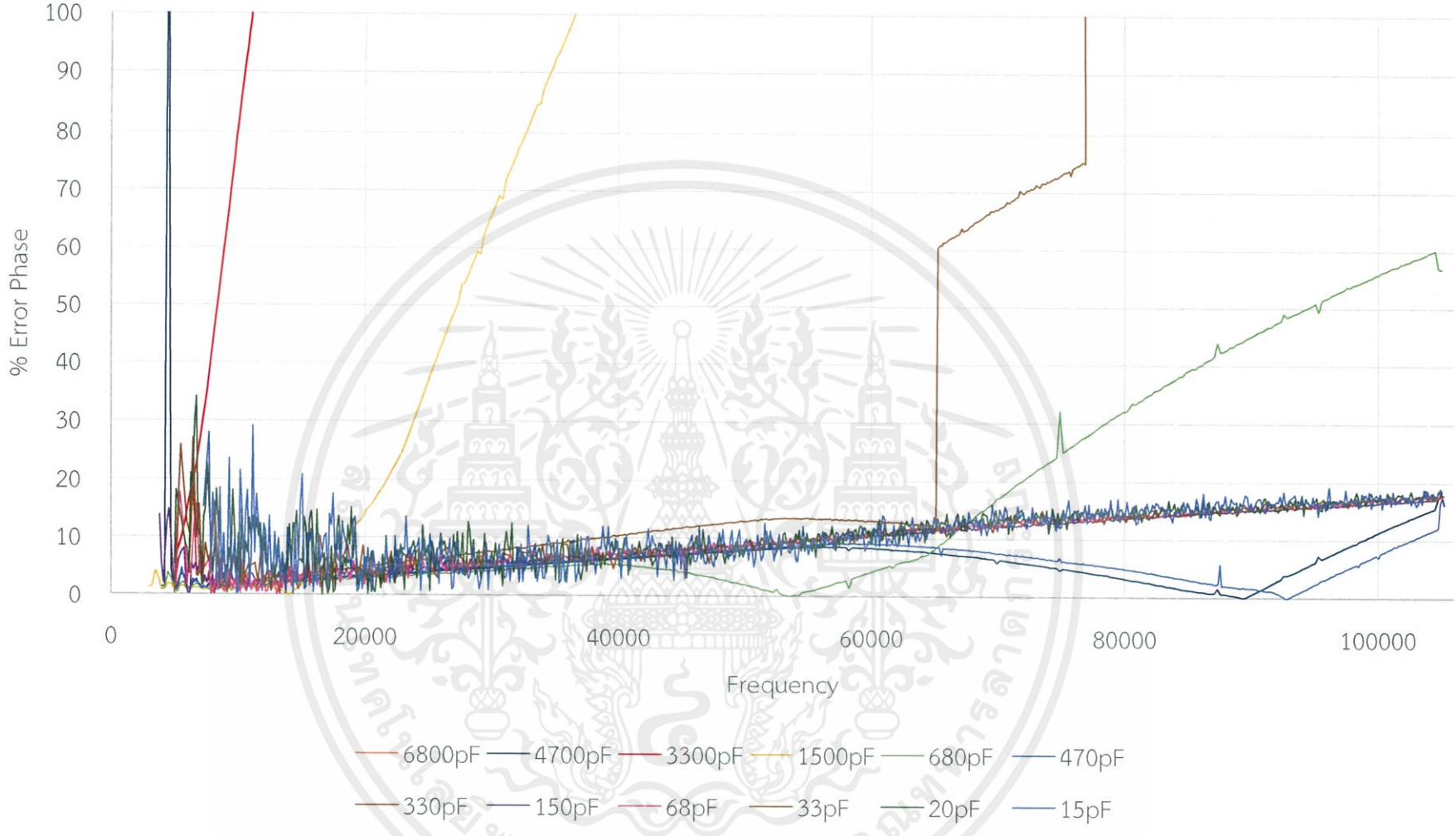
รูปที่ 4.47 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวเก็บประจุ



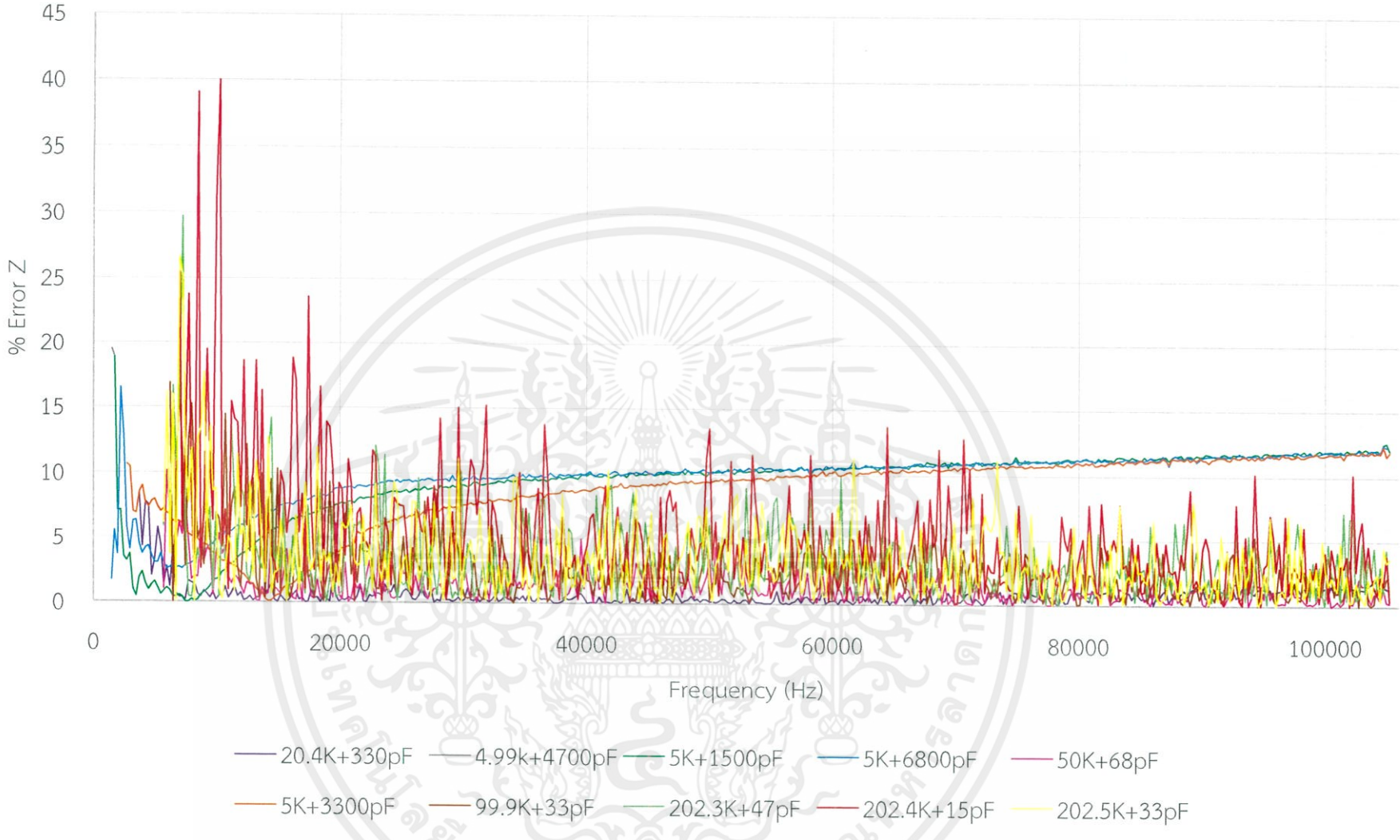
รูปที่ 4.48 รูปขยายรูปที่ 4.47 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 – 100 %



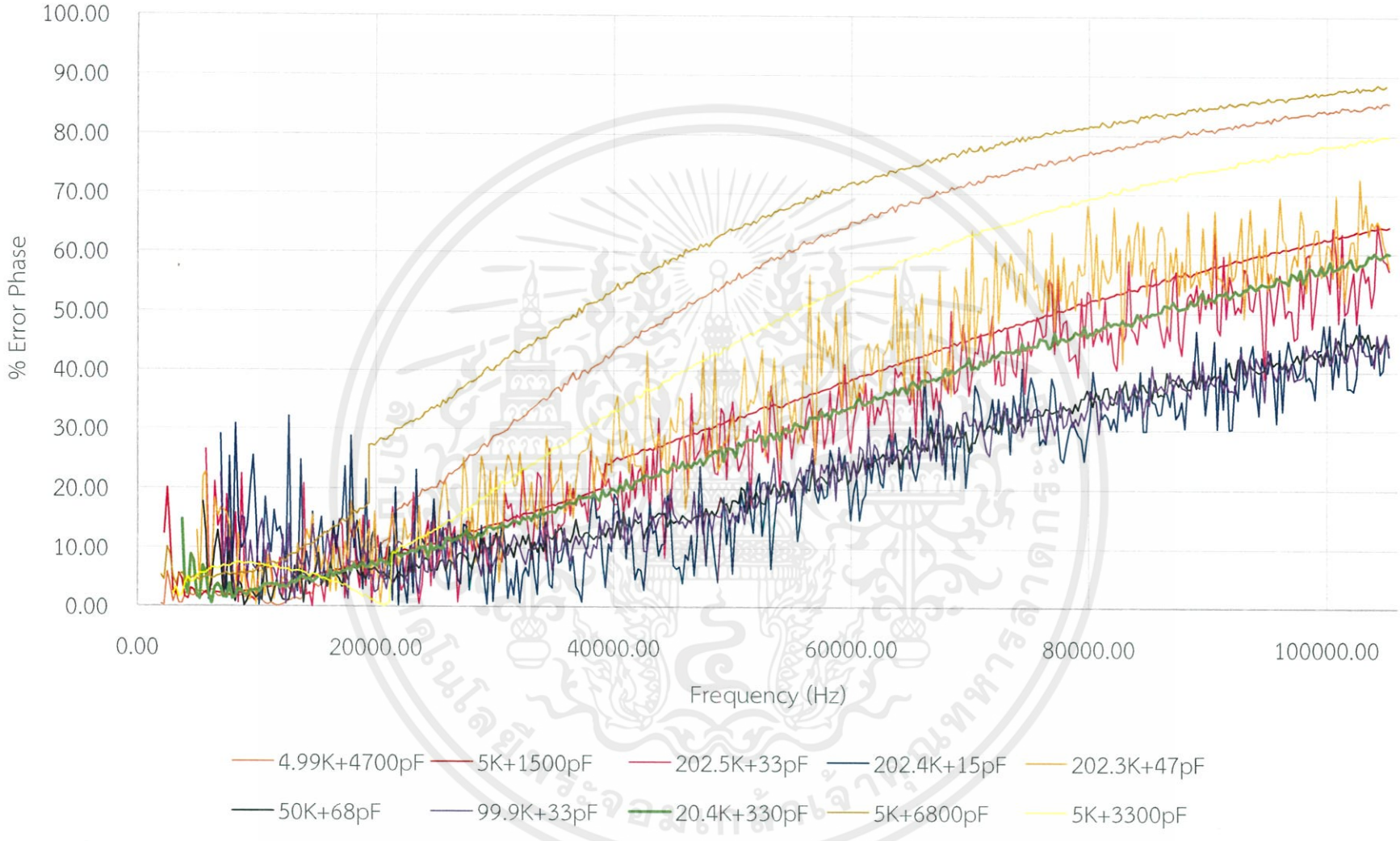
รูปที่ 4.49 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทาน



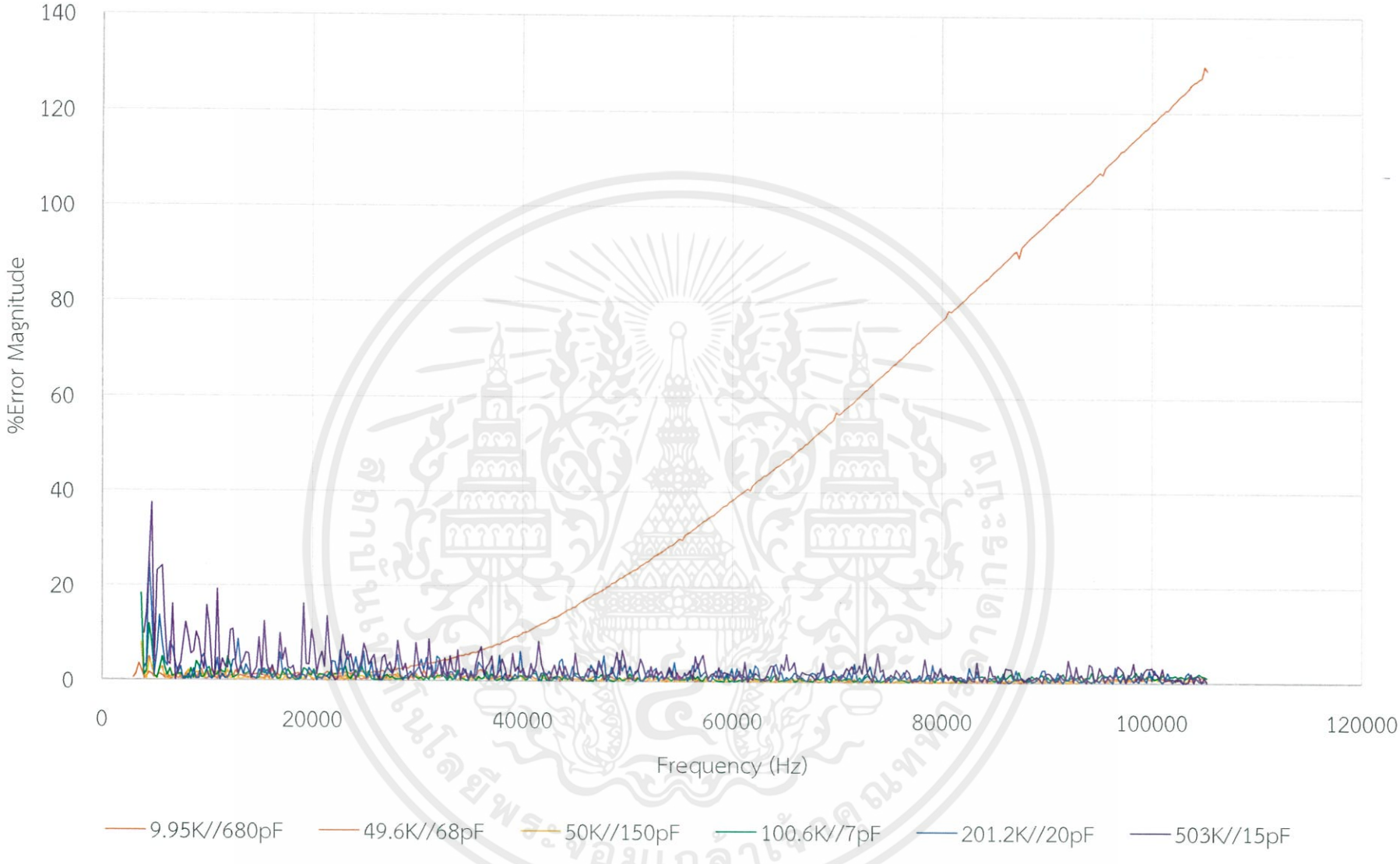
รูปที่ 4.50 รูปขยายรูปที่ 4.50 ในช่วงที่มีความคลาดเคลื่อน 0 – 100 %



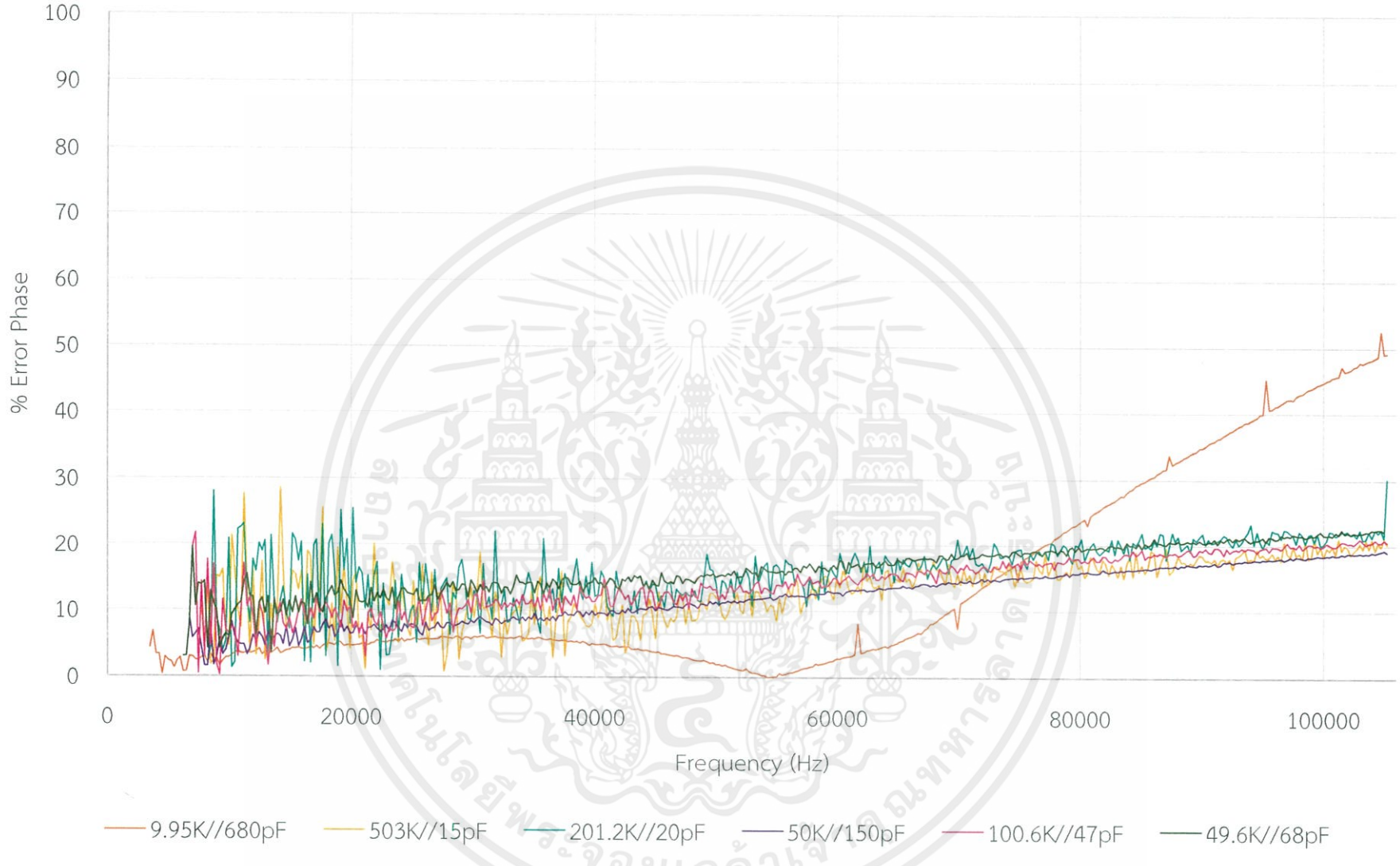
รูปที่ 4.51 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวต้านทานต่ออนุกรมตัวเก็บประจุ



รูปที่ 4.52 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ



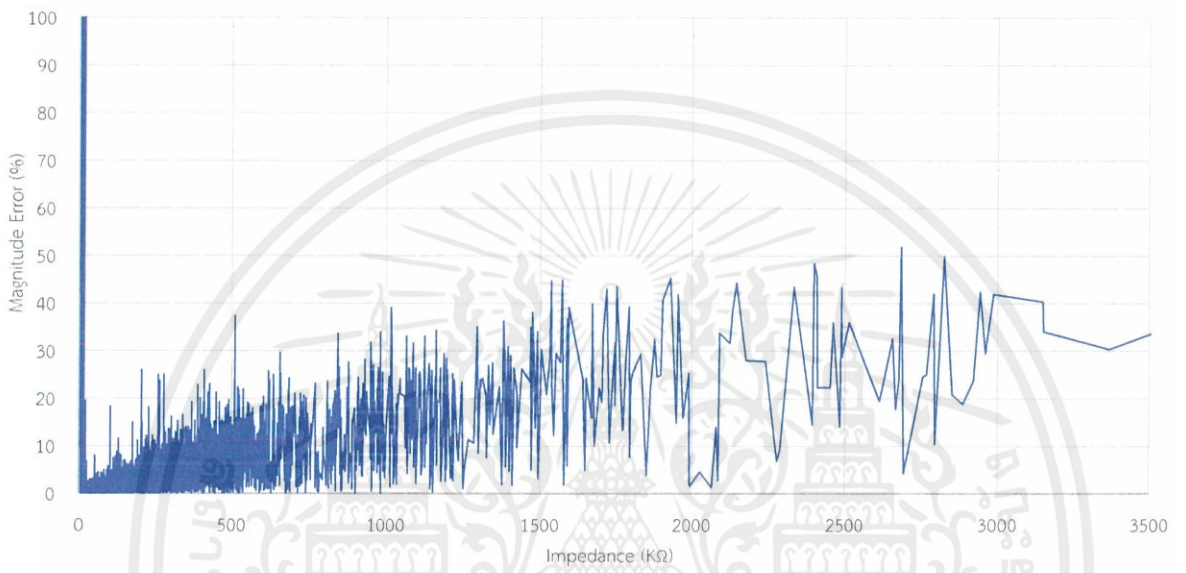
รูปที่ 4.53 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดขนาดของตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ



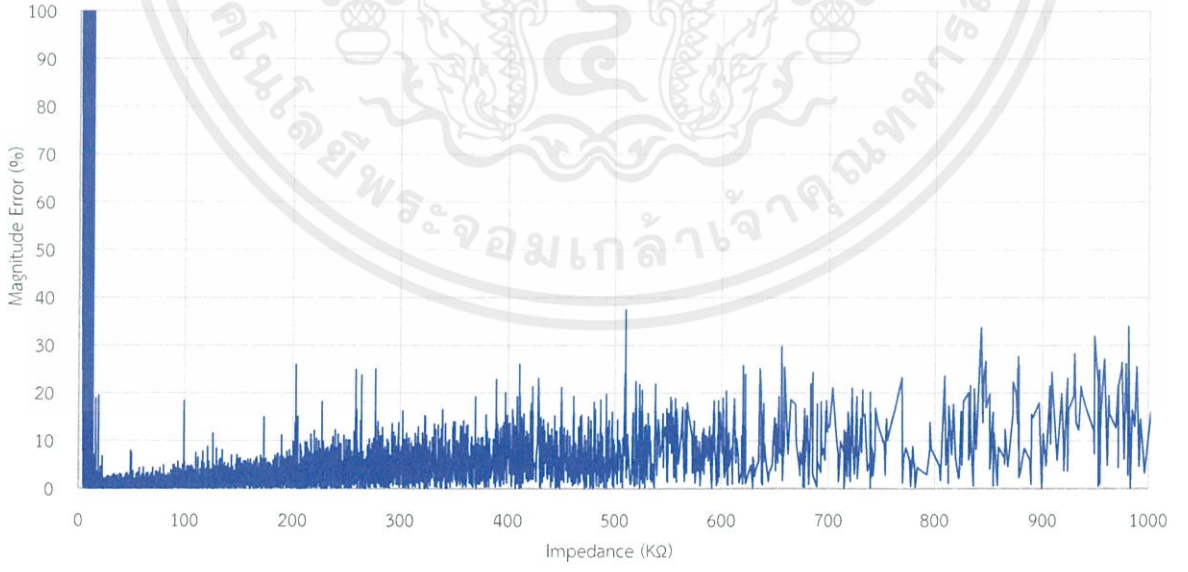
รูปที่ 4.54 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับมิเตอร์ความละเอียดสูง เมื่อวัดเฟสของตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเก็บประจุ

4.5 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของขนาดและเฟสของค่าอิมพีแดนซ์

จากผลการทดลองในข้อ 4.4 จะสังเกตเห็นว่าความคลาดเคลื่อนของขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการวัด ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนของเฟสของค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับความถี่ขณะที่ทำการวัด จึงสรุปผลการทดลองในข้อ 4.4 ได้ดังรูปที่ 4.55 - 4.57

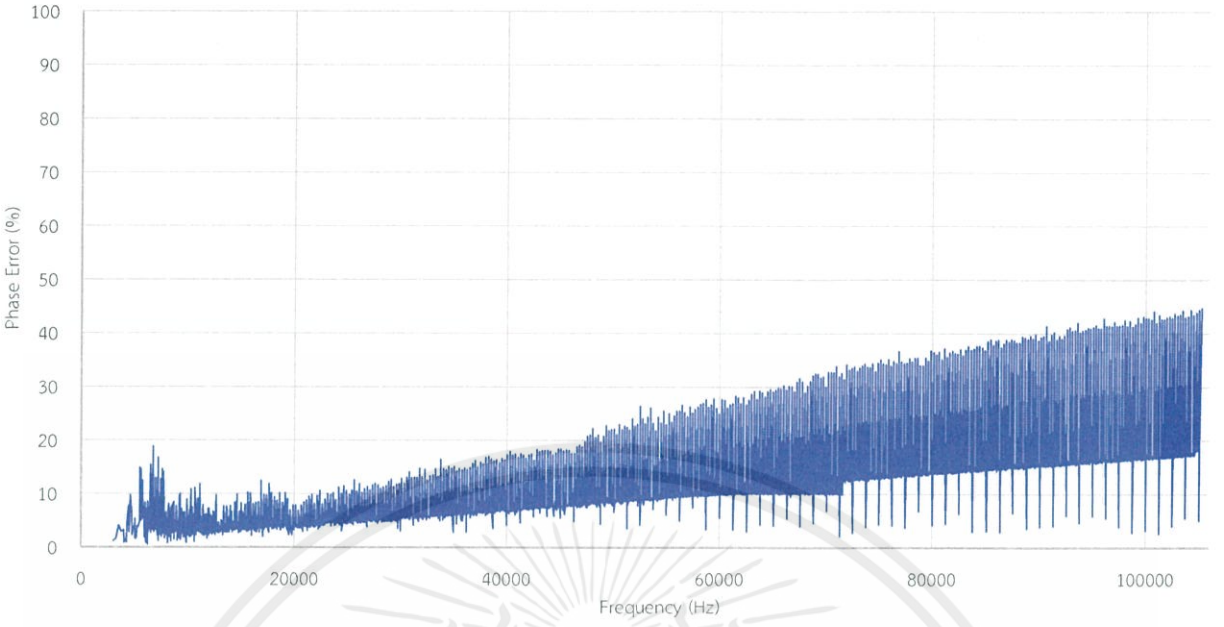


รูปที่ 4.55 กราฟผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของอิมพีแดนซ์กับช่วงของอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4.56 รูปขยายรูปที่ 4.55 ในช่วงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 0 - 1000 kΩ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.57 กราฟผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของมุมเฟสกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

สำหรับขนาดของค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้นั้น จะเห็นว่าในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดมีค่าน้อยกว่า 5 KΩ จะวัดค่าได้ที่ 5 KΩ แบบคงที่ และในกรณีที่ค่าที่วัดมีค่ามากกว่า 1.5 MΩ จะวัดค่าได้มากที่สุดที่ประมาณ 1.5 MΩ จึงสรุปว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ได้ในช่วง 5 KΩ - 1 MΩ โดยที่ค่าระหว่าง 5 - 100 KΩ จะมีความผิดพลาดประมาณ 2 – 5 % ในขณะที่ค่าที่อยู่ระหว่าง 100 KΩ - 1 MΩ จะมีความผิดพลาดประมาณ 15 – 20 %

ในส่วนของเฟสของค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้นั้น ที่ค่าอิมพีแดนซ์ในช่วง 5 KΩ - 1.5 MΩ ที่ความถี่ 6 – 40 KHz จะมีความผิดพลาดประมาณ 2 – 10 % ที่ความถี่ 40 - 80 KHz จะมีความผิดพลาดประมาณ 10 – 20 % และที่ความถี่ 80 – 100 KHz จะมีความผิดพลาดประมาณ 20 - 40 %

โดยในช่วงที่เริ่มวัดค่าในแต่ละกราฟจะมีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่วงจรรวม AD5933 จะต้องใช้เวลาในการปรับเทียบ (Calibrate) เมื่อเริ่มทำการวัด โดยเป็นที่น่าสังเกตว่ายิ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการวัดมีค่าสูง วงจรรวมจะใช้เวลาในการปรับเทียบนาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากขดลวดเหนี่ยวนำในท้องตลาดมีค่าให้เลือกน้อย ทำให้ไม่ได้ทำการทดสอบการวัดค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ

2. ในการทดลองในหัวข้อ 4.3 ก่อนทำการเก็บค่าควรแก้ปัญหาที่ค่าที่วัดในช่วงเริ่มต้นมีความคลาดเคลื่อนสูงอันเป็นผลมาจากการปรับเทียบเมื่อเริ่มต้นระบบให้ได้เสียก่อน

3. สามารถทำให้ระบบวัดค่าได้แม่นยำมากขึ้นอีกด้วยการแก้ไขซอฟต์แวร์ โดยเพิ่มจำนวนย่านในการวัด โดยการเพิ่มย่านวัดนั้นต้องสอดคล้องฮาร์ดแวร์ อย่างไรก็ตามการออกแบบซอฟแวร์ให้ใช้กับโมดูลวัดอิมพีแดนซ์ดังกล่าวมีความซับซ้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] B. Pease, *What's all this transimpedance amplifier stuff, anyhow?*, Electronic Design, vol. 77, Jan. 8, 2011.

[2] G. Amorese, *LCR/Impedance Measurement Basics*, California: Hew-Packard Co., 1997.

[3] L. Callegaro, *Electrical Impedance Principles, Measurement and Application*, Florida: Taylor & Francis group, 2013.

[4] บริษัท อีทีที จำกัด, *เรียนรู้เข้าใจใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino,* บริษัท อีทีที จำกัด, 2552.

[5] *Agilent Impedance Measurement Handbook*, 4th Ed., Agilent Tech. Co., pp. 2-4 - 2-6.

[6] *AD5933, 1MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer*, Analog Device Inc., Norwood, MA, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดคำสั่งที่เขียนขึ้นในโปรแกรม Arduino IDE

```
#include "Wire.h"
#define button 2
#define SLAVE_ADDR 0x0D
#define ADDR_PTR 0xB0
#define START_FREQ_R1 0x82
#define START_FREQ_R2 0x83
#define START_FREQ_R3 0x84
#define FREG_INCRE_R1 0x85
#define FREG_INCRE_R2 0x86
#define FREG_INCRE_R3 0x87
#define NUM_INCRE_R1 0x88
#define NUM_INCRE_R2 0x89
#define NUM_SCYCLES_R1 0x8A
#define NUM_SCYCLES_R2 0x8B
#define RE_DATA_R1 0x94
#define RE_DATA_R2 0x95
#define IMG_DATA_R1 0x96
#define IMG_DATA_R2 0x97
#define TEMP_R1 0x92
#define TEMP_R2 0x93
#define CTRL_REG 0x80
#define CTRL_REG2 0x81
#define STATUS_REG 0x8F

const float MCLK = 16.776*pow(10,6); // AD5933 Internal Clock Speed 16.776 MHz
const float start_freq = 6*pow(10,3); // Set start freq, < 100Khz
const float incre_freq = 2.5*pow(10,1); // Set freq increment
const int incre_num = 24; // Set number of increments; < 511
char state;
void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(115200);
  pinMode(button, INPUT);
  //nop - clear ctrl-reg
  writeData(CTRL_REG,0x0);
  //reset ctrl register
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  writeData(CTRL_REG2,0x10);
  programReg();
}
void loop(){
   if(Serial.available()>0) {   //Read state and enter FSM
     state = Serial.read();
     switch(state) {       //FSM
       case 'A':  //Program Registers
         programReg();
         break;
       case 'B':  //Measure Temperature
         measureTemperature();
         break;
       case 'C':
         runSweep();
         delay(1000);
         break;
     }
     Serial.flush();
   }
}
void programReg(){ /////Programming Device Registers/////
  writeData(CTRL_REG,0x01);  // Set Range 1, PGA gain 1
  writeData(NUM_SCYCLES_R1, 0x07);  // Set settling cycles
  writeData(NUM_SCYCLES_R2, 0xFF);
  writeData(START_FREQ_R1, getFrequency(start_freq,1));  // Start frequency of 1kHz
  writeData(START_FREQ_R2, getFrequency(start_freq,2));
  writeData(START_FREQ_R3, getFrequency(start_freq,3));
  writeData(FREG_INCRE_R1, getFrequency(incre_freq,1)); // Increment by 1 kHz
  writeData(FREG_INCRE_R2, getFrequency(incre_freq,2));
  writeData(FREG_INCRE_R3, getFrequency(incre_freq,3));
  // Points in frequency sweep (100), max 511
  writeData(NUM_INCRE_R1, (incre_num & 0x001F00)>>0x08 );
  writeData(NUM_INCRE_R2, (incre_num & 0x0000FF));
}
void runSweep() {
  short re;
  short img;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  double freq;
  double mag;
  double phase;
  double phaseA;
  double sys_phase;
  double gain;
  double impedance;
        double tot=0;
        double avg;
  int i=0;
  programReg();
  // 1. Standby '10110000' Mask D8-10 of avoid tampering with gains
  writeData(CTRL_REG,(readData(CTRL_REG) & 0x07) | 0xB0);
  // 2. Initialize sweep
  writeData(CTRL_REG,(readData(CTRL_REG) & 0x07) | 0x10);
  // 3. Start sweep
  writeData(CTRL_REG,(readData(CTRL_REG) & 0x07) | 0x20);
  while((readData(STATUS_REG) & 0x07) < 4 ) {  // Check that status reg != 4, sweep
not complete
    delay(100); // delay between measurements
    int flag = readData(STATUS_REG)& 2;
    if (flag==2) {
      byte R1 = readData(RE_DATA_R1);
      byte R2 = readData(RE_DATA_R2);
      re = (R1 << 8) | R2;
      R1  = readData(IMG_DATA_R1);
      R2  = readData(IMG_DATA_R2);
      img = (R1 << 8) | R2;
      freq = start_freq + i*incre_freq;
      mag = sqrt(pow(double(re),2)+pow(double(img),2));
      gain = (1.0/10030)/9766.13;
      impedance = 1/(gain*mag);
      Serial.print("Frequency: ");
      Serial.print(freq);
      Serial.print("Hz;");
      /* Serial.print(" Magnitude: ");
      Serial.print(mag);
      Serial.print("Ohm;");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Serial.print(" Resistance: ");
        Serial.print(re);
        Serial.print(",");
        Serial.print(" Reactance: ");
        Serial.print(img);
        Serial.println(",");     */
        Serial.print(" Impedance: ");
        Serial.print(impedance);
        Serial.print("Ohm;");
        Serial.println(",")
        phase = atan(double(img)/double(re));
        phase = (180.0/3.1415926)*phase;  //convert phase angle to degrees
        // Phase Calibration
        sys_phase = (0.000822*freq) + 89.67 ;
        phase = phase - sys_phase
         if( re>0 && img>0 ){
         phase = phase ;
        }
        else if (re < 0){
          phase = phase + 180;
        }
        else{
          phase = phase + 360;
        }
        Serial.print(phase);
        Serial.println(",");
        // break;  //TODO: for single run, remove after debugging
        //Increment frequency
        if((readData(STATUS_REG) & 0x07) < 4 ){
          writeData(CTRL_REG,(readData(CTRL_REG) & 0x07) | 0x30);
          i++;
        }
      }
    }
  //Power down
  //writeData(CTRL_REG,0xA0);
    writeData(CTRL_REG,(readData(CTRL_REG) & 0x07) | 0xA0);
  }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void writeData(int addr, int data) {
 Wire.beginTransmission(SLAVE_ADDR);
 Wire.write(addr);
 Wire.write(data);
 Wire.endTransmission();
 delay(1);
}
int readData(int addr){
  int data;
  Wire.beginTransmission(SLAVE_ADDR);
  Wire.write(ADDR_PTR);
  Wire.write(addr);
  Wire.endTransmission();
  delay(1);
  Wire.requestFrom(SLAVE_ADDR,1);
  if (Wire.available() >= 1){
    data = Wire.read();
  }
  else {
    data = -1;
  }
  delay(1);
  return data;
}
boolean measureTemperature() {
  // Measure temperature '10010000'
  writeData(CTRL_REG, 0x90);
  //TODO: necessary to write to second control register?
  delay(10); // wait for 10 ms
  //Check status reg for temp measurement available
  int flag = readData(STATUS_REG)& 1;
  if (flag == 1) {
    // Temperature is available
    int temperatureData = readData(TEMP_R1) << 8;
    temperatureData |= readData(TEMP_R2);
    temperatureData &= 0x3FFF; // remove first two bits
    if (temperatureData & 0x2000 == 1) { // negative temperature
      temperatureData -= 0x4000;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    }
    double val = double(temperatureData) / 32;
    temperatureData /= 32;
    Serial.print("Temperature: ");
    Serial.print(val);
    //Serial.write(176);  //degree sign
    Serial.println("C.");
    // Power Down '10100000'
    writeData(CTRL_REG,0xA0);
    return true;
  } else {
    return false;
  }
}
byte getFrequency(float freq, int n){
  long val = long((freq/(MCLK/4)) * pow(2,27));
  byte code;
    switch (n) {
      case 1:
        code = (val & 0xFF0000) >> 0x10;
        break;
      case 2:
        code = (val & 0x00FF00) >> 0x08;
        break;
      case 3:
        code = (val & 0x0000FF);
        break;
      default:
        code = 0;
    }
  return code;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้