

การพัฒนางจรวีตสโตนบริดจ์สำหรับการวัดค่าความต้านทานสูงในระดับเทระโอห์ม



นายกองศักดิ์ ทองบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชามาตรวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF WHEATSTONE BRIDGE CIRCUIT FOR MEASUREMENT
OF HIGH VALUE RESISTANCE IN ORDER OF TERAOHM



Mr. Kongsak Thongboon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนางจรวัดสโตนบริดจ์สำหรับวัดค่าความต้านทานสูงใน
ระดับทะเลไอห่ม

โดย

นายกองศักดิ์ ทองบุญ

สาขาวิชา

มาตรวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

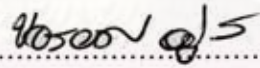
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

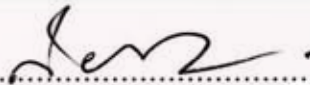


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

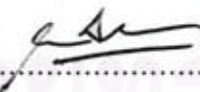
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



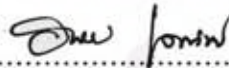
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชงยศ อยู่ดี)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิริณันต์ รัตนธรรมพันธ์)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน)





..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพูน)

กองศักดิ์ ทองบุญ : การพัฒนาวงจรวัดสโตนบริดจ์สำหรับการวัดค่าความต้านทานสูงใน
ระดับเทระโอห์ม. (DEVELOPMENT OF WHEATSTONE BRIDGE CIRCUIT FOR
MEASUREMENT OF HIGH VALUE RESISTANCE IN ORDER OF TERAOHM)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ รัตนธรรมพันธ์, 126 หน้า.

วัดสโตนบริดจ์เป็นวิธีที่นิยมใช้วัดค่าความต้านทานมาตรฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ
ระดับมาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary Standard) เป็นวิธีการวัดที่ให้ค่าความถูกต้องและแม่นยำสูง เนื่อง
เป็นการวัดแบบ Null detection ดังนั้นในการสอบเทียบความต้านทานค่าสูงๆ ที่ต้องการความถูกต้องที่
สูง ต้องอาศัยสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมอย่างดี ต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์ในการสอบเทียบ ดังนั้นวิธีการ
วัดแบบเดิมอื่นๆนั้นมีความยุ่งยากและใช้เวลาในการสอบเทียบมาก ดังนั้นจึงมีจุดประสงค์ในการเพื่อ
พัฒนาระบบการวัดที่มีประสิทธิภาพ ราคาถูก ลดระยะเวลาที่ใช้สอบเทียบ และใช้งานสะดวก ในการ
สอบเทียบความต้านทานมาตรฐานสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ค่าความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า
นำมาใช้ถ่ายค่ามาตรฐานให้กับความต้านทานที่ไม่ทราบค่าในอัตราส่วน 1:1 และ 1:10 ประกอบไปด้วย
ชุดแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ $\pm V_s$ จากเครื่อง Multi-Product Calibrator รุ่น 5520A ยี่ห้อ Fluke เป็นแหล่งจ่าย
มาตรฐาน ค่าแรงดันที่ใช้ขึ้นกับอัตราส่วน ratio ของค่าความต้านทานทั้ง 2 ที่นำมาทำการวัด และใช้
แหล่งจ่ายแรงดันปรับค่าได้ $\pm V_x$ สองตัวแยกกันจ่ายแรงดัน ทางฝั่งบวกและฝั่งลบ จะทำหน้าที่จ่าย
แรงดันให้กับความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x และใช้เครื่อง Digital Multimeter รุ่น 3458A ยี่ห้อ Agilent
เป็นตัววัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวความต้านทานมาตรฐาน R_s จะได้เป็นแรงดันตกคร่อม $\pm V_s$ และจะวัด
แรงดันตกคร่อมส่วนความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะบริดจ์สมดุล เป็นแรงดันตก
คร่อม $\pm V_x$ และใช้เครื่อง Picoammeter/Voltage รุ่น 487 ยี่ห้อ Keithley เป็นตัววัดกระแส I_s เมื่อวงจร
บริดจ์อยู่สภาวะสมดุล ค่ากระแสที่ไหลจะมีค่าใกล้เคียงค่าศูนย์มากที่สุด จึงทำการบันทึกผล

บทความนี้กล่าวถึงงานศึกษาวิจัยพัฒนาวิธีการวัดความต้านทาน ที่สามารถสอบเทียบความ
ต้านทานสูงในระดับเทระโอห์ม (Teraohm) โดยใช้เทคนิคการวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ (Wheatstone
Bridge) ที่พัฒนาขึ้น สามารถสอบเทียบค่าความต้านทานมาตรฐานตั้งแต่ค่า $10k\Omega - 1T\Omega$ ได้ค่าความ
ไม่แน่นอน $0.000443T\Omega$ ที่ค่าความต้านทาน $1T\Omega$ เทคนิคการวัดนี้ควบคุมกระบวนการวัดด้วยระบบ
คอมพิวเตอร์ สามารถลดความคลาดเคลื่อนการวัด นอกจากนั้นยังสามารถลดเวลาในการสอบเทียบลง
เหลือเพียง 2 ชั่วโมงต่อความต้านทาน 1 ตัว

สาขาวิชา..... มาตรฐานวิทยา..... ลายมือชื่อนิสิต..... 
ปีการศึกษา 2552..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 

4972212523: MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KONGSAK THONGBOON: DEVELOPMENT OF WHEATSTONE BRIDGE
CIRCUIT FOR MEASUREMENT OF HIGH VALUE RESISTANCE IN ORDER OF
TERAOHM. , THESIS ADVISOR: ASST. PROF. KIRANANT
RATANATHAMMAPAN., 126 pp.
KEYWORDS: UNCERTAINTY.

Wheatstone bridge method is widely used among secondary calibration laboratory for calibration of standard resistance. This method provides high accuracy due to null detection used. However, for calibration of high value resistance with accuracy, this method has several limitations for example, the environment has to be controlled and the operators must have good experienced in calibration. Therefore, the main objective of this research is to develop an efficient, low cost, less calibration time and easy-to-use calibration system. For the developed system, the known value resistance (R_s) will be used to assign a value to an unknown value resistance (R_x) with the ratio of 1:1 and 1:10. Voltage source for R_s ($\pm V_s$), Fluke multi-product calibrator model 5520A, is used as a standard voltage source. The applied voltage depends on the ratio of both resistance (R_s and R_x). Voltage source adjust for R_x ($\pm V_x$) are separately used in each direction. Agilent digital multimeter model 3458A is used to measure voltage across R_s ($\pm V_s$), and the voltage across R_x ($\pm V_x$). In addition, Keithley picoammeter/voltage model 487 is used to measure current at equilibrium condition (I_b). I_b will be recorded during a null process after its value is close to zero as possible.

This thesis concerns research and development of resistance calibration method for Teraohm resistance. Using the developed wheatstone bridge method, standard resistance in range of ($10\text{k}\Omega - 1\text{T}\Omega$) can be calibrated with uncertainty of $0.000443\text{T}\Omega$ at $1\text{T}\Omega$. The calibration system is controlled by computer for all the measuring process. The measurement error is minimized, and also, calibration time is reduced to only 2 hours per 1 resistance.

Field of Study : Metrological Science

Student's Signature

T. Kongsak

Academic Year : 2009

Advisor's Signature

[Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่ต้องอาศัยความรู้และทักษะความเชี่ยวชาญ เฉพาะด้านในหลายสาขา มาคิดผสมผสานความรู้เทคนิคต่างๆ โดยผู้ทำวิจัยเองได้พยายามศึกษาและ ได้ขอคำแนะนำจากผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ที่มากกว่าในด้านต่างๆ เพื่อให้สามารถนำมา ดำเนินการวิจัยและทำให้ผลงานนี้ประสบความสำเร็จออกมาเป็นรูปธรรมได้ ผู้ทำวิจัย ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ลำดับแรก ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพันธ์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้โอกาสแก่ผู้ทำวิจัย ให้ได้ทำงานวิจัยในเรื่องนี้ อีกทั้งคอยชี้แนะให้คำปรึกษา ให้ งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี

ลำดับที่สอง ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรรยาพร อยู่ดี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน และ รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่สาม ขอขอบพระคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยเฉพาะนางอัจฉรา เจริญสุข หัวหน้าฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ได้ให้โอกาสใช้ช่วงเวลาส่วนหนึ่ง ของการทำงานเพื่อใช้ในการศึกษาต่อและใช้งานเครื่องมือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และ ขอขอบพระคุณ คุณชัชวัฒน์ เกษภูจินต์, พันจ่าอากาศเอกวรพล พระภักดี นักมาตรวิทยาไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และขอขอบพระคุณเพื่อนๆที่คอยให้กำลังใจที่ ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับสุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบคุณกำลังใจจาก คุณพ่อ คุณแม่และทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนด้านการเงินและกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยุโทรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
ภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ค
บทที่ 1 บทนำและขั้นตอนการดำเนินการ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและค่านามเฉพาะ.....	4
2.1 ความหมายของมาตรวิทยา.....	4
2.2 การวัดความต้านทานและชนิดของความต้านทานมาตรฐาน.....	7
2.2.1 วิธีการวัด (Type of Measurements).....	7
2.2.2 การวัดความต้านทาน (Resistance of Measurements).....	11
2.3 ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty).....	18
2.4 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.....	20
บทที่ 3 โปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	25
3.1 โปรแกรม.....	25
3.2 การใช้งานโปรแกรม LabVIEW.....	27

3.2.1	แผงด้านหน้าของ VI	27
3.2.2	Flowchart และบล็อกไดอะแกรม(Block Diagram).....	29
3.2.3	ส่วนเก็บข้อมูล.....	31
3.3	สรุปการใช้งาน โปรแกรม LabVIEW.....	31
บทที่ 4	วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
4.1	วงจรวัดสโตนบริดจ์สำหรับการวัดค่าความต้านทานสูงในระดับเทระโอห์ม.....	32
4.1.1	รูปแบบการวัด.....	32
4.1.2	ชนิดเครื่องมือที่ใช้วัด.....	35
4.1.3	ขบวนการวัด.....	39
4.1.4	ขั้นตอนการวัด.....	40
4.2	การวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง.....	43
4.2.1	รูปแบบการวัด.....	43
4.2.2	ชนิดเครื่องมือที่ใช้วัด.....	44
4.2.3	ขบวนการวัด.....	45
4.2.4	ขั้นตอนการวัด.....	46
4.3	การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจร.....	47
4.4	การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแบบโดยตรง.....	49
4.5	ข้อสรุปในบทนี้.....	50
บทที่ 5	ผลการวิจัย.....	51
5.1	ผลการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจร.....	51
5.2	การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในระดับเทระโอห์ม.....	64
5.3	ผลการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง.....	109
5.4	การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง.....	109
5.5	การเปรียบเทียบผลการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในระดับเทระโอห์มกับการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง.....	111

5.6	สรุปผลการวัด.....	112
บทที่ 6	อภิปรายและสรุปผลการวิจัย	113
6.1	เปรียบเทียบผล.....	113
6.1.1	วิธีการวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจรในการวัดความต้านทานใน ระดับเทระโอห์ม.....	113
6.1.2	วิธีการวัดแบบโดยตรง.....	114
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	115
	รายการอ้างอิง.....	116
	ภาคผนวก.....	117
	ภาคผนวก ก Specification Guildline Series 9334A	118
	ภาคผนวก ข Specification Guildline Series 9336&9337.....	120
	ภาคผนวก ค Specification Fluke Series 742A.....	122
	ภาคผนวก ง Specification Digital Multimeter 3458A.....	124
	ภาคผนวก จ ตารางการกระจายแบบที่ (Student't distribution).....	125
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

สารบัญตาราง

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10k Ω Model 742A S/N 8363000; R_x 100k Ω Model 742A S/N 8363002 ; Ratio 1:10 @ 10V.....	52
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001; R_x 1M Ω Model 742A S/N 8129002 ; Ratio 1:1 @ 10V.....	53
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001; R_x 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; Ratio 1:10 @ 10V.....	53
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001; R_x 10M Ω Model 742A S/N 8001005 ; Ratio 1:10 @10V.....	54
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8129002; R_x 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; Ratio 1:10 @ 10V.....	54
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005; R_x 10M Ω Model 742A S/N 8001005 ; Ratio 1:1 @ 10V.....	55
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005; R_x 100M Ω Model 5155-8; Ratio 1:10 @ 10V.....	55
ตารางที่ 5.8 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005; R_x 100M Ω Model 9334; Ratio 1:10 @ 10V.....	56
ตารางที่ 5.9 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005; R_x 100M Ω Model 9336; Ratio 1:10 @ 10V.....	56
ตารางที่ 5.10 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9334; R_x 100M Ω Model 9336; Ratio 1:1 @ 10V.....	57
ตารางที่ 5.11 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9334; R_x 100M Ω Model 9336; Ratio 1:1 @ 100V.....	57
ตารางที่ 5.12 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9336; R_x 100M Ω Model 5155-8; Ratio 1:1 @ 100V.....	58

ตารางที่ 5.13 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_x 100M Ω Model 9334A; Ratio 1:1 @ 100V.....	58
ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @ 10V.....	59
ตารางที่ 5.15 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 5155-9; Ratio 1:10 @ 10V.....	59
ตารางที่ 5.16 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 9331S; Ratio 1:10 @ 10V.....	60
ตารางที่ 5.17 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9331S; R_x 1G Ω Model 5155-9; Ratio 1:1 @ 100V.....	60
ตารางที่ 5.18 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 9331S; Ratio 1:1 @ 100V.....	61
ตารางที่ 5.19 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9331S; R_x 10G Ω Model 5155-10; Ratio 1:10 @ 10V.....	61
ตารางที่ 5.20 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9331S; R_x 10G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @ 10V.....	62
ตารางที่ 5.21 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9336; R_x 10G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @ 10V.....	62
ตารางที่ 5.22 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 9336; R_x 10G Ω Model 5155-10; Ratio 1:1 @ 10V.....	63
ตารางที่ 5.23 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 9336; R_x 10G Ω Model 5155-10; Ratio 1:1 @ 100V.....	63
ตารางที่ 5.24 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 9336; R_x 100G Ω Model 9334A; Ratio 1:10 @ 10V.....	64
ตารางที่ 5.25 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 9336; R_x 100G Ω Model 5155-11; Ratio 1:10 @ 10V.....	64
ตารางที่ 5.26 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_x 100G Ω Model 9334A; R_x 1T Ω Model 5155-12; Ratio 1:10 @ 10V.....	65
ตารางที่ 5.27 Uncertainty Budget R_x 100k Ω ; Model 742A; S/N 8363002 @ 10V.....	66

ตารางที่ 5.28 Uncertainty Budget R_x 1M Ω ; Model 742A; S/N 8129002 @ 10V.....68

ตารางที่ 5.29 Uncertainty Budget R_x 10M Ω ; Model 742A; S/N 7806005 @ 10V.....69

ตารางที่ 5.30 Uncertainty Budget R_x 10M Ω ; Model 742A; S/N 8001005 @ 10V.....71

ตารางที่ 5.31 Uncertainty Budget R_x 10M Ω ; Model 742A; S/N 7806005 @ 10V.....72

ตารางที่ 5.32 Uncertainty Budget R_x 10M Ω ; Model 742A; S/N 8001005 @ 10V.....74

ตารางที่ 5.33 Uncertainty Budget R_x 100M Ω ; Model 5155-8 @ 10V.....75

ตารางที่ 5.34 Uncertainty Budget R_x 10M Ω ; Model 9334A @ 10V.....77

ตารางที่ 5.35 Uncertainty Budget R_x 10M Ω ; Model 9336 @ 10V.....78

ตารางที่ 5.36 Uncertainty Budget R_x 100M Ω ; Model 9336 @ 10V.....80

ตารางที่ 5.37 Uncertainty Budget R_x 100M Ω ; Model 9336 @ 100V.....81

ตารางที่ 5.38 Uncertainty Budget R_x 100M Ω ; Model 5155-8 @ 100V.....83

ตารางที่ 5.39 Uncertainty Budget R_x 100M Ω ; Model 9334A @ 100V.....84

ตารางที่ 5.40 Uncertainty Budget R_x 1G Ω ; Model 9336 @ 10V.....86

ตารางที่ 5.41 Uncertainty Budget R_x 1G Ω ; Model 5155-9 @ 10V.....87

ตารางที่ 5.42 Uncertainty Budget R_x 1G Ω ; Model 9331S @ 10V.....89

ตารางที่ 5.43 Uncertainty Budget R_x 1G Ω ; Model 5155-9 @ 100V.....90

ตารางที่ 5.44 Uncertainty Budget R_x 1G Ω ; Model 9331S @ 100V.....92

ตารางที่ 5.45 Uncertainty Budget R_x 10G Ω ; Model 5155-10 @ 10V.....93

ตารางที่ 5.46 Uncertainty Budget R_x 10G Ω ; Model 9336 @ 10V.....95

ตารางที่ 5.47 Uncertainty Budget R_x 10G Ω ; Model 9336 @ 10V.....96

ตารางที่ 5.48 Uncertainty Budget R_x 10G Ω ; Model 5155-10 @ 10V.....98

ตารางที่ 5.49 Uncertainty Budget R_x 10G Ω ; Model 5155-100 @ 10V.....99

ตารางที่ 5.50 Uncertainty Budget R_x 100G Ω ; Model 9334A @ 10V.....101

ตารางที่ 5.51 Uncertainty Budget R_x 100G Ω ; Model 5155-11 @ 10V.....102

ตารางที่ 5.52 Uncertainty Budget R_x 1T Ω ; Model 5155-12 @ 10V.....104

ตารางที่ 5.53 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานแบบ โดยตรงที่ค่าต่างๆ.....105

ตารางที่ 5.54 แสดงผลค่าความไม่แน่นอนที่ความต้านทานค่าต่างๆ.....106

ตารางที่ 5.55 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดและค่าความไม่แน่นอน.....107

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการสอบย้อนกลับของค่าความต้านทาน ไปสู่ระดับ SI Units.....	6
รูปที่ 2.2 การวัดโดยตรง.....	8
รูปที่ 2.3 การวัดความต่าง.....	8
รูปที่ 2.4 การวัดแบบส่งผ่าน.....	9
รูปที่ 2.5 การวัดแบบอัตราส่วน.....	9
รูปที่ 2.6 การวัดแบบโดยอ้อม.....	10
รูปที่ 2.7 วงจรวัดสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge).....	11
รูปที่ 2.8 วงจรเคลวินบริดจ์ (Kelvin Bridge).....	13
รูปที่ 2.9 วิธีการวัดแบบอัตราส่วนหรือโพเทนชิโอมิเตอร์.....	14
รูปที่ 2.10 วิธีการวัดแบบโวลท์-แอมป์.....	15
รูปที่ 2.11 ไคเรกเคอร์เรนท์คอมพารเตอ์บริดจ์.....	16
รูปที่ 2.12 วิธีการวัดแบบถ่ายโอนค่า.....	17
รูปที่ 2.13 การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution).....	21
รูปที่ 2.14 การกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution).....	22
รูปที่ 2.15 การกระจายแบบสามเหลี่ยม (Triangular Distribution).....	23
รูปที่ 3.1 ส่วนแฉงด้านหน้า.....	27
รูปที่ 3.2 ส่วนบล็อกไดอะแกรมและการเชื่อมโยง.....	27
รูปที่ 3.3 ส่วนส่วนแฉงด้านหน้าของโปรแกรม LabVIEW.....	29
รูปที่ 3.4 แสดงภาพ Flowchart การทำงานของโปรแกรมการวัด.....	31
รูปที่ 3.5 แสดงผลข้อมูลดิบที่ได้จากการสอบเทียบ.....	32
รูปที่ 4.1 วงจรการวัดความต้านทานสูงแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจร.....	34
รูปที่ 4.2 รายละเอียดของวงจรวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนา.....	35
รูปที่ 4.3 ยี่ห้อ Fluke รุ่น 742A.....	36
รูปที่ 4.4 ยี่ห้อ iET รุ่น SRL, SRC, และ SRX.....	37
รูปที่ 4.5 ยี่ห้อ Guildline รุ่น 9334A และรุ่น 9336A.....	37
รูปที่ 4.6 ยี่ห้อ Keithley Instrument รุ่น 5155.....	38
รูปที่ 4.7 เครื่อง Multi-Product Calibrator ยี่ห้อ Fluke รุ่น 5520A.....	38
รูปที่ 4.8 เครื่อง Picoammeter ยี่ห้อ Keithley รุ่น 487.....	39
รูปที่ 4.9 เครื่อง Digital Multimeter 8 ½ digit ยี่ห้อ Agilent รุ่น 3458A.....	39

รูปที่ 4.10 ชุดแหล่งจ่ายแรงดัน V_x	40
รูปที่ 4.11 การต่อเครื่องมือวัดแบบวิสตโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจรเพื่อวัดความต้านทานสูง.....	41
รูปที่ 4.12 วิธีการต่อตัวต้านทานไว้ในกล่องซีลด์	42
รูปที่ 4.13 แสดงการต่อเครื่องมือวัดที่ใช้วัดจริง.....	43
รูปที่ 4.14 วงจรการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง.....	44
รูปที่ 4.15 ความต้านทานมาตรฐาน ยี่ห้อ Guildline ที่ต่างๆ.....	45
รูปที่ 4.16 Digital Teraohmmeter ยี่ห้อ Guildline รุ่น 6500A	46
รูปที่ 4.17 การต่อวัดความต้านทานเข้ากับ Digital Teraohmmeter.....	47
รูปที่ 4.18 วงจรการวัดความต้านทานสูงแบบวิสตโตนบริดจ์ที่พัฒนา.....	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SI Units	หน่วยพื้นฐานของหน่วยวัดระบบสากล (International System of Units)
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)
c_i	สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient)
u_c	ค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined standard uncertainty)
U	ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty)
k	ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor)
ν	ค่าองศาแห่งความอิสระ (Effective degree of freedom)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำและขั้นตอนการดำเนินการ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การนำความต้านทานสูงไปใช้งานด้านต่างๆ เช่นด้านในภาคอุตสาหกรรม การทดสอบผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ต้องนำความต้านทานสูงมาใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง ตัวความต้านทานมาตรฐานก็ยังใช้ถ่ายค่าความถูกต้องในด้านมาตรวิทยา ค่าความถูกต้องของตัวความต้านทานนั้น ขึ้นอยู่กับการออกแบบและการใช้งาน โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมีหน้าที่จัดเก็บบำรุงรักษาค่ามาตรฐานและถ่ายค่าความถูกต้องให้กับห้องปฏิบัติการระดับที่รองลง โดยใช้ตัวความต้านทานสูงมาตรฐานสอบเทียบเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เทระโอห์มมิเตอร์ เม็กกะโอห์มมิเตอร์ เอิร์ทเทสเตอร์ เป็นต้น ซึ่งตัวความต้านทานสูงมาตรฐานจำเป็นต้องถูกสอบเทียบด้วยวิธีการและเครื่องมือที่มีความถูกต้องสูงด้วยเช่นกัน โดยวิธีการสอบเทียบตัวความต้านทานสูงมาตรฐานนั้นมีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันในห้องปฏิบัติการ เป็นแบบวิดสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่ให้ค่าความถูกต้องในการวัดและความแม่นยำสูง ในช่วงของค่าความต้านทานตั้งแต่ค่า $10\text{k}\Omega - 1\text{T}\Omega$ รูปแบบของวิธีการวัดแบบวิดสโตนบริดจ์จะประกอบไปด้วยแขนความต้านทาน 4 ตัว ที่ต่ออนุกรมกัน 4 แขน มีแหล่งจ่ายแรงดันต่อคร่อมที่จุดร่วมแขนสองจุด และกัลวานอร์มิเตอร์จะต่อคร่อมที่จุดร่วมแขนอีกสองจุด โดยกัลวานอร์มิเตอร์จะทำหน้าที่ตรวจวัดกระแส ปริมาณกระแสที่ไหล ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างจุดร่วมทั้งสอง และในสภาวะที่วงจรเกิดการสมดุลนั้น กระแสที่ไหลผ่านกัลวานอร์มิเตอร์จะเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงค่าศูนย์มากที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของตัวกัลป์วานอร์มิเตอร์

ตัวต้านทานที่มีค่าสูงนั้น จะมีความไวมากต่อสภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น ดังนั้นเพื่อป้องกันผลต่างๆ สายวัดจึงหุ้มฉนวนที่เป็นเทปลอน รวมทั้งระบบการวัดและเครื่องมือที่นำมาใช้สอบเทียบตัวต้านทานสูงนั้นต้องมีค่าความถูกต้องและมีเสถียรภาพที่ดีมาก และต้องมีการชิลด์ (shield) ระบบวัดอย่างดี ดังนั้นเครื่องมือที่ค่าความถูกต้องและมีเสถียรภาพดี ราคาที่จะแพงตามคุณภาพ ระบบการวัดแบบวิดสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) นั้นต้องใช้ค่าความต้านทานมาตรฐานที่รู้ค่า 3 ตัว ซึ่งอยู่ยากต่อการวัด อีกทั้งความไวต่อสภาวะแวดล้อมของตัวต้านทานก็ยิ่งมากขึ้น แต่ถ้าหากพิจารณาในระบบของการวัดค่าทางไฟฟ้า ทั้งการวัดค่าความต้านทาน วัดค่าแรงดัน วัดค่ากระแส วัดค่าความนำ ค่าความถูกต้องและค่าเสถียรภาพในการวัดที่ได้นั้น ค่าแรงดันจะมีเสถียรภาพของระบบดีกว่า ผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมจะน้อยกว่าและควบคุมง่ายกว่า หาก

เทียบกันระหว่างแรงดันกับความต้านทาน ค่าความผิดพลาดของแรงดันจะมีน้อยกว่าความต้านทาน ผลกระทบที่มาจากสภาวะแวดล้อมก็จะน้อยกว่า แต่เมื่อเราทำการวัดจริง ระบบที่ทำการวัดจะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุมที่ดีภายใต้เงื่อนไขที่ถูกต้อง และผู้ที่ทำการวัดจะต้องมีความรู้และประสบการณ์รวมทั้งมีเทคนิคการวัดที่ดี จึงจะวัดค่าถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้มุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาระบบมาตรวิทยาในส่วนการวัดความต้านทานสูง ให้มีความถูกต้องมากขึ้น เพื่อที่จะนำไปถ่ายค่าความถูกต้องให้กับระดับห้องปฏิบัติการที่รองลงไป ทั้งภาครัฐและภาคเอกชน โดยใช้วิธีการวัดแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนาใหม่ มาทำการถ่ายค่า โดยจะอาศัยข้อดีของแรงดันเข้ามาใช้แทนตัวต้านทานมาตรฐานที่รู้ค่าถึง 3 ตัว เพื่อที่จะลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบการวัดเดิม โดยจะนำไปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW เข้ามาควบคุมระบบการวัดและจัดเก็บข้อมูล เพื่อเพิ่มความสะดวกของการวัด ให้มีความรวดเร็วและถูกต้องมากขึ้น และนำผลที่ได้มาทำการประเมินผลการวัดค่าความไม่แน่นอน ซึ่งอาศัยหลักการทางสถิติมาใช้ประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงด้วยวิธีวีตสโตนบริดจ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งความสนใจวัดค่าความต้านทานสูงในช่วง $10\text{k}\Omega - 1\text{T}\Omega$ และนำผลที่ได้มาทำการประเมินผลการวัดค่าความไม่แน่นอนของกรวัด และจะนำไปทำการเปรียบเทียบผลการวัด โดยวิธีแบบอื่นๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สร้างชุดการวัดความต้านทานสูง ด้วยเทคนิคการวัดแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนาจริงใหม่ ที่มีความถูกต้องในการวัดสูงและมีความรวดเร็วของการวัดมากขึ้น ราคาไม่แพง เมื่อนำมาวัดความต้านทานมาตรฐานในระดับเทระโอห์ม
- 1.4.2 ลดผลกระทบจากวิธีการวัดแบบวีตสโตนบริดจ์แบบเดิม และนำวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปวัดค่าความต้านทานค่าต่างๆ

- 1.4.3 พัฒนาวิธีวัดแบบใหม่ในด้านมาตรวิทยาสาขาไฟฟ้า สอดคล้องนโยบายของสถาบันฯ ที่ให้พนักงาน ศึกษาค้นคว้างานวิจัยในส่วนของงานด้านมาตรวิทยาในส่วนที่เกี่ยวข้องให้มีความรู้ความสามารถมากขึ้น
- 1.4.4 นำผลสำเร็จที่เกิดขึ้นไปถ่ายค่าความถูกต้องของค่าความต้านทานมาตรฐานให้กับห้องปฏิบัติการอื่นๆ ต่อไป

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

ออกแบบและพัฒนาระบบวัดความต้านทานสูงด้วยวิธีการวัดแบบ วิดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาใหม่ ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1.5.1 ทำการค้นคว้าและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านการวัดความต้านทานสูงด้วยวิธีการวัดแบบวิดสโตนบริดจ์ ทั้งในและต่างประเทศ
- 1.5.2 ออกแบบระบบที่ใช้วัด พร้อมทั้งอุปกรณ์และเครื่องมือที่นำมาใช้ในการประกอบวงจรวิดสโตนบริดจ์
- 1.5.3 สั่งซื้ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ต้องใช้
- 1.5.4 ทำการวัดและเช็คค่าของตัวอุปกรณ์ว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ เช่นเช็คค่าความต้านทานชนิดแถบสี ค่าตัวเก็บประจุ ก่อนที่จะประกอบวงจรเป็นชุดวัดความต้านทานสูง ทั้งชุดที่สำเร็จรูปและที่ต้องทำขึ้นใหม่
- 1.5.5 ทำการต่อวงจร และทำการตรวจสอบความพร้อมของวงจรเมื่อต่อเสร็จ ทำการสร้างวงจรแบบเดียวกันนี้ขึ้นมา 2 ชุด แต่เลือกใช้อุปกรณ์ที่ต่างแบบกัน ทั้งนี้ก็เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำงาน
- 1.5.6 ทำการตั้งค่าเครื่องมือบางตัวเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม เช่นชุดไฟเลี้ยงที่ $\pm 12\text{VDC}$
- 1.5.7 นำไปทำการวัดค่าความต้านทานมาตรฐาน ตั้งแต่ค่า $10\text{k}\Omega$ จนถึง $1\text{T}\Omega$
- 1.5.8 บันทึกผลการวัดด้วยมือและดูค่าความต้านทานมาตรฐานที่วัดแต่ละค่า เพื่อนำผลมาวิเคราะห์การทำงาน ก่อนที่จะทำการปรับปรุงต่อไป
- 1.5.9 เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW ควบคุมการวัดและเก็บผลการวัด
- 1.5.10 นำผลการวัดมาคำนวณค่าความไม่แน่นอน
- 1.5.11 เปรียบเทียบผลการวัดกับวิธีการแบบอื่น

บทที่ 2

ทฤษฎีและคำนิยามเฉพาะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทาน คำนิยามต่างๆ ที่เกี่ยวกับการวัด วิธีการวัดค่าความต้านทานแบบต่างๆ คุณสมบัติและชนิดของความต้านทานในแต่ละแบบ รวมไปถึงความสัมพันธ์ของการสอบกลับได้ (Traceability) และการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานทั้ง Type A และ Type B การรวมผลของความไม่แน่นอน และความไม่แน่นอนขยาย กล่าวคือในการวัดความต้านทานในระดับค่าความต้านทานที่ค่าต่างๆ จะให้ได้ค่าความถูกต้องสูงนั้นผู้ที่ทำการวัดจะต้องมีความรู้ทางด้านวิธีการวัดความต้านทาน และการเลือกวิธีการที่เหมาะสมมาใช้ทำการวัด การวิเคราะห์ผลกระทบจากสถานะแวดล้อมที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวัดและสามารถที่จะแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นได้ เพื่อให้ได้ผลการวัดที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด และนำผลการวัดที่ได้มาทำการคำนวณทางสถิติเพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด ให้ใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด ดังนั้นผู้ที่ทำการวัดจำเป็นต้องศึกษาถึงข้อมูลจำเพาะของความต้านทานแต่ละตัวแต่ละชนิดให้เข้าใจก่อนที่จะเข้าสู่ระบบทำการวัดต่อไป

2.1 ความหมายของมาตรวิทยา [1]

มาตรวิทยา (Metrology) หมายถึง วิชาที่ว่าด้วยศาสตร์ของการวัดโดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์มาตรวจสอบคุณสมบัติ ซึ่งรวมถึงเครื่องมือและวิธีการวิเคราะห์ การอ้างอิงถึงหน่วยมาตรฐานสากล โดยมุ่งเน้นความถูกต้องและความแม่นยำของการวัด และการกำหนดคุณลักษณะมาตรฐานวิธีการที่ใช้อ้างอิงให้เป็นที่ยอมรับให้เป็นระบบสากล

การวัด (Measurement) หมายถึง การวัดปริมาณใดๆ เช่น ความต้านทาน ความยาว ปริมาตร แรงดัน เป็นต้น เมื่อมองในเรื่องของคำว่าปริมาณ (Quantities) ในการวัดปริมาณใดๆ ที่แตกต่างกัน นั้น มีวิธีการที่จะนำมาใช้วัดปริมาณใดๆ ที่แตกต่างกัน ไปด้วย มีหลากหลายวิธีโดยมีการพัฒนาวิธีการวัดให้ได้ค่าความถูกต้องมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้นำมาวัด การเลือกเครื่องมือวัดที่ใช้ทำการวัด การใช้เครื่องมืออย่างถูกต้องโดยผู้ใช้ต้องทำการศึกษาการใช้งานจากคู่มือให้เข้าใจเสียก่อน ก่อนที่จะทำการวัด สถานะแวดล้อมที่ทำการวัดต้องมีการควบคุมให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสม รวมถึงผู้ที่ทำการวัดต้องมีความรู้ ทักษะในการวัดปริมาณใดๆ ด้วย ข้อมูล (Data) หมายถึงสิ่งที่ได้มาจากการวัดปริมาณใดๆ โดยที่ยังไม่ได้สรุปผลของการวัดได้อย่างสมบูรณ์ จนกว่า

ได้นำข้อมูลดิบเหล่านี้มาทำการวิเคราะห์ห้อย่างมีเหตุผล ผลกระทบการแก้ไขข้อผิดพลาดให้มีความถูกต้อง ซึ่งผู้ที่ทำการวัดนั้นจะต้องระบุผลของความคลาดเคลื่อนกับค่าความผิดพลาด รวมทั้งสามารถระบุขอบเขตของค่าความผิดพลาดในการวัดได้

ระบบมาตรวิทยาในประเทศไทย มีพระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด มีขึ้นครั้งแรกเมื่อราว ร.ศ. 119 ในรัชกาลที่ 5 เมื่อได้เข้าเป็นสมาชิกขององค์การระหว่างประเทศ **Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)** (พ.ศ. 2452) และต่อจากนั้นเมื่อปี พ.ศ. 2463 ได้โอนงานกระทรวงเกษตราราชเป็นผู้รับผิดชอบ ไปขึ้นอยู่กับกระทรวงพาณิชย์ เมื่อวันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2466 นั้นเริ่มแรก ได้ทำการปรับปรุง พ.ร.บ. ชั่งตวงวัดใหม่อันเป็นกฎหมายสำคัญเกี่ยวกับมาตรฐานการวัดเป็นครั้งแรกในประเทศไทย

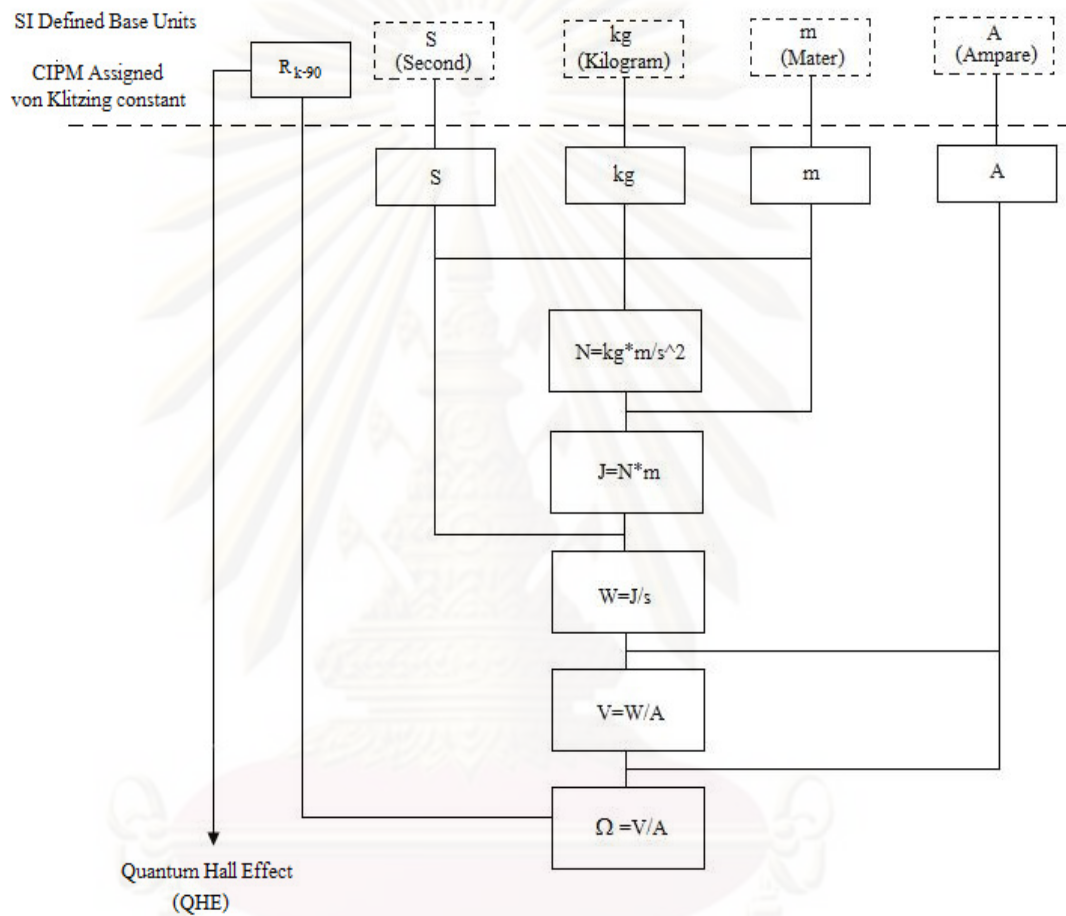
เมื่อปี พ.ศ. 2528 รัฐบาลและคณะรัฐมนตรีทางเศรษฐกิจ ได้มีมติให้มีการจัดตั้งหน่วยงานที่ดูแลงานด้านมาตรวิทยาทางวิทยาศาสตร์ คือ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยดูแลรับผิดชอบมาตรฐานการวัดทางไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ อุณหภูมิ แสง และรังสี โดยมีกรมวิทยาศาสตร์บริการรับผิดชอบมาตรฐานการวัดทางด้านมิติ มวล ความดัน รวมทั้งทดสอบวัสดุอ้างอิงต่างๆด้วย แต่ในขณะนั้นก็ยังมีความสับสนในการปฏิบัติงานอยู่ โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆภายในประเทศไทยถูกบีบบังคับจากบริษัทแม่ในต่างประเทศ ที่ต้องส่งเครื่องมือที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมไปสอบเทียบตามมาตรฐานสากล ISO-9000 Series ซึ่งมีบทบังคับที่ว่าด้วยจะต้องสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้งานนั้นๆ ตามระยะเวลาที่กำหนด

เมื่อวันที่ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2534 นักวิชาการด้านมาตรวิทยาจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้รวมตัวกันจัดตั้งชมรมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทยขึ้น เพื่อร่วมมือกันทางวิชาการ รวมทั้งฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ช่วยสนับสนุนงานด้านมาตรวิทยา เพื่อที่จะพัฒนาระบบมาตรวิทยาในประเทศไทยให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล ดังนั้นการสอบเทียบและการทดสอบเป็นส่วนสำคัญหนึ่งในระบบคุณภาพ ISO-9000 Series ในการใช้รับรองคุณภาพของสินค้าและการส่งออก โดยทางผู้ผลิตสามารถยืนยันได้ว่าผลของการสอบเทียบและการทดสอบสินค้านั้นได้ทำอย่างถูกต้อง และสามารถสอบย้อนกลับสู่มาตรฐานแห่งชาติได้

การสอบย้อนกลับ (Traceability) หมายถึง ความสามารถในการสอบย้อนกลับสู่มาตรฐานแห่งชาติ เป็นการส่งต่อหน่วยวัดตามนิยาม SI ไปจนถึงผู้ใช้งาน โดยได้รับการนิยามไว้ว่า “สมบัติของผลการวัดที่สามารถเชื่อมโยงไปสู่มาตรฐานแห่งชาติโดยเป็นที่ยอมรับ โดยการเปรียบเทียบผลที่ไม่ขาดช่วง เป็นลูกโซ่ และจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดไว้ด้วย” (*property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be related to state references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparisons all having*

state uncertainties: VIM 6.10) ดังนั้นจะยกตัวอย่างของการสอบกลับได้ของความต้านทานได้จาก

สมการ $R = \frac{E}{I}$ ไปสู่ระบบ SI Units และจะแสดงการเชื่อมโยงเป็นแผนภูมิดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการสอบย้อนกลับของค่าความต้านทานไปสู่ระดับ SI Units

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การสอบเทียบ หมายถึง การนำเครื่องมือวัดหรือวัสดุอ้างอิง มาวัดเปรียบเทียบโดยตรงกับวิธีมาตรฐานหรือวัสดุอ้างอิง

นิยามของการสอบเทียบ “ชุดของการดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่บ่งบอกโดยเครื่องมือวัด หรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องมือวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ของปริมาณที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้” (*set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between values of quantities indicated by a measuring instrument or measuring system, or values represented by material measure or a reference material, and the corresponding values realized by standard: VIM 6.11*)ตาม EA-4/02

2.2 การวัดความต้านทานและชนิดของความต้านทานมาตรฐาน

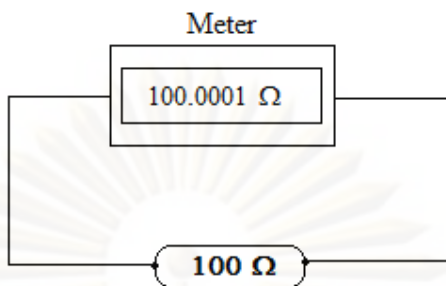
2.2.1 วิธีการวัด (Type of Measurements)

มีอยู่ 5 วิธีได้แก่

1. การวัดโดยตรง (Direct Measurements)
2. การวัดความแตกต่าง (Differential Measurements)
3. การวัดแบบส่งผ่าน (Transfer Measurements)
4. การวัดแบบอัตราส่วน (Ratio Measurements)
5. การวัดโดยอ้อม (Indirect Measurements)

1. การวัดโดยตรง (Direct Measurements)

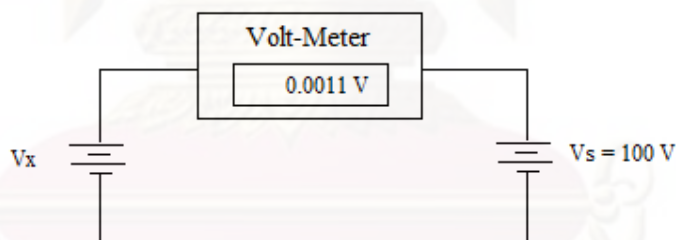
การวัดโดยตรงเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการทำการวัดค่าปริมาณใดๆก็ตามที่ต้องการทราบค่า โดยนำเครื่องมือวัดตั้งย่านให้ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดและปริมาณที่เราวัด จากนั้นทำการต่อเครื่องวัดตรงเข้ากับปริมาณที่ต้องการจะวัด อ่านค่าที่แสดงผลทางหน้าจอของเครื่องวัดวิธีการวัดแบบนี้จะมีข้อเสียคือ ค่าความถูกต้องนั้นก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องวัดที่นำมาใช้ มีปัญหาเรื่องความผิดพลาดของระบบ เช่น การสูญเสีย (Losses) ปรากฏการณ์ภาระ (Loading Effect) ในระบบการวัด เป็นต้น ดังนั้นความถูกต้องที่ได้จะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ แสดงวิธีการวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การวัดโดยตรง

2. การวัดความต่าง (Differential Measurements)

การวัดความต่างเป็นการวัดปริมาณที่ไม่ทราบค่ากับปริมาณมาตรฐานที่เราทราบค่า โดยส่วนมากจะนำวิธีการวัดแบบนี้ไปวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้า เพราะถ้าหากนำไปวัดความต้านทานจะทำให้ไม่สามารถวัดได้เพราะจะกลายเป็นการต่อความต้านทานอนุกรมกันแทน ข้อดีของการวัดความต่างนี้จะให้ความถูกต้องและความละเอียดในการวัดที่สูง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของปริมาณมาตรฐานที่เราทราบค่า ความถูกต้องและความแม่นยำที่ได้จากการวัดความต่างจะดีกว่าการวัดแบบโดยตรง แสดงรูปการวัดความต่างดังรูปที่ 2.3



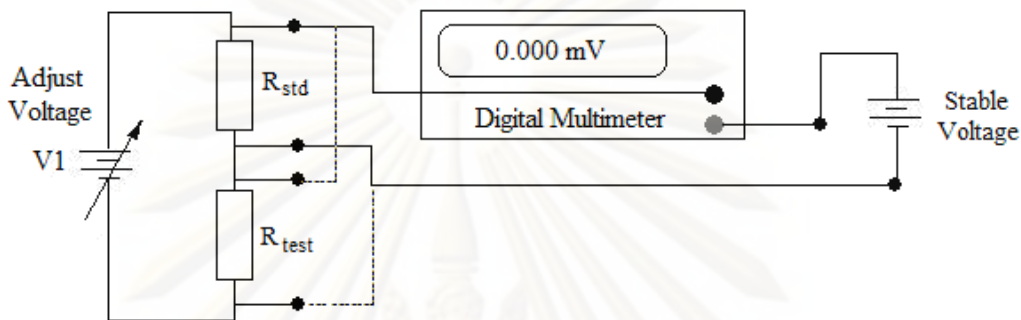
รูปที่ 2.3 การวัดความต่าง

3. การวัดแบบส่งผ่าน (Transfer Measurements)

การวัดแบบส่งผ่านนี้จัดเป็นการวัดในประเภทเดียวกันกับการวัดความต่าง (Differential Measurement) แต่จะต่างกันตรงที่ ค่าปริมาณมาตรฐานที่ถูกส่งผ่านไปยังปริมาณตัวที่ถูกวัด ดังแสดงจากรูปที่ 2.4 โดยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้า V_1 กระทั่งดิจิตอลโวลต์มิเตอร์วัดได้ค่าศูนย์ ทั้ง R_{std} และ R_{test} ค่าของความต้านทานมาตรฐานจะถูกส่งผ่านไปยังตัวต้านทานที่ถูกวัด เราจะหาค่าของความต้านทานได้จากสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$V1 * R_{std} = V1' * R_{test} \tag{2-1}$$

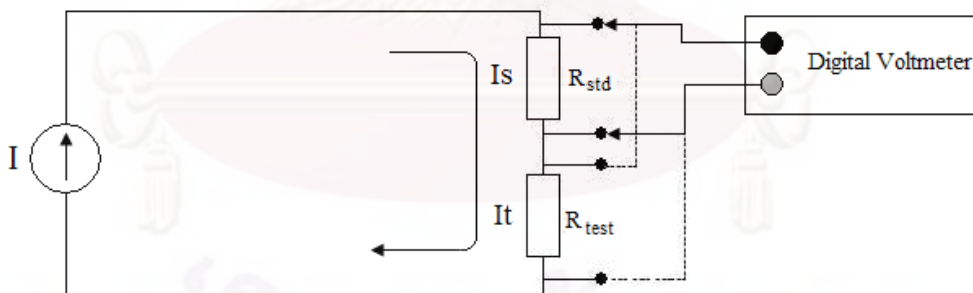
$$R_{test} = R_{std} * \frac{V1}{V1'} \tag{2-2}$$



รูปที่ 2.4 การวัดแบบส่งผ่าน

4. การวัดแบบอัตราส่วน (Ratio Measurements)

จัดเป็นการวัดอีกวิธีการหนึ่งที่ต้องอาศัยค่าความถูกต้องของปริมาณมาตรฐานที่รู้ค่าเทียบอัตราส่วนกับปริมาณที่ต้องการทราบค่า ดังนั้นหากนำวิธีการวัดนี้ไปใช้วัดค่าความต้านทาน ค่าความถูกต้องที่ได้จากการวัดก็จะขึ้นอยู่กับตัวต้านทานมาตรฐานที่รู้ค่าที่นำมาเป็นตัวอ้างอิงและตัวดิจิตอลโวลท์มิเตอร์ที่นำมาใช้วัด ดังแสดงได้จากรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวัดแบบอัตราส่วน

เมื่อเราพิจารณาจากรูป เราจะทำการวัดโวลท์ตกคร่อมที่ระหว่างความต้านทานแต่ละตัว ดังนั้นเมื่อนำไปใช้วัดความต้านทานที่สูงที่มีค่าใกล้เคียงกับขั้วอินพุทอิมพีแดนซ์ของโวลท์มิเตอร์ ก็จะมีปัญหาเรื่องของการดึงกำลัง การวัดแรงดันที่ตกคร่อมจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้นวิธีการนี้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้วัดค่าความต้านทานต่ำ และสามารถหาความต้านทานที่ต้องการทราบค่าได้จากสมการความสัมพันธ์ดังนี้

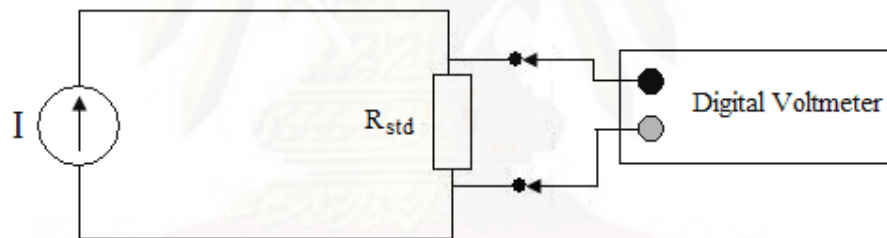
$$I_s = I_{test} \quad (2-3)$$

$$\frac{V_s}{R_s} = \frac{V_{test}}{R_{test}} \quad (2-4)$$

$$R_{test} = \frac{V_{test}}{V_s} \cdot R_s \quad (2-5)$$

5. การวัดแบบโดยอ้อม (Indirect Measurements)

การวัดโดยอ้อมเป็นวิธีการวัดปริมาณสิ่งที่ต้องการทราบค่าใดๆ แต่จะไม่ได้วัดปริมาณนั้นโดยตรง โดยจะทำการวัดปริมาณค่าอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กันแทนแล้วนำผลที่ได้มาทำการคำนวณกลับเพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการทราบ เช่น ถ้าต้องการวัดค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า แต่เราจะวัดปริมาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมค่าความต้านทานมาตรฐาน ดังแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การวัดแบบโดยอ้อม

เมื่อพิจารณาจากรูปเราสามารถหาค่ากระแสได้จากสมการ $I = \frac{E}{R}$ แต่ข้อเสียของวิธีนี้หากไปวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงๆ จะมีผลในเรื่องของความร้อนที่สะสมในระหว่างการวัดดังนั้นผู้ที่ทำการวัดจึงจำเป็นต้องทิ้งช่วงเวลาในการป้อนและทำการวัดแต่ละครั้งในช่วงเวลาที่เหมาะสมด้วย เพื่อลดผลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดด้วย

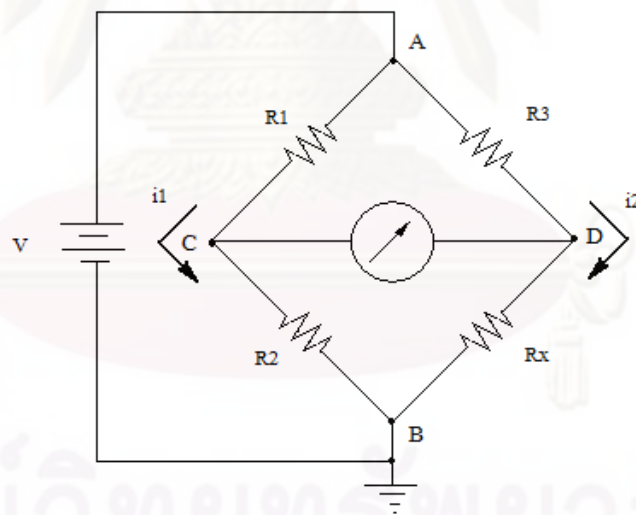
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 การวัดความต้านทาน (Resistance Measurements)

วิธีการวัดค่าความต้านทานในปัจจุบันได้มีการแก้ไขพัฒนาวิธีการวัดความต้านทานขึ้นมาหลายวิธีด้วยกัน เพื่อให้ระบบมีการวัดมีความเสถียรภาพมากขึ้นสามารถวัดความต้านทานถูกต้องมากขึ้น โดยแต่ละวิธีการก็จะเหมาะสมกับความต้านทานแต่ละชนิดของผู้ผลิตและการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการวัดค่าความต้านทานต่ำ หรือวัดค่าความต้านสูง ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับทางเลือกไปใช้งาน สำหรับการเลือกวิธีการวัดควรเลือกให้เหมาะสมกับความถูกต้องและย่านการใช้งาน การวัดความต้านทานมี 7 วิธีการด้วยกันดังนี้

1. วิดสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)

ปัจจุบันเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ให้ค่าความถูกต้องและความแม่นยำสูงในการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า โดยอาศัยหลักการของการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่ต้องการทราบค่ากับความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่าแล้ว ขณะเมื่อวงจรอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรวิดสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)

จากรูปที่ 2.7 เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะสมดุล กระแสที่ไหลผ่านตัวกัลป์วานอ์มิเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างจุด C และ D มีค่าเท่ากันทำให้ได้แรงดันตกคร่อมที่ความต้านทาน R_2 กับ R_x มีค่าเท่ากัน และแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทาน R_1 กับ R_3 มีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการความสัมพันธ์ จะได้สมการ

เมื่อบริดจ์สมดุลจะได้ $i_1 \cdot R_1 = i_2 \cdot R_3$ (2-1)

$$i_1 \cdot R_2 = i_2 \cdot R_x \quad (2-2)$$

นำสมการ (2-2) หารด้วยสมการ (2-1)

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \quad (2-3)$$

ดังนั้นจะหาค่าความต้านทาน R_x ได้จากสมการ

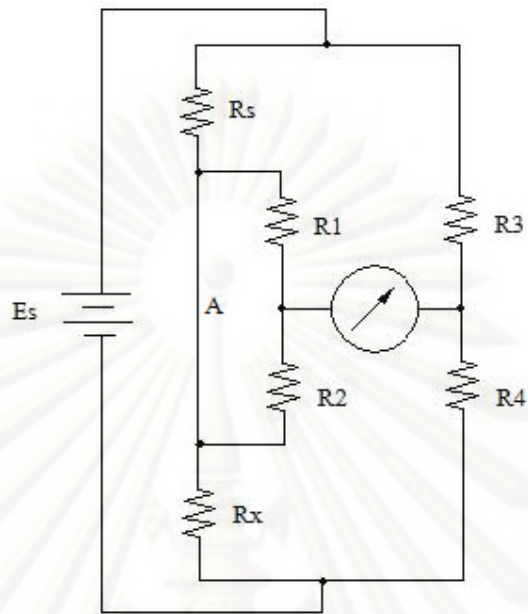
$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \quad (2-4)$$

ข้อดี ของวงจรวัดสโตนบริดจ์สามารถนำไปใช้วัดค่าความต้านทานได้หลายย่าน มีความผิดพลาดในการวัดต่ำ และไม่มีปัญหาในเรื่องของการดึงกำลัง แต่ก็จะมีข้อเสียด้วยเช่นกันคือต้องใช้ตัวต้านทานมาตรฐานที่รู้ค่าถึง 3 ตัว และก็ยุ่งยากหากต้องการวัดค่าความต้านทานที่ค่าต่างๆ เพราะเรื่องของอัตราส่วนที่จะนำมาใช้ให้เหมาะสมนั่นเอง ในส่วนของการวัดความต้านทานที่สูงขึ้นก็จะพบปัญหาเรื่องของการควบคุมสภาวะแวดล้อม และในส่วนของความสามารถของตัวจับกระแสที่มีความละเอียดไม่เพียงพอ

2. เคลวินบริดจ์ (Kelvin Bridge)

เคลวินบริดจ์เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในเรื่องของค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในสายของวัดสโตนบริดจ์ เมื่อเรานำวัดสโตนบริดจ์ไปวัดค่าความต้านทานต่ำที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $(0.1\mu\Omega - 100\Omega)$ สายและขั้วต่อจะมีความต้านทานอยู่จำนวนหนึ่ง ดังนั้นการนำวัดสโตนบริดจ์มาวัดความต้านทานที่มีค่าต่ำ จะทำให้ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดมีความคลาดเคลื่อนไป เนื่องจากอัตราส่วนของความต้านทานที่ใช้ในวงจรบริดจ์จะรวมค่าความต้านทานของสายและขั้วต่อเข้าไปด้วย ดังรูปที่ 2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 วงจรเคลวินบริดจ์ (Kelvin Bridge)

วิธีการลดผลกระทบจากความต้านทานของสายและขั้วต่อของ Wheatstone Bridge โดยการนำอัตราส่วนความต้านทานอีกค่าหนึ่ง ต่อเพิ่มเข้าไปในวงจร โดยที่ค่า R_1 , R_2 จะมีค่าเท่ากับ R_3 , R_4 และ A เป็นสายที่มีค่าความต้านทานน้อยมากๆ เป็นแขนที่เชื่อม และค่าความต้านทานมาตรฐาน R_s กับค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x ในสถานะที่ Kelvin Bridge อยู่ในสถานะสมดุล จะไม่มีกระแสไหลผ่านตัวกัลป์แวนอร์มิเตอร์ ค่าความต้านทานของสาย A จะไม่มีผลกระทบต่อการวัดความต้านทานที่ไม่ทราบค่า พิจารณาได้จากสมการหาค่า R_x

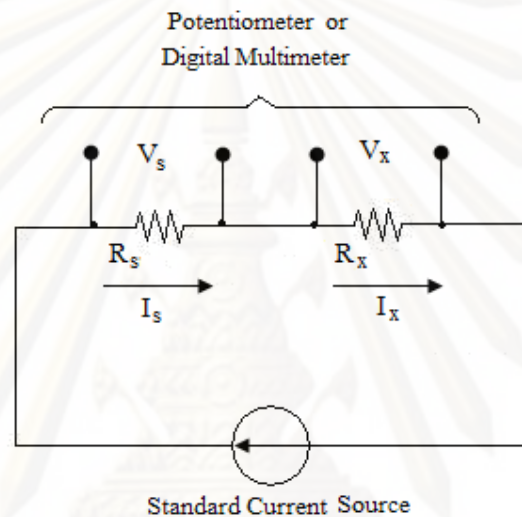
$$R_x = R_s \cdot \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_1 \cdot A}{R_1 + R_2 + A} \cdot \left(\frac{R_4}{R_3} - \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2-5)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \text{ แล้วจะได้}$$

$$\therefore R_x = R_s \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (2-6)$$

3. วิธีอัตราส่วน

เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้มาวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า หรืออาจเรียกวิธีการนี้ว่า วิธีโพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer Method) วิธีการนี้จะอาศัยหลักการจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐานคงที่เข้าไป แล้วนำตัวโพเทนชิโอมิเตอร์มาวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวความต้านทานแต่ละตัว ทั้ง R_s และ R_x โดยทั่วไปวิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการวัดค่าความต้านทานที่มีค่าน้อยๆ เท่านั้น เพราะถ้าหากนำไปวัดค่าความต้านทานที่สูงขึ้น จะมีผลในเรื่องของการดิ่งกำลัง ดังแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วิธีการวัดแบบอัตราส่วนหรือโพเทนชิโอมิเตอร์

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าความต้านทานที่ทราบค่าและไม่ทราบค่าต่ออนุกรมกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาด้านการไหลของกระแสไฟฟ้า จะไหลเท่ากันทั้งวงจร ขณะที่ทำการวัดกระแสที่ใช้ต้องมีค่าคงที่ ในการวัด เราสามารถหาค่าความต้านทานไม่ทราบค่า R_x ได้จากสมการ

$$I_s = I_x \quad (2-7)$$

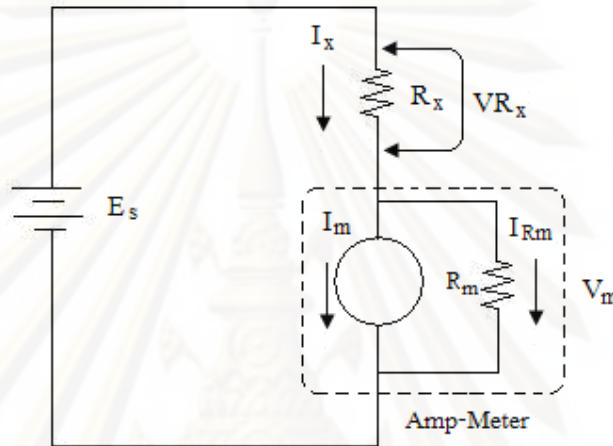
$$\frac{V_s}{R_s} = \frac{V_x}{R_x} \quad (2-8)$$

หาค่า R_x ได้จากสมการ

$$\therefore R_x = R_s \cdot \frac{V_x}{V_s} \quad (2-9)$$

4. วิธีโวลต์-แอมป์ (Volt-Amp Method)

วิธีการโวลต์-แอมป์จะนิยมนำไปใช้วัดหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x ในช่วงค่าความต้านทานที่มีค่าสูง เพราะ $E_s = V_{R_x} + V_m$ และ $I_m = I_x - I_{R_m}$ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าที่วัดหาค่า R_x มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่จะวัดได้จริง วิธีการนี้จะอาศัยกฎของโอห์ม ดูได้จากรูปวงจรที่ 2.10



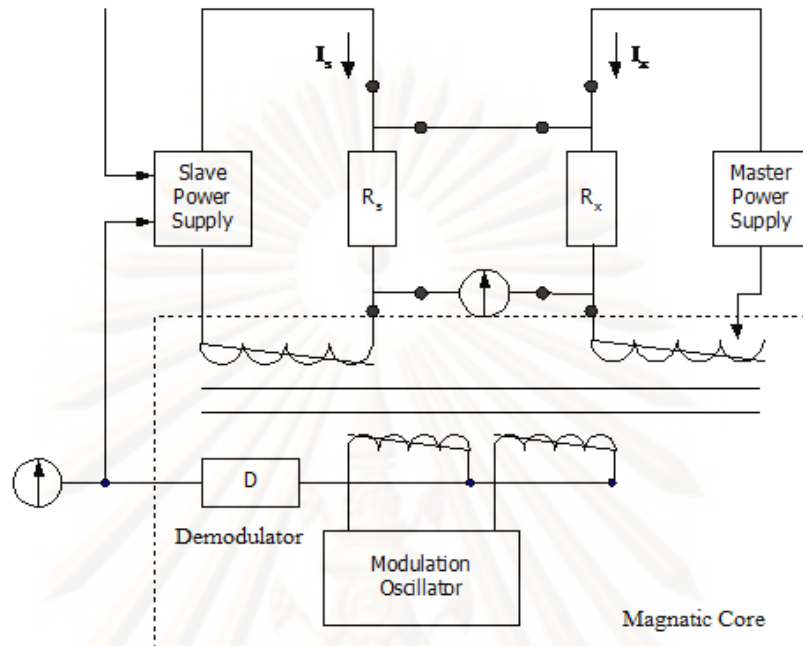
รูปที่ 2.10 วิธีการวัดแบบโวลต์-แอมป์

เมื่อพิจารณาจากรูปวงจรที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันมาตรฐานจะต่ออนุกรมกับความต้านทานและแอมป์มิเตอร์ ในทางทฤษฎีนั้นสามารถหาค่าความต้านทาน $R_x = \frac{V_{R_x}}{I_x}$ แต่ในทางปฏิบัติเราต้องอ่านค่ากระแสที่ได้จากตัวแอมป์มิเตอร์ เมื่อพิจารณาสมการก็จะได้

$$R_x = \frac{E}{I_m} \quad (2-10)$$

5. ไตรเคอร์เรนที่คอมพารเตอร์บริดจ์ (Direct Current Comparator Bridge)

เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุดและมีคุณภาพดีที่สุดที่ใช้วัดหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าใดๆ ซึ่งจะให้ผลการวัดของช่วงค่าความต้านทานไม่เกิน 10 กิโลโอห์ม ซึ่งวิธีการนี้จะอาศัยหลักการเปรียบเทียบอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการตรวจจับของสภาวะที่เส้นแรงแม่เหล็กเป็นศูนย์ในแกนแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไคเรคเคอร์เรนท์คอมพารเตอ์บริดจ์

จากรูปเมื่อวงจรอยู่ในสภาวะสมดุล กระแสที่ไหลในขดลวด 2 ขด จะมีปริมาณที่ขนาดเท่ากัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่แกนเหล็กทั้ง 2 แต่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะตรงข้ามกัน โดยจะมีเครื่องตรวจจับที่เรียกว่า โมดูเลชัน ดีเทคเตอร์ (Modulation Detector) ซึ่งจะทำหน้าที่ตรวจจับและยังควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลออกจากแหล่งจ่ายโดยอัตโนมัติ ในการเปรียบเทียบค่าความต้านทานมาตรฐานของตัวที่ทราบค่าและไม่ทราบค่า ซึ่งแต่ละตัวต่างจะต่ออยู่กับขดลวดปฐมภูมิ (\$N_s\$) และขดลวดทุติยภูมิ (\$N_x\$) ตามลำดับ อัตราส่วนของปริมาณกระแส สามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนรอบของขดลวด และแหล่งจ่ายไฟสำรอง (Slave Power Supply) จะทำงานโดยอัตโนมัติเพื่อรักษาสภาวะของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาสมการจะได้ว่า

$$I_s \cdot R_s = I_x \cdot R_x \quad (2-10)$$

เมื่อวงจรอยู่ในสภาวะสมดุล

$$V_s = V_x \quad (2-11)$$

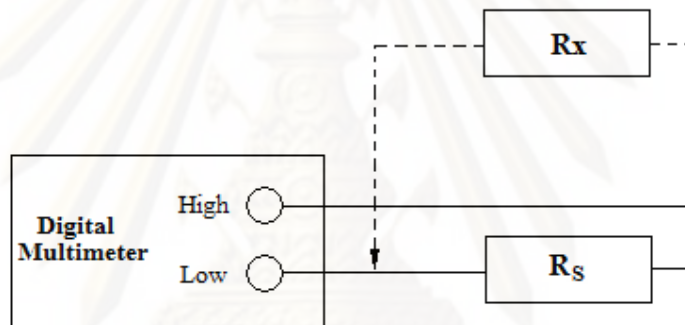
$$I_s \cdot R_s = I_x \cdot R_x \quad (2-12)$$

หาค่า R_x โดยนำสมการที่ (2-10)/(2-12) จะได้

$$\therefore R_x = \frac{N_x}{N_s} \cdot R_s \quad (2-13)$$

6. วิธีถ่ายโอนค่า (Transfer Method)

วิธีการวัดแบบถ่ายโอนค่าจะเป็นการวัดถ่ายค่าจากความต้านทานที่รู้ค่า R_s คู่ความต้านทานที่ต้องการทราบค่า R_x โดยที่จะทำการวัดค่าความต้านทานแต่ละครั้ง ดังแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วิธีการวัดแบบถ่ายโอนค่า

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าจะใช้ตัวดิจิทัลโวลต์มิเตอร์เป็นตัววัดค่าความต้านทานทั้ง 2 ตัว ดังนั้นค่าความถูกต้องที่ได้จากการวัดก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการอ่าน ความละเอียด และความเสถียรระยะสั้น (Short Term Stability) ของตัวเครื่องมิเตอร์ แต่โดยปกติทั่วไปนั้นมิเตอร์จะมีความถูกต้องอยู่ที่ช่วงกลางย่านวัด ดังนั้นการใช้วิธีการนี้จึงเหมาะกับการวัดค่าความต้านทานที่ช่วงกลางเป็นต้นไป เมื่อพิจารณาสมการหาค่า R_x จะได้ว่า

$$R_x = R_s \cdot \frac{R_x'}{R_s'} \quad (2-14)$$

เมื่อ R_s = ค่าความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า
 R_s' = ค่าความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์
 R_x = ค่าความต้านทานมาตรฐานที่ไม่ทราบค่า
 R_x' = ค่าความต้านทานมาตรฐานที่ไม่ทราบค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์

2.3 ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty)

นิยาม ของค่าความไม่แน่นอนในการวัด หมายถึง พารามิเตอร์ต่างๆที่รวมมากับผลการวัด ที่บอกลักษณะของการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอ้างได้อย่างมีเหตุผลผลว่าเป็นปริมาณที่ถูกวัด (*parameter, associated with the result of measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand: VIM 3.9*)

ความไม่แน่นอนหมายถึง สิ่งที่ยังบอกความไม่สมบูรณ์ของปริมาณที่ทำการวัดไม่ว่าจะเป็น การวัดปริมาณใดๆก็ตามก็ต้องมีค่าความไม่แน่นอนในการวัด ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนจะมีอยู่ทุกครั้งที่ทำการวัด และทุกระดับขั้นของการสอบกลับได้ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะเกิดสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้จะมากหรือน้อยก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำการวัดของแต่ละระดับหรือแต่ละห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีหลายสาเหตุที่เกิดค่าความไม่แน่นอน เช่น เกิดจากวิธีการวัดที่นำมาใช้ เครื่องมือมาตรฐาน ผู้ทำการสอบเทียบ และสภาวะแวดล้อมในขณะที่ทำการวัด เป็นต้น การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจะอาศัยหลักทางสถิติมาคำนวณที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล และในการรายงานผลการวัด จะรายงานผลการวัดที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และ ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor; $k = 2$) ในแต่ละขั้นตอนของการทำกระบวนการวัดจนถึงออกรายงานผลการวัดใด จะต้องมีการจัดทำเป็นเอกสาร เพื่อที่จะให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถมาทำการทวนสอบความถูกต้องได้

ในใบรายงานผลการวัดของห้องปฏิบัติการสอบเทียบจะมีการรายงานค่าความไม่แน่นอนรวมกับค่าความคลาดเคลื่อน โดยค่าที่รายงานผลนั้นจะเป็นค่าจริงที่วัดได้ ในขณะที่ทำการวัด ณ. ช่วงเวลาที่ได้มีการควบคุมการวัดภายใต้เงื่อนไขของการสอบเทียบและการใช้เครื่องมือวัด แต่ถ้าหากการใช้เครื่องมือวัดที่เงื่อนไขต่างออกไป ผลจากการสอบเทียบก็จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนและความไม่แน่นอนเปลี่ยนไป ผลที่ได้อาจจะเกินกว่าที่สามารถจะยอมรับได้ การยอมรับได้ของการสอบเทียบนั้นต้องมีความสัมพันธ์กับมาตรฐานแห่งชาติ โดยห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองจากองค์กรที่เป็นที่ยอมรับระหว่างประเทศ เช่นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025:2005

แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดใดๆนั้น จะมีแหล่งของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสิ่งที่เราสอบเทียบ เช่นปริมาณสิ่งที่ทำการสอบเทียบ วิธีการที่นำมาใช้ทำการสอบเทียบ และต้องมีการดูว่ามีสาเหตุของขั้นตอนไหนบ้างที่จะทำให้ผลการวัดนั้นๆ มีความไม่แน่นอน และขั้นตอนไหนที่เราจะสามารถละเว้นหรือไม่กล่าวถึงนัยสำคัญหรือตัดทิ้งได้ แล้วนำส่วนที่มีผลต่อค่าความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นมาคิด โดยอาศัยหลักการคิดทางสถิติมาช่วยในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดได้ แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการวัดก็คือความผิดพลาดสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทหลักดังนี้

1. Gross Errors เป็นความไม่แน่นอนหรือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวบุคคลที่ทำการวัด ซึ่งเราสามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ เช่นการใช้วิธีการวัด การอ่านค่าการวัด การปรับตั้งค่าของเครื่องมือวัด รวมถึงการใช้เครื่องมือวัดและการคำนวณ

2. Systematic Errors เป็นความไม่แน่นอนหรือความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือวัด หรือเนื่องจากสภาวะแวดล้อมในขณะที่ทำการวัด โดยได้มีการจัดการกับระบบของการวัดให้คงที่อยู่ในสภาวะนั้นๆให้ดีที่สุด โดยผู้ใช้จะอ้างอิงถึงวิธีการจากเอกสารหลักฐาน หรือข้อมูลต่างๆ ที่น่าเชื่อถือเนื่องจาก Systematic Errors ที่เกิดขึ้นในการวัดแต่ละอย่างย่อมมีแหล่งความไม่แน่นอนที่แตกต่างกัน ดังนั้นควรมีเอกสาร UKAS M3003 ที่ได้จำแนก Systematic Errors ตามลักษณะของงานซึ่งเป็นข้อมูลที่ทำให้ผู้ใช้นำมาเป็นแนวทางที่จะนำมาพิจารณาของแหล่งความไม่แน่นอน

3. Random Errors เป็นความไม่แน่นอนหรือความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือวัด ที่เกิดจากการทำการวัดซ้ำๆ หลายๆครั้งภายใต้เงื่อนไขที่ทำการสอบเทียบเดียวกัน ซึ่งจะได้ผลการวัดที่ไม่เหมือนกันทั้งนี้เนื่องจาก ความไม่คงที่ของเครื่องมือวัดเอง ความเสถียรภาพคงตัวของเครื่องมือวัด ความคงที่จากสภาวะแวดล้อม

2.4 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด [2]

Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด วิธีการนี้จะมีรูปแบบที่ชัดเจนในโครงสร้างและการกำหนดค่าความไม่แน่นอน หากห้องปฏิบัติการต้องการพัฒนาทางเทคนิคในการทดสอบ โดยที่ GUM ได้แยกประเภทของความไม่แน่นอนออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- Type A

หมายถึง เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบสุ่มโดยใช้หลักการทางสถิติของผลการวัดซ้ำๆ กัน ภายใต้การกำหนดเงื่อนไขสภาวะต่างๆ ที่คงที่ หรือเพื่อดูการกระจายของค่าเฉลี่ยของผลการวัด ซึ่งเป็นการประเมินแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

- การหาค่าเฉลี่ย (\bar{X}) ของผลการวัด ที่เป็นอิสระต่อกันจำนวน n ครั้ง

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2-15)$$

เมื่อ \bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด

x_n คือ ค่าที่วัดได้แต่ละครั้ง

n คือ จำนวนครั้งที่วัด

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด Standard Deviation (s_x)

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-16)$$

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากลาง Standard Deviation of the mean $S(\bar{x})$

$$S(\bar{x}) = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (2-17)$$

- ความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$$U_A = S(\bar{x}) \quad (2-18)$$

- องศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom)

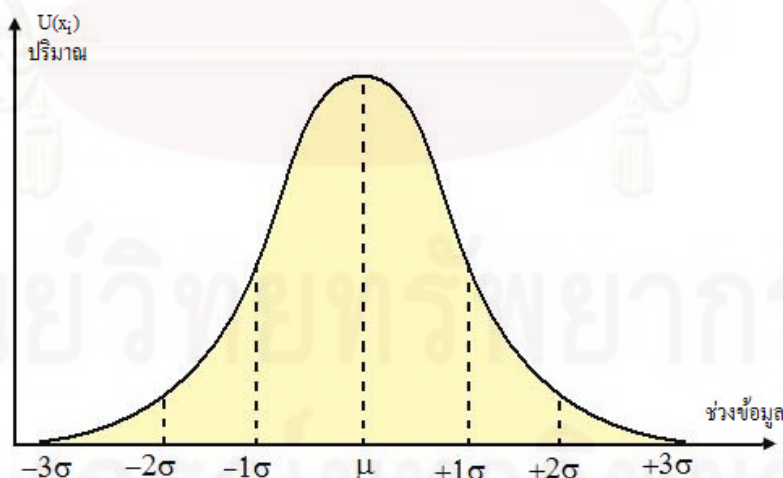
$$\nu = n - 1 \quad (2-19)$$

-Type B

หมายถึง เป็นการประเมินค่าความไม่แน่นอน ที่มาจากแหล่ง Systematic Errors ต่างๆ ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากระบบการวัด โดยอาศัยประสบการณ์เชิงวิทยาศาสตร์ ซึ่งต้องมีความรู้พื้นฐานของข้อมูลการวัดครั้งก่อนๆ ความรู้เกี่ยวกับธรรมชาติและคุณสมบัติของเครื่องมือวัด ใบบรรองผลการสอบเทียบ ข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิตที่ติดมากับเครื่องมือ ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงทางวิชาการ ดังนั้นการประเมินค่าความไม่แน่นอนแบบ Type B นี้จะแบ่งการกระจายของแหล่งความไม่แน่นอนออกเป็น 3 วิธีด้วยกัน

1. การกระจายแบบปกติ (Normal Distribution)

การกระจายปกติ จะเป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่ได้มาจาก ใบบรรองการสอบเทียบของมาตรฐานหรือเครื่องมือวัดที่ใช้ความไม่แน่นอนมาตรฐาน ดังรูป 2.13 และอยู่ในรูปแบบ (2-20)



รูปที่ 2.13 การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

$$u(X_i) = \frac{U}{k} \quad (2-20)$$

เมื่อ

$u(X_i)$ = ความไม่แน่นอนจากการวัด

U = Uncertainty ที่ได้จากใบ Certificate

k = ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor)

โดยที่

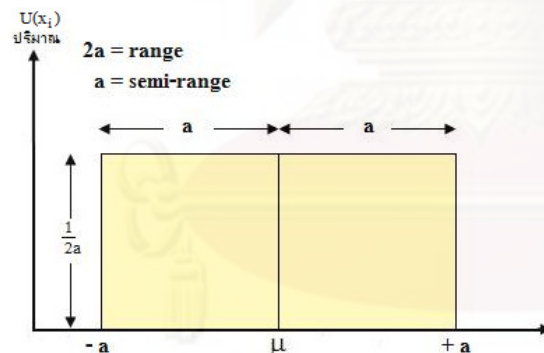
k = 1 ที่ระดับความเชื่อมั่น 68.3 %

k = 2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45 % (ประมาณ 95%)

k = 3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 99.7 %

2. การกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution)

เป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่ได้มาจากการกระจายของข้อมูล ที่เท่าเทียมกันตลอดพิสัยที่กำหนดดังรูปที่ 2.14 และรูปแบบสมการในการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอน



$$\sigma^2_{rec} = \int_{-a}^{+a} x^2 P dx$$

$$\text{When } P = \frac{1}{2a}$$

$$\sigma^2_{rec} = \int_{-a}^{+a} x^2 \frac{1}{2a} dx = \left[\frac{x^3}{3a} \right]_{-a}^{+a} = \frac{a^2}{3}$$

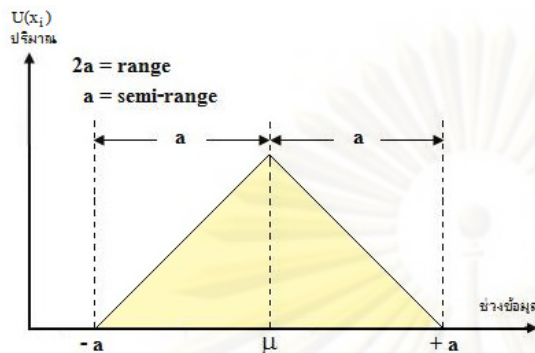
$$\sigma_{rec} = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

$$\therefore u(X_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2-21)$$

รูปที่ 2.14 การกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution)

3. การกระจายแบบสามเหลี่ยม (Triangular Distribution)

เป็นแหล่งความไม่แน่นอนที่ได้มาจากการกระจายของข้อมูล ที่มีความหนาแน่นของข้อมูลอยู่ตรงกลางของพิสัยมากกว่าทั้งสองข้าง ดังรูปที่ 2.15 และรูปแบบสมการในการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอน



$$\sigma^2_{tri} = \frac{1}{2} \int_{-a}^{+a} x^2 P dx$$

$$\text{When } P = \frac{1}{2a}$$

$$\sigma^2_{tri} = \frac{1}{2} \int_{-a}^{+a} x^2 \frac{1}{2a} dx = \left[\frac{x^3}{3a} \right]_{-a}^{+a} = \frac{a^2}{6}$$

$$\sigma_{tri} = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

$$\therefore u(X_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2-22)$$

รูปที่ 2.15 การกระจายแบบสามเหลี่ยม (Triangular Distribution)

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined standard uncertainty ; $u_c(y)$)

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined standard uncertainty; $u_c(y)$) คือการนำความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากข้อมูลย่อยๆ ขึ้นต้น มาทำการคิดรวมเป็นตัวเดียวกันทั้งหมด โดยมีหลักเกณฑ์ว่า ค่าความไม่แน่นอนแต่ละสาเหตุนั้นจะต้องมีหน่วยเดียวกัน และมีระดับความเชื่อมั่นเท่ากัน โดยรวมแบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง ดังสมการ

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (2-23)$$

เมื่อ

c_i คือ สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficient) เป็นตัวที่ทำให้หน่วยของปริมาณอินพุตแต่ละตัวสามารถนำมารวมกันได้ผลลัพธ์สุดท้ายคือหน่วยของปริมาณเอาต์พุต (Output)

$u(x_i)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุตแต่ละตัว

ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty ; U)

เป็นการขยายค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการที่ให้ รายงานที่ได้จากการรายงานผลค่าความไม่แน่นอนของการวัด โดยทั่วไปเมื่อไม่มีข้อกำหนดเป็นอย่างอื่น ห้องปฏิบัติการจะรายงานที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45 % หรือความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งก็คือรายงานค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty; U) โดยใช้ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor ; k) คูณเข้ากับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม U_c จะได้สมการดังนี้

$$U = k \bullet u_c(y) \quad (2-24)$$

ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor ; k)

เป็นตัวประกอบที่เมื่อคูณเข้ากับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมแล้ว จะได้ค่าความไม่แน่นอนเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการที่จะให้รายงานในใบรับรองผลการวัดที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการจะรายงาน การหาค่าองศาความเป็นอิสระที่มีประสิทธิภาพ (ν_{eff}) ได้จากสมการ (Welch-Satterthwaite equation)

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u_i^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (2-25)$$

เมื่อ

ν_{eff} = ค่า Effective Degree of Freedom

$u_c(y)$ = ค่า Combined Standard Uncertainty

$u_i(y)$ = ค่า Uncertainty ของ Output แต่ละตัว

ν_i = ค่าองศาแห่งความอิสระของอินพุตแต่ละตัว

N = จำนวนอินพุตที่ทำการวัด

จากนั้นนำค่าองศาแห่งความอิสระและระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการไปเทียบกับตารางการกระจายแบบที (t-distribution) ที่แสดงไว้ภาคผนวก ง. เพื่อหาตัวประกอบครอบคลุมที่เหมาะสม (k) ต่อไป

บทที่ 3

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.1 โปรแกรม [3]

ในการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW Version 6.1 มาใช้ควบคุมกระบวนการวัดและวิเคราะห์ผล รวมทั้งบันทึกผลของการวัดทั้งหมด ซึ่งโปรแกรมนี้นี้มีความนิยมและสามารถประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้มากมายและเป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน การเชื่อมต่อพอร์ตจากเครื่องมือกับคอมพิวเตอร์ควบคุมจะเชื่อมต่อผ่านพอร์ต GPIB 488.2 (IEEE 488) ซึ่งมีอัตราการส่งข้อมูลขนาด 32 bit ในการส่งข้อมูล

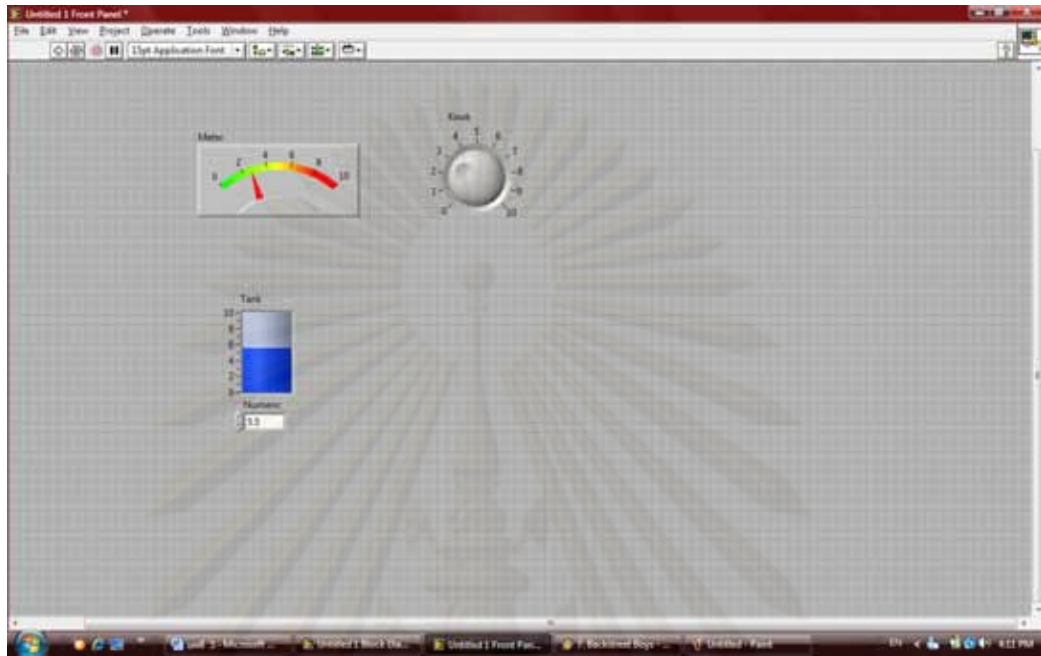
LabVIEW เป็นโปรแกรมประยุกต์ชนิดหนึ่ง โดยโปรแกรมจะเขียนเป็นรูป (Graphical-based Programming) ซึ่งจะแตกต่างจาก Text based Programming ที่เขียนเป็นตัวรูปแบบคำสั่ง (Command) เป็นตัวอักษรและกำหนดการทำงานตามขั้นตอนให้แล้วเสร็จทีละขั้น แต่ LabVIEW จะรูปแบบคำสั่งที่เป็นเหมือนเครื่องวัดเสมือนจริง Virtual Instrument (VI) มาทำให้ง่ายต่อการออกแบบรูปแบบของตัวโปรแกรม เพราะมีรูปภาพเครื่องมือที่เลือกใช้อย่างมากมายและทำงานเหมือนเครื่องมือวัดทั่วไป การทำงานของตัวโปรแกรมจะมีการทำงานแบบการไหลของข้อมูล (Dataflow Programming) ตัวโปรแกรมจะแบ่งออกเป็นส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนของแผงด้านหน้า (Front Panel) ส่วนของบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ส่วนของไอคอนและแผงผังการต่อ (Icon and Connector Panel)

3.1.1 แผงด้านหน้า (Front Panel)

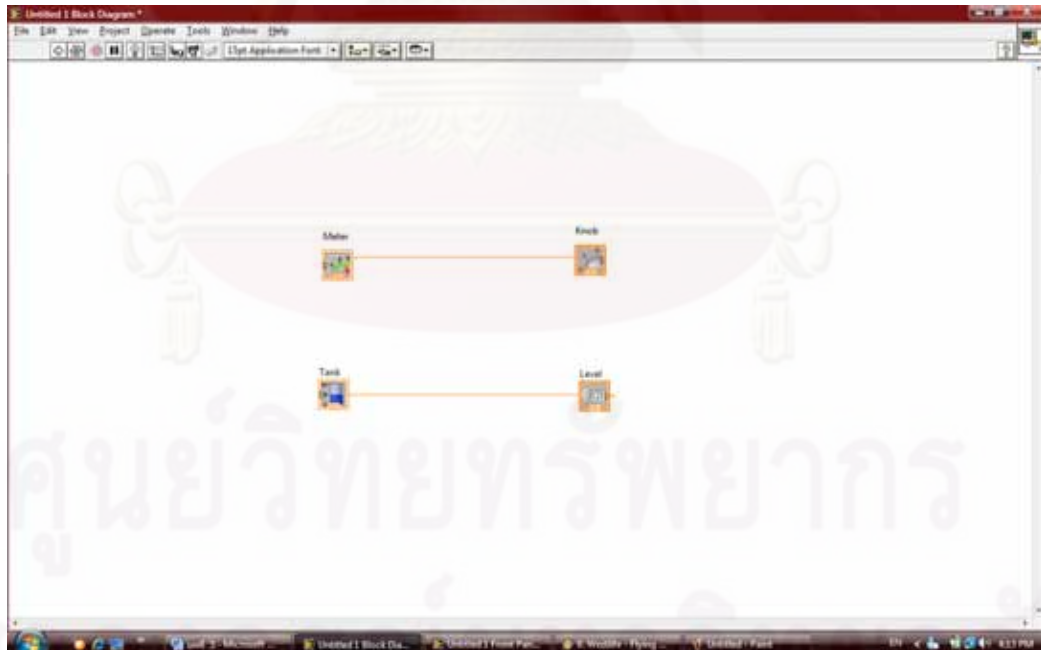
เป็นส่วนที่ผู้ใช้จะออกแบบกำหนดรูปแบบที่ต้องการจะใช้งาน และเป็นตัวควบคุมการทำงานรวมทั้งบอกสถานะ หรือกำหนดปริมาณของค่าอินพุตต่างๆ ที่ต้องการ และยังแสดงสถานะของผลของการทำงานได้อีกด้วยทั้งนี้ก็จะขึ้นกับว่าจะให้แสดงผลออกมาเป็นรูปแบบไหน เช่น ตัวเลข กราฟ หรือตัวเลข เป็นต้น ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.1

3.1.2 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram)

เป็นส่วนที่ผู้ใช้จะเขียนโปรแกรม เพื่อกำหนดค่าการทำงานของแต่ละเครื่องมือตามที่ต้องการ โดยจะกำหนดรูปแบบของตัวโปรแกรมหรือการตั้งค่าต่างๆ ให้ทำงานเชื่อมโยงกันกับป้ายด้านหน้า ซึ่งในแต่ละส่วนของบล็อกไดอะแกรมจะมีกราฟฟิกของตัวที่ต้องการควบคุมหรือ รหัส (Code) ให้ตั้งค่าต่างๆ และการเชื่อมโยงอุปกรณ์ ทำได้จากส่วนนี้ ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ส่วนแผงด้านหน้า



รูปที่ 3.2 ส่วนบล็อกไดอะแกรมและการเชื่อมโยง

3.1.3 ส่วนของไอคอนและแผนผังการต่อ (Icon and Connector Panel)

เป็นส่วนที่แสดงกราฟฟิกหน้าต่างในส่วนย่อยของตัวโปรแกรม เมื่อผู้ใช้ได้สร้างป้ายด้านหน้าและกำหนดค่าในบล็อกไดอะแกรมเสร็จแล้ว สถานะของไอคอนจะปรากฏที่มุมบนด้านขวามือด้วยอักษรตัว VI การใช้งานของไอคอนจะต้องมีการกำหนดชื่อของการเชื่อมโยงต่างๆไปในแต่ละบล็อกไดอะแกรม และส่วนของตัวควบคุมและแสดงผล เมื่อนำไอคอนดังกล่าวไปใช้งานในบล็อกไดอะแกรม VI อื่นๆ ไอคอนตัวดังกล่าวจะแสดงสถานะของตัวเองเป็น Sub VI ของตัว VI

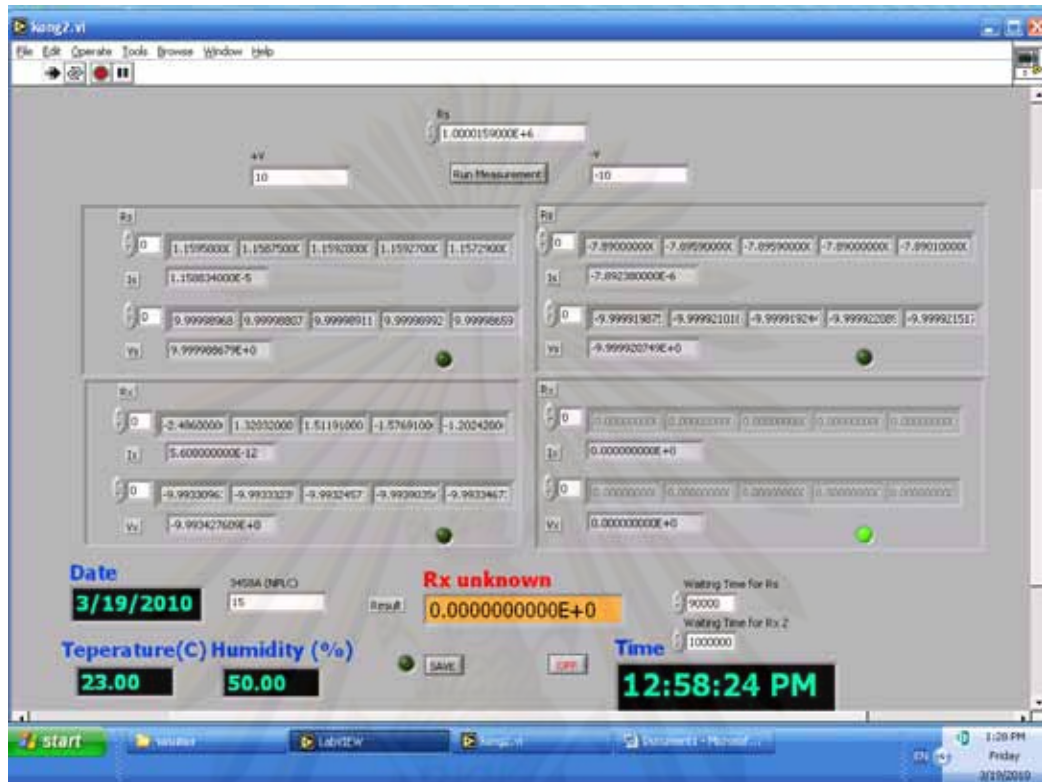
3.2 การใช้งานโปรแกรม LabVIEW

ในงานวิจัยนี้ได้นำโปรแกรม LabVIEW มาใช้ควบคุมระบบการวัดความต้านทานสูง โดยจะนำมาใช้ควบคุมเครื่องมัลติโปรตักคาลิเบรเตอร์ เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง เครื่องดิจิทัลมิเตอร์ทำการวัดค่าแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า และตัวความต้านทานที่ต้องการทราบค่า และใช้ตัวพีโกแอมป์มิเตอร์มาเป็นตัววัดกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่าและวัดกระแสในสถานะที่วงจรวัดสโตนบริดจ์สมดุล รวมทั้งจะโปรแกรมในการคำนวณค่าเฉลี่ยของผลการวัด และจัดเก็บข้อมูลของการวัดที่ได้ โดยจะมีส่วนรายละเอียดต่างๆของตัวโปรแกรมที่ใช้ดังนี้

3.2.1 แผงด้านหน้าของ VI

ในส่วนของแผงด้านหน้าของโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมและแสดงผลของค่าที่ทำการวัดในขณะนั้น จะอธิบายได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



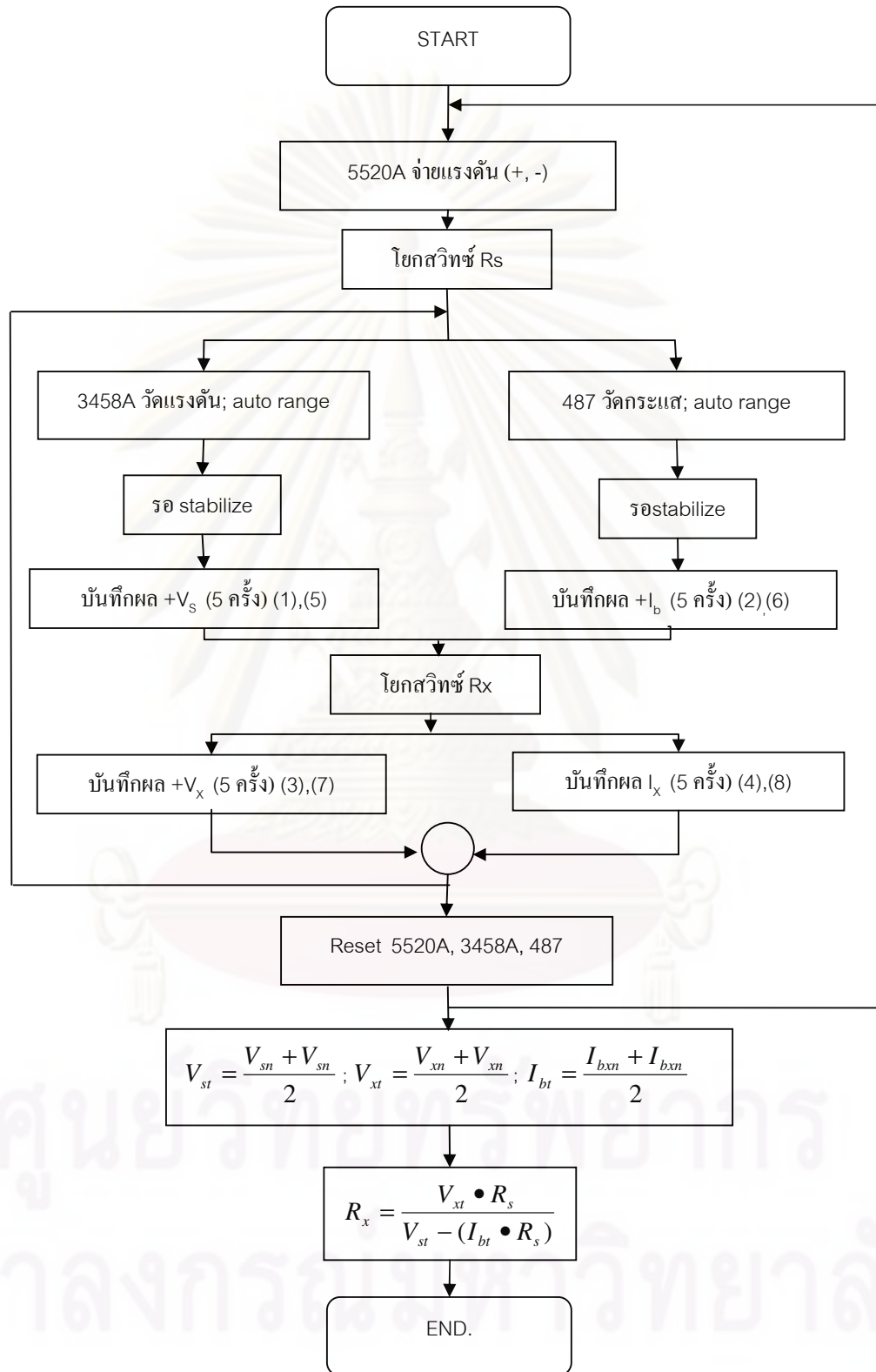
รูปที่ 3.3 ส่วนแฉงด้านหน้าของโปรแกรม LabVIEW

- ปุ่ม On-Off ใช้ในการเปิดปิดการทำงานของตัวโปรแกรมทั้งหมด
- Temperature และ Humidity ใช้ป้อนค่าอุณหภูมิและความชื้นในขณะที่ทำการวัด
- R_s คือ ใช้ป้อนค่าความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่าที่นำมาใช้ทำการวัด
- V_+ และ V_- ใช้ป้อนค่าแรงดันที่ให้เครื่องมัลติโปรตักคาลิเบรเตอร์จ่ายค่าแรงดันที่ต้องการ
- Run Measurement ใช้ในการกดให้โปรแกรมทำการวัดเมื่อการตั้งค่าต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว และพร้อมที่จะทำการวัดจริง
- I_s เป็นช่องแสดงผลการวัดค่ากระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า
- V_s เป็นช่องแสดงผลการวัดค่าแรงดันที่ตัวต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า
- I_x เป็นช่องแสดงผลการวัดค่ากระแสที่เมื่อวงจรวัดส โตนบริดจ์สมดุล
- V_x เป็นช่องแสดงผลการวัดค่าแรงดันที่ตัวต้านทานมาตรฐานที่ไม่ทราบค่า
- 3458A (NPLC) ใส่ค่าอัตราการอ่านข้อมูลของดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- Waiting Time for R_s ใส่ค่าเวลาเพื่อรอให้เครื่องมืออ่านค่าได้นิ่งที่สุดทางฝั่ง R_s
- Waiting Time for R_x ใส่ค่าเวลาเพื่อรอให้เครื่องมืออ่านค่าได้นิ่งที่สุดทางฝั่ง R_x

- R_x Unknown เป็นช่องแสดงผลการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า เมื่อคำนวณได้จากค่าที่วัดได้
- Time แสดงเวลาที่ทำการวัด
- Save ใช้ในการบันทึกผลการวัดค่าที่ได้

3.2.2 Flowchart และบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram)

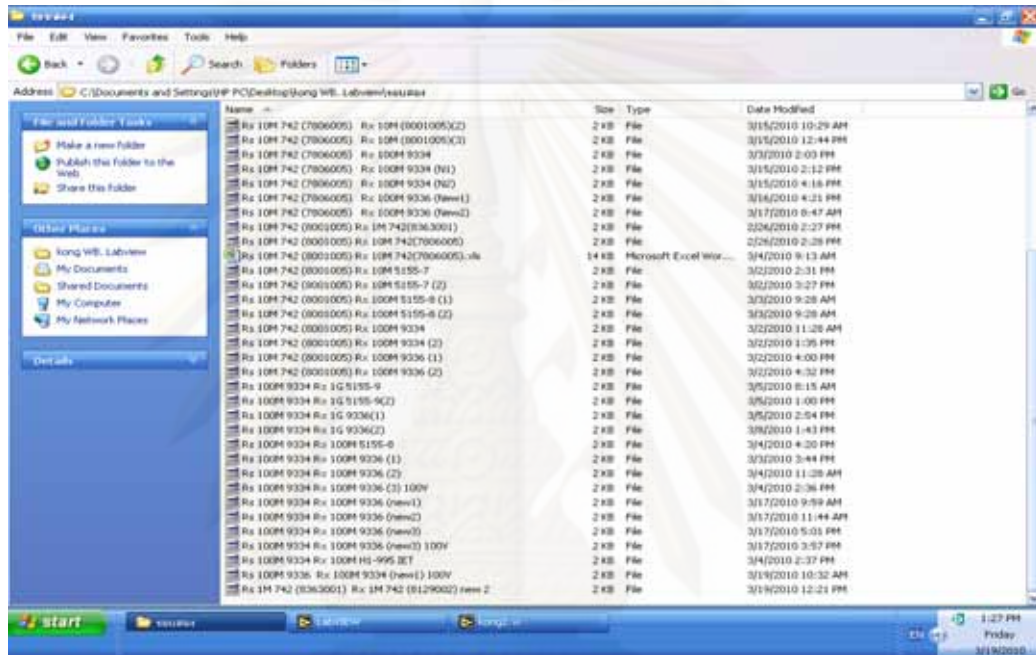
ในส่วนนี้จะแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม ซึ่งจะแสดงเป็น Flowchart ดังรูปที่ 3.4 จาก Flowchart เริ่มต้นโดยเครื่องมัลติโปรดักคาไลเบรเตอร์ รุ่น 5520A จะเริ่มจากการจ่ายแรงดัน $+V_s$ เพื่อวัดทางฝั่งความต้านทาน R_s ก่อน ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น 3458A วัดแรงดัน V_s (1) ใช้พิโกแอมป์มิเตอร์ รุ่น 487 วัดกระแส I_s (2) จากนั้นรอกจนกว่าเครื่องมือทั้งสองอ่านค่าได้นิ่งแล้วทำการบันทึกผลการวัด 5 ครั้งเก็บไว้เสร็จแล้วโยกสวิตซ์วัดทางฝั่งความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x และทำกระบวนการวัดจนบันทึกค่า V_x (3) และ I_x (4) ทำการบันทึกผลการวัด 5 ครั้ง จากนั้นโปรแกรมจะสั่งรีเซ็ตเครื่องมือทั้งหมดในส่วนของการจ่ายแรงดัน $+V_s$ เพื่อที่จะเริ่มขั้นตอนใหม่โดยจะสั่งให้เครื่องมัลติโปรดักคาไลเบรเตอร์ รุ่น 5520A เริ่มจ่ายแรงดัน $-V_x$ แล้ววัดความต้านทาน R_s ก่อน ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รุ่น 3458A วัดแรงดัน V_s (5) ใช้พิโกแอมป์มิเตอร์ รุ่น 487 วัดกระแส I_s (6) จากนั้นรอกจนกว่าเครื่องมือทั้งสองอ่านค่าได้นิ่งแล้วทำการบันทึกผลการวัด 5 ครั้งเก็บไว้เสร็จแล้วโยกสวิตซ์วัดความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x และทำกระบวนการวัดและบันทึกค่า V_x (7) ส่วน I_x (8) ทำการบันทึกผลการวัด 5 ครั้ง โปรแกรมจะสั่งรีเซ็ตเครื่องมือในส่วนของการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า และเข้าสู่ขั้นตอนของการนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยทั้งการจ่ายแรงดันบวกและแรงดันลบ ของการวัด 5 ครั้ง มาในแต่ละค่าจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยรวมของผลการวัด 5 ครั้ง เพื่อที่จะนำไปใช้แทนค่าในสมการ
$$R_x = \frac{V_{xt} \cdot R_s}{V_{st} - (I_{bt} \cdot R_s)}$$
 เพื่อที่จะคำนวณหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า และในส่วนของหน้าต่างของบล็อกไดอะแกรม VI ภายในจะมีบล็อกย่อยๆหรือเรียกว่า Sub VI ซึ่งเป็นส่วนของข้อมูลและรหัสข้อมูลของ VI ที่เขียนเพื่อใช้ควบคุมการทำงานแยกออกเป็นแต่ละบล็อก โดยจะมีการเชื่อมโยงข้อมูลไปยังส่วนของแผงด้านหน้าของโปรแกรม และเชื่อมโยงในแต่ละ Sub VI สำหรับไอคอนของแต่ละ Sub VI จะแสดงอยู่ที่มุมบนขวามือของแต่ละหน้าต่างของบล็อกไดอะแกรม



รูปที่ 3.4 แสดงภาพ Flowchart การทำงานของโปรแกรมการวัด

3.2.3 ส่วนเก็บข้อมูล

หลังจากที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW ได้ทำการรวบรวมการสอบเทียบเครื่องมือเสร็จ ก็จะได้ผลการวัดของชุดข้อมูลของการสอบเทียบซึ่งเป็นข้อมูลดิบ โดยจะเก็บไว้ในส่วนนี้ซึ่งเป็นไฟล์ของข้อมูลดิบที่ได้จากการสอบเทียบค่าความต้านทาน แล้วเก็บไว้ในส่วนนี้ ดังรูปที่ 3.11



ดั่งรูปที่ 3.5 แสดงผลข้อมูลดิบที่ได้จากการสอบเทียบ

3.3 สรุปการใช้งานโปรแกรม LabVIEW

การใช้โปรแกรมในการทำงานวิจัยนี้ทำให้เข้าใจถึงการทำงานของโปรแกรม LabVIEW ในการควบคุมระบบการวัดค่าความต้านทานสูงวิธีการวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ ที่มาใช้ควบคุมเครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ ให้ทำงานตามวัตถุประสงค์ เพื่อให้ระบบการวัดง่ายสะดวกต่อการใช้งาน และยังได้ผลการวัดที่ดีมากขึ้น ในบทนี้จะทำให้เข้าใจพื้นฐานและส่วนประกอบของโปรแกรม LabVIEW ไม่ว่าจะเป็นส่วนของแผงด้านหน้า ส่วนบล็อกไดอะแกรม และส่วนของไอคอนและแผนผังการต่อได้ จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะได้นำไปใช้ในการวัดความต้านทานสูงแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาใหม่ จะกล่าวถึงในบทถัดไป

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ เกี่ยวกับการวัดค่าความต้านทานมาตรฐานค่าสูงโดยใช้วิธีการวัดแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในการวัดความต้านทานในระดับทีราโอห์มและได้นำโปรแกรม LabVIEW เข้ามาช่วยควบคุมระบบการวัด ค่าความต้านทานที่ได้ทำการวัดก็จะเป็นค่าความต้านทานมาตรฐานตั้งแต่ค่า $10\text{k}\Omega$ ถึง $1\text{T}\Omega$ และจะใช้ค่าความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่านำมาใช้ถ่ายค่าไปสู่ความต้านทานที่ต้องการทราบค่าในอัตราส่วน 1:1 และ 1:10 โดยในแต่ละส่วนจะกล่าวถึงขั้นตอนของการวัด เครื่องมือมาตรฐานที่นำมาใช้วัดรวมถึงการตั้งค่าเครื่องมือวัด และนำแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนที่เกิดจากการระบบวัดความต้านทานสูงจากวิธีการวัดแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในการวัดความต้านทานในระดับทีราโอห์ม มาทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย และนำผลการวัดที่ได้ไปเปรียบเทียบผลการวัดกับวิธีการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าความต้านทานตั้งแต่ค่า $10\text{M}\Omega$ ไปจนถึง $1\text{T}\Omega$

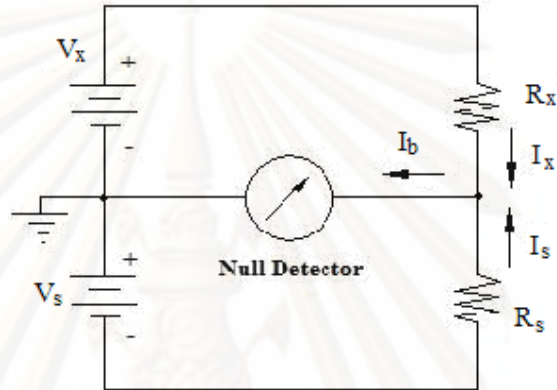
4.1 วงจรวีตสโตนบริดจ์สำหรับการวัดค่าความต้านทานสูงในระดับเทระโอห์ม [4][5][6]

ในส่วนนี้จะเป็นการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจร ความต้านทานที่นำมาใช้วัดนั้นจะมีค่าตั้งแต่ $10\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$, $1\text{M}\Omega$, $10\text{M}\Omega$, $100\text{M}\Omega$, $1\text{G}\Omega$, $10\text{G}\Omega$, $100\text{G}\Omega$ และ $1\text{T}\Omega$ โดยจะใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบการวัดซึ่งอาศัยโปรแกรม LabVIEW ในการสั่งการทำงานของเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบการวัดความต้านทาน คำนวณค่าเฉลี่ยของผลการวัดที่ค่าต่างๆ เก็บผลการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณไว้เป็นไฟล์ที่สามารถเรียกใช้ได้สะดวก ค่าที่วัดได้จากค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าจะมีการนำค่าที่วัดได้จากวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจร ไปเปรียบเทียบผลการวัดกับวิธีการวัดแบบโดยตรง จะมีรายละเอียดทั้งหมดดังต่อไปนี้

4.1.1 รูปแบบการวัด

ในรูปแบบการวัดความต้านทานสูงแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจร วงจรที่ใช้จะเป็นวงจรดังรูปที่ 4-1 ซึ่งได้พัฒนาขึ้นมาจากวงจรวีตส โตนบริดจ์แบบเดิม โดยจะใช้แรงดันไฟตรงเข้ามาใช้แทนตัวต้านทานมาตรฐานที่รู้ค่า เพื่อที่จะลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากระบบ เพราะในระบบเดิมนั้นจะใช้ค่าความต้านทานที่รู้ค่าถึง 3 ตัว เพื่อที่จะใช้มาหาค่าความต้านทานที่ต้องการทราบ ทำให้มีความยุ่งยากที่จะทำการวัดและมีผลกระทบจากสถานะแวดล้อมมากกว่าเมื่อเทียบกับระบบการวัดความต้านทานสูงแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจรที่ใช้แรงดันไฟตรง จะมีรายละเอียดของวงจรที่ใช้แสดงดังรูปที่

4-2 จากรูปวงจรที่ใช้จะเป็นวงจรอาร์ซีอินทิเกรท และใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงคงที่สองตัว แยกกันจ่ายแรงดันกัน ทางฝั่งบวกก็จะเป็นตัว P4 และฝั่งลบเป็น N4 เป็นแรงดันไฟตรง V_x ในการวัดได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW เข้ามาควบคุมระบบการวัดและคำนวณรวมทั้งจัดเก็บข้อมูล เพื่อเพิ่มความสะดวกของการวัด ให้มีความถูกต้องมากขึ้น แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดคำนวณหาค่าความต้านทานสมการที่ (4-1)



รูปที่ 4.1 วงจรวัดสโตนบริดจ์สำหรับการวัดค่าความต้านทานสูงในระดับเทระโอห์ม

$$R_x = \frac{V_x \cdot R_s}{V_s - (I_b \cdot R_s)} \quad (4-1)$$

เมื่อ R_x = ความต้านทานที่ต้องการทราบค่า

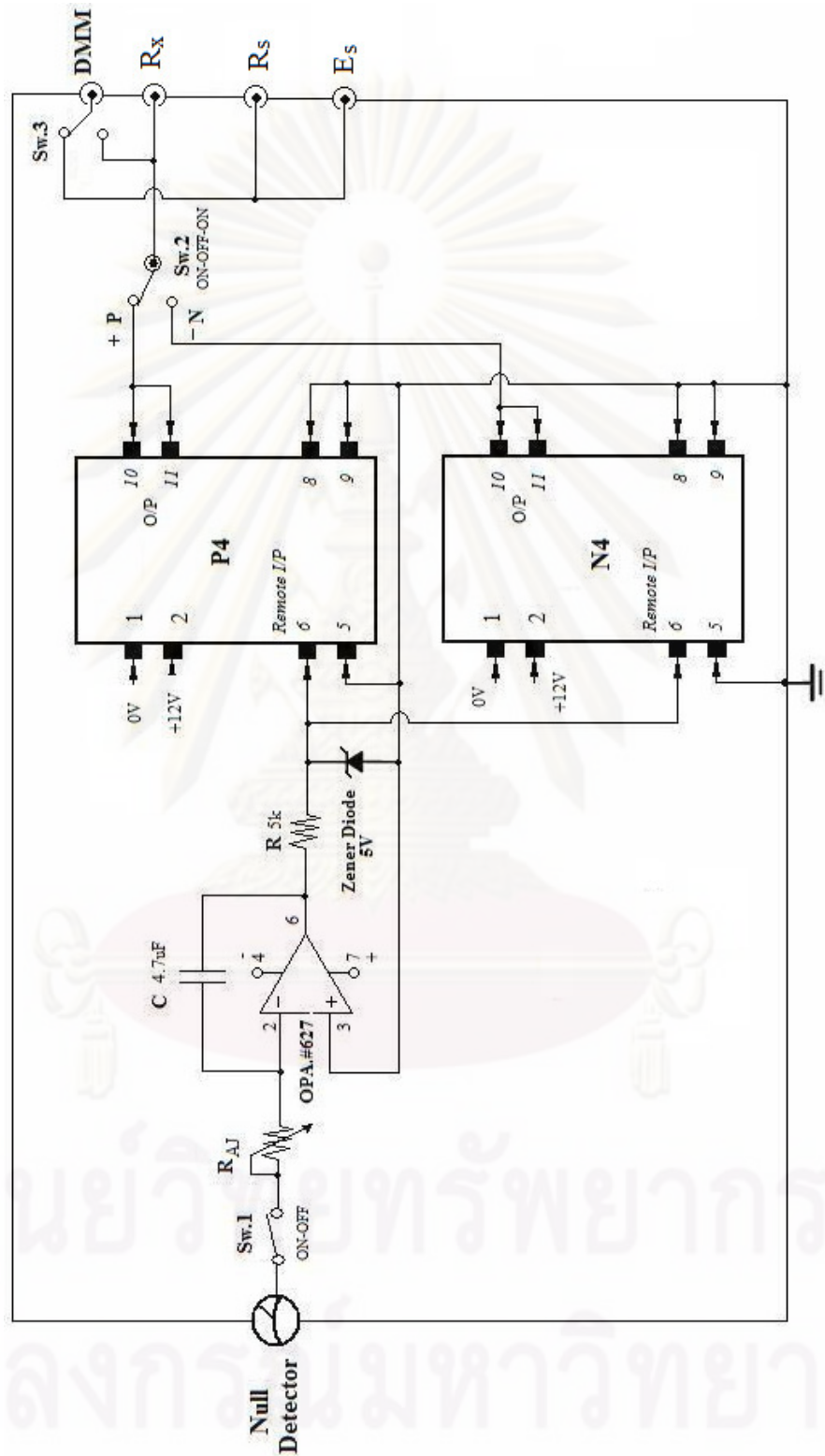
R_s = ความต้านทานมาตรฐานที่นำมาใช้ถ่ายค่า

V_x = แรงเคลื่อนดกคร่อมความต้านทานที่ต้องการทราบค่า

V_s = แรงเคลื่อนดกคร่อมความต้านทานมาตรฐานที่นำมาใช้ถ่ายค่า

I_b = กระแสที่ไหลในวงจร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 รายละเอียดของวงจรวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาจริง

4.1.2 ชนิดเครื่องมือที่ใช้วัด

ในการวัดความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจร จะใช้เครื่องมือมาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงมาทำการวัด ซึ่งตัวเครื่องมือมาตรฐานที่นำมาใช้จะต้องมีการสอบเทียบ หรือได้รับการถ่ายค่ามาตรฐานจากระดับเครื่องมือที่สูงกว่า รายละเอียดเครื่องมือมาตรฐานมีดังต่อไปนี้

4.1.2.1 ตัวความต้านทานมาตรฐาน

ตัวต้านทานที่ทราบค่า R_s และไม่ทราบค่า R_x ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นตัวต้านทานชนิดมาตรฐานแรงดันไฟตรงแบบอินแอร์ดังแสดงรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.6 ตามลำดับ ในทางการวัดถ้าหากมีตัวมาตรฐานในแต่ละค่าเท่ากับตัวต้านทานที่ไม่ทราบค่าก็จะเป็นการดี เพราะในการนำมาใช้ถ่ายค่าความต้านทานในอัตราส่วน 1:1 ให้ความต้านทานมาตรฐานที่ไม่ทราบค่านั้นดีที่สุด เช่น $R_s = 10k\Omega$ ถ่ายค่า $R_x = 10k\Omega$



รูปที่ 4.3 ยี่ห้อ Fluke รุ่น 742A



รูปที่ 4.4 ยี่ห้อ iET รุ่น SRL, SRC, และ SRX



รูปที่ 4.5 ยี่ห้อ Guideline รุ่น 9334A และรุ่น 9336



รูปที่ 4.6 ซีพื่อ Keithley Instrument รุ่น 5155 (10MΩ-1TΩ)

4.1.2.2 เครื่องจ่ายแรงดันไฟตรง (V_s)

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวมาตรฐานเป็น Multi-Product Calibrator รุ่น 5520A เป็นแหล่งจ่ายคงที่ V_s ให้ความต้านทานมาตรฐานที่นำมาถ่ายค่า แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เครื่อง Multi-Product Calibrator ซีพื่อ Fluke รุ่น 5520A

4.1.2.3 เครื่องตรวจวัดกระแส

ใช้ตัวมาตรฐานเป็น Picoammeter ยี่ห้อ Keithley รุ่น 487 เป็นตัววัดกระแสที่ไหลในวงจร แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เครื่อง Picoammeter ยี่ห้อ Keithley รุ่น 487

4.1.2.4 เครื่องตรวจวัดแรงดัน

เลือกใช้ตัวมาตรฐานเป็น Digital Multimeter 8 ½ digit ยี่ห้อ Agilent รุ่น 3458A เป็นตัววัดแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมความต้านทาน ทั้ง R_s และ R_x แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 เครื่อง Digital Multimeter 8 ½ digit ยี่ห้อ Agilent รุ่น 3458A

4.1.2.5 ชุดจ่ายแรงดันไฟตรง (V_x)

เป็นชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงคงที่สองตัวแยกกันจ่ายแรงดันกัน ทางฝั่งบวกก็จะเป็นตัว P4 และฝั่งลบเป็น N4 เพื่อจ่ายแรงดันให้กับความต้านทานที่ต้องการวัด แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ชุดแหล่งจ่ายแรงดัน V_x

4.1.3 ขบวนการวัด

ในขั้นตอนการวัดนี้ ก่อนที่จะทำการวัดหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า จะต้องมีการจัดเตรียมเครื่องมือมาตรฐาน ในส่วนนี้ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญที่จะต้องปฏิบัติก่อนที่จะทำการวัด ต้องมีการศึกษาคู่มือและวิธีใช้งานเครื่องมือ รวมถึงข้อมูลจำเพาะต่างๆของเครื่องมือให้ถูกต้องเสียก่อน โดยสามารถแบ่งเป็นรายละเอียดดังนี้

- ตรวจสอบสภาพภายนอกและสภาวะการทำงานของเครื่องมือให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้ เช่น ปุ่มกด ขั้วต่ออินพุทและเอาต์พุท ฟิวส์ รอยแตก รอยไหม้
- ทำความสะอาดขั้วต่ออินพุทและเอาต์พุท
- การอุ่นเครื่องมือวัดให้ได้ตามข้อกำหนดของผู้ผลิต ในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุม
- ตรวจสอบสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการที่ใช้ทำการวัด เช่น อุณหภูมิ 23 ± 2 °C ความชื้น 50 ± 5 %RH
- หลังจากอุ่นเครื่องมือเสร็จแล้วต้องมีการทำ Zero Cal และ Self test เครื่องมือ

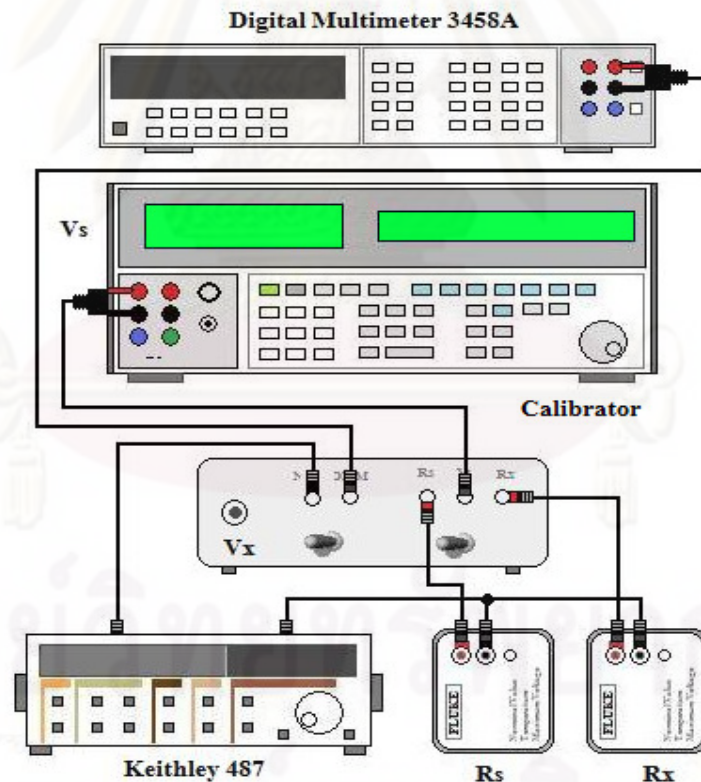
ก่อนใช้งาน เช่น เครื่อง Multi-Product Calibrator และ เครื่อง Digital Multimeter 8 ½ - ตรวจสอบสายวัดให้แน่ใจว่าสายวัดที่นำมาใช้อาศัยอยู่ในสภาพดี

หลังจากที่ได้มีการจัดเตรียมเครื่องมือมาตรฐานและตัวความต้านทานมาตรฐานที่จะมาใช้ในการทำกระบวนการวัดเรียบร้อยแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการวัดต่อไป

4.1.4 ขั้นตอนการวัด

ในขั้นตอนการวัดนี้ในการวัดค่าความต้านทานแบบแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรเพื่อวัดความต้านทานสูงเราจะทำการวัดหรือถ่ายค่าจากค่าความต้านทานมาตรฐาน ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:10 โดยมีขั้นตอนการวัดดังนี้

4.1.4.1 ทำการ Short ที่ขั้วต่ออินพุทของเครื่อง Digital Multimeter 8 ½ โดยตั้งย่านวัดไปที่ DC Voltage แล้วกดฟังก์ชัน Math Null เพื่อลดค่าออฟเซต (offset) ให้ใกล้เคียงศูนย์



รูปที่ 4.11 การต่อเครื่องมือวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรเพื่อวัดความต้านทานสูง

4.1.4.2 ทำการต่อสายวัดเข้ากับเครื่องมือวัดและต่อสายกราวด์ตามรูปที่ 4.11 โดยจะเริ่มทำการวัดความต้านทานที่ไม่ทราบค่าที่ค่า R_x 10 k Ω และความต้านทานมาตรฐานที่มาใช้ค่า R_s 100 k Ω

4.1.4.3 ต่อตัวต้านทานไว้ในกล่อง shield เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่มีผลในขณะที่ทำการวัดจริง โดยแสดงการต่อดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วิธีการต่อตัวต้านทานไว้ในกล่องชีลด์ (shield)

4.1.4.4 ทำการเชื่อมต่อสาย GPIB 488.2 (IEEE 488) ระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุมเข้ากับเครื่องมือวัด

4.1.4.5 ทำการตั้งค่าการวัดต่างๆ ลงในส่วนที่ป้อนด้านหน้า ของโปรแกรม LabVIEW อาทิเช่น ใส่ค่าความต้านทานมาตรฐาน R_s ที่ใช้ ตั้งค่าแรงดัน $\pm 10V_s$ ตั้งค่าหน่วยเวลาในการทำการวัด, ตั้งค่าวันที่และอุณหภูมิความชื้นในขณะที่จะทำการวัด ดังแสดงการต่อวงจรสำเร็จในรูปที่ 4.13

4.1.4.6 คลิกปุ่ม Start จากนั้นโยกสวิตช์เพื่อวัดแรงเคลื่อน $+10V_s$ ที่ต่อกว้อม R_s เสร็จแล้วกดปุ่ม Run Measurement โปรแกรมจะทำการวัดค่า V_s และบันทึกผลการวัด 5 ครั้ง

4.1.4.7 โยกสวิตช์เพื่อวัดค่า R_x กดปุ่ม Run Measurement โปรแกรมจะทำการวัดค่า $+V_x$ และ I_x บันทึกผลการวัด 5 ครั้ง

4.1.4.8 โยกสวิตช์เพื่อวัดแรงเคลื่อน $-10V_s$ ที่ต่อกว้อม R_s เสร็จแล้วกดปุ่ม Run Measurement โปรแกรมจะทำการวัดค่า $-V_s$ และบันทึกผลการวัด 5 ครั้ง



รูปที่ 4.13 แสดงการต่อเครื่องมือวัดที่ใช้วัดจริง

4.1.4.8 โยคสวิตช์เพื่อวัดค่า R_x กดปุ่ม Run Measurement โปรแกรมจะทำการวัดค่า $-V_x$ และ I_b บันทึกผลการวัด 5 ครั้ง

4.1.4.9 เสร็จสิ้นกระบวนการวัดค่า R_x จากนั้นกดบันทึกค่าผลการวัดเก็บไว้

4.1.4.9 ทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ไม่ทราบ R_x ที่ค่าอื่นๆ (แต่ต้องคำนึงอัตราส่วนแรงดันและกระแส)

4.1.4.10 ทำการวัดค่า R_x ตามขั้นตอน 4.1.4.4 ถึง 4.1.4.7

4.1.4.11 ทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน R_s และ R_x โดยจะทำการถ่ายค่าขึ้นไปเรื่อยๆ ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:10 ไปจนถึงค่าที่ R_x 1 T Ω

4.1.4.12 เมื่อทำกระบวนการวัดเสร็จในแต่ละค่า โปรแกรม LabVIEW จะทำการคำนวณค่าเฉลี่ยของผลการวัด 5 ครั้ง ของค่า $+V_s$, $-V_x$ และ I_b แล้วคำนวณหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_x จากสมการที่ (4-1)

4.1.4.13 บันทึกค่าของผลการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด

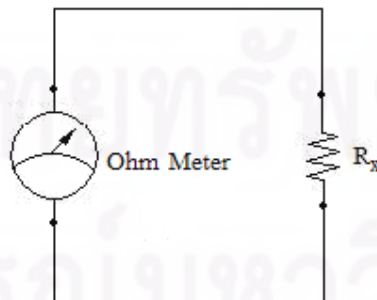
4.1.4.14 นำผลการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดไปหาค่าความไม่แน่นอนในการวัด จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2 การวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง

ในส่วนนี้จะเป็นการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง ตัวความต้านทานที่นำมาใช้วัดนั้นจะมีค่าตั้งแต่ $1M\Omega$, $10M\Omega$, $100M\Omega$, $1G\Omega$, $10G\Omega$, $100G\Omega$ และ $1T\Omega$ แสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.6 โดยวิธีการวัดนั้นเราจะใช้เครื่องมือมาตรฐาน Digital Teraohmmeter ยี่ห้อ Guildline รุ่น 6500A ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับ วิธีการวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนา แสดงดังรูปที่ 4.13 เป็นมาตรฐานตัวอ่านค่าความต้านทานที่ต้องการทราบค่า

4.2.1 รูปแบบการวัด

รูปแบบการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง (Direct Measurement) เป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวกต่อการทำการวัดค่าปริมาณที่ต้องการทราบค่า โดยนำเครื่องมือวัดมาตรฐานตั้งค่าการวัดและย่านการวัดให้ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดและปริมาณที่เราวัด จากนั้นทำการต่อเครื่องมือวัดมาตรฐานเข้ากับตัวความต้านทานที่ต้องการจะวัด อ่านค่าที่แสดงผลทางหน้าจอของเครื่องวัด วิธีการวัดแบบนี้จะมีข้อเสียคือ ค่าความถูกต้องนั้นก็จะขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องวัดที่นำมาใช้ และสายวัด ดังแสดงวงจรดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 วงจรการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง

4.2.2 ชนิดเครื่องมือที่ใช้วัด

ในการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง จะใช้เครื่องมือมาตรฐาน Teraohmmeter รุ่น 6500A ยี่ห้อ Guildline มาทำการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า โดยตัวเครื่องได้มีการออกแบบของขั้วต่ออินพุตด้านเข้า ให้เป็นแบบขั้วหมุนตัวผู้ และตัวความต้านทานสูงก็จะออกแบบขั้วอินพุตขั้วหมุนตัวเมียเพื่อหมุนเข้าตัวเครื่องมาตรฐาน เพราะการวัดความต้านทานมีค่าสูงสายวัดที่นำมาใช้ต้องมีค่าความต้านทานที่สูงด้วย ดังนั้นเพื่อลดผลความผิดพลาดจากการวัดเนื่องจากสายวัด ทางผู้ผลิตจึงออกแบบมาให้ต่อตัวความต้านทานเข้ากับเครื่องมือมาตรฐาน โดยตรง แสดงดังรูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ความต้านทานมาตรฐาน ยี่ห้อ Guildline ที่ต่างๆ



รูปที่ 4.16 Digital Teraohmmeter ยี่ห้อ Guildline รุ่น 6500A

4.2.3 ขบวนการวัด

ในขั้นตอนการวัดนี้ ก่อนที่จะทำการวัดหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแบบโดยตรง จะต้องมีการจัดเตรียมเครื่องมือมาตรฐาน ก่อนที่จะทำการวัด ต้องมีการศึกษาคู่มือและวิธีใช้งาน เครื่องมือ รวมถึงข้อมูลจำเพาะต่างๆของเครื่องมือให้ถูกต้องเสียก่อน มีรายละเอียดดังนี้

- ตรวจสอบภายนอกและสภาวะการทำงานเครื่องมือให้อยู่ในสภาวะที่พร้อมใช้ เช่น ปุ่มกด ขั้วต่ออินพุทและเอาต์พุท รอยแตก รอยไหม้
- ทำความสะอาดขั้วต่ออินพุทและเอาต์พุท
- การอุ่นเครื่องมือวัดให้ได้ตามข้อกำหนดของผู้ผลิต ในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุม
- ตรวจสอบสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการที่ใช้ทำการวัด เช่น อุณหภูมิ 23 ± 2 °C ความชื้น 50 ± 5 %RH

4.2.4 ขั้นตอนการวัด

จากข้างต้นเมื่อได้ทำการเตรียมพร้อมที่จะทำการวัดแล้ว ในขั้นตอนการวัดแบบโดยตรงนี้ จะมีขั้นตอนในการวัดหาค่าความต้านทานสูงที่ไม่ทราบค่าดังนี้

4.2.4.1 ทำการต่อตัวความต้านทานที่ไม่ทราบค่าเข้ากับตัวเครื่องมือมาตรฐานดังรูปที่

4.17

4.2.4.2 ตั้งค่าเครื่องมือมาตรฐาน

- กดปุ่ม Reset เครื่องมือ
 - กดปุ่ม Man Rate > กดปุ่ม OHM > เลือกตั้งค่าระดับแรงดันสูงสุดที่จะใช้
Volts Max Test โดยกดปุ่มลูกศรเลือกค่าขึ้นหรือลง > กดปุ่ม SET
 - ตั้งค่า Capacitor กดปุ่มลูกศรเลือกค่า > กดปุ่ม SET
 - ตั้งค่า Threshold กดปุ่มลูกศรเลือกค่า > กดปุ่ม SET
 - ตั้งค่า Test Volts กดปุ่มลูกศรเลือกค่า > กดปุ่ม SET
- (การตั้งค่าเครื่องมือให้เหมาะสม ดูรายละเอียดจากคู่มือการใช้งาน)



รูปที่ 4.17 การต่อวัดความต้านทานเข้ากับ Digital Teraohmmeter

4.2.4.3 กดปุ่ม Test Volt บนตัวเครื่องมือมาตรฐาน เพื่อจ่ายค่าแรงดัน

4.2.4.4 รอจนกว่าเครื่องมือจะอ่านค่าความต้านอ่านค่าที่แน่นอน และทำการบันทึกค่าผลการวัดเก็บไว้ 5 ครั้ง

4.2.4.5 กดปุ่ม Test Volt อีกครั้งเพื่อหยุดจ่ายค่าแรงดัน

4.2.4.6 ทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า เพื่อที่จะทำการวัด

4.2.4.7 กระทำซ้ำตามขั้นตอน 4.2.4.2 ถึง 4.2.4.5

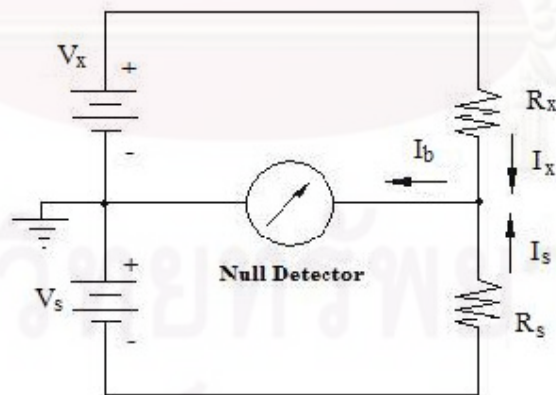
4.2.4.8 ทำการวัดค่าความต้านทานไปจนครบ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการวัดแล้ว นำผลที่ได้มาทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบผลการวัดในหัวข้อถัดไป

4.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจร

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจร แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นจากระบบการวัดโดยจะนำค่าเหล่านั้นมาประเมินค่าทางสถิติ โดยจะแยกประเภทของความไม่แน่นอนแบบ Type A ที่มาจากผลการวัดซ้ำๆ และความไม่แน่นอนแบบ Type B ที่มาจากการการเก็บประวัติข้อมูลการวัด จากใบสอบเทียบ จากข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิตที่ระบุมาให้กับเครื่องมือ

จากระบบการวัดที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจร เราสามารถพิจารณาถึงสมการทางฟิสิกส์ที่ได้จากวงจรดังต่อไปนี้

รูปแบบทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 4.18 วงจรการวัดความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนา

จากกฎของเคอร์ชอฟจะได้

$$-V_x + I_x \cdot R_x = 0 \quad (2)$$

$$-V_s - I_s \cdot R_s = 0 \quad (3)$$

$$I_s + I_x = I_b \quad (4)$$

แทนสมการ (2),(3) ในสมการ (4) จะได้

$$-\frac{V_s}{R_s} + \frac{V_x}{R_x} + [-I_b] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{V_s \cdot R_x - V_x \cdot R_s}{R_s \cdot R_x} = I_b \quad (6)$$

$$V_s \cdot R_x - V_x \cdot R_s = I_b \cdot R_s \cdot R_x \quad (7)$$

$$R_x \cdot [V_x - I_b \cdot R_s] = V_x \cdot R_s \quad (8)$$

จะได้อัตราส่วนของ R_x และ R_s เป็น

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{V_x}{V_s} \cdot \frac{1}{1 - \frac{I_b \cdot R_s}{V_s}} \quad (9)$$

จะได้อัตราส่วนของ R_x และ R_s เป็น

$$\therefore R_x = \frac{V_x \cdot R_s}{V_s - (I_b \cdot R_s)} \quad (10)$$

พิจารณาแหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

$$\begin{bmatrix} V_x = V_x + \delta V_x \\ V_s = V_s + \delta V_s \\ R_x = R_x + \delta R_x \\ R_s = R_s + \delta R_s \\ I_b = I_b + \delta I_b \\ \delta R_x = \delta R_{xt} \\ \delta R_s = \delta R_{sd} + \delta R_{st} \end{bmatrix} \quad (11)$$

แทนสมการ (11) ใน (10) และที่สภาวะบริดจ์สมดุล $I_b = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\therefore R_x = \frac{(V_x + \delta V_x) \cdot (R_s + \delta R_{sd} + \delta R_{st})}{(V_s + \delta V_s) - (\delta I_b \cdot (R_s + \delta R_{sd} + \delta R_{st}))} - \delta R_{xt} \quad (12)$$

โดยที่

R_x = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า(unknown resistor)

R_s = ค่าความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ

V_x = ค่าแรงดันสำหรับความต้านทานที่ไม่ทราบค่า ที่ได้จากคิิจิตอลมัลติมิเตอร์

V_s = ค่าแรงดันสำหรับความต้านทานมาตรฐาน ที่ได้จากคิิจิตอลมัลติมิเตอร์

δV_x = ค่าความละเอียด (resolution) ที่สามารถแสดงได้ของเครื่องคิิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด

δV_s = ค่าความละเอียด (resolution) ที่สามารถแสดงได้ของเครื่องคิิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด

δR_{st} = ค่าความต้านทานมาตรฐานแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift)/ปี

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง

4.4 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแบบโดยตรง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง จะพิจารณาแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นจากระบบการวัดโดยจะนำค่าเหล่านั้นมาประเมินค่าทางสถิติ โดยจะแยกประเภทของความไม่แน่นอนแบบ Type A ที่มาจากผลการวัดซ้ำๆ และความไม่แน่นอนแบบ Type B ที่มาจากการการเก็บประวัติข้อมูลการวัด จากใบสอบเทียบ จากข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิตที่ระบุมาให้กับเครื่องมือ

รูปแบบกระบวนการวัด สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของกระบวนการวัดได้ดังนี้

$$R_{ix} = \delta R_{ix} + \delta R_{rep} + \delta R_{xt} \quad (13)$$

โดยที่

R_{ix} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า(unknown resistor)

δR_{ix} = ค่าความละเอียด (resolution) ที่สามารถแสดงได้ของเครื่อง Digital Teraohmmeter

δR_{rep} = ค่าความสามารถที่วัดซ้ำของ Digital Teraohmmeter

δR_{xt} = ค่าเลื่อนของความต้านทาน/อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

4.5 ข้อสรุปในบทนี้

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้จะกล่าวถึง วิธีการดำเนินการวิจัย โดยในหัวข้อที่ 4.1 จะกล่าวถึงการวัดความต้านทานสูงแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจรที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW ควบคุมระบบการวัด 4.2 เป็นการวัดความต้านทานสูงโดยใช้วิธีการวัดแบบโดยตรง 4.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าสูงแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนางจร 4.4 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าสูงแบบโดยตรง ซึ่งทั้งหมดนี้จะนำไปเป็นใช้ในการวิเคราะห์หาความไม่แน่นอนในบทถัดไป

บทที่ 5

ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานสูง โดยใช้วิธีการวัดแบบ วิดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในการวัดความต้านทานสูงในระดับที่ราโอห์ม ที่โปรแกรม คอมพิวเตอร์ LabVIEW ควบคุมระบบการวัด และวิธีการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรง โดยจะ นำผลกาวัดของวิธีการทั้งสองมาเปรียบเทียบผลการวัด การประเมินค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการ วัดด้วยวิธีการทั้งสอง รวมทั้งสรุปผลและวิเคราะห์ผลที่เกิดจากการวัดของงานวิจัยนี้

5.1 ผลการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวิดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจร

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10k Ω Model 742A; R_x 100k Ω Model 742A S/N 8363002 ; Ratio 1:10 @ 1V

Voltage (1V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
I_b (A)	6.31E-08	-7.41E-08	5.05E-08	1.04E-07	5.87E-08	4.04E-08
V_x (V)	-9.98E+00	-9.98E+00	-9.98E+00	-9.98E+00	-9.98E+00	-9.98E+00
Voltage (-1V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00	-1.00E+00
I_b (A)	4.87E-08	9.63E-08	-7.47E-08	-7.82E-08	3.70E-08	5.83E-09
V_x (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
Total Average						
V_{st} (V)	0.99995462					
I_{bt} (A)	9.99722087					
V_{xt} (V)	2.313E-8					
R_s (Ω)	10000.307		10.000307	kΩ		
R_x (Ω)	100002.94		100.00294	kΩ		
Date:4/18/2010	TIME:3:25:40 PM					

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001 ; R_x 1M Ω Model 742A S/N 8129002 ; Ratio 1:1 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	-2.49E-11	1.32E-09	1.51E-09	-1.58E-09	-1.20E-09	5.61E-12
V_x (V)	-9.99E+00	-9.99E+00	-9.99E+00	-9.99E+00	-9.99E+00	-9.99E+00
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	1.47E-09	8.91E-10	-1.65E-09	-1.14E-10	1.66E-09	4.52E-10
V_x (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999547					
I_{bt} (A)	9.9983115					
V_{xt} (V)	2.287E-10					
R_s (Ω)	1000015.9		1.0000159	MΩ		
R_x (Ω)	999874.4		0.9998744	MΩ		
Date:3/19/2010	TIME:3:24:59 PM					

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001 ; R_x 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; Ratio 1:10 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	-3.41E-09	2.78E-09	-7.36E-09	3.42E-09	-3.78E-09	-1.67E-09
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	-6.24E-09	2.61E-09	5.93E-09	-5.56E-09	-1.70E-09	-9.91E-10
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.99995481					
I_{bt} (A)	100.001922					
V_{xt} (V)	1.331E-09					
R_s (Ω)	1000015.9		1.0000159	MΩ		
R_x (Ω)	10001728		10.001728	MΩ		
Date:3/11/2010	TIME:2:00:26 PM					

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001 ; R_x 10M Ω
Model 742A S/N 8001005 ; Ratio 1:10 @10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	6.61E-10	-3.10E-09	-1.18E-10	2.22E-09	-3.55E-09	-7.77E-10
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	1.85E-10	-3.17E-09	2.25E-09	-2.93E-09	-5.51E-09	-1.84E-09
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999588					
I_{bt} (A)	100.00138					
V_{xt} (V)	1.306E-09					
R_s (Ω)	1000015.9		1.0000159	M Ω		
R_x (Ω)	10001644.5		10.001644	M Ω		
Date:4/8/2010	TIME:9:02:12 AM					

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1M Ω Model 742A S/N 8129002 ; R_x 10M Ω
Model 742A S/N 7806005 ; Ratio 1:10 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	4.10E-09	-2.74E-09	-6.36E-09	-3.66E-09	3.67E-09	-9.98E-10
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	2.99E-09	-6.65E-09	6.30E-09	-2.52E-09	-2.34E-09	-4.45E-10
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999575					
I_{bt} (A)	100.001015					
V_{xt} (V)	7.214E-10					
R_s (Ω)	999874.44		0.9998744	M Ω		
R_x (Ω)	10000150.98		10.0001510	M Ω		
Date:3/12/2010	TIME:11:32:17 AM					

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; R_x 10M Ω
Model 742A S/N 8001005 ; Ratio 1:1 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	-4.39E-12	-1.22E-11	5.39E-12	-3.37E-11	1.61E-11	-5.75E-12
V_x (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	-3.17E-12	-1.07E-11	-5.90E-13	-1.64E-12	-7.80E-13	-3.37E-12
V_x (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
Total Average						
V_{st} (V)	9.99996357					
I_{bt} (A)	10.0000671					
V_{xt} (V)	4.558E-12					
R_s (Ω)	10000150.98		10.0001510 M Ω			
R_x (Ω)	10000300.07		10.0003001 M Ω			
Date:3/15/2010	TIME:10:28:58 AM					

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; R_x 100M Ω
Model 5188-8 ; Ratio 1:10 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	2.71E-12	-1.35E-12	4.50E-13	6.57E-12	1.21E-12	1.92E-12
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	2.25E-12	2.99E-12	-1.12E-12	1.58E-12	4.30E-13	1.23E-12
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.99995784					
I_{bt} (A)	100.194256					
V_{xt} (V)	1.572E-12					
R_s (Ω)	10000151.0		10.0001510 M Ω			
R_x (Ω)	100196348.1		100.196348 M Ω			
Date:3/16/2010	TIME:1:41:39 PM					

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; R_x 100M Ω
Model 9334A; Ratio 1:10 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	6.20E-13	1.40E-12	3.67E-12	3.67E-12	-2.20E-12	1.43E-12
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	2.90E-13	2.80E-13	2.70E-13	1.13E-12	1.75E-12	7.44E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.99996053					
I_{bt} (A)	100.004058					
V_{xt} (V)	1.088E-12					
R_s (Ω)	10000151.0		10.0001510	MΩ		
R_x (Ω)	100006071.0		100.006071	MΩ		
Date:3/15/2010	TIME:2:12:26 PM					

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; R_x 100M Ω
Model 9336 ; Ratio 1:10 @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	-3.26E-12	-1.33E-12	-6.10E-13	-4.00E-14	3.95E-12	-2.58E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	-2.60E-12	0.00E+00	5.93E-12	-9.90E-13	2.91E-12	1.05E-12
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999584					
I_{bt} (A)	100.000165					
V_{xt} (V)	6.540E-13					
R_s (Ω)	10000151		10.0001510	MΩ		
R_x (Ω)	100002156		100.002156	MΩ		
Date:3/17/2010	TIME:8:47:52 AM					

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9334A; R_x 100M Ω Model 9336; Ratio 1:1 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	-6.60E-13	-1.50E-13	-8.90E-13	4.10E-13	-1.16E-12	-4.90E-13
V_x (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	3.30E-13	3.20E-13	3.00E-13	3.00E-13	3.00E-13	3.10E-13
V_x (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999605					
I_{bt} (A)	9.9995996					
V_{xt} (V)	4.000E-13					
R_s (Ω)	100006071		100.006071	MΩ		
R_x (Ω)	100002861		100.002861	MΩ		
Date:3/17/2010	TIME:5:01:04 PM					

ตารางที่ 5.11 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9334A; R_x 100M Ω Model 9336; Ratio 1:1 ; @ 100V

Voltage (100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
I_b (A)	8.00E-14	5.13E-12	3.84E-12	2.01E-12	1.49E-12	2.51E-12
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
I_b (A)	1.50E-12	4.02E-12	-3.40E-13	-3.40E-13	1.41E-12	1.25E-12
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	99.999888					
I_{bt} (A)	99.995659					
V_{xt} (V)	1.880E-12					
R_s (Ω)	100006071		100.006071	MΩ		
R_x (Ω)	100002029		100.002029	MΩ		
Date:3/17/2010	TIME:3:57:35 PM					

ตารางที่ 5.12 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9336; R_x 100M Ω Model 5155-8; Ratio 1:1 ; @ 100V

Voltage (100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
I_b (A)	2.32E-12	8.60E-13	-3.10E-13	-1.49E-12	3.60E-12	9.96E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
I_b (A)	1.83E-12	-1.34E-12	-4.10E-13	2.66E-12	-1.23E-12	3.02E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	99.999884					
I_{bt} (A)	100.194841					
V_{xt} (V)	6.490E-13					
R_s (Ω)	100002029		100.002029	MΩ		
R_x (Ω)	100197056		100.197056	MΩ		
Date:3/22/2010	TIME:9:54:18 AM					

ตารางที่ 5.13 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9336; R_x 100M Ω Model 9334A; Ratio 1:1 ; @ 100V

Voltage (100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
I_b (A)	-1.72E-12	-8.30E-13	-1.57E-12	2.90E-13	-3.03E-12	-1.37E-12
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
I_b (A)	5.10E-13	-1.03E-12	-1.04E-12	-1.04E-12	2.78E-12	3.60E-14
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	99.999904					
I_{bt} (A)	100.004072					
V_{xt} (V)	7.040E-13					
R_s (Ω)	100002029		100.002029	MΩ		
R_x (Ω)	100006268		100.006268	MΩ		
Date:3/19/2010	TIME:10:32:09 AM					

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 9336;

Ratio 1:10 ; @10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	2.05E-12	1.01E-12	1.01E-12	-2.46E-12	-4.30E-13	2.36E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.30E-13	4.40E-13	4.50E-13	4.50E-13	4.40E-13	4.42E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999609					
I_{bt} (A)	100.000058					
V_{xt} (V)	3.390E-13					
R_s (Ω)	100002156		100.002156	MΩ		
R_x (Ω)	1000029436		1.00002944	GΩ		
Date:4/1/2010	TIME:2:13:13 PM					

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 5155-9;

Ratio 1:10 ; @10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	3.10E-13	3.10E-13	3.20E-13	3.30E-13	3.40E-13	3.22E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.30E-13	4.30E-13	4.20E-13	4.30E-13	4.30E-13	4.28E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999578					
I_{bt} (A)	100.344135					
V_{xt} (V)	3.750E-13					
R_s (Ω)	100002029		100.00203	MΩ		
R_x (Ω)	100346971		1.0034697	GΩ		
Date:3/22/2010	TIME:2:53:26 PM					

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100M Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 9331S;

Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	5.10E-13	5.20E-13	5.40E-13	5.40E-13	1.36E-12	6.94E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	5.30E-13	5.20E-13	-1.80E-13	3.50E-13	3.50E-13	3.14E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999614					
I_{bt} (A)	99.991949					
V_{xt} (V)	5.040E-13					
R_s (Ω)	100002029		100.002029	M Ω		
R_x (Ω)	999948674		0.9999487	G Ω		
Date:3/22/2010	TIME:2:10:06 PM					

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1G Ω Model 9331S; R_x 1G Ω Model 5155-9;

Ratio 1:1 ; @ 100V

Voltage (100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
I_b (A)	5.30E-13	5.40E-13	5.50E-13	5.60E-13	5.70E-13	5.50E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
I_b (A)	4.10E-13	4.10E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.16E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	99.999891					
I_{bt} (A)	100.350150					
V_{xt} (V)	4.830E-13					
R_s (Ω)	999948674		0.9999487	G Ω		
R_x (Ω)	1.003E+09		1.00345593	G Ω		
Date:3/23/2010	TIME:7:48:31 AM					

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1G Ω Model 9336; R_x 1G Ω Model 9331S;
Ratio 1:1 ; @ 100V

Voltage (100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
I_b (A)	-2.21E-12	1.54E-12	5.50E-13	5.40E-13	-1.40E-12	-1.96E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
I_b (A)	5.30E-13	5.40E-13	5.40E-13	5.40E-13	5.40E-13	5.38E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	99.9999295					
I_{bt} (A)	99.9999291					
V_{xt} (V)	3.670E-13					
R_s (Ω)	1000029436		1.0000294	G Ω		
R_x (Ω)	99988365		0.9998837	G Ω		
Date:4/1/2010	TIME:3:51:49 PM					

ตารางที่ 5.19 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1G Ω Model 9331S; R_x 10G Ω Model 5155-10;
Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	4.80E-13	4.80E-13	4.80E-13	4.80E-13	4.80E-13	4.80E-13
V_x (V)	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13
V_x (V)	9.97E+01	9.97E+01	9.97E+01	9.97E+01	9.97E+01	9.97E+01
Total Average						
V_{Rs} (V)	9.9999614					
V_{Rx} (V)	99.651203					
I_{Rx} (A)	4.700E-13					
R_s (ohm)	999948674		0.9999487	G Ω		
R_x (ohm)	996511564		9.9651156	G Ω		
Date:3/24/2010	TIME:1:10:23 PM					

ตารางที่ 5.20 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1G Ω Model 9331S; R_x 10G Ω Model 9336;

Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	5.00E-13	5.00E-13	5.00E-13	5.00E-13	5.00E-13	5.00E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.70E-13	4.62E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999610					
I_{bt} (A)	100.017622					
V_{xt} (V)	4.810E-13					
R_s (Ω)	999948674		0.9999486	G Ω		
R_x (Ω)	100017688		10.0017689	G Ω		
Date:3/23/2010	TIME:3:12:33 PM					

ตารางที่ 5.21 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 1G Ω Model 9336; R_x 10G Ω Model 9336;

Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	8.00E-14	1.00E-13	7.00E-13	6.90E-13	6.80E-13	4.50E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.70E-13	4.70E-13	4.70E-13	4.70E-13	4.60E-13	4.68E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999629					
I_{bt} (A)	100.010289					
V_{xt} (V)	4.590E-13					
R_s (Ω)	1000029436		1.0000294	G Ω		
R_x (Ω)	1000181955		10.001820	G Ω		
Date:4/1/2010	TIME:4:59:02 PM					

ตารางที่ 5.22 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10G Ω Model 9336; R_x 10G Ω Model 5155-10;

Ratio 1:1 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	4.40E-13	4.40E-13	4.30E-13	4.40E-13	4.40E-13	4.38E-13
V_x (V)	-9.96E+00	-9.96E+00	-9.96E+00	-9.96E+00	-9.96E+00	-9.96E+00
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.10E-13	4.10E-13	4.10E-13	4.00E-13	4.00E-13	4.06E-13
V_x (V)	9.97E+00	9.97E+00	9.97E+00	9.97E+00	9.97E+00	9.97E+00
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999628					
I_{bt} (A)	9.9625082					
V_{xt} (V)	4.22E-13					
R_s (Ω)	10001768886		10.001769	GΩ		
R_x (Ω)	9968514999		9.9685150	GΩ		
Date:3/24/2010	TIME:3:51:22 PM					

ตารางที่ 5.23 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10G Ω Model 9336; R_x 10G Ω Model 5155-10;

Ratio 1:1 ; @ 100V

Voltage (100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
I_b (A)	4.70E-13	4.70E-13	4.70E-13	4.70E-13	4.80E-13	4.72E-13
V_x (V)	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01	-9.96E+01
Voltage (-100V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
I_b (A)	4.30E-13	4.30E-13	4.30E-13	4.30E-13	4.30E-13	4.30E-13
V_x (V)	9.96E+01	9.96E+01	9.96E+01	9.96E+01	9.96E+01	9.96E+01
Total Average						
V_{st} (V)	99.999869					
I_{bt} (A)	99.626533					
V_{xt} (V)	4.51E-13					
R_s (Ω)	100017688		10.001769	GΩ		
R_x (Ω)	996487812		9.9648781	GΩ		
Date:3/24/2010	TIME:4:55:08 PM					

ตารางที่ 5.24 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10G Ω Model 9336; R_x 100G Ω Model 9334A;

Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	5.10E-13	5.10E-13	5.10E-13	5.10E-13	5.00E-13	5.08E-13
V_x (V)	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02	-1.00E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.60E-13	4.70E-13	4.70E-13	4.70E-13	-9.60E-13	1.82E-13
V_x (V)	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999678					
I_{bt} (A)	100.10161					
V_{xt} (V)	3.45E-13					
R_s (Ω)	100018195		10.001820	G Ω		
R_x (Ω)	100154703		100.15470	G Ω		
Date:4/2/2010	TIME:3:07:26 PM					

ตารางที่ 5.25 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 10G Ω Model 9336A; R_x 100G Ω Model 5155-

11; Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13	4.60E-13
V_x (V)	-1.03E+02	-1.03E+02	-1.03E+02	-1.03E+02	-1.03E+02	-1.03E+02
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.20E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.20E-13
V_x (V)	1.03E+02	1.03E+02	1.03E+02	1.03E+02	1.03E+02	1.03E+02
Total Average						
V_{st} (V)	9.9999700					
I_{bt} (A)	103.25336					
V_{xt} (V)	4.4E-13					
R_s (Ω)	100018195		10.001820	G Ω		
R_x (Ω)	103317927		103.31793	G Ω		
Date:4/7/2010	TIME:1:07:44 PM					

ตารางที่ 5.26 แสดงผลการวัดค่าความต้านทาน R_s 100G Ω Model 9334A; R_x 1T Ω Model 5155-12; Ratio 1:10 ; @ 10V

Voltage (10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
I_b (A)	4.30E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.20E-13	4.10E-13	4.20E-13
V_x (V)	-9.89E+01	-9.89E+01	-9.89E+01	-9.89E+01	-9.89E+01	-9.89E+01
Voltage (-10V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
V_s (V)	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01	-1.00E+01
I_b (A)	4.90E-13	5.00E-13	5.00E-13	5.00E-13	5.00E-13	4.98E-13
V_x (V)	9.98E+01	9.98E+01	9.98E+01	9.98E+01	9.98E+01	9.98E+01
Total Average						
V_{st} (V)	9.99997021					
I_{bt} (A)	99.3656851					
V_{xt} (V)	4.59E-13					
R_s (Ω)	100154703		100.154703	GΩ		
R_x (Ω)	99979319		0.9997932	TΩ		
Date:4/7/2010	TIME:4:46:03 PM					

5.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีดส์โตนบริดจ์ที่พัฒนา วงจรในระดับเทระโอห์ม [6]

ในการพิจารณาถึงแหล่งของความไม่แน่นอนที่ได้จากการวัดต่างๆ ต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอนที่มีผล ในการนำมาทำการประเมินผลค่าความไม่แน่นอนรวมทั้งระบบการวัด

ประเภทของความไม่แน่นอนได้แยกออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

- **Type A** ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ประเมินโดยการวิเคราะห์ทางสถิติของการวัดซ้ำๆ หรือได้มาจากการวัด (Random Errors)
- **Type B** ความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ประเมินได้จากระบบการวัด เช่น ข้อมูลจำเพาะไบร่บรองผล เป็นต้น (Systematic Errors)

ขั้นตอนของการประเมินความไม่แน่นอน

1. พิจารณารูปแบบของกระบวนการวัด (Math Modeling)
2. ประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน **Type A, Type B**
3. ความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty)
4. ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty)
5. รายงานผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนที่ได้

5.2.1 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x **100k Ω Model 742A S/N 8363002** ; R_s 10k Ω Model 742A; Ratio 1:10

ที่มาของความไม่แน่นอน

ความต้านทาน R_x **100k Ω** ถูกนำไปสอบเทียบด้วยวิธีการวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนา โดยใช้ความต้านทานมาตรฐาน R_s 10k Ω ในการถ่ายค่าในอัตราส่วน 1:10 โดยแรงดันที่ใช้ ± 1 VDC ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ถูกใช้งานในย่านวัด 1V และ 10V โดยทำการวัด 5 ครั้ง

ข้อมูล R_s **10k Ω** : จากใบรับรองผล 10.000 307k Ω @ 1ppm (k=2)

: จากข้อมูลจำเพาะ Stability 4ppm/year, Temperature Coefficient 1.5ppm

ข้อมูล R_x **100k Ω** : จากข้อมูลจำเพาะ Temperature Coefficient 2ppm

ข้อมูล DMM : ย่าน 1V Accuracy = 4 ppm of reading+0.05ppm.of range, Resolution 100 μ A

: ย่าน 10V Accuracy = 4 ppm of reading+0.3ppm.of range, Resolution 1 μ A

1. รูปแบบกระบวนการวัด

$$R_x = \frac{(V_x + \delta V_x) \cdot (R_s + \delta R_{sd} + \delta R_{st})}{(V_s + \delta V_s) - (\delta I_b \cdot (R_s + \delta R_{sd} + \delta R_{st}))} - \delta R_{xt}$$

2. ประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A

Voltage (1V)	#1	#2	#3	#4	#5
V_s (1)	0.9999805	0.9999806	0.9999803	0.9999802	0.9999805
I_b (1)	0.0000000631	-0.0000000741	0.0000000505	0.0000001039	0.0000000587
V_x (1)	-9.9843182	-9.9810141	-9.9793686	-9.9783170	-9.9775570
Voltage (-1V)	#6	#7	#8	#9	#10
V_s (2)	-0.9999291	-0.9999288	-0.9999287	-0.9999289	-0.9999286
I_b (2)	0.0000000487	0.0000000963	-0.0000000747	-0.0000000782	0.0000000370
V_x (2)	10.0048442	10.0162224	10.0168015	10.0165225	10.0172400

หาค่าเฉลี่ยของค่า V_{st} , I_{bt} , V_{xt}

$$V_{st} = \frac{V_{s\#1} + ABS(V_{s\#6})}{2}; \frac{V_{s\#2} + ABS(V_{s\#7})}{2}; \frac{V_{s\#3} + ABS(V_{s\#8})}{2}; \frac{V_{s\#n} + ABS(V_{s\#n})}{2}$$

$$I_{bt} = \frac{I_{b\#1} + I_{b\#6}}{2}; \frac{I_{b\#2} + I_{b\#7}}{2}; \frac{I_{b\#3} + I_{b\#8}}{2}; \frac{I_{b\#n} + I_{b\#n}}{2}$$

$$V_{xt} = \frac{ABS(V_{x\#1}) + V_{x\#6}}{2}; \frac{ABS(V_{x\#2}) + V_{x\#7}}{2}; \frac{ABS(V_{x\#3}) + V_{x\#8}}{2}; \frac{ABS(V_{x\#n}) + V_{x\#n}}{2}$$

ดังนั้นจะได้

Total	#1	#2	#3	#4	#5
V_{st}	0.99995477	0.99995471	0.99995451	0.99995456	0.99995455
I_{bt}	0.0000000559	0.0000000111	-0.0000000121	0.0000000129	0.0000000479
V_{xt}	9.9945812	9.9986183	9.9980850	9.9974198	9.9973985

2.1 หาค่าเฉลี่ย \bar{X} ของผลการวัด n ครั้ง

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

$$\bar{V}_{st} = \frac{0.99995477 + 0.99995471 + 0.99995451 + 0.99995456 + 0.99995455}{5} = \mathbf{0.99995462V}$$

$$\bar{I}_{bt} = \frac{0.0000000559 + 0.0000000111 + (-0.0000000121) + 0.0000000129 + 0.0000000479}{5} = \mathbf{0.0000000231A}$$

$$\bar{V}_{xt} = \frac{9.9945812 + 9.9986183 + 9.9980850 + 9.9974198 + 9.9973985}{5} = \mathbf{0.99995462V}$$

นำค่าเฉลี่ยที่ได้แต่ละครั้งมาหาค่า $R_{x_n} = \frac{V_{x_n} \cdot R_{s_n}}{V_{s_n} - (I_{b_n} \cdot R_{s_n})}$

$$R_{x1} = \frac{9.9945812 \cdot 10.000307}{0.99995477 - (0.0000000559 \cdot 10.000307)} = 0.09995340\Omega$$

$$R_{x2} = \frac{9.9986183 \cdot 10.000307}{0.99995471 - (0.0000000111 \cdot 10.000307)} = 0.09999378\Omega$$

$$R_{x3} = \frac{9.9980850 \cdot 10.000307}{0.99995451 - (-0.0000000121 \cdot 10.000307)} = 0.09998847\Omega$$

$$R_{x4} = \frac{9.9974198 \cdot 10.000307}{0.99995456 - (0.0000000129 \cdot 10.000307)} = 0.09998181\Omega$$

$$R_{x5} = \frac{9.9973985 \cdot 10.000307}{0.99995455 - (0.0000000497 \cdot 10.000307)} = 0.09998160\Omega$$

$$\overline{R_x} = \frac{0.09995340 + 0.09999378 + 0.09998847 + 0.09998181 + 0.09998160}{5} = 0.09997981\Omega$$

2.2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัด n ครั้ง (Standard Deviation)

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{5-1} ((0.09995340 - 0.09997981)^2 + (0.09999378 + 0.09997981)^2 + (0.09998847 + 0.09997981)^2 + (0.09998181 + 0.09997981)^2 + (0.09998160 + 0.09997981)^2)}$$

$$= 0.00001561\Omega$$

2.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่ากลาง (Standard Deviation of the mean)

$$S(\bar{x}) = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.00001561\Omega}{\sqrt{5}} = 0.00000698\Omega \text{ หรือ } 69.8\text{ppm}$$

2.4 องศาความเป็นอิสระของ Type A (Degree of freedom)

$$V = n-1 = 5-1 = 4$$

3. ประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

3.1 ตัวต้านทานมาตรฐาน $R_s = 10k\Omega$

จากใบรับรองผลระบุค่าของตัวมาตรฐาน $10.000307k\Omega$ มีค่าความไม่แน่นอน 1ppm ที่ระดับความเชื่อมั่น $k=2$

$$= \frac{1}{1000000} = 0.000001$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } R_s = \frac{U}{k} = \frac{0.000001}{2} = 0.0000005$$

3.2 จากข้อมูลจำเพาะของดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ที่ย่านวัด 10V โดยวัดแรงดันที่ความต้านทานที่ไม่ทราบค่า (V_x)

= 9.99722087V : (Accuracy = 4 ppm of reading+0.05ppm.of range)

$$= \left(\left(\frac{4}{1000000} * 9.99722087V \right) + \left(\frac{0.05}{1000000} * 10V \right) \right) = 0.0000405V \approx 4.05 \text{ ppm}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } \frac{4.05}{1000000} = 0.00000405$$

$$V_x = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.00000405}{\sqrt{3}} = 2.34E - 6$$

3.3 จากข้อมูลจำเพาะของดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ที่ย่านวัด 1V โดยวัดแรงดันที่ความต้านทานมาตรฐานที่ทราบค่า (V_x)

= 0.999954626V: (Accuracy = 4 ppm of reading+0.3ppm of range)

$$= \left(\left(\frac{4}{1000000} * 0.999954626V \right) + \left(\frac{0.3}{1000000} * 1V \right) \right) = 0.0000043V \approx 4.3 \text{ ppm}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } \frac{4.3}{1000000} = 0.00000430$$

$$V_x = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.00000430}{\sqrt{3}} = 2.48E - 6$$

3.4 ความละเอียดดิจิทัลของมัลติมิเตอร์ (resolution) = 0.0000001V ที่ย่านการวัด 10V (δV_x)

$$= \frac{0.0000001V}{10V} * 1000000 = 0.01 ppm$$

ดังนั้นจะได้ $\frac{0.01}{1000000} = 0.00000001$

$$\delta V_x = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.00000001}{2 * \sqrt{3}} = 2.89E - 9$$

3.5 ความละเอียดดิจิทัลของมัลติมิเตอร์ (resolution) = 0.00000001V ที่ย่านการวัด 1V (δV_s)

$$= \frac{0.00000001V}{1V} * 1000000 = 0.01 ppm$$

ดังนั้นจะได้ $\frac{0.01}{1000000} = 0.00000001$

$$\delta V_s = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.00000001}{2 * \sqrt{3}} = 2.89E - 9$$

3.6 ข้อมูลจำเพาะค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า (δR_{xt}) แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 2ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ

$$= \pm 0.5^\circ C = 2ppm * 0.5 = 1.00ppm$$

ดังนั้นจะได้ $\frac{1}{1000000} = 0.00000001$

$$\delta R_{xt} = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.000001}{\sqrt{3}} = 4.33E - 7$$

3.7 ข้อมูลจำเพาะของค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า (δR_{st}) แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 1.5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ

$$= \pm 0.5^\circ C = 1.5ppm * 0.5 = 0.75ppm$$

ดังนั้นจะได้ $\frac{0.75}{1000000} = 0.00000075$

$$\delta R_{st} = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.00000075}{\sqrt{3}} = 5.77E - 7$$

3.8 ข้อมูลจำเพาะของค่าความต้านทานมาตรฐาน (δR_{sd}) เปลี่ยนแปลง(drift) 4ppm

$$\text{ดังนั้นจะได้ } \frac{4}{1000000} = 0.000004$$

$$\delta R_{st} = \frac{U}{\text{Rectangular}} = \frac{0.000004}{\sqrt{3}} = 2.31E-6$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ_i)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	10 V	2.34×10^{-6}	-	Rectangular	∞	1	2.34×10^{-6}	-
δV_x	0	2.89×10^{-9}	-	Rectangular	∞	1	2.89×10^{-9}	-
V_s	10 V	2.48×10^{-6}	-	Rectangular	∞	1	2.48×10^{-6}	-
δV_s	0	2.89×10^{-9}	-	Rectangular	∞	1	2.89×10^{-9}	-
R_s	1M Ω	5.00×10^{-7}	-	Normal	∞	1	5.00×10^{-7}	-
δR_{sd}	0	2.31×10^{-6}	-	Rectangular	∞	1	2.31×10^{-6}	-
δR_{st}	0	4.33×10^{-7}	-	Rectangular	∞	1	4.33×10^{-7}	-
δR_{xt}	0	5.77×10^{-7}	-	Rectangular	∞	1	5.77×10^{-7}	-
δI_b	0	6.98×10^{-5}		Normal	4	1	6.98×10^{-5}	
R_x	1M Ω				∞		1.40×10^{-4}	-

ตารางที่ 5.27 Uncertainty Budget R_x 100k Ω ; Model 742A; S/N 8363002 @ 1V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 7.00 \times 10^{-5} = 1.40 \times 10^{-4} \times 100k\Omega = \pm 0.014k\Omega @ 100.002k\Omega$$

5.2.2 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1M Ω Model 742A S/N 8129002 ; R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001; Ratio 1:1; @ 10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 5ppm (1.000 015 9M Ω)

$$= (5/1000000 = 0.000005) = 5.00E-6/2 = \mathbf{2.50E-6}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.998 311 5V ที่ย่านวัด1V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4 ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 954 7V ที่ย่านวัด 1V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4 ppm of reading+0.3ppm.of range = 4.3ppm.

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc
0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 1Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 2ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ = $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($2\text{ppm} \cdot 0.5 = 1.00\text{ppm}$)

$$= (1.00/1000000) = 1.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77E-7}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 1.5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ = $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($2\text{ppm} \cdot 0.5 = 1.00\text{ppm}$)

$$= (1.00/1000000) = 1.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77E-7}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเดือนค่า (drift) 8ppm/year

$$= (8/1000000) = 8.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{4.62E-6}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 12.9ppm

$$= (12.9/1000000) = 1.29E-5 / 1 = \mathbf{1.29E-5}$$

Quantity Xi	Estimate Xi	Standard Uncert. U(Xi)		Probability distribution	Effective degree of freedom (gi)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	1M Ω	$2.50 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	∞	1	$2.50 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{sd}	0	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-
δI_b	0	$1.29 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	4	1	$1.29 \cdot 10^{-5}$	-
R_x	1M Ω				∞		$1.44 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.28 Uncertainty Budget R_x 1M Ω ; Model 742A; S/N 8129002

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.44 \cdot 10^{-5} = 2.87 \cdot 10^{-5} \cdot 1\text{M}\Omega = \pm 0.000\ 029\text{M}\Omega @ 0.999\ 874\text{M}\Omega$$

5.2.3 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001; Ratio 1:10

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 5ppm (1.000 015 9M Ω)

$$= (5/1000000 = 0.000005) = 5.00E-6/2 = \mathbf{2.50E-6}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.001 922V ที่ย่านวัด 1V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 954 8V ที่ย่านวัด 1V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4 ppm of reading+0.3ppm.of range = 4.3ppm.

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2 \sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 1Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2 \sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 2ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (3ppm*0.5 = 1.50ppm)

$$= (1.50/1000000) = 1.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66E-7}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 1.5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (2ppm*0.5 = 1.00ppm)

$$= (1.00/1000000) = 1.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77E-7}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 8ppm/year

$$= (8/1000000) = 8.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{4.62E-6}$$

δI_p = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 12.5ppm

$$= (12.5/1000000) = 1.25E-6 / 1 = \mathbf{1.25E-5}$$

Quantity Xi	Estimate Xi	Standard Uncert. U(Xi)		Probability distribution	Effective degree of freedom (gi)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	1M Ω	$2.50 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	∞	1	$2.50 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{sd}	0	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-
δI_b	0	$1.25 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	4	1	$1.25 \cdot 10^{-5}$	-
R_x	10M Ω				∞		$1.43 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5-29. Uncertainty Budget R_x 10M Ω Model 742A S/N 7806005 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.43 \cdot 10^{-5} = 2.86 \cdot 10^{-5} \cdot 10M\Omega = \pm 0.00029M\Omega @ 10.00173M\Omega$$

5.2.4 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10M Ω Model 742A S/N 8001005 ; R_s 1M Ω Model 742A S/N 8363001; Ratio 1:10

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 5ppm (1.0000159M Ω)

$$= (5/1000000) = 0.000005 = 5.00E-6/2 = 2.50E-6$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.001380V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000) = 6.30E-6 = 6.30E-6 / \sqrt{3} = 3.64E-6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.9999588V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4 ppm of reading+0.3ppm.of range = 4.3ppm.

$$= (4.05/1000000) = 4.05E-6 = 4.05E-6 / \sqrt{3} = 2.34E-6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = 2.89E-9$$

$$\delta V_s = \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องวัดดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 1Vdc 0.01ppm} \\ = (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

$$\delta R_{xt} = \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (3\text{ppm} * 0.5 = 1.50\text{ppm}) \\ = (1.50/1000000) = 1.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66\text{E-}7}$$

$$\delta R_{st} = \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 2ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ขณะทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (2\text{ppm} * 0.5 = 1.00\text{ppm}) \\ = (1.00/1000000) = 1.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77\text{E-}7}$$

$$\delta R_{sd} = \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 8ppm/year} \\ = (8/1000000) = 8.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{4.62\text{E-}6}$$

$$\delta I_b = \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง} = 12.8\text{ppm} \\ = (12.8/1000000) = 1.28\text{E-}5 / 1 = \mathbf{1.28\text{E-}5}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
R_s	1M Ω	$2.50 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	∞	1	$2.50 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{sd}	0	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-
δI_b	0	$1.28 \cdot 10^{-5}$		Normal	4	1	$1.28 \cdot 10^{-5}$	
R_x	10M Ω				∞		$1.45 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.30 Uncertainty Budget R_x 10M Ω Model 742A S/N 8001005 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.45 \cdot 10^{-5} = 2.90 \cdot 10^{-5} * 10\text{M}\Omega = \pm 0.000 29\text{M}\Omega @ 10.001 64\text{M}\Omega$$

5.2.5 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10M Ω Model 742A S/N 7806005 ; R_s 1M Ω Model 742A S/N 8129002; Ratio 1:10

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 29ppm (0.999 874 4M Ω)

$$= (29/1000000 = 0.000029) = 2.90E-5/2 = \mathbf{1.45E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.001 015V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันสำหรับความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 957V ที่ย่านวัด10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4 ppm of reading+0.3ppm.of range = 4.3ppm.

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-6 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-7}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-7 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-8}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (3ppm*0.5 = 1.50ppm)

$$= (1.50/1000000) = 1.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66E-7}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 2ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (2ppm*0.5 = 1.00ppm)

$$= (1.00/1000000) = 1.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77E-7}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 8ppm/year

$$= (8/1000000) = 8.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{4.62E-6}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 5.58ppm

$$= (5.58/1000000) = 5.58E-6 / 1 = \mathbf{5.58E-6}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ_i)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-7}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	1M Ω	$1.45 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.45 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$4.62 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-
δI_b	0	$5.58 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	4	1	$5.58 \cdot 10^{-6}$	-
R_x	10M Ω				∞		$1.68 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.31 Uncertainty Budget R_x 10M Ω Model 742A S/N 7086005 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.68 \cdot 10^{-5} = 3.36 \cdot 10^{-5} \cdot 1\text{M}\Omega = \pm 0.00034\text{M}\Omega @ 1.00015\text{M}\Omega$$

5.2.6 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10M Ω Model 742A S/N 8001005 ; R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005; Ratio 1:10 @ 10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 34ppm (10.0001510M Ω)

$$= (34/1000000) = 0.000034 = 3.40\text{E-}5/2 = 1.70\text{E-}5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 10.000067 1V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลเฉพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000) = 4.05\text{E-}6 = 4.05\text{E-}6 / \sqrt{3} = 2.34\text{E-}6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999963 6V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลเฉพาะ 4 ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000) = 4.05\text{E-}6 = 4.05\text{E-}6 / \sqrt{3} = 2.34\text{E-}6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = 2.89\text{E-}9$$

$$\delta V_s = \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm} \\ = (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

$$\delta R_{xt} = \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (3\text{ppm} * 0.5 = 1.50\text{ppm}) \\ = (1.50/1000000) = 1.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66\text{E-}7}$$

$$\delta R_{st} = \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ขณะทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (3\text{ppm} * 0.5 = 1.50\text{ppm}) \\ = (1.00/1000000) = 1.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66\text{E-}7}$$

$$\delta R_{sd} = \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 9ppm/year} \\ = (9/1000000) = 9.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.20\text{E-}6}$$

$$\delta I_b = \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง} = 0.69\text{ppm} \\ = (0.69/1000000) = 6.90\text{E-}7 / 1 = \mathbf{6.90\text{E-}7}$$

Quantity Xi	Estimate Xi	Standard Uncert. U(Xi)		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$2.34 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 * 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 * 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 * 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 * 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 * 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 * 10^{-9}$	-
R_s	10MΩ	$1.20 * 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.20 * 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.20 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$5.20 * 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$8.66 * 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 * 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$8.66 * 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 * 10^{-7}$	-
δI_b	0	$6.90 * 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$6.90 * 10^{-7}$	-
R_x	10MΩ				∞		$1.81 * 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.32 Uncertainty Budget R_x 10MΩ Model 742A S/N 8001005 @ 10V

∴ ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.81 * 10^{-5} = 3.63 * 10^{-5} * 10\text{M}\Omega = \pm 0.00036\text{M}\Omega @ 10.00030\text{M}\Omega$$

5.2.7 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 5155-8; R_s 10M Ω Model 742A S/N 7803006;
Ratio 1:10; @ 10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรอง
ผลการสอบเทียบ 34ppm (10.000 151 0M Ω)

$$= (34/1000000 = 0.000034) = 3.40E-5/2 = \mathbf{1.70E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.194 256V ที่
ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.31ppm

$$= (6.31/1000000 = 6.31E-6) = 6.31E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 957 8V ที่ย่านวัด
10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc
0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ
เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยน
ขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (3ppm*0.5 = 1.50ppm)

$$= (1.50/1000000) = 1.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66E-7}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 9ppm/year

$$= (9/1000000) = 9.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.20E-6}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.33ppm

$$= (0.33/1000000) = 3.32E-7 / 1 = \mathbf{3.32E-7}$$

Quantity Xi	Estimate Xi	Standard Uncert. U(Xi)		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	10M Ω	$1.70 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.70 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.20 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$5.20 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$3.32 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$3.32 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100M Ω				∞		$1.84 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.33. Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 5155-8 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.84 \cdot 10^{-5} = 3.68 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \text{M}\Omega = \pm 0.0037 \text{M}\Omega @ 100.1964 \text{M}\Omega$$

5.2.8 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9334A; R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005; Ratio 1:10; @ 10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 24ppm (10.000 151 0M Ω)

$$= (34/1000000) = 0.000034 = 3.40 \text{E-}5 / 2 = 1.70 \text{E-}5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.004 058V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading + 0.3ppm of range = 6.30pm

$$= (6.30/1000000) = 6.30 \text{E-}6 = 6.30 \text{E-}6 / \sqrt{3} = 3.64 \text{E-}6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 960 5V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000) = 4.05 \text{E-}6 = 4.05 \text{E-}6 / \sqrt{3} = 2.34 \text{E-}6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00 \text{E-}8 / 2 \sqrt{3} = 2.89 \text{E-}9$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ = $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($5\text{ppm} \cdot 0.5 = 2.50\text{ppm}$)

$$= (2.50/1000000) = 2.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44\text{E-}6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ = $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($3\text{ppm} \cdot 0.5 = 1.50\text{ppm}$)

$$= (1.50/1000000) = 1.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66\text{E-}7}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 9ppm/year

$$= (9/1000000) = 9.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.20\text{E-}6}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.184ppm

$$= (0.184/1000000) = 1.84\text{E-}7 / 1 = \mathbf{1.84\text{E-}7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	10M Ω	$1.70 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.70 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.20 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$5.20 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.84 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$1.84 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100M Ω				∞		$1.84 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.34 Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 9334A @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.84 \cdot 10^{-5} = 3.67 \cdot 10^{-5} \cdot 100\text{M}\Omega = \pm 0.0037\text{M}\Omega @ 100.0061\text{M}\Omega$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.9 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_s 10M Ω Model 742A S/N 7806005;
Ratio 1:10; @ 10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรอง
ผลการสอบเทียบ 34ppm (10.000 151 0M Ω)

$$= (34/1000000 = 0.000034) = 3.40E-5/2 = \mathbf{1.70E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.000 165V ที่
ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30pm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 958 4V ที่ย่านวัด
10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc
0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ
เปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 3ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยน
ขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (3ppm*0.5 = 1.50ppm)

$$= (1.50/1000000) = 1.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{8.66E-7}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 9ppm/year

$$= (9/1000000) = 9.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{5.20E-6}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.178ppm

$$= (0.178/1000000) = 1.78E-7 / 1 = \mathbf{1.78E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
		U(X_i)					Contribution $U_i(y)$	
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	10M Ω	$1.70 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.70 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.20 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$5.20 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{st}	0	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$8.66 \cdot 10^{-7}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.78 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$1.78 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100M Ω				∞		$1.84 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.35 Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 9336 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 1.84 \cdot 10^{-5} = 3.67 \cdot 10^{-5} \cdot 100M\Omega = \pm 0.0037 M\Omega @ 100.0026 M\Omega$$

5.2.10 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_s 100M Ω Model 9334A; Ratio 1:1; @ 10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 37ppm (100.00607M Ω)

$$= (37/1000000) = 0.000037 = 3.70E-5/2 = 1.85E-5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999599 6V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000) = 4.05E-6 = 4.05E-6 / \sqrt{3} = 2.34E-6$$

V_s = ค่าแรงดันสำหรับความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999960 5V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000) = 4.05E-6 = 4.05E-6 / \sqrt{3} = 2.34E-6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = 2.89E-9$$

$$\delta V_s = \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm} \\ = (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

$$\delta R_{xt} = \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (5\text{ppm} * 0.5 = 2.50\text{ppm}) \\ = (2.50/1000000) = 2.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44\text{E-}6}$$

$$\delta R_{st} = \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (5\text{ppm} * 0.5 = 2.50\text{ppm}) \\ = (2.50/1000000) = 2.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44\text{E-}6}$$

$$\delta R_{sd} = \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 20ppm/year} \\ = (20/1000000) = 2.00\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{1.15\text{E-}5}$$

$$\delta I_b = \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง} = 0.191\text{ppm} \\ = (0.191/1000000) = 1.91\text{E-}7 / 1 = \mathbf{1.91\text{E-}7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ_i)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	10 V	$2.34 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 * 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 * 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 * 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 * 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 * 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 * 10^{-9}$	-
R_s	100M Ω	$1.85 * 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.85 * 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.15 * 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$1.15 * 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 * 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 * 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.91 * 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$1.91 * 10^{-7}$	-
R_x	100M Ω				∞		$2.22 * 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.36 Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 9336 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.22 * 10^{-5} = 4.43 * 10^{-5} * 100\text{M}\Omega = \pm 0.004 \text{ 4M}\Omega @ 100.002 \text{ 9M}\Omega$$

5.2.11 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9336; R_s 100M Ω Model 9334A; Ratio 1:1; @ 100V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 37ppm (100.006 071M Ω)

$$= (37/1000000 = 0.000037) = 3.70E-5/2 = \mathbf{1.85E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.995 659V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.999 888V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 20ppm/year

$$= (20/1000000) = 2.00E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{1.15E-5}$$

δI_p = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.169ppm

$$= (0.169/1000000) = 1.69E-7 / 1 = \mathbf{1.69E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	100M Ω	$1.85 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.85 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.15 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$1.15 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.69 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$1.69 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100M Ω				∞		$2.25 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.37 Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 9336 @ 100V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.25 \cdot 10^{-5} = 4.50 \cdot 10^{-5} * 100M\Omega = \pm 0.0045 M\Omega @ 100.0020 M\Omega$$

5.2.12 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 5155-8; R_s 100M Ω Model 9336; Ratio 1:1; @100V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 45ppm (100.0020M Ω)

$$= (45/1000000 = 0.000045) = 4.50E-5/2 = 2.25E-5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.194 841V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.31ppm

$$= (6.31/1000000 = 6.31E-6) = 6.31E-6 / \sqrt{3} = 3.64E-6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.999 884V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = 3.64E-6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2 \sqrt{3} = 2.89E-9$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc
0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ = $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($5\text{ppm} \cdot 0.5 = 2.50\text{ppm}$)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ = $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($5\text{ppm} \cdot 0.5 = 2.50\text{ppm}$)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} > \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเดือนค่า (drift) 25ppm/year

$$= (25/1000000) = 2.50E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.116ppm

$$= (0.116/1000000) = 1.16E-7 / 1 = \mathbf{1.16E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_x	100 M Ω	$2.25 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.25 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.44 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.16 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$1.16 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100 M Ω				∞		$2.73 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.38 Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 5155-8 @ 100V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.73 \cdot 10^{-5} = 5.46 \cdot 10^{-5} * 100\text{M}\Omega = \mathbf{\pm 0.0055\text{M}\Omega @ 100.1971\text{M}\Omega}$$

5.2.13 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100M Ω Model 9334A; R_s 100M Ω Model 9336; Ratio 1:1 @100V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 45ppm (100.00203M Ω)

$$= (45/1000000 = 0.000045) = 4.50E-5/2 = \mathbf{2.25E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.004 072V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.31ppm

$$= (6.31/1000000 = 6.31E-6) = 6.31E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.999 904V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 25ppm/year

$$= (25/1000000) = 2.50E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-5}$$

δI_p = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.446ppm

$$= (0.446/1000000) = 4.46E-7 / 1 = \mathbf{4.46E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty	
		U(Xi)					Contribution Ui(y)	
Xi	Xi	Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	100 M Ω	$2.25 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.25 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.44 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$4.46 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$4.46 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100 M Ω				∞		$2.73 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.39 Uncertainty Budget R_x 100M Ω Model 9334A @ 100V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.73 \cdot 10^{-5} = 5.46 \cdot 10^{-5} \cdot 100 \text{M}\Omega = \pm 0.0055 \text{M}\Omega @ 100.0063 \text{M}\Omega$$

5.2.14 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9336; R_s 100M Ω Model 9336; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 37ppm (100.00216M Ω)

$$= (37/1000000 = 0.000037) \Rightarrow 3.70 \text{E-}5/2 \Rightarrow \mathbf{1.85 \text{E-}5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.000 058V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading + 0.3ppm of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30 \text{E-}6) = 6.30 \text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64 \text{E-}6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 960 9V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05 \text{E-}6) = 4.05 \text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34 \text{E-}6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00 \text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89 \text{E-}9}$$

$$\begin{aligned}\delta V_s &= \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm} \\ &= (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta R_{xt} &= \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ &\text{เปลี่ยนขณะทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (6\text{ppm} * 0.5 = 3.00\text{ppm}) \\ &= (3.00/1000000) = 3.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73\text{E-}6}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta R_{st} &= \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยน} \\ &\text{ขณะทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (5\text{ppm} * 0.5 = 2.50\text{ppm}) \\ &= (2.50/1000000) = 2.50\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44\text{E-}6}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta R_{sd} &= \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 35ppm/year} \\ &= (35/1000000) = 3.50\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{2.02\text{E-}5}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta I_b &= \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง} = 1.10\text{ppm} \\ &= (1.10/1000000) = 1.10\text{E-}6 / 1 = \mathbf{1.10\text{E-}6}\end{aligned}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 * 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 * 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 * 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 * 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 * 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 * 10^{-9}$	-
R_s	100MΩ	$1.85 * 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$1.85 * 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$2.02 * 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.02 * 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 * 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.73 * 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 * 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.10 * 10^{-6}$		Normal	4	1	$1.10 * 10^{-6}$	
R_x	1 GΩ				∞		$2.78 * 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.40 Uncertainty Budget R_x 1GΩ Model 9336 @ 10V

∴ ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%(k=2); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.78 * 10^{-5} = 5.57 * 10^{-5} * 1\text{G}\Omega = \pm 0.000\ 056\text{G}\Omega @ 1.000\ 029\text{G}\Omega$$

5.2.15 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 5155-9; R_s 100M Ω Model 9336; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 45ppm (100.00203M Ω)

$$= (45/1000000 = 0.000045) = 4.50E-5/2 = \mathbf{2.25E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.344 135V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.32ppm

$$= (6.32/1000000 = 6.32E-6) = 6.32E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.65E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 957 8V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000)*100V = 1.00E-7 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-8}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000)*10V = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (6ppm*0.5 = 3.00ppm)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (5ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 25ppm/year

$$= (25/1000000) = 2.50E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.354ppm

$$= (0.354/1000000) = 3.54E-7 / 1 = \mathbf{3.54E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ_i)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty	
		U(Xi) Relative	Absolute				Contribution U _i (y) Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.65 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.65 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	100M Ω	$2.25 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.25 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.44 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$2.25 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$2.25 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	1G Ω				∞		$2.72 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.41 Uncertainty Budget R_x 1G Ω Model 5155-9 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.72 \cdot 10^{-5} = 5.44 \cdot 10^{-5} \cdot 1G\Omega = \pm 0.000\ 0054G\Omega \text{ @ } 1.003\ 469G\Omega$$

5.2.16 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9331S; R_s 100M Ω Model 9336; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 45ppm (100.002 03M Ω)

$$= (45/1000000 = 0.000045) = 4.50E-5/2 = \mathbf{2.25E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.991 949V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading + 0.3ppm of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 961 4V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) \cdot 100V = 1.00E-7 / 2 \sqrt{3} = \mathbf{2.89E-8}$$

$$\delta V_s = \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm} \\ = (0.01/1000000)*10V = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

$$\delta R_{xt} = \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (6\text{ppm} * 0.5 = 3.00\text{ppm}) \\ = (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

$$\delta R_{st} = \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 5ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ขณะทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (5\text{ppm} * 0.5 = 2.50\text{ppm}) \\ = (2.50/1000000) = 2.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-6}$$

$$\delta R_{sd} = \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 25ppm/year} \\ = (25/1000000) = 2.50E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44E-5}$$

$$\delta I_b = \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง} = 0.342\text{ppm} \\ = (0.342/1000000) = 3.42E-7 / 1 = \mathbf{3.42E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64*10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89*10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89*10^{-8}$	-
V_s	10 V	$2.34*10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34*10^{-5}$	-
δV_s	0	$2.89*10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89*10^{-9}$	-
R_s	100M Ω	$2.25*10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.25*10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.44*10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44*10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.44*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44*10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.73*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73*10^{-6}$	-
δI_b	0	$3.42*10^{-7}$	-	Normal	4	1	$3.42*10^{-7}$	-
R_x	1G Ω				∞		$2.72*10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.42 Uncertainty Budget R_x 1G Ω Model 9331S @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.72*10^{-5} = 5.43*10^{-5} * 1G\Omega = \pm 0.000\ 054\ G\Omega \ @\ 0.999\ 949G\Omega$$

5.2.17 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 5155-9; R_s 1G Ω Model 9331S; Ratio 1:1 @100V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 54ppm (0.999 949G Ω)

$$= (54/1000000 = 0.000054) = 5.40E-5/2 = \mathbf{2.70E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.350 150V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.32ppm

$$= (6.32/1000000 = 6.32E-6) = 6.32E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.65E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.999 891V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (6ppm*0.5 = 3.00ppm)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (6ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 40ppm/year

$$= (40/1000000) = 4.00E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{2.31E-5}$$

δI_p = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.433ppm

$$= (0.433/1000000) = 4.33E-7 / 1 = \mathbf{4.33E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ_i)	Sensitivity coefficient (C_i)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		U(Xi)					Relative	Absolute
X_i	X_i	Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.65 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.65 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
R_s	1G Ω	$2.70 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.70 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$2.31 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.31 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$4.33 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$4.33 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	1G Ω				∞		$3.60 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.43 Uncertainty Budget R_x 1G Ω Model 5155-9 @ 100V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 3.60 \cdot 10^{-5} = 7.20 \cdot 10^{-5} \cdot 1G\Omega = \pm 0.000\ 072G\Omega \text{ @ } 1.003\ 456G\Omega$$

5.2.18 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1G Ω Model 9331S; R_s 1G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @100V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 56ppm (1.000 029G Ω)

$$= (56/1000000 = 0.000056) = 5.60E-5/2 = \mathbf{2.80E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.984 985V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.999 929V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) \cdot 100V = 1.00E-6 / 2 \sqrt{3} = \mathbf{2.89E-7}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc
0.01ppm

$$= (0.01/1000000)*100V = 1.00E-6 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-7}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($6\text{ppm} * 0.5 = 3.00\text{ppm}$)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($6\text{ppm} * 0.5 = 2.50\text{ppm}$)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 35ppm/year

$$= (35/1000000) = 3.50E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{2.02E-5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.731ppm

$$= (0.731/1000000) = 7.31E-7 / 1 = \mathbf{7.31E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64*10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89*10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89*10^{-7}$	-
V_s	100 V	$3.64*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64*10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89*10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89*10^{-7}$	-
R_x	1 G Ω	$2.80*10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.80*10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$2.02*10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.02*10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.73*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73*10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$1.73*10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73*10^{-6}$	-
δI_b	0	$7.31*10^{-7}$	-	Normal	4	1	$7.31*10^{-7}$	-
R_x	1 G Ω				∞		$3.50*10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.44 Uncertainty Budget R_x 1G Ω Model 9331S @ 100V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 3.50*10^{-5} = 7.00*10^{-5} * 1G\Omega = \pm 0.000\ 070G\Omega @ 0.999\ 884G\Omega$$

5.2.19 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 5155-10; R_s 1G Ω Model 9331S; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 54ppm (0.999 949G Ω)

$$= (54/1000000 = 0.000054) = 5.40E-5/2 = \mathbf{2.70E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.651 203V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.28ppm

$$= (6.28/1000000 = 6.28E-6) = 6.28E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.63E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 961 4V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-7 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25ppm*0.5 = 12.5ppm)

$$= (12.5/1000000) = 12.5E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (6ppm*0.5 = 2.50ppm)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 40ppm/year

$$= (40/1000000) = 4.00E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{2.31E-5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.447ppm

$$= (0.447/1000000) = 4.47E-7 / 1 = \mathbf{4.47E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty	
		U(Xi)					Contribution Ui(y)	
Xi	Xi	Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.63 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.63 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
R_s	1 G Ω	$2.70 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.70 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$2.31 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.31 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$4.47 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$4.47 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	1 G Ω				∞		$3.66 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.45 Uncertainty Budget R_x 10G Ω Model 5155-10 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 3.66 \cdot 10^{-5} = 7.31 \cdot 10^{-5} \cdot 10G\Omega = \pm 0.00073G\Omega @ 9.96512G\Omega$$

5.2.20 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 9336; R_s 1G Ω Model 9331S; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 54ppm (0.999949G Ω)

$$= (54/1000000) = 0.000054 = 5.40E-5/2 = 2.70E-5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.017622V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000) = 6.30E-6 = 6.30E-6 / \sqrt{3} = 3.64E-6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.9999610V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000) = 4.05E-6 = 4.05E-6 / \sqrt{3} = 2.34E-6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = 2.89E-9$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = 2.89E-9$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($25\text{ppm} \cdot 0.5 = 12.5\text{ppm}$)

$$= (12.5/1000000) = 12.5\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22\text{E-}6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ($6\text{ppm} \cdot 0.5 = 2.50\text{ppm}$)

$$= (3.00/1000000) = 3.00\text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73\text{E-}6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 40ppm/year

$$= (40/1000000) = 4.00\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{2.31\text{E-}5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.317ppm

$$= (0.317/1000000) = 3.17\text{E-}7 / 1 = \mathbf{3.17\text{E-}7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
R_s	1 G Ω	$2.70 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.70 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$2.31 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.31 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$3.17 \cdot 10^{-7}$		Normal	4	1	$3.17 \cdot 10^{-7}$	
R_x	10 G Ω				∞		$3.66 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.46 Uncertainty Budget R_x 10G Ω Model 9336 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 3.66 \cdot 10^{-5} = 7.31 \cdot 10^{-5} \cdot 10\text{G}\Omega = \pm 0.00073\text{G}\Omega @ 10.00177\text{G}\Omega$$

5.2.21 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 9336; R_s 1G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของค่าความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 56ppm (1.000 029 4G Ω)

$$= (56/1000000 = 0.000056) = 5.60E-5/2 = \mathbf{2.80E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.010 289V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) \Rightarrow 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 962 9V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) \Rightarrow 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25ppm*0.5 = 12.5ppm)

$$= (12.5/1000000) = 12.5E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 6ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (6ppm*0.5 = 3.00ppm)

$$= (3.00/1000000) = 3.00E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{1.73E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 35ppm/year

$$= (35/1000000) = 3.50E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{2.02E-5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.294ppm

$$= (0.294/1000000) = 2.94E-6 / 1 = \mathbf{2.94E-6}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty	
		U(Xi)					Relative	Absolute
Xi	Xi	Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
R_s	1 G Ω	$2.80 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$2.80 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$2.02 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$2.02 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$1.73 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$2.94 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	4	1	$2.94 \cdot 10^{-6}$	-
R_x	10 G Ω				∞		$3.54 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.47 Uncertainty Budget R_x 10G Ω Model 9336 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 3.57 \cdot 10^{-5} = 7.14 \cdot 10^{-5} \cdot 10 \text{G}\Omega = \pm 0.00071 \text{G}\Omega @ 10.00182 \text{G}\Omega$$

5.2.22 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 5155-10; R_s 10G Ω Model 9336; Ratio 1:1 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 73ppm (10.00177G Ω)

$$= (73/1000000 = 0.000073) = 7.30 \text{E-}5/2 = 3.65 \text{E-}5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.962508 2V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.04ppm

$$= (4.04/1000000 = 4.04 \text{E-}6) = 4.04 \text{E-}6 / \sqrt{3} = 2.33 \text{E-}6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999962 8V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05 \text{E-}6) = 4.05 \text{E-}6 / \sqrt{3} = 2.34 \text{E-}6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่อ่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00 \text{E-}8 / 2\sqrt{3} = 2.89 \text{E-}9$$

$$\delta V_s = \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องวัดดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm} \\ = (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} \Rightarrow \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

$$\delta R_{xt} = \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (25\text{ppm} * 0.5 = 12.5\text{ppm}) \\ = (12.5/1000000) = 12.5\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22\text{E-}6}$$

$$\delta R_{st} = \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ขณะทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (25\text{ppm} * 0.5 = 12.5\text{ppm}) \\ = (12.5/1000000) = 12.5\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22\text{E-}6}$$

$$\delta R_{sd} = \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 100ppm/year} \\ = (100/1000000) = 1.00\text{E-}4 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77\text{E-}5}$$

$$\delta I_b = \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง} = 0.296\text{ppm} \\ = (0.296/1000000) = 2.96\text{E-}6 / 1 = \mathbf{2.96\text{E-}6}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (C_i)	Uncertainty Contribution $U_i(y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	10 V	$2.33 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.33 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	10 G Ω	$3.65 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$3.65 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$2.96 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	4	1	$2.96 \cdot 10^{-6}$	-
R_x	10 G Ω				∞		$6.92 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.48 Uncertainty Budget R_x 10G Ω Model 5155-10 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 6.92 \cdot 10^{-5} = 1.38 \cdot 10^{-4} \cdot 10\text{G}\Omega = \pm 0.00138\text{G}\Omega @ 9.96852\text{G}\Omega$$

5.2.23 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 10G Ω Model 5155-10; R_s 10G Ω Model 9336; Ratio 1:1 @100V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 73ppm (10.001 77G Ω)

$$= (73/1000000 = 0.000073) = 7.30E-5/2 = \mathbf{3.65E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.626 533V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.28ppm

$$= (6.28/1000000 = 6.28E-6) = 6.28E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.62E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.999 869V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.30ppm

$$= (6.30/1000000 = 6.30E-6) = 6.30E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.64E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25ppm*0.5 = 12.5ppm)

$$= (12.5/1000000) = 1.25E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22E-6}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25ppm*0.5 = 12.5ppm)

$$= (12.5/1000000) = 12.5E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 100ppm/year

$$= (100/1000000) = 1.00E-4 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77E-5}$$

δI_p = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.126ppm

$$= (0.126/1000000) = 1.26E-6 / 1 = \mathbf{1.26E-6}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ)	Sensitivity coefficient (C_i)	Uncertainty	
		U(Xi)					Contribution U _i (y)	
Xi	Xi	Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.62 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.62 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
R_s	10 G Ω	$3.65 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$3.65 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$1.26 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$1.26 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	10 G Ω				∞		$6.93 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.49 Uncertainty Budget R_x 10G Ω Model 5155-10 @ 100V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 6.93 \cdot 10^{-5} = 1.396 \cdot 10^{-4} \cdot 10G\Omega = \pm 0.001396G\Omega @ 9.96488G\Omega$$

5.2.24 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100G Ω Model 9334A; R_s 10G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน (standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 71ppm (10.00182G Ω)

$$= (71/1000000 = 0.000071) = 7.10E-5/2 = 3.55E-5$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 100.101608V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading + 0.3ppm of range = 6.31ppm

$$= (6.31/1000000 = 6.31E-6) = 6.31E-6 / \sqrt{3} = 3.64E-6$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.9999679V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading + 0.05ppm of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) \Rightarrow 4.05E-6 / \sqrt{3} = 2.34E-6$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 250ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($250\text{ppm} \cdot 0.5 = 125\text{ppm}$)

$$= (125/1000000) = 1.25\text{E-}4 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22\text{E-}5}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ($25\text{ppm} \cdot 0.5 = 12.5\text{ppm}$)

$$= (12.5/1000000) = 1.25\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22\text{E-}6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 100ppm/year

$$= (100/1000000) = 1.00\text{E-}4 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77\text{E-}5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.156ppm

$$= (0.156/1000000) = 1.56\text{E-}6 / 1 = \mathbf{1.56\text{E-}6}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
X_i	X_i							
V_x	100 V	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.64 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
R_s	10 G Ω	$3.55 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$3.55 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-5}$	-
δI_b	0	$1.56 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	4	1	$1.56 \cdot 10^{-6}$	-
R_x	100 G Ω				∞		$9.94 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.50 Uncertainty Budget R_x 100G Ω Model 9334A @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 9.94 \cdot 10^{-5} = 1.99 \cdot 10^{-4} \cdot 100\text{G}\Omega = \pm 0.0199 \text{G}\Omega @ 100.154 \text{G}\Omega$$

5.2.25 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 100G Ω Model 5155-11; R_s 10G Ω Model 9336; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 71ppm (10.001 82G Ω)

$$= (71/1000000 = 0.000071) = 7.10E-5/2 = \mathbf{3.55E-5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 103.253 362V ที่ย่านวัด100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.50ppm

$$= (6.50/1000000 = 6.50E-6) = 6.50E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.75E-6}$$

V_s = ค่าแรงดันสำหรับความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 970 01V ที่ย่านวัด10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05E-6) = 4.05E-6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34E-6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δV_s = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00E-8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89E-9}$$

δR_{xt} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 250ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (250ppm*0.5 = 125ppm)

$$= (125/1000000) = 1.25E-4 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22E-5}$$

δR_{st} = ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 25ppm เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะทำการสอบเทียบ= $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (25ppm*0.5 = 12.5ppm)

$$= (12.5/1000000) = 1.25E-5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22E-6}$$

δR_{sd} = ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 100ppm/year

$$= (100/1000000) = 1.00E-4 / \sqrt{3} = \mathbf{5.77E-5}$$

δI_b = ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำ ของผลการวัด 5 ครั้ง = 0.676ppm

$$= (0.676/1000000) = 6.76E-7 / 1 = \mathbf{6.76E-7}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (γ_i)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty	
		U(Xi) Relative	Absolute				Contribution Ui(y) Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.75 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.75 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-9}$	-
R_s	10 G Ω	$3.55 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$3.55 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$5.77 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{st}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δR_{xt}	0	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-6}$	-
δI_b	0	$6.76 \cdot 10^{-7}$	-	Normal	4	1	$6.76 \cdot 10^{-7}$	-
R_x	100 G Ω				∞		$9.94 \cdot 10^{-5}$	-

ตารางที่ 5.51 Uncertainty Budget R_x 100G Ω Model 5155-11 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 9.94 \cdot 10^{-5} = 1.99 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \text{G}\Omega = \pm 0.0199 \text{G}\Omega @ 103.317 \text{G}\Omega$$

5.2.26 การวัดที่ค่าความต้านทาน R_x 1T Ω Model 5155-12; R_s 100G Ω Model 9334A; Ratio 1:10 @10V

ที่มาของแหล่งความไม่แน่นอน

R_s = ค่าความไม่แน่นอนของความต้านทานมาตรฐาน(standard resistor) ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ 199ppm (100.154 703G Ω)

$$= (199/1000000 = 0.000199) = 1.99 \text{E-}4/2 = \mathbf{9.95 \text{E-}5}$$

V_x = ค่าแรงดันที่ความต้านทานไม่ทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 99.365 685V ที่ย่านวัด 100V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 6ppm of reading+0.3ppm.of range = 6.26ppm

$$= (6.26/1000000 = 6.26 \text{E-}6) = 6.26 \text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{3.62 \text{E-}6}$$

V_s = ค่าแรงดันที่ความต้านทานทราบค่า ที่อ่านจากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 9.999 970 2V ที่ย่านวัด 10V แหล่งที่มาได้จากข้อมูลจำเพาะ 4ppm of reading+0.05ppm.of range = 4.05ppm

$$= (4.05/1000000 = 4.05 \text{E-}6) \Rightarrow 4.05 \text{E-}6 / \sqrt{3} = \mathbf{2.34 \text{E-}6}$$

δV_x = ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 100Vdc 0.01ppm

$$= (0.01/1000000) = 1.00 \text{E-}8 / 2 \sqrt{3} = \mathbf{2.89 \text{E-}9}$$

$$\delta V_s = \text{ความละเอียด (resolution) ของเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ย่านการวัด 10Vdc 0.01ppm} \\ = (0.01/1000000) = 1.00\text{E-}8 / 2\sqrt{3} = \mathbf{2.89\text{E-}9}$$

$$\delta R_{xt} = \text{ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 500ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (500\text{ppm} * 0.5 = 250\text{ppm}) \\ = (250/1000000) = 2.50\text{E-}4 / \sqrt{3} = \mathbf{1.44\text{E-}4}$$

$$\delta R_{st} = \text{ค่าความต้านทานที่ทราบค่าแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ 250ppm เมื่ออุณหภูมิมีการ} \\ \text{เปลี่ยนแปลงทำการสอบเทียบ} = \pm 0.5^\circ\text{C} (250\text{ppm} * 0.5 = 125\text{ppm}) \\ = (125/1000000) = 1.25\text{E-}5 / \sqrt{3} = \mathbf{7.22\text{E-}5}$$

$$\delta R_{sd} = \text{ค่าความต้านทานมาตรฐานเลื่อนค่า (drift) 200ppm/year} \\ = (200/1000000) = 2.00\text{E-}4 / \sqrt{3} = \mathbf{1.15\text{E-}4}$$

$$\delta I_b = \text{ค่าความสามารถที่กระทำซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง} = 0.144\text{ppm} \\ = (0.144/1000000) = 1.44\text{E-}6 / 1 = \mathbf{1.44\text{E-}6}$$

Quantity	Estimate	Standard Uncert.		Probability distribution	Effective degree of freedom (ν)	Sensitivity coefficient (Ci)	Uncertainty Contribution Ui(y)	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
V_x	100 V	$3.62 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$3.62 \cdot 10^{-6}$	-
δV_x	0	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-7}$	-
V_s	10 V	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-	Rectangular	∞	1	$2.34 \cdot 10^{-6}$	-
δV_s	0	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-	Rectangular	∞	1	$2.89 \cdot 10^{-8}$	-
R_s	100 G Ω	$9.95 \cdot 10^{-5}$	-	Normal	∞	1	$9.95 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{sd}	0	$1.15 \cdot 10^{-4}$	-	Rectangular	∞	1	$1.15 \cdot 10^{-4}$	-
δR_{st}	0	$7.22 \cdot 10^{-5}$	-	Rectangular	∞	1	$7.22 \cdot 10^{-5}$	-
δR_{xt}	0	$1.44 \cdot 10^{-4}$	-	Rectangular	∞	1	$1.44 \cdot 10^{-4}$	-
δI_b	0	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-	Normal	4	1	$1.44 \cdot 10^{-6}$	-
R_x	1 T Ω				∞		$2.22 \cdot 10^{-4}$	-

ตารางที่ 5.52 Uncertainty Budget R_x 1T Ω Model 5155-12 @ 10V

\therefore ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k=2$); $U = k \cdot u(R_x)$

$$= 2 \cdot 2.22 \cdot 10^{-4} = 4.44 \cdot 10^{-4} \cdot 1\text{T}\Omega = \pm 0.000\ 444\text{T}\Omega @ 0.999\ 793\text{T}\Omega$$

5. รายงานผลการวัดและค่าความไม่แน่นอน

MEASUREMENT RESULTS

Resistance Test

Standard (R_s)	Voltage		Ratio	Norminal (R_x)	Measured		Uncertainty	
	(V_s)	(V_x)			Value	(\pm)		
10k Ω	1V	10V	1:10	100k Ω	100.002	k Ω	0.014	k Ω
1M Ω	10V	10V	1:1	1M Ω	0.999 874	M Ω	0.000 029	M Ω
1M Ω	10V	100V	1:10	10M Ω	10.001 73	M Ω	0.000 29	M Ω
1M Ω	10V	100V	1:10	10M Ω	10.001 64	M Ω	0.000 29	M Ω
1M Ω	10V	100V	1:10	10M Ω	10.001 50	M Ω	0.000 34	M Ω
10M Ω	10V	10V	1:1	10M Ω	10.000 30	M Ω	0.000 36	M Ω
10M Ω	10V	100V	1:10	100M Ω	100.196 4	M Ω	0.003 7	M Ω
10M Ω	10V	100V	1:10	100M Ω	100.006 1	M Ω	0.003 7	M Ω
10M Ω	10V	100V	1:10	100M Ω	100.002 2	M Ω	0.003 7	M Ω
100M Ω	10V	10V	1:1	100M Ω	100.002 9	M Ω	0.004 4	M Ω
100M Ω	100V	100V	1:1	100M Ω	100.002 0	M Ω	0.004 5	M Ω
100M Ω	100V	100V	1:1	100M Ω	100.197 1	M Ω	0.005 5	M Ω
100M Ω	100V	100V	1:1	100M Ω	100.006 3	M Ω	0.005 5	M Ω
100M Ω	10V	100V	1:10	1G Ω	1.000 029	G Ω	0.000 056	G Ω
100M Ω	10V	100V	1:10	1G Ω	1.003 469	G Ω	0.000 054	G Ω
100M Ω	10V	100V	1:10	1G Ω	0.999 949	G Ω	0.000 054	G Ω
1G Ω	100V	100V	1:1	1G Ω	1.003 456	G Ω	0.000 072	G Ω
1G Ω	100V	100V	1:1	1G Ω	0.999 884	G Ω	0.000 070	G Ω
1G Ω	10V	100V	1:10	10G Ω	9.965 12	G Ω	0.000 73	G Ω
1G Ω	10V	100V	1:10	10G Ω	10.001 77	G Ω	0.000 73	G Ω
1G Ω	10V	100V	1:10	10G Ω	10.001 82	G Ω	0.000 71	G Ω
10G Ω	10V	10V	1:1	10G Ω	9.968 52	G Ω	0.001 38	G Ω
10G Ω	100V	100V	1:1	10G Ω	9.964 88	G Ω	0.001 39	G Ω
10G Ω	10V	100V	1:10	100G Ω	100.154 7	G Ω	0.019 9	G Ω
10G Ω	10V	100V	1:10	100G Ω	103.317 9	G Ω	0.019 9	G Ω
100G Ω	10V	100V	1:10	1T Ω	0.999 793	T Ω	0.000 444	T Ω

ตารางที่ 5.53 รายงานผลการวัดและค่าความไม่แน่นอน

5.3 ผลการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง

ตารางที่ 5.54 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานแบบ โดยตรงที่ค่าต่างๆ

Range	S/N	(V)	#1	#2	#3	#4	#5	Average
10MΩ	7806005	10V	10.0005	10.0004	10.00055	10.0005	10.0004	10.0005
	8001005		10.0009	10.0008	10.0008	10.00065	10.0008	10.0008
	5155-9		10.0029	10.00313	10.00284	10.00274	10.00285	10.0029
100MΩ	9334	10V	100.0190	100.0187	100.0188	100.0185	100.0184	100.019
	5155-10		100.201	100.202	100.202	100.202	100.201	100.202
	9336		100.012	100.012	100.012	100.012	100.013	100.012
100MΩ	9334	100V	100.0130	100.0136	100.0133	100.0137	100.0128	100.013
	5155-10		100.2	100.2	100.199	100.199	100.199	100.199
	9336		100.01	100.01	100.01	100.011	100.010	100.01
1GΩ	5155-11	10V	1.00351	1.00353	1.00355	1.00357	1.00356	1.00354
	9336		1.00018	1.00017	1.00018	1.00018	1.00019	1.00018
	9331S		1.00019	1.00014	1.00013	1.00018	1.00017	1.00016
10GΩ	9336	100V	10.0033	10.0032	10.0033	10.0033	10.0032	10.0033
	5155-12		9.96737	9.96746	9.96735	9.96741	9.96763	9.96744
	9331S		9.97782	9.97790	9.97776	9.97756	9.97774	9.97776
100GΩ	9334	1000V	100.1710	100.1720	100.1710	100.1715	100.1710	100.171
	5155-10		101.6878	101.6880	101.6882	101.6870	101.6870	101.688
1TΩ	5155-12	1000V	0.99596	0.99602	0.99601	0.99606	0.99609	0.99603

5.4 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง

$$R_{ix} = \delta R_{ix} + \delta R_{rep} + \delta R_{xt}$$

โดยที่

R_{ix} = ค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า(unknown resistor)

δR_{ix} = ค่าความละเอียด (resolution) ที่สามารถแสดงได้ของเครื่อง Digital Teraohmmeter

δR_{rep} = ค่าความสามารถที่วัดซ้ำของ Digital Teraohmmeter

δR_{xt} = ค่าเดือนของความต้านทาน/อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (ข้อมูลจำเพาะของตัวต้านทาน)

พิจารณาถึงแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดความต้านทานสูงแบบโดยตรงของแต่ละค่าความต้านทานที่ค่าต่างลงในตารางที่ 5-55 R_{ix}

Range	S/N	δR_{ix}	δR_{xt}	δR_{ep}	Ur	k=2	Ue			
		$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	1						
10V										
10M Ω	7806005	0.00001	2.89E-06	1.5E-06	8.66E-07	3.26E-05	3.26E-05	3.28E-05	2.00	6.55E-05
	8001005	0.00001	2.89E-06	1.5E-06	8.66E-07	3.84E-05	3.84E-05	3.85E-05	2.00	7.70E-05
	5155-9	0.00001	2.89E-06	1.5E-06	8.66E-07	6.50E-05	6.50E-05	6.51E-05	2.00	1.30E-04
100M Ω	9334	0.0001	2.89E-05	2.5E-06	1.44E-06	1.07E-04	1.07E-04	1.11E-04	2.00	2.21E-04
	5155-10	0.0001	2.89E-05	2.5E-06	1.44E-06	1.72E-04	1.72E-04	1.74E-04	2.00	3.49E-04
	9336	0.0001	2.89E-05	2.5E-06	1.44E-06	1.56E-04	1.56E-04	1.59E-04	2.00	3.18E-04
100V										
100M Ω	9334	0.0001	2.89E-05	2.5E-06	1.44E-06	1.71E-04	1.71E-04	1.74E-04	2.00	3.48E-04
	5155-10	0.0001	2.89E-05	2.5E-06	1.44E-06	1.93E-04	1.93E-04	1.96E-04	2.00	3.91E-04
	9336	0.0001	2.89E-05	2.5E-06	1.44E-06	2.22E-04	2.22E-04	2.24E-04	2.00	4.48E-04
10V										
1G Ω	5155-11	0.00001	2.89E-06	3.00E-06	1.73E-06	1.08E-05	1.08E-05	1.13E-05	2.00	2.26E-05
	9336	0.00001	2.89E-06	3.00E-06	1.73E-06	3.16E-06	3.16E-06	4.62E-06	2.00	9.24E-06
	9331S	0.00001	2.89E-06	3.00E-06	1.73E-06	1.16E-05	1.16E-05	1.21E-05	2.00	2.41E-05
100V										
10G Ω	9336	0.00001	2.89E-06	1.3E-05	7.22E-06	2.45E-05	2.45E-05	2.57E-05	2.00	5.14E-05
	5155-12	0.00001	2.89E-06	1.3E-05	7.22E-06	5.02E-05	5.02E-05	5.08E-05	2.00	1.02E-04
	9331S	0.00001	2.89E-06	1.3E-05	7.22E-06	5.64E-05	5.64E-05	5.69E-05	2.00	1.14E-04
1000V										
100G Ω	9334	0.0001	2.89E-05	1.25E-04	7.22E-05	2.00E-04	2.00E-04	2.15E-04	2.00	4.29E-04
	5155-10	0.0001	2.89E-05	1.25E-04	7.22E-05	2.53E-04	2.53E-04	2.65E-04	2.00	5.29E-04
1T Ω	5155-12	0.001	2.89E-04	1.50E-04	8.66E-05	2.22E-05	2.22E-05	3.02E-04	2.00	6.04E-04

ตารางที่ 5.55 แสดงผลค่าความไม่แน่นอนที่ความต้านทานค่าต่างๆ

5.5 การเปรียบเทียบผลการวัดค่าความต้านทานสูงแบบวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจรในระดับที่ร่าโหม้กับการวัดค่าความต้านทานสูงแบบโดยตรง

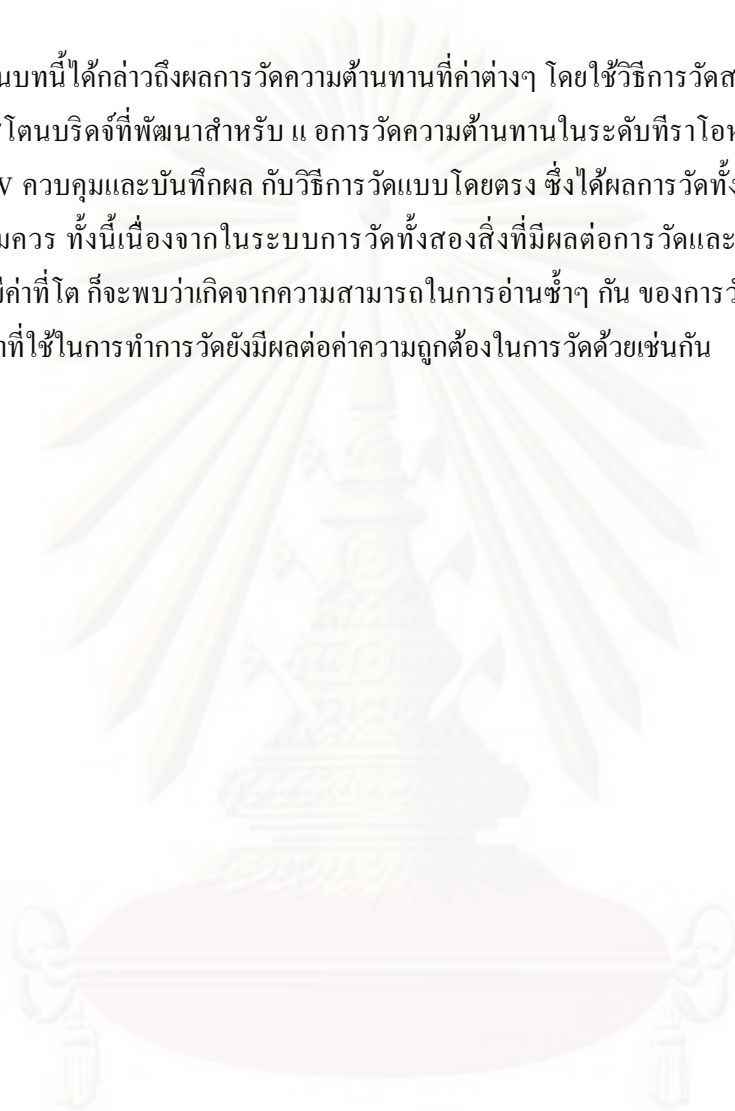
Range	S/N	UUC reading				Uncert.	
		Direct		Bridge		Direct	Bridge
10MΩ (10V)	7806005	10.000452	MΩ	10.00173	MΩ	66 ppm	29 ppm
	8001005	10.000778	MΩ	10.00030	MΩ	77 ppm	36 ppm
100MΩ (10V)	5155-8	100.01868	MΩ	100.1964	MΩ	349 ppm	37 ppm
	9334	100.20154	MΩ	100.0061	MΩ	221 ppm	37 ppm
	9336	100.01212	MΩ	100.0022	MΩ	318 ppm	37 ppm
100MΩ (100V)	9334	100.01328	MΩ	100.0020	MΩ	448 ppm	45 ppm
	5155-8	100.19942	MΩ	100.1971	MΩ	391 ppm	55 ppm
	9336	100.01008	MΩ	100.0063	MΩ	348 ppm	55 ppm
1GΩ (10V)	5155-9	1.003544	GΩ	1.000029	GΩ	9 ppm	56 ppm
	9336	1.00018	GΩ	1.003469	GΩ	23 ppm	54 ppm
	9331S	1.000162	GΩ	0.9999487	GΩ	24 ppm	54 ppm
10GΩ (100V)	9336	10.00326	GΩ	9.96512	GΩ	102 ppm	73 ppm
	5155-10	9.967444	GΩ	10.00177	GΩ	51 ppm	73 ppm
100GΩ (1000V)	9334	100.171	GΩ	100.15470	GΩ	429 ppm	199 ppm
	5155-10	101.6876	GΩ	103.31793	GΩ	529 ppm	199 ppm
1TΩ	5155-12	0.996028	TΩ	0.999793	TΩ	604 ppm	444 ppm

ตารางที่ 5.56 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดและค่าความไม่แน่นอน

จากตารางเปรียบเทียบผลการวัด จะเป็นการเปรียบเทียบผลของค่าความไม่แน่นอนรวม ที่เกิดขึ้นจากระบบการวัดทั้งสองวิธี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า การวัดแบบโดยตรงมีค่าความไม่แน่นอน ของผลการวัดที่มีค่าต่ำกว่า ค่าความไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับการวัดวีตสโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจรในช่วงของค่าความต้านทาน ทั้งนี้ได้พบว่าค่าความไม่แน่นอนที่ใด เกิดจากค่าความไม่แน่นอนจากการอ่านซ้ำๆ ของการวัด 5 ครั้ง ดังนั้นหากจะลดค่าความไม่แน่นอนรวมลง ทำได้ โดยการเพิ่มจำนวนการวัดที่มากขึ้น และอาจจะเกิดจากการวัดแบบวิธี โดยตรงนั้นยังต้องใช้วิธีการจดบันทึกค่าด้วยมือ เมื่อทำการวัดที่ค่าความต้านทานสูงๆ แม้ผู้ที่ทำการวัดเคลื่อนตัวหรือขยับตัวก็มีผลทำให้ค่าการวัดไม่นิ่งได้

5.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงผลการวัดความต้านทานที่ค่าต่างๆ โดยใช้วิธีการวัดสองวิธี คือ วิธีการวัดแบบวีตส โตนบริดจ์ที่พัฒนาสำหรับ แอการวัดความต้านทานในระดับที่ราโอห์มโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ควบคุมและบันทึกผล กับวิธีการวัดแบบโดยตรง ซึ่งได้ผลการวัดทั้งสองมีค่าที่ใกล้เคียงกันพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากในระบบการวัดทั้งสองสิ่งที่มีผลต่อการวัดและที่ทำให้ค่าความไม่แน่นอนมีค่าที่โต ก็จะพบว่าเกิดจากความสามารถในการอ่านซ้ำๆ กัน ของการวัด 5 ครั้ง นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการทำการวัดยังมีผลต่อค่าความถูกต้องในการวัดด้วยเช่นกัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย รวมถึงปัญหาที่พบ และวิธีการแก้ไข เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่องานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งอาจจะเป็นแนวทางและประโยชน์ต่อไป

6.1 บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความต้านทานสูงในช่วง $10k\Omega - 1T\Omega$ โดยใช้วิธีการวัด 2 วิธีการมาทำการวัดค่าความต้านทาน คือ แบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในการวัดความต้านทานในระดับเทระโอห์ม และแบบการวัดโดยตรง

6.1.1 วิธีการวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในการวัดความต้านทานในระดับเทระโอห์ม

ในส่วนของการวัดแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนางจรในการวัดความต้านทานในระดับเทระโอห์ม ซึ่งพบว่าตัวเครื่องมือมาตรฐานที่นำมาใช้วัด เพื่อหาค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่า นั้นจะมีผลต่อการวัดเพราะ หากนำตัวมาตรฐานที่นำมาใช้มีค่าความเสถียรคงที่ไม่ดี และค่าความไม่แน่นอนที่ผิดพลาดมากแล้ว การถ่ายค่าให้กับความต้านทานที่ไม่ทราบค่า ก็จะมีค่าความไม่แน่นอนมากขึ้นด้วยเช่นกัน ในกระบวนการวัดจะทำการถ่ายค่าความต้านทานในอัตราส่วน 1:1, 1:10 ซึ่งจะถ่ายค่าตั้งแต่ค่าที่น้อยกว่าไปจนถึงค่าความต้านทานที่ $1T\Omega$ ในการวัดค่าความต้านทานแต่ละตัวแต่ละครั้ง ต้องคำนึงถึงสถานะแวดล้อมที่จะทำการวัด ไม่ว่าจะเป็นส่วนของตัวเครื่องมือมาตรฐานที่ต้องมีการเตรียมพร้อม อุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการ ก่อนที่จะทำการวัด เพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการวัด

จากการวัดที่ค่าความต้านทานที่ค่าต่างๆ พบว่าที่ค่าความต้านทาน $10k\Omega - 100k\Omega$ นั้น สายวัดจะมีผลต่อการวัด เนื่องจากสายวัดก็มีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง เช่น การใช้ค่ามาตรฐาน R_s $10.000\ 01k\Omega +$ สายวัด $0.1\Omega = 10.000\ 11k\Omega$ ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่าความต้านทาน สายวัดก็จะถูกรวมเข้าไปในระบบการวัด ทำให้ผลการวัดที่ได้ผิดพลาด ซึ่งถ้าหากต้องการความถูกต้องในระดับมิลลิโอห์ม และในการวัดที่ค่าความต้านทานที่ค่าต่ำๆ อัตราส่วนของแรงดันต่อความต้านทาน ทำให้เกิดกระแสที่สูงมากขึ้นตามกฎของโอห์ม ดังนั้นในการวัดจึงต้องคำนึงถึงเครื่องมือและข้อจำกัดของการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นตัวเครื่องมือมาตรฐานและตัวความต้านทานที่ทราบค่าและไม่ทราบค่า อาจจะเกิดเสียหายได้ เพราะเครื่องมือในระดับนี้จะมียุติค่าที่สูงมาก และในส่วนของการวัดค่าความ

ต้านทานสูงในช่วง $10\text{M}\Omega - 1\text{T}\Omega$ นั้น ต้องคำนึงถึงสถานะแวดล้อมในขณะที่ทำการวัด เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และไม่มีคนเดินพลุกพล่าน เป็นต้น เพราะในช่วงค่าความต้านทานจะไวต่อสถานะดังกล่าว ทำให้ความสามารถในการอ่านซ้ำของผลการวัด 5 ครั้งไม่ดี เมื่อคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้น

ในส่วนของระบบการควบคุมการวัดก็จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW เข้ามาควบคุมและบันทึกผลการวัด โดยในส่วนในช่วงเวลาของการบันทึกผลนั้นจะเห็นได้ว่า เวลาวัดและบันทึกผลการวัดด้วยมือแล้ว เราจะไม่สามารถที่จะบันทึกผลการวัดที่เกิดขึ้นในเวลาขณะนั้นได้พร้อมๆ กัน ทั้งในส่วนการบันทึกผลแรงดันที่อ่านค่าได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และในส่วนของการบันทึกค่ากระแสที่ไหลที่อ่านได้จากเครื่องพีโกแอมป์มิเตอร์ได้พร้อมๆ ในช่วงเวลาเดียวกันได้ อีกทั้งจำนวนตัวเลขที่บันทึกก็มีจำนวนหลักที่มาก ดังนั้นในการวัดและบันทึกผล โดยใช้โปรแกรมมาช่วยควบคุมการวัด จะสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากผู้ทำการวัด และจากการบันทึกผลการวัดได้ในเวลาที่พร้อมๆ กัน ทั้งค่าแรงดันและค่ากระแส ที่เวลาที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดทำให้ได้อัตราส่วนของการวัดค่าความต้านทานมีความถูกต้อง

ในส่วนของผลการวัดที่ได้จากการวัดด้วยวิธีวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาวงจรในการวัดความต้านทานในระดับเทระโอห์มนั้น ผลการวัดที่ได้จะแสดงผลไว้ในบทที่ 5 เมื่อพิจารณาถึงผลที่ได้จากการวัดและค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการประเมินผล ที่ค่าความต้านทานที่ทำการวัดที่ค่าต่างๆ อยู่ในระดับที่น่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้วัดค่าความต้านทานในช่วง $10\text{k}\Omega - 1\text{T}\Omega$ ได้ โดยผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนนั้น เมื่อนำมาเทียบกับการวัดแบบโดยตรงแล้วถือว่า ผลการวัดให้ค่าความไม่แน่นอนที่ดีกว่าและผลการวัดถูกต้องมากกว่าการวัดแบบโดยตรง ในส่วนของการประเมินค่าความไม่แน่นอน พบว่าแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนที่มีผลมากที่สุดทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาด คือ แหล่งของความไม่แน่นอนที่ได้จากการวัด ความสามารถในการอ่านซ้ำของผลการวัด 5 ครั้ง และแหล่งความไม่แน่นอนของตัวมาตรฐานที่นำมาใช้ถ่ายค่า

6.1.2 วิธีการวัดแบบโดยตรง

ในส่วนของการวัดด้วยวิธีการแบบโดยตรงนั้น ก็จะใช้ตัวมาตรฐานดิจิตอลเทระโอห์มมิเตอร์ รุ่น 6500A ยี่ห้อ Guildline ในการวัดค่าความต้านทาน ย่นความสามารถในการวัดค่าความต้านทาน $1\text{M}\Omega$ ไปจนถึงค่า $1\text{T}\Omega$ วิธีการวัด ก็จะทำการวัดความต้านทานทีละค่าไปจนครบ ซึ่งปัญหาที่พบก็คือ ในการออกแบบซ้ำของตัวความต้านทานนั้นบางผู้ผลิต ได้ออกแบบมาให้การใช้งานในด้านการวัดที่แตกต่างกันไป ซึ่งปัญหาที่พบก็คือ ในการต่อขั้วสายวัดจากตัวความต้านทานเข้ากับตัวมาตรฐานการอ่าน จำเป็นต้องใช้ขั้วต่อหลายชนิดเพื่อแปลงให้สามารถต่อวัดค่าความ

ด้านทานได้ อาจจะเป็นผลให้ค่าที่ได้จากการวัดความต้านทานได้ผลที่ผิดพลาดไปเช่นกัน และในขณะที่ทำการวัดค่าความต้านทานสูงตั้งแต่ค่า $10\text{G}\Omega$ ไปจนถึง $1\text{T}\Omega$ นั้น เวลาที่ทำการวัดและบันทึกผลการวัด 5 ครั้ง ต้องใช้เวลานานกว่าตัวเครื่องจะอ่านค่ามาได้แต่ละครั้ง ในการวัดที่ต้องการความละเอียดที่มากขึ้น ดังนั้นในห้องปฏิบัติการจริงในขณะที่ทำการวัดต้องอยู่ในสภาวะที่นิ่ง บุคคลห้ามเคลื่อนตัวหรือแม้แต่ตัวผู้วัดงานเองก็ตาม ซึ่งในทางปฏิบัติจะควบคุมได้ยาก แนวทางแก้ไขในการวัด ก็ต้องมาใช้โปรแกรมควบคุมระบบการวัดแทนคน แต่ก็เกิดแนวคิดที่ว่าในการวัดค่าความต้านทานที่สูง ให้ถูกต้องนั้นทางห้องปฏิบัติการหรือตัวผู้วัด ต้องไปเลือกวิธีการอื่นที่มีความถูกต้องมากกว่า ให้ผลของความไม่แน่นอนที่เล็กกว่า ในการวัดหรือถ่ายค่าความต้านทานมาตรฐาน ผลของความไม่แน่นอนที่ได้จากการวัดแบบโดยตรงนั้น แหล่งของความไม่แน่นอนที่เกิดจากความสามารถในการวัดซ้ำๆ กันมีผลทำให้ค่าความไม่แน่นอนรวมมีค่าผิดพลาดมากขึ้น ตามปัจจัยข้างต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำการวิจัยในการวัดค่าความต้านทานสูงด้วยวิธีการแบบวัดสโตนบริดจ์ที่พัฒนาจริงในการวัดความต้านทานในระดับเทระโอห์ม โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW ควบคุมระบบการวัด ได้ทำการวัดค่าความต้านทานที่ค่าต่างๆ ซ้ำๆ กันหลายครั้ง ในเวลาที่ต่างๆ กัน เพื่อศึกษาถึงผลการวัดที่ได้ ค่าความเสถียรของระบบการวัด ผลกระทบที่เกิดจากการวัดและลดผลค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดจากช่วงแรกๆ จนได้ผลการวัดเป็นที่น่าพอใจ ที่สามารถนำวิธีการวัดนี้ไปวัดถ่ายทอดค่าความต้านทานให้แก่ผู้ใช้บริการในระดับมาตรฐานทุติยภูมิ หรือระดับใช้งานได้ เพราะมีความถูกต้องและรวดเร็วในการวัดค่าความต้านทานที่ค่าสูง

ในการเลือกใช้เครื่องมือเป็นแหล่งจ่ายแรงดัน V_s และ V_x ต้องเลือกใช้เครื่องมือที่มีความเสถียรภาพในการจ่ายค่าแรงดันเป็นเวลานานๆ ยิ่งเครื่องมือที่นำมาใช้มีค่าความถูกต้องสูงที่มีเสถียรภาพคงตัวดี และต้องคำนึงถึงข้อจำกัดของความสามารถของตัวความต้านทานที่นำมาใช้ในการทำการวัด ต้องระวังเรื่องอัตราส่วนการทนแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นกับตัวความต้านทานด้วยเช่นกัน เพราะตัวความต้านทานได้ถูกออกแบบมาให้มีอัตราทนแรงดันและกระแสที่ต่างกัน

รายการอ้างอิง

- [1] Jassadajin C, “Low Resistance Measurement Technique and Evaluation of Measurement Uncertainty,” (Degree of Master of Electrical Engineering King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2005).
- [2] EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, (December 1999): 1-79.
- [3] Les Huntley. The Computer Based Wheatstone-Bridge. Proceeding of the Measurement Science Conference Symposium and Workshop. (January 1992): 1-13.
- [4] Dean G. Jarrett. Automated Guarded Bridge for Calibration of Multimegohm Standard Resistors from 10 M Ω to 1T Ω . IEEE Transactions on Instrument and Measurement. 46, 2(April 1997): 325-328.
- [5] Braudaway David W. Precision Resistor: a Review of Material Characteristic, Resistor design and Construction Practices. IEEE Trans. Instrument. Meas. 48, 5, (1999): 878-883.
- [6] Behnam Dizaji, “Using High Resistance Meters Effectively,” (Guildline Instruments Limited of Canada, 2003).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Specification Guildline Series 9334A



GUILDLINE
INSTRUMENTS

SERIES 9334A
RESISTANCE STANDARDS
VERY HIGH STABILITY CALIBRATION LABORATORY STANDARDS



Guildline 9334A series of Resistance Standards are designed as very high stability calibration laboratory standards for high accuracy resistance calibration in air, without the need for stabilization in a temperature controlled bath.

They can be used as working standards or highly reliable and rugged transportable transfer standards. They are extremely useful for the calibration of resistance ranges of multi-function calibrators and high accuracy DVMs, as well as being used in more classical standards and calibration laboratory applications.

Hysteresis error, is typically better than negligible to 0.1 ppm when stressed at three times the maximum voltage, and less than 0.3 ppm over a temperature cycle between 0 °C and 40 °C.

Connections to these resistance standards are by conventional 4-terminal connection up to 1M Ω and two terminal connection for values above 1M Ω. The model 9334AH-1G and the 9334AW-1G are designed to answer a difficult calibration need for owners of the HP/Agilent 3458A and the Wavetek/Datron 1271 and 1281 model DMMs.

9334A FEATURES

- > Stability < 2.5 ppm
- > Oil or Air Baths not required
- > Operating Range 18 °C to 28 °C
- > Resistance Range 1 μΩ to 100G Ω
- > Compact and ruggedized
- > Report of Calibration traceable to NIST or INMS/NRCC included
- > Nominal Accuracy < 2 ppm
- > Low Temperature Coefficient
- > High Power Rating, Low Power coefficient
- > Guard and Shield compliant
- > 1G Ω Direct plug-in for Wavetek 1271 & 1281 DMMs
- > 1G Ω Direct plug-in for HP/Agilent HP3458A and Fluke 8508A DMMs
- > 10G Ω Direct plug-in for Fluke 8508A DMM
- > Voltage Hysteresis < 0.1 ppm
- > Special values available on request

The 9334A Series Precision Resistance Standards are available in a wide range of off the shelf and custom values to satisfy demanding applications between 1 μΩ and 100G Ω.

Both manufacturers' instruments require verification at the 1 gigaohm level and typical connection methods make it difficult to obtain a satisfactory stable reading. These special 9334A's are designed to fit directly into the appropriate DMM's input terminals without the necessity of external leads and the inherent problems of noise pickup.

The 9334AH-1G and 9334AH-10G are also designed to support the calibration of the Fluke 8508A.

Special values such as 0.25 Ω, are available for precision thermometry. Standards available for Quantum Hall Effect applications include 6.4532 k Ω and 12.9064 k Ω. If linearity verification of a long scale DVM is your challenge, 1.9 x cardinal resistance points are available. If you have a special resistance application between 1 μΩ and 100G Ω, Guildline can supply a precision standard to fulfill your requirement.

HP/Agilent are trademarks of Agilent Technologies Inc. Wavetek/Datron and Fluke are trademarks of Fluke Corporation

ภาคผนวก ก (ต่อ)

9334A SERIES SPECIFICATIONS

Model	Nominal Resistance Value (Ohms)	Nominal Initial Tolerance (± ppm) (Note 1)	Calibration Uncertainty (± ppm) (Note 2)	Stability 6 Months (ppm)	Stability 12 Months (ppm)	Temp. Coeff. (±ppm/°C)	Max. Voltage (Volts)	Max. Current (mA)	Voltage Coefficient (± ppm/V)
9334A-1μ	0.000001	100	50	25	35	10	0.0001	100A	-
9334A-10μ	0.00001	50	25	15	20	10	0.0005	50A	-
9334A-100μ	0.0001	25	15	10	20	5	0.002	20A	-
9334A-0.001	0.001	15	5	10	20	1	0.01	10A	-
9334A-0.01	0.01	10	3	5	10	0.5	0.03	3A	-
9334A-0.1	0.1	3	1.5	3	5	0.3	0.1	1000	-
9334A-1	1	2	1	2	2.5	0.2	0.32	320	-
9334A-10	10	2	1	2	2.5	0.2	1	100	-
9334A-25	25	2	1	2	2.5	0.2	1.6	64	-
9334A-100	100	2	1	2	2.5	0.2	3.2	32	-
9334A-400	400	2	1	2	2.5	0.2	6.3	16	-
9334A-1k	1k	2	1	2	2.5	0.2	10	10	-
9334A-10k	10k	2	1	2	2	0.2	32	3.2	0.01
9334A-100k	100k	3	3	3	4	0.3	100	1	0.03
9334A-1M	1M	5	7	3	5	0.3	320	0.32	0.05
9334A-10M	10M	15	15	4	6	2.5	1000	0.1	0.1
9334A-100M	100M	35	25	12	20	5	1500	0.015	0.2
9334A-1G	1G	50	80	12	25	6	1500	0.0015	0.3
9334AH-1G	1G	50	80	12	25	6	1500	0.0015	0.3
9334AW-1G	1G	50	80	12	25	6	1500	0.0015	0.3
9334A-10G	10G	100	80	50	100	25	1500	0.15uA	0.5
9334AH-10G	10G	100	80	50	100	25	1500	0.15uA	0.5
9334A-100G	100G	350	500	100	200	250	1500	0.015uA	1

- Note 1:** Nominal initial tolerance is defined as the maximum variation of resistance mean values as initially adjusted at the point of sale.
- Note 2:** Calibrated in air at 21, 23 and 25 °C referred to the unit of resistance as maintained by the National Research Council of Canada or the National Institute of Standards and Technology, and expressed as a total uncertainty with a coverage factor of k = 2. A traceable report of calibration stating the measured values and uncertainty is provided with each resistor.
- Note 3:** Voltage hysteresis: negligible to < 0.1 ppm
Temperature hysteresis: < 0.3 ppm between 0 °C and 40 °C
- Note 4:** Special values available on request.

ORDERING INFORMATION

9334A-ohmic value Resistance Standard
 TM 9334A Technical Manual (included)
 Certificate of Calibration (included)
 Report of Calibration (included)

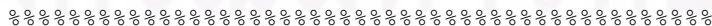
GENERAL SPECIFICATIONS

Environment: Operating 18 °C to 28 °C
 < 70% RH, non-condensing
 Storage -20 °C to 60 °C
 < 90% RH, non-condensing
Dimensions: μ ohm values values above 100μ ohm
 H97mm(3.8in) H 88 mm (3.5 in)
 W124mm(4.9in) W 124 mm (4.9 in)
 D79mm(3.1in) D 79 mm (3.1 in)
Weight: 1.1kg(2.4lbs) 0.6 kg (1.4 lbs)

GUILDLINE IS DISTRIBUTED BY:

Guildline Instruments Limited
 P.O. Box 99
 21 Gilroy Street
 Smiths Falls, Ontario Canada K7A 4S9
 Phone: (613) 283-3000
 Fax: (613) 283-6082
 Web: www.guildline.ca

39165-01-85 Rev. B Copyright © 2006,04,24 Guildline Instruments Limited. All rights reserved. Subject to change without notice.



ภาคผนวก ข

Specification Guildline Series 9336&9337



GUILDLINE
INSTRUMENTS

9336 & 9337 Series

PRECISION HIGH VALUE AIR RESISTANCE STANDARDS

HIGH TO ULTRA-HIGH VALUE LABORATORY AIR RESISTANCE STANDARDS



GUILDLINE INSTRUMENTS 9336 & 9337 SERIES of Resistance Standards are designed as very high stability calibration laboratory standards for accurate resistance calibration in air, between 10 M Ω and 10 P Ω . These new resistors complement the 9334 and 9336 Resistance Standards available from 1 Ω to 100 G Ω with many custom and intermediate values for special applications.

These resistors are also suitable for use as calibration standards for the Guildline 6500 Series of Teraohmmeters to include the new 6520 Programmable Teraohmmeter. They are also an excellent choice for the calibration of other high to ultra high ohms measuring instruments and standards.

With a wide laboratory environment from 18 $^{\circ}$ C to 28 $^{\circ}$ C, they can be used as working standards or reliable, ruggedized, transportable transfer standards. They are extremely useful for the calibration of resistance ranges of multi-function calibrators and high accuracy digital multimeters, as well as being used in more classical standards and calibration laboratory applications where the need for high accuracy high ohms values are required.

9336 & 9337 SERIES FEATURES

- ◆ 12 Month Stabilities Low as 10 ppm
- ◆ Wide Operating Range 18 $^{\circ}$ C to 28 $^{\circ}$ C
- ◆ Resistance Range 10M Ω to 100 G Ω
- ◆ Hermetically Sealed
- ◆ ISO 17025 Calibrations Available
- ◆ Compact and Ruggedized
- ◆ Nominal Initial Accuracy < 2 ppm
- ◆ Low Temperature Coefficients
- ◆ Voltage Hysteresis < 0.1 ppm
- ◆ Rated to 1000V
- ◆ Suitable for Calibration of Teraohmmeters Meggers, Long Scale DMM's, and More...

The 9336 and 9337 Series of Precision Resistance Standards can be used as laboratory standard or for portable applications requiring high accuracy with resistance values from 10 M Ω to 10 P Ω .

The resistor elements are securely mounted to the inside of a rugged hermetically sealed, shielded, aluminium enclosure. A pair of input/output Type N connectors provides the termination for the standard.

The "SOURCE" connector connects to the power supply of the measurement system, while the "OUTPUT" connector connects to the measurement detector. If necessary, the ambient temperature of the enclosure may be monitored and a correction factor applied to the value of the resistance.

The 9337 Standard Resistors are 3 terminal devices. The 3 terminal design minimizes the effect of current leakages from the source and output connectors. The high stability is achieved by use of a resistance divider network of the form shown below:





For The Ultimate In A High or Ultra High Value Resistance Standard Check Out The **6636 TEMPERATURE STABILIZED RESISTANCE STANDARD!**

ภาคผนวก ข (ต่อ)

9336/9337 SERIES OF PRECISION HIGH VALUE RESISTANCE STANDARDS

SERIES SPECIFICATIONS

Model	Nominal Resistance Value (Ω)	Initial ¹ Tolerance ± ppm	Calibration ² Uncertainty ± ppm	12 Month Stability ³ (+/- ppm)	Temperature Coefficient ± ppm/°C	Voltage Coefficient ± ppm/V _{dc}
9336-10M	10 M	25	15	10	<5	0.1
9336-100M	100 M	50	25	25	<5	0.5
9336-1G	1 G	100	80	35	<6	0.5
9336-10G	10 G	200	100	100	<25	1
9336-100G	100 G	500	500	200	<250	1
9337-1T	1T	1000	1000	500	<300	<2
9337-10T	10T	3000	4500	750	<500	<2
9337-100T	100T	5000	5500	1000	<800	<2
9337-1P	1P	2%	1%	2000	<1000	<2
9337-10P	10P	30%	25%	2%	<5000	<5
9336-X	Customer Specified Value		Specifications Provided Upon Request			
9337-X	Customer Specified Value		Specifications Provided Upon Request			

Note 1: Initial Tolerance is the maximum variation of resistance mean value as adjusted initially at the point of sale.
Note 2: Calibrated at 23 °C, referred to the unit of resistance as maintained by the National Research Council of Canada (NRCC) or NIST and expressed as a total uncertainty with a coverage factor of k=2. A calibration report stating the measured value and uncertainty is provided with each resistor.
Note 3: Maximum Voltage Rating: 1000 volts
Note 4: Special Values available on request

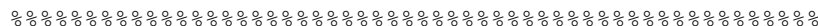
GENERAL SPECIFICATIONS				
Environmental	Temperature		Humidity	
	Operating	18 °C to 28 °C	<50% RH non-condensing	
	Storage	-20 °C to 60 °C	15% to 80% RH	
Dimensions	Height	Width	Depth	Weight
	mm	82 mm	124 mm	79 mm* 0.63 kg
	inches	3.8"	4.9"	3.1" 1.4 lbs

Guildline provides Extended Warranties and Calibration Support Plans up to 5 years for total customer service and support solutions. Be sure to ask about these coverage plans when you order!

ORDERING INFORMATION	
9336-Model	Resistance Standard (List Ohmic Value For Model)
9336-X	Customer Specified Value (State Value)
/TM9336	Technical Manual included at no charge.
9337-Model	Resistance Standard (List Ohmic Value For Model)
9337-X	Customer Specified Value (State Value)
/TM9337	Technical Manual included at no charge.
Note: Report and Certificate of Calibration Provided with each 9336 & 9337 Model	
*Precision Leads Are Available – Call and tell us your requirements	
Optional Calibration Services (ISO 17025 & Z540 Service Available)	
/Temp	Additional Customer Specified Temp Cal Point (Charge)
/Voltage	Additional Customer Specified Voltage Point (Charge)

GUILDLINE IS DISTRIBUTED BY

Guildline Instruments Limited
 21 Gilroy Street, PO Box 99
 Smiths Falls, Ontario
 Canada K7A 4S9
 Phone: (613) 283-3000
 Fax: (613) 283-6082
 Web: www.guildline.com
 Email: sales@guildline.com



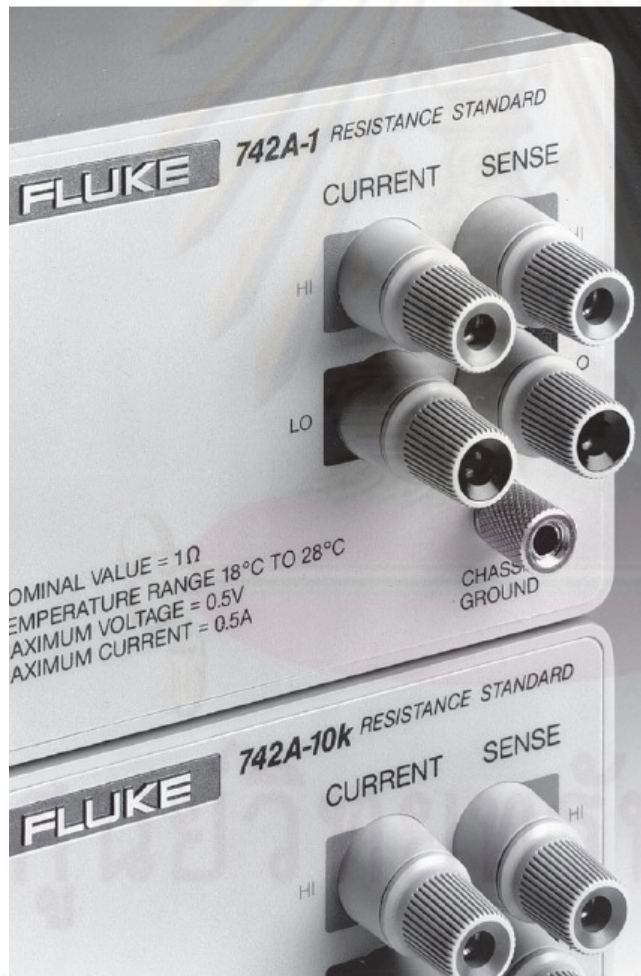
ภาคผนวก ก

Specification Fluke Series 742A

742A

Four-Terminal Resistance Standards

Technical Data



Applications

- Working standards
- Portable transfer standards
- Supports Artifact Calibration of the Fluke 5700A and 5720A Calibrators

Features

- Small and rugged
- No oil or air baths required
- 18°C to 28°C operating range
- Supplied with temperature characterization
- Six month stability to 2.5 ppm

Fluke 742A Standard Resistors are high accuracy working standards for precision, on-site resistance calibration. Their excellent temperature stability allows them to be used from 18°C to 28°C with typically less than 2 ppm degradation. Using the calibration table supplied with the standards, which lists corrections in 0.5°C increments, this uncertainty can be reduced to near zero. No cumbersome oil or air baths are required.

Because 742A Standard Resistors are small and rugged, they are easy to transport. Care has been taken to reduce resistance changes brought about by thermal and mechanical shock. Retrace (shift in resistance) is typically less than 2 ppm after cycling between 0°C and 40°C.

The 742A-1 1 Ω and 742A-10k 10 kΩ units are ideally suited for Artifact Calibration of the Fluke 5700A and 5720A Calibrators. The other values can be used to verify the calibration if you desire.

A convenient transit case, designed to hold two standards, is available as an option.

ภาคผนวก จ

ตารางการกระจายแบบที (Student't distribution)

องศาแห่ง ความอิสระ V	$p = 68.27\%$	$p = 90\%$	$p = 95\%$	$p = 95.45\%$	$p = 99\%$	$p = 99.73\%$
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.01	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นายกองศักดิ์ ทองบุญ
วัน เดือน ปี และสถานที่เกิด	4 มีนาคม พ.ศ.2521 นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พ.ศ. 2545
ประสบการณ์ทำงาน	นักมาตรวิทยา ห้องปฏิบัติการไฟฟ้า ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2545 ถึง ปัจจุบัน

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย