



การศึกษาค่าความถูกต้องของการวัดความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์
Study on Accuracy value of Resistance Measurement by using Digital Multimeter

จารุพงษ์ ตริโกศล

JARUPONG THREEKOSON



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2559



การศึกษาค่าความถูกต้องของการวัดความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์
Study on Accuracy value of Resistance Measurement by using Digital Multimeter

จารุพงษ์ ตริโกศล

JARUPONG THREEKOSON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาค่าความถูกต้องของการวัดความต้านทานด้วย
ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

Thesis Title Study on Accuracy value of Resistance Measurement by using
Digital Multimeter

ชื่อ นามสกุล นายจรรพพงษ์ ตรีโกศล

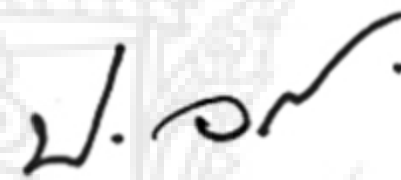
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

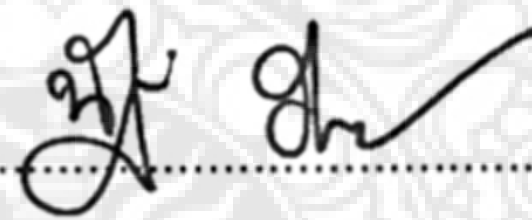
อาจารย์ที่ปรึกษา 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ
2. ดร.ชัยวัฒน์ เจษฎาจินต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว



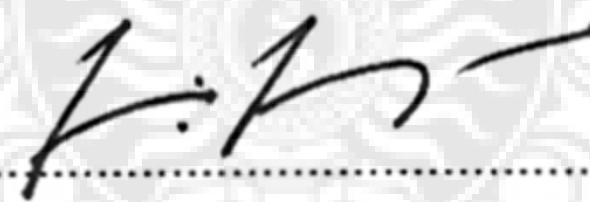
..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)



..... กรรมการและเลขานุการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฤทธิทอง)

วันที่ 29 เดือน เมษายน พ.ศ. 2559

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาค่าความถูกต้องของการวัดความต้านทานด้วย ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
ชื่อ สกุล	นายจรรพพงษ์ ศรีโกศล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการวัดค่าความต้านทานด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ผู้ใช้งานมักจะทำการวัดแล้วนำค่าที่แสดงบนหน้าจอเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ไปใช้งาน โดยมีได้ค่าหนึ่งถึงค่าที่วัดได้นั้นมีความถูกต้องหรือไม่ซึ่งค่าที่แสดงบนหน้าจออาจเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง อันเกิดจากสายไฟที่ใช้ จุดเชื่อมต่อ วิธีการวัด และปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อกรวัด เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำและสามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์

นอกจากนี้ในระบบคุณภาพมาตรฐานสากล 9000 (ISO 9000) ยังมีข้อกำหนดไว้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับเครื่องวัดหรืออุปกรณ์การวัดต่างๆ ที่อยู่ในระบบ ต้องได้รับการสอบเทียบและในไปรับรองการสอบเทียบจะต้องระบุค่าที่ได้รับการสอบเทียบ พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดนั้นๆ ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดเพื่อให้สอดคล้องตามมาตรฐานสากล

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบต่อการวัดค่าความต้านทาน 0.01 โอห์ม ถึง 100 เมกะโอห์ม โดยวิธีการวัดโดยตรงแบบ 2 สายและ 4 สาย ผลกระทบจากโหลด การใช้ตัวนำต่างชนิด ความต้านทานที่ขั้วต่อ ความเสถียรของตัวต้านทาน รวมถึงการวิเคราะห์ผลทางสถิติ มาใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการวัดค่าความต้านทานในย่านต่างๆได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

คำสำคัญ : ชัดความต้านทานปรับค่าได้, สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ, ความไม่แน่นอนของการวัด

Thesis title	Study on Accuracy value of Resistance Measurement by using Digital Multimeter
Author	Jarupong Threekoson
Degree	Master of Electrical Engineering
Major program	Electrical Engineering
Academic Year	2015

ABSTRACT

In general, the measured resistance with a digital multimeter. Users tend to be measured and then displayed on the screen to the user, regardless of the value that is accurate or not. The value displayed on screen digital multimeter may be incorrect. As a result from wires, access point, measurement and other factor that affect to the value of measurement. Thus, the study of factors that affect the measurement to get the accurate and more precise and also can be used in the operations.

According to international standard quality system requirements for ISO are clearly on the meter or the measuring device must be calibrated and in the certificate specifies the gain calibration and the uncertainty of measurement. Therefore, it is necessary to evaluate the uncertainty of measurement to comply with the standard splash.

This thesis presents a study of the effect to the measurement resistance in 0.01 ohm to 100 mega-ohm by direct measurement for 2wire & 4wire, Loading effect, Using different kinds of conductors, Thermal EMF and the stability of the resistor. Include the statistical analysis was used to estimate the uncertainty.

From this study can be applied to measure the resistance in a variety of accurately and precisely.

Keywords : Decade Resistance Box, Temperature Coefficient, Uncertainty of Measurement

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะไม่ประสบความสำเร็จเลยถ้าไม่มีทักษะเฉพาะด้านโดยต้องอาศัยความรู้ความชำนาญหลากหลายสาขาที่ต้องนำมาใช้ร่วมกันรวมถึงประสบการณ์ตามสาขาต่างๆที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ซึ่งผู้ทำงานวิจัยได้ทำการพยายามค้นคว้าศึกษาหาความรู้และได้ขอคำแนะนำจากผู้ชำนาญการตามสายงานในด้านต่างๆในการทำบทความวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้ทำงานวิจัยต้องขอขอบคุณที่จะกล่าวดังนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ในการทำงานวิจัยขึ้นนี้รวมถึงคอยให้คำแนะนำให้คำปรึกษาในงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.ชัยวัฒน์ เจษฎาจินต์ ที่ปรึกษาร่วมนักมาตรวิทยาไฟฟ้าห้องปฏิบัติการไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือวัดอุปกรณ์การวัดรวมถึงคอยให้คำปรึกษาช่วยเหลือปรึกษาและแนะนำในทุกๆด้านงานวิจัยนี้

ทำยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจเป็นอย่างดี อีกทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และขอขอบคุณเจ้าของเอกสารทุกเอกสารและงานวิจัยทุกงานวิจัยที่ผู้ศึกษาค้นคว้าได้นำมาอ้างอิงในการทำวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นายจรรุพงษ์ ตีร์โกศล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบัญ	(ง)
สารบัญตาราง	(ฉ)
สารบัญภาพ	(ช)
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 วิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 นิยามศัพท์	3
1.7 คำสำคัญ	3
2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ความหมายมาตริวิทยา	4
2.3 ระบบมาตริวิทยาระหว่างประเทศ	4
2.4 ระบบมาตริวิทยาสากล	7
2.5 ระบบการวัด	7
2.5.1 ระบบการวัดแห่งชาติ	8
2.5.2 ระบบของหน่วยวัด	8
2.6 การสอบเทียบและความสามารถสอบกลับได้	13
2.6.1 การสอบเทียบ	13
2.6.2 ความสามารถสอบกลับได้	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การนำกระบวนการทางสถิติมาวิเคราะห์ผลการวัด	17
2.7.1 การหาค่าเฉลี่ย	17
2.7.2 การหาส่วนเบี่ยงเบน	17
2.7.3 การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	18
2.7.4 การหาตัวอย่างและประชากร	18
2.7.5 การแจกแจง	22
2.8 ความไม่แน่นอนของการวัด	25
2.8.1 รูปแบบกระบวนการวัด	26
2.8.2 การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน แบบ A	27
2.8.3 การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน แบบ B	28
2.8.4 ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม	30
2.8.5 ความไม่แน่นอนขยาย	32
2.9 การวัดความต้านทาน	34
2.9.1 การวัดความต้านทาน	36
2.9.2 ความร้อนที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้า	38
2.9.3 ความร้อนจากอุปกรณ์	42
2.9.4 ผลกระทบจากโหลด	43
2.9.5 การป้องกันการรบกวนของโหลดของความต้านทาน	44
2.9.6 เวลาการวัด	46
2.10 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	47
3. วิธีดำเนินการวิจัย	49
3.1 บทนำ	49
3.2 การเลือกชนิดของตัวต้านทานในการทำ ตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการสร้างชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้	55
3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์	56
3.3.2 ขั้นตอนในการสร้างชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้	58
3.4 อุปกรณ์การวัดและวิธีการวัด	61
3.4.1 อุปกรณ์ประกอบด้วย	61
3.5 วิธีการวัดและค่าผิดพลาด	62
3.5.1 การวัดโดยตรง	62
3.5.2 วิธีการวัดขั้วต่อแต่ละจุด	63
3.5.3 วิธีการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย	63
3.5.4 ผลกระทบโหลด	63
3.5.5 ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม	63
3.5.6 ความเสถียรของชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้	64
3.6 การวิเคราะห์ผลการวัดทางสถิติ	65
3.6.1 ความไม่แน่นอน	65
3.7 รูปแบบการวัด	67
4. ผลการวิจัย	69
4.1 บทนำ	69
4.2 ผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย	69
4.3 ผลกระทบจากโหลด	74
4.4 ผลการวัดระหว่างสายตัวนำต่างชนิด	77
4.5 ความต้านทานที่ขั้วต่อ	82
4.6 ค่าความเสถียร	88
4.7 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผล และข้อเสนอแนะ	97
5.1 บทนำ	97
5.2 สรุปผลความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย	97
5.3 สรุปผลผลกระทบจากโหลด	97
5.4 ผลการวัดระหว่างสายตัวนำต่างชนิด	98
5.5 ความต้านทานที่ขั้วต่อ	99
5.6 ค่าความเสถียรของความต้านทาน	100
5.7 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด	102
เอกสารอ้างอิง	104
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะมัลติมิเตอร์อาทิลเลนท์ 3458A	107
ภาคผนวก ข ข้อมูลจำเพาะแคลมป์มิเตอร์โซวิน อาร์นูวซ์ F205	113
ภาคผนวก ค ตารางการกระจายแบบที่	117
ภาคผนวก ง การศึกษาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานหลายชนิด ขนาด 1 กิโลโอห์ม	119
ภาคผนวก จ ตารางการประเมินความไม่แน่นอน	125
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	136

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	หน่วยพื้นฐานของระบบเมตริก	9
2.2	แสดงค่าอุปสรรคที่ใช้กับหน่วยพื้นฐาน	10
2.3	หน่วยพื้นฐานของระบบอังกฤษ	10
2.4	หน่วยพื้นฐานในระบบ SI	11
2.5	หน่วยอนุพันธ์ SI	11
2.6	คำนำหน้าหน่วยในระบบ SI	12
4.1	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สายที่ความต้านทาน 0.01 โอห์ม ถึง 0.10 โอห์ม	69
4.2	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 0.10 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม	70
4.3	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 1 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม	70
4.4	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 10 โอห์มถึง 100 โอห์ม	71
4.5	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 100 โอห์ม ถึง 1,000 โอห์ม	71
4.6	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 1,000 โอห์มถึง 10,000 โอห์ม	72
4.7	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 10,000 โอห์ม ถึง 100,000 โอห์ม	72
4.8	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 100,000โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม	73
4.9	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 1,000,000 โอห์ม ถึง 10,000,000 โอห์ม	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.10	ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4สาย ที่ R 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม	74
4.11	ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000 โอห์ม ถึง 100,000 โอห์ม	75
4.12	ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000 โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม	75
4.13	ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000 โอห์ม ถึง 10,000,000 โอห์ม	76
4.14	ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม	76
4.15	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01โอห์ม ถึง 0.1โอห์ม	77
4.16	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1โอห์ม ถึง 1โอห์ม	78
4.17	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 1โอห์ม ถึง 10โอห์ม	78
4.18	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 10โอห์ม ถึง 100โอห์ม	79
4.19	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 100โอห์ม ถึง 1,000โอห์ม	79
4.20	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 1กิโลโอห์ม ถึง 10กิโลโอห์ม	80
4.21	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 10กิโลโอห์ม ถึง 100กิโลโอห์ม	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.22	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000 โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม	81
4.23	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000 โอห์ม ถึง 10,000,000 โอห์ม	81
4.24	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม	82
4.25	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 0.1 โอห์ม	83
4.26	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม	83
4.27	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม	84
4.28	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 10 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม	84
4.29	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 100 โอห์ม ถึง 1,000 โอห์ม	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.30	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000 โอห์ม ถึง 10,000 โอห์ม	85
4.31	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000 โอห์ม ถึง 100,000 โอห์ม	86
4.32	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000 โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม	86
4.33	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000 โอห์ม ถึง 10,000,000 โอห์ม	87
4.34	ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม	87
4.35	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 0.1 โอห์ม	88
4.36	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม	89
4.37	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.38	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 10 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม	90
4.39	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 100 โอห์ม ถึง 1,000 โอห์ม	90
4.40	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000 โอห์ม ถึง 10,000 โอห์ม	91
4.41	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000 โอห์ม ถึง 100,000 โอห์ม	91
4.42	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000 โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม	92
4.43	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000 โอห์ม ถึง 10,000,000 โอห์ม	92
4.44	ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม	93
4.45	ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่า ความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม	94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.46	ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความผันผวนตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม	94
4.47	ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความผันผวนตั้งแต่ 100 โอห์ม ถึง 10,000 โอห์ม	95
4.48	ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความผันผวนตั้งแต่ 10,000 โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม	95
4.49	ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความผันผวนตั้งแต่ 1,00,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม	96
5.1	เปอร์เซ็นต์ค่าความเสถียรของความผันผวนแต่ละย่าน	101



สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
2.1	แสดงระดับมาตรฐานวิทยาระหว่างประเทศ	5
2.2	แสดงความสัมพันธ์ของห่วงโซ่การสอบกลับ	15
2.3	แสดงการสอบกลับของความต้านทานไปสู่ระบบ SI Units	16
2.4	กราฟผลการทดลองของ QHE ที่อุณหภูมิ 1.2 เคลวิน	17
2.5	แสดงตัวอย่างและประชากรของข้อมูลการวัด	19
2.6	PDF ของประชากรการวัด	19
2.7	แสดงกลุ่มตัวอย่างที่มาจากประชากรการวัด	20
2.8	แสดง Pooled Standard Deviation ในรูปของ PDF	21
2.9	การแจกแจงข้อมูลแบบปกติ	22
2.10	การแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	23
2.11	การแจกแจงแบบสามเหลี่ยม	24
2.12	การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ทางสถิติ	27
2.13	ลักษณะการแจกแจงของความไม่แน่นอนแบบปกติ	29
2.14	ลักษณะการแจกแจงของความไม่แน่นอนที่ทราบขอบเขตการแจกแจงที่แน่นอน	29
2.15	การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอาท์พุทประมาณ y และปริมาณอินพุทประมาณ x_i	31
2.16	ผังขั้นตอนการส่งผ่านค่าความต้านทานมาตรฐาน	34
2.17	แสดงระบบการวัดและถ่ายทอดความถูกต้องของความต้านทาน	35
2.18	แสดงการวัดตัวต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์แบบ 2 สาย	36
2.19	แสดงการวัดความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์แบบ 4 สาย	37
2.20	วิธีการกลับขั้วกระแส	38
2.21	วิธีการคำนวณข้อมูล	39
2.22	วิธีชดเชยความต้านทานออฟเซต	42
2.23	การวัดความต้านทานที่มีผลกระทบจากโหลด	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
2.24	การแสดงการรั่วไหลของกระแสจากรัดดึง	44
2.25	วงจรการรั่วไหลของกระแสจากรัดดึง	45
2.26	การรัดดึงแบบมีแอมพลิไฟเยอร์	45
2.27	ผลของการเกิดช่วงเวลาการวัด	47
2.28	แสดงถึงระยะเวลาการวัดที่เกิดขึ้น	47
3.1	โครงสร้างตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม	50
3.2	ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม	50
3.3	โครงสร้างตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน	51
3.4	ตัวอย่างตัวต้านทานฟิล์มคาร์บอน	51
3.5	โครงสร้างตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ	52
3.6	ตัวอย่างตัวต้านทานฟิล์มโลหะ	52
3.7	ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา	53
3.8	ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มบาง	53
3.9	ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดไวร์วาวด์	54
3.10	ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ	54
3.11	แสดงชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้	55
3.12	แสดงกล่องเหล็กหนาแบบเปิดกว้าง	57
3.13	แสดงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมพร้อมเจาะรู	57
3.14	แสดงวงจรการต่อกล่อง	58
3.15	แสดงแบบขนาดการเจาะรู	58
3.16	แสดงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบปุ่มปรับ	59
3.17	แสดงการต่อบัดกรีตัวต้านทาน	59
3.18	แสดงแบบปุ่มปรับแต่ละตัวต้านทาน	60
3.19	แสดงหัวต่อเต้ารับ	60
3.20	แสดงการประกอบลูกบิดที่ปุ่มปรับ	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3.21	มัลติมิเตอร์ดิจิตอลยี่ห้ออะจีแลนด์ รุ่น 3458เอ	61
5.1	กราฟความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย	97
5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับค่าความผิดพลาด จากผลกระทบไหลด	98
5.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าความผิดพลาด จาก Thermal EMF	99
5.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าความผิดพลาด จากขั้วต่อ	100
5.5	เปอร์เซ็นต์ค่าความไม่แน่นอนในการวัดความต้านทานแต่ละย่าน	102



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปการวัดความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ผู้ใช้งานมักมีการต่อวัดแล้วนำค่าที่แสดงผลบนหน้าจอดิจิทัลมัลติมิเตอร์ไปใช้งานโดยไม่คำนึงถึงผลการวัดที่แสดงผลบนหน้าจอว่ามีความถูกต้องหรือไม่ ซึ่งค่าที่วัดได้บนหน้าจอดิจิทัลมัลติมิเตอร์อาจมีค่าความไม่ถูกต้องที่เป็นผลมาจากสายไฟ จุดต่อ วิธีการต่อ รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อค่าที่วัดทำให้ต้องมีการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบกับการวัด เพื่อที่ค่าที่แสดงผลการวัดบนหน้าจอดิจิทัลมัลติมิเตอร์มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์นอกจากนี้ตามระบบคุณภาพมาตรฐานสากล 9000 (ISO9000) มีข้อกำหนดไว้อย่างชัดเจนว่าเครื่องวัดหรืออุปกรณ์การวัดต่างๆ ที่อยู่ในระบบต้องได้รับการสอบเทียบ ซึ่งในใบรับรองผลการสอบเทียบจะมีการระบุค่าที่ได้รับการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องวัดนั้นๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัดเกิดขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระบบสากล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการวัดความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์
- 1.2.2 ศึกษาถึงรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบการวัด
- 1.2.3 นำกระบวนการทางสถิติมาใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบการวัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบวัดความต้านทานปรับค่าได้ในย่าน 0.01 โอห์มถึง 100 เมกกะโอห์มต่อวัดโดยตรงด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบการวัดคือ สายไฟ(Wire) การต่อ (Connectors) ความต้านทานของการต่อ (Contact Resistance) ความร้อนที่มีผลมาจากแรงดันไฟฟ้า (Thermal Voltages) และการวัดความต้านทานแบบ 2 สายและ 4 สาย (2 Wire and 4 Wire) ในส่วนของการศึกษารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบการวัด จะศึกษาถึงการวิเคราะห์ค่าผลการวัดในรูปแบบสมการทาง

คณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าความถูกต้องของระบบการวัดและในส่วนสุดท้ายคือการประเมินความไม่แน่นอนของระบบการวัดจะใช้กระบวนการทางสถิติมาวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อหาความไม่แน่นอนของการวัดความต้านทาน

1.4 วิธีการวิจัย

จัดสร้างความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ 0.01 โอห์ม ถึง 100 เมกกะโอห์มเพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการวัดความต้านทาน โดย

1.4.1 ศึกษาถึงการเขียนรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการวัด สมการระบบการวัด ความคลาดเคลื่อน เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าผลการวัดความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์

1.4.2 ศึกษาถึงกระบวนการทางสถิติ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอย่างและประชากร การแจกแจงแบบต่างๆ ความไม่แน่นอนของการวัด ความไม่แน่นอนมาตรฐานชนิด A และ ชนิด B ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ปริมาณอินพุทไม่มีสหสัมพันธ์ ปริมาณสหสัมพันธ์ และความไม่แน่นอนขยาย รวมถึงการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์

1.4.3 จัดทำตารางความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของระบบการวัด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถลดค่าผิดพลาด (Error) ที่มีผลกระทบต่อค่าความถูกต้องของผลการวัดความต้านทาน

1.5.2 สามารถใช้รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ไปวิเคราะห์ระบบการวัดต่างๆ เพื่อเพิ่มค่าความถูกต้องของระบบการวัดนั้นๆ

1.5.3 ได้ทราบถึงขั้นตอนและวิธีการประเมินความไม่แน่นอนของระบบการวัด ทำให้สามารถรู้แนวทางการประเมินความไม่แน่นอนของระบบการวัดที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล

1.5.4 เผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการวัด ผลกระทบต่างๆ และวิธีการประเมินความไม่แน่นอนในการวัดสู่หน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน

1.6 นิยามศัพท์

SI Units	หน่วยพื้นฐานของหน่วยวัดระบบสากล (International System of Unit)
SD	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)
K	ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor)
ν_c	ค่าองศาแห่งความอิสระ (Effective degree of freedom)

1.7 คำสำคัญ

ชุดความต้านทานปรับค่าได้, สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ, ความไม่แน่นอนของการวัด



บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การวัดเป็นปฏิบัติการทางเทคนิค ที่ต้องปฏิบัติตามวิธีการหรือขั้นตอนที่กำหนดไว้ เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณที่วัดกับปริมาณมาตรฐาน (Standard) และสิ่งสำคัญของการวัดนั้นคือ เครื่องมือวัดนั่นเอง หากต้องการความถูกต้องและความแม่นยำจำเป็นต้องมีความรู้ความชำนาญในการวัดของผู้ทำการวัดประกอบกันด้วย

โดยทั่วไปการวัดที่เกี่ยวข้องกับการซื้อขายแลกเปลี่ยนระหว่างประเทศจะถูกจัดการภายใต้มาตรวิทยาทางกฎหมาย (Legal Metrology) และถูกควบคุมตามกฎหมายท้องถิ่นนั้นๆ เช่น ประเทศไทยจะมีมาตรวิทยา การชั่ง การตวง การวัดความยาว เป็นต้น

2.2 ความหมายมาตรวิทยา

มาตรวิทยา (Metrology) คือ ศาสตร์แห่งการวัด หรือวิชาที่ว่าด้วยเรื่องของการวัด ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติจริง เพื่อให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง แม่นยำและสามารถรายงานค่าของผลการวัดได้ ซึ่งในรายงานนั้นรวมเอาการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดไว้ด้วย นอกจากนี้ยังรวมถึงการกำหนดให้มีหน่วยของการวัด และการสอบเทียบที่สามารถสอบกลับได้อีกด้วย

มาตรวิทยาทางกฎหมาย (Legal Metrology) ครอบคลุมทุกอย่างของการจัดการและเทคนิคของกระบวนการตามกฎหมายที่ถูกจัดตั้งขึ้นหรืออ้างอิงตามองค์การที่รับผิดชอบต่อสาธารณะ การนำไปปฏิบัติเพื่อให้เกิดความมั่นใจตามกฎหมายระเบียบหรือตามสัญญา การวัดที่มีคุณภาพเหมาะสมเชื่อถือได้ในเรื่องที่มีการควบคุมของทางการ การค้าขาย สุขภาพ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม

2.3 ระบบมาตรวิทยาระหว่างประเทศ

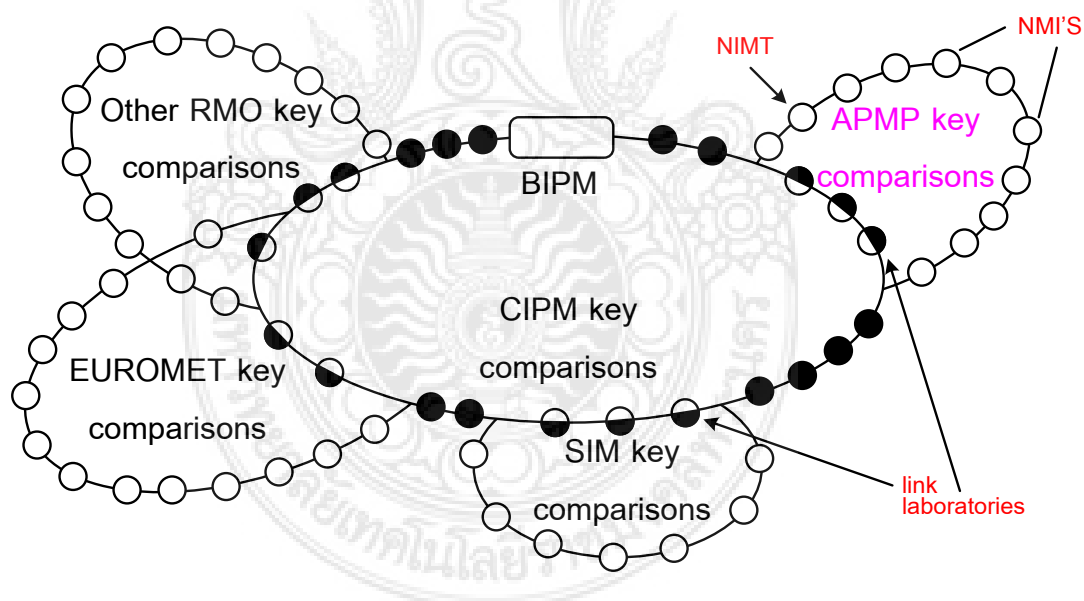
ความร่วมมือกันทางด้านมาตรวิทยาระหว่างประเทศจะเกิดขึ้นได้ จำเป็นต้องมีการยอมรับร่วมกันทางด้านมาตรวิทยา ที่เรียกว่า MRA (Mutual Recognition Arrangement) ที่เกิดจากความพยายามขององค์การการค้าโลก (WTO) ในการที่จะพัฒนา กฎ ระเบียบและมาตรฐานให้เป็น

แบบแผนของประเทศสมาชิก เพื่อทำการขจัดอุปสรรคทางเทคนิคที่มีต่อการค้าให้หมดไป ซึ่งได้มีการประชุมใหญ่ระหว่างประเทศ เรียกว่า CGPM ที่กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส เมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ.2542 โดยมีผู้อำนวยการของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศต่างๆ ที่เป็นสมาชิกใน สหพันธ์สัญญาเมตริก จำนวน 38 ประเทศ และมีผู้แทนขององค์การสากล (International Organization) 2 แห่ง ได้มาร่วมลงนามใน MRA ด้วย โดยมีสาระสำคัญ 2 ประการดังนี้

1. การยอมรับร่วมระหว่างสถาบันมาตรวิทยา NMIs (The National Measurement Institute) ในเรื่องมาตรฐานการวัดแห่งชาติ (National Measurement Standards)

2. การยอมรับระหว่างสถาบันมาตรวิทยา NMIs (The National Measurement Institute) ในใบรับรองการสอบเทียบ (Calibration Certificate) ซึ่งในใบรับรองการสอบเทียบของ NMI เกิดจากการจัดทำระบบคุณภาพตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025,

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความร่วมมือกันทางด้านมาตรวิทยาระหว่างประเทศ ต่างๆ ดังรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงระดับมาตรวิทยาระหว่างประเทศ

ที่มา: สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (2556)

จากรูปที่ 2.1 มีคำอธิบายสาระสำคัญดังนี้

BIPM มีชื่อเรียกในภาษาฝรั่งเศสว่า “Bureau International des Poids et Mesures” และภาษาอังกฤษเรียกว่า “International Bureau of Weights and Measures” หรือ “สำนักงานซึ่งตรวจวัดระหว่างประเทศ” เป็นองค์กรมาตรวิทยาระดับโลกที่ทำหน้าที่เป็นสถาบันมาตรวิทยา ระหว่างประเทศ เพื่อดำเนินงานทางด้านวิชาการให้กับที่ประชุมใหญ่ของสนธิสัญญาเมตริก และมีสมาชิกทั้งหมด 54 ประเทศ รวมทั้งประเทศไทยด้วย สำหรับ International Bureau of Weights and Measures (BIPM) มีหน้าที่รับผิดชอบที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานการวัด 3 ประการคือ

1. การเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างกัน (International Comparison) ของ ประเทศสมาชิก
2. การส่งเสริม การประสานงาน และจัดทำเอกสารเพื่อการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างกันของประเทศสมาชิก
3. การวิจัย ในสาขาของมาตรวิทยาที่เลือกสรรแล้ว ภายใต้การอำนวยการของ CIPM (International Committee for Weights and Measures)

CIPM (International Committee for Weights and Measures) หรือ คณะกรรมการมาตรวิทยาสากล เป็นผู้กำหนดการทำ CIPM Key Comparison ซึ่งจะกำหนดปริมาณและค่าวัด เพื่อให้ NMI ทำการเปรียบเทียบค่าวัดเพื่อแสดงความสามารถ โดย NMI ที่ทำ CIPM Key Comparison จะอยู่ในประเทศพัฒนา เช่น อเมริกา อังกฤษ เยอรมัน ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น เป็นต้น

APMP Key Comparison เป็นการกำหนด Key Comparison ระดับภูมิภาคโดยกลุ่มสมาชิก APMP (Asia Pacific Metrology Program) จำนวน 23 ประเทศ ได้แก่ ออสเตรเลีย, บังกลาเทศ, จีน, ไต้หวัน, เกาหลีใต้, พูจี, ฮองกง, อินเดีย, อินโดนีเซีย, ญี่ปุ่น, เกาหลีเหนือ, มาเลเซีย, มองโกเลีย, เนปาล, นิวซีแลนด์, ปากีสถาน, ปาปัวนิวกินี, ฟิลิปปินส์, รัสเซีย, สิงคโปร์, ศรีลังกา, เวียดนาม รวมทั้งประเทศไทยด้วย และยังมีสมาชิกสมทบ (Associate Members) จำนวน 5 ประเทศ ได้แก่ อียิปต์, จอร์แดน, คาซัคสถาน, แอฟริกาใต้ และ ซีเรีย

นอกจากนี้ยังมีการทำ Regional Key Comparison คือ การเปรียบเทียบค่าวัดหมู่ RMO หรือ Regional Metrology Organization ซึ่งเป็นการทำ Key Comparisons ระดับภูมิภาค อื่นๆ เช่น SIM Key Comparisons, EUROMET Key Comparisons และ Other RMO Key Comparisons เป็นต้น

2.4 ระบบมาตรวิทยาสากล (ที่มา: ออนไลน์) “<https://th.wikipedia.org/wiki/>”

ในอดีตการวัดขนาดและปริมาณต่างๆ รวมถึงหน่วยวัดที่กำหนดขึ้นจะใช้ภายในกลุ่มเดียวกัน ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการซื้อขายแลกเปลี่ยน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดหน่วยวัดขนาดและปริมาณที่ทุกๆ คนยอมรับ จึงทำให้เกิดการลงนามร่วมกันของรัฐบาล 17 ประเทศทั่วโลก ที่เป็นสมาชิกก่อตั้ง The Metre Convention เรียกว่า สนธิสัญญาเมตริก ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ประกาศวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2418 (ค.ศ. 1875) และให้วันที่ 20 พฤษภาคมของทุกปีเป็น วันมาตรวิทยาโลก ปัจจุบันมีสมาชิก 78 ประเทศ รวมทั้งประเทศไทย สาระสำคัญของสนธิสัญญาเมตริก มีดังนี้

1. จัดให้ตั้งสำนักงานซึ่ง ตวง วัดระหว่างประเทศ (BIPM) เพื่อกำหนดหน่วยวัดสากล
2. จัดให้ตั้งคณะกรรมการมาตรวิทยาสากล (CIPM)
3. จัดให้มีการประชุมมาตรวิทยาระหว่างประเทศ (CGPM)

สำหรับประเทศไทยเข้าเป็นสมาชิกของ The Metre Convention ในปี พ.ศ. 2455 และอีก 11 ปีต่อมาได้มีพระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด พ.ศ. 2466 เป็นกฎหมายด้านมาตรวิทยาระดับแรกเกิดขึ้น ซึ่งมีใจความสำคัญว่า ประเทศไทยยอมรับระบบเมตริกในปี พ.ศ. 2504 ห่องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือวัด ถือกำเนิดขึ้นเป็นแห่งแรกของประเทศไทย เดิมห่องปฏิบัติการสอบเทียบจะต้องส่งเครื่องมือวัดและมาตรฐานอ้างอิงไปสอบเทียบในต่างประเทศต่อมาสำนักงานชั่ง ตวง วัด กระทรวงพาณิชย์ ปรับปรุงพระราชบัญญัตินี้และประกาศใช้พระราชบัญญัติพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ. 2542 และจัดตั้ง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology (Thailand): NIMT) ขึ้น ซึ่งได้รับการรับรองความสามารถห่องปฏิบัติการตามข้อกำหนด ISO/IEC 17025 เริ่มดำเนินงานเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2541 จนถึงปัจจุบันนี้

2.5 ระบบการวัด (ที่มา: ออนไลน์) “<http://www.mst.or.th/>”

การวัด (Measurement) คือการปฏิบัติการทางเทคนิค ที่ต้องปฏิบัติตามวิธีการที่กำหนดขึ้นตอนไว้แล้ว มีวัตถุประสงค์เพื่อการตัดสินค่าของปริมาณและการเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณที่ถูกวัดกับปริมาณมาตรฐาน (Standard) ซึ่งเป็นตัวแทนของหน่วยวัด นั่นคือเครื่องมือวัดนั่นเอง สำหรับวิธีการวัดและเครื่องมือวัดที่ใช้จะขึ้นอยู่กับระดับของความถูกต้องของการวัด รวมทั้งความรู้ความชำนาญในระบบการวัดของผู้ทำการวัดประกอบกันด้วย ผลการวัด

ประกอบด้วยส่วนของปริมาณ (รวมถึงความไม่แน่นอนของปริมาณที่วัดได้) และหน่วยวัด เช่น ตุ่ม มีค่าน้ำหนักระบุเป็น 1 กิโลกรัม อาจระบุเป็น $1,000.00 \pm 0.001$ กรัม เป็นต้น

2.5.1 ระบบการวัดแห่งชาติ

ประเทศไทยมีระบบการวัดแห่งชาติที่สอดคล้องกับระบบการวัดชั่งตวงวัดแห่งชาตินานาประเทศ 2 ระบบดังนี้

1. ระบบการวัดแห่งชาติเชิงพาณิชย์หรือเชิงกฎหมาย (Legal Metrology)

เป็นระบบการวัดที่มีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาความถูกต้องในการชั่ง ตวง วัด และเพื่อความ เป็นธรรมในการซื้อขายแลกเปลี่ยนในเชิงพาณิชย์หรือในเชิงกฎหมาย ตามที่ได้กำหนดไว้ใน พระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด พ.ศ.2542 โดยมีสำนักชั่ง ตวง วัด กระทรวงพาณิชย์ที่มีหน้าที่ รับผิดชอบกำหนดระดับความถูกต้องของการชั่ง ตวง วัด ในเชิงพาณิชย์และดำเนินการให้เป็นไป ตามกฎหมาย รวมถึงการควบคุมให้มีการปฏิบัติตามพระราชบัญญัติ ชั่ง ตวง วัด อย่างเคร่งครัด อีกด้วย เช่น

- การชั่ง ได้แก่ เครื่องชั่งและตม่น้ำหนัก
- การตวง ได้แก่ ลิตรมาตรฐาน
- การวัด ได้แก่ ไม้มเมตร ตลับเมตร

2. ระบบการวัดแห่งชาติทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม (Scientific Metrology or Industrial Metrology)

เป็นระบบการวัดแห่งชาติที่มุ่งเน้นการสถาปนาและรักษามาตรฐานการวัดแห่งชาติที่มีความถูกต้องสูงสุดตามระบบการวัดสากลหรือระบบหน่วยวัด SI (International System of Units) สำหรับการผลิตและการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งอยู่ภายใต้ความ รับผิดชอบของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตาม พระราชบัญญัติพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ.2540

นอกจากนี้ยังมีระบบการวัดระหว่างประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้การค้าขาย แลกเปลี่ยนระหว่างประเทศเป็นไปอย่างราบรื่นและทุกประเทศใช้ระบบหน่วยวัดเดียวกันที่เป็น สากล จึงเป็นที่มาของความตกลงระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานการวัดปริมาณทางกายภาพนั้น คือ สนธิสัญญาเมตริก ดังมีรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.5.2 ระบบของหน่วยวัด (Measurements Unit)

ระบบการวัด (Systems of Measurements) คือ หน่วยวัดที่ใช้ระบุสิ่งใดๆ ซึ่งสามารถวัดได้ เพื่อการค้าและการพาณิชย์ ในทางวิทยาศาสตร์ปริมาณบางชนิดที่ได้วิเคราะห์แล้วจะถูกกำหนดขึ้นให้เป็นหน่วยมูลฐาน ซึ่งหน่วยของการวัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีดังนี้

1. ระบบเมตริก (metric system)

เป็นหนึ่งในระบบสากลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ถือกำเนิดขึ้นที่ประเทศฝรั่งเศส เมื่อปีพ.ศ.2334 (ค.ศ.1791) โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1.1 เป็นระบบเลขฐานสิบ หมายถึง การเพิ่มค่าจากหน่วยขึ้นไปหรือการลดค่าลง มาอีกหน่วยหนึ่ง จะต้องเพิ่มหรือลดขนาดเป็น 10 เท่า เช่น 1 เมตร แบ่งเป็น 10 ส่วน แต่ละส่วนเรียก เดซิเมตร และเดซิเมตร แบ่งเป็น 10 ส่วน แต่ละส่วนเป็น เซนติเมตร เป็นต้น

1.2 มีหน่วยพื้นฐานเพียงแค่ 7 หน่วยเท่านั้น ได้แก่

ตารางที่ 2.1 หน่วยพื้นฐานของระบบเมตริก

หน่วยพื้นฐาน	หน่วย
ความยาว	เมตร (meter)
มวล	กิโลกรัม (kilogram)
เวลา	วินาที (second)
อุณหภูมิ	เคลวิน (Kelvin)/ เซลเซียส (Celsius)
ไฟฟ้า	แอมแปร์ (ampere)
ปริมาณสารในปฏิกิริยาเคมี	โมล (mole)
ปริมาณความเข้มของแสงสว่าง	แคนเดลา (candela)

หน่วยพื้นฐานในระบบเมตริกสามารถเปลี่ยนหน่วยได้ โดยการเติมคำอุปสรรค (prefix) ที่หน้าหน่วยพื้นฐาน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคำอุปสรรคที่ใช้กับหน่วยพื้นฐาน

Prefix	Symbol	Meaning	x10 for Scientific Notation
tera	T	1,000,000,000,000	10^{12}
giga	G	1,000,000,000	10^9
mega-	M	1,000,000	10^6
kilo-	k	1,000	10^3
deci-	d	0.1	10^{-1}
centi-	c	0.01	10^{-2}
milli-	m	0.001	10^{-3}
micro-	μ	0.000001	10^{-6}
nano-	n	0.000000001	10^{-9}
pico-	p	0.0000000000001	10^{-12}
femto-	f	0.000000000000001	10^{-15}

2. ระบบอังกฤษ (British Systems)

เป็นหน่วยมาตรฐานอีกหน่วยหนึ่งที่ยังนิยมใช้กันในหลายประเทศ แต่ในประเทศไทย อาจจะไม่คุ้นเคยนักเพราะไม่ได้ใช้เป็นหน่วยมาตรฐาน ตัวอย่างของหน่วยวัดที่เป็นที่นิยมใช้กัน ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.3 หน่วยพื้นฐานของระบบอังกฤษ

หน่วยวัดปริมาตร	หน่วยวัดความยาว	หน่วยวัดมวล
8 ออนซ์ = 1 ถ้วย	1 ฟุต = 12 นิ้ว	16 ออนซ์ = 1 ปอนด์
2 ถ้วย = 1 ไพน์ท์	1 หลา = 3 หลา	2000 ปอนด์ = 1 ตัน
2 ไพน์ท์ = 1 ควอท	1 ไมล์ = 5280 ฟุต	
4 ควอท = 1 แกลลอน	1 ไมล์ = 1760 หลา	

3. ระบบ SI Unit (The International System of Unit)

จากการที่มีระบบหน่วยใช้ปนกันทั้ง 2 ระบบ ก่อให้เกิดความสับสนขึ้นบ่อยครั้งในการคำนวณหน่วยกลับไปกลับมา จึงมีการประชุมร่วมกันที่ฝรั่งเศสในปี ค.ศ.1790 มี 17 ประเทศเข้าร่วมประชุม รวมทั้งสหรัฐอเมริกาด้วย เพื่อใช้แทนระบบซึ่ง ตวง วัดให้ได้มาตรฐานเป็นที่ยอมรับและใช้ร่วมกันโดยทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย

1. หน่วยพื้นฐานในระบบ SI (SI Base Units) เป็นหน่วยการวัดพื้นฐานที่สามารถสอบกลับได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 หน่วยพื้นฐานในระบบ SI

เชิงปริมาณ (Quantity)	หน่วยพื้นฐาน (Base Unit)	สัญลักษณ์ (Symbol)
ความยาว (Length)	เมตร (Meter)	m
มวล (Mass)	กิโลกรัม (Kilogram)	kg
เวลา (Time)	วินาที (Second)	s
กระแสไฟฟ้า (Electric Current)	แอมแปร์ (Ampere)	A
อุณหภูมิ (Thermodynamic Temperature)	เคลวิน (Kelvin)	K
ปริมาณสาร (Amount of Substance)	โมล (Mole)	mol
ความเข้มของการส่องสว่าง (Luminous Intensity)	แคนเดลา (Candela)	cd

2. หน่วยอนุพันธ์เอสไอ (SI Derived Units) เกิดจากการพิสูจน์ทางพีชคณิตระหว่างหน่วยพื้นฐานหรือหน่วยอนุพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 หน่วยอนุพันธ์ SI (SI Derived Units)

เชิงปริมาณอนุพันธ์ (Derived Quantity)	หน่วยอนุพันธ์ (Derived Units)	สัญลักษณ์ (Symbol)
พื้นที่ (Area)	ตารางเมตร (square Meter)	m^2
ปริมาตร (Volume)	ลูกบาศก์เมตร (cubic Meter)	m^3

เชิงปริมาณอนุพันธ์ (Derived Quantity)	หน่วยอนุพันธ์ (Derived Units)	สัญลักษณ์ (Symbol)
อัตราเร็ว, ความเร็ว (Speed, Velocity)	เมตรต่อวินาที (meter per second)	$m \cdot s^{-1}$
ความเร่ง (Acceleration)	เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (meter per second square)	$m \cdot s^{-2}$
ความหนาแน่นกระแส (Current Density)	แอมแปร์ต่อลูกบาศก์เมตร (ampere per cubic meter)	$A \cdot m^{-3}$
ความแรงสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength)	โวลต์ต่อเมตร (volt per meter)	$V \cdot m^{-1}$
การซึมผ่านได้ (Permeability)	เฮนรีต่อเมตร (henry per meter)	$H \cdot m^{-1}$

3. คำนำหน้าหน่วยในระบบ SI (SI Prefixes) คือสัญลักษณ์ที่ถูกนำมาไว้หน้าหน่วย เพื่อให้การแสดงผลมีความกะทัดรัดมากขึ้น โดยสัญลักษณ์เหล่านี้จะเข้าไปคู่กับหน่วย ทำให้มีผลเท่ากับการเพิ่มหรือลดขนาดของหน่วย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คำนำหน้าหน่วยในระบบ SI (SI Prefixes)

ตัวประกอบ (Factor)	ชื่อคำนำหน้าหน่วย (Prefix Name)	สัญลักษณ์ (Symbol)	ตัวประกอบ (Factor)	ชื่อคำนำหน้าหน่วย (Prefix Name)	สัญลักษณ์ (Symbol)
10^1	เดคา (deka)	da	10^{-1}	เดซี (deci)	d
10^2	เฮกโต (hecto)	h	10^{-2}	เซนติ (centi)	c
10^3	กิโล (kilo)	k	10^{-3}	มิลลิ (milli)	m
10^6	เมกะ (mega)	M	10^{-6}	ไมโคร (micro)	μ
10^9	กิกะ (giga)	G	10^{-9}	นาโน (nano)	n
10^{12}	เทระ (tera)	T	10^{-12}	พิโก (pico)	p
10^{15}	เพตะ (peta)	P	10^{-15}	เฟมโต (femto)	f
10^{18}	เอกซะ (exa)	E	10^{-18}	อัตโต (atto)	a
10^{21}	เซตตะ (zetta)	Z	10^{-21}	เซปโต (zepto)	z
10^{24}	ยอตตะ (yotta)	Y	10^{-24}	ยอกโต (yocto)	y

2.6 การสอบเทียบและความสามารถสอบกลับได้

2.6.1 การสอบเทียบ (Calibration)

การวัดและการทดสอบที่มีความถูกต้องและแม่นยำจำเป็นต้องมีการยืนยันผลของการวัด โดยใบรับรองการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่แสดงผลการวัด และความไม่แน่นอนของการวัดที่สามารถสอบกลับได้กับหน่วยวัด SI Units ที่ทำให้เป็นที่ยอมรับได้ และสามารถรักษาไว้ในฐานะที่เป็นมาตรฐานการวัดแห่งชาติ ซึ่งถูกรักษาไว้โดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (ประเทศไทย) ซึ่งมีลำดับการสอบเทียบดังนี้

1. การสอบเทียบระดับระหว่างประเทศ

เพื่อให้ได้รับความมั่นใจในความถูกต้องหรือความเท่าเทียมกันในมาตรฐานการวัดแห่งชาติของแต่ละประเทศ ได้มาจากการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างประเทศทั้งในระดับทวิภาคและพหุภาค แทนการสอบเทียบที่กระทำกันตามปกติโดยทั่วไป ในระดับระหว่างประเทศนั้นได้มาจากการทำให้เป็นจริง (Realization) จากนิยามของหน่วยวัดระบบเอสไอ (SI Units) ซึ่งได้รับการรับรองจากที่ประชุมทั่วไปว่าด้วยการชั่ง วัด ตวง และหน่วยงานที่รับผิดชอบในการดำเนินการให้มีการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างประเทศคือ สำนักงาน ชั่ง วัด ตวง ระหว่างประเทศนั่นเอง

2. การสอบเทียบระดับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ มีหน้าที่หลักคือ การรักษามาตรฐานขั้นปฐมภูมิของหน่วยวัดระบบ SI ของแต่ละประเทศ รวมทั้งการวิจัยและพัฒนามาตรฐานการวัดและวิธีการวัด ให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นตามความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การสอบเทียบที่กระทำโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติจะจำกัดอยู่ที่การสอบเทียบเพื่อถ่ายทอดมาตรฐานของหน่วยวัด SI ในระดับปฐมภูมิของประเทศไปสู่มาตรฐานระดับทุติยภูมิของห้องปฏิบัติการการสอบเทียบในอุตสาหกรรมเท่านั้น

3. ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับใบรับรองความสามารถอย่างเป็นทางการของแต่ละประเทศ สำหรับหน่วยงานที่ให้การรับรองอย่างเป็นทางการของประเทศไทยคือ ส่วนงานรับรองห้องปฏิบัติการสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) สำหรับห้องปฏิบัติการที่ผ่านการรับรองโดยการตรวจประเมินความสามารถทางเทคนิคตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO/IEC 17025 แล้วนั้น จะได้รับใบรับรองความสามารถของการวัดพร้อมกับความไม่แน่นอนน้อยที่สุดที่สามารถกระทำได้

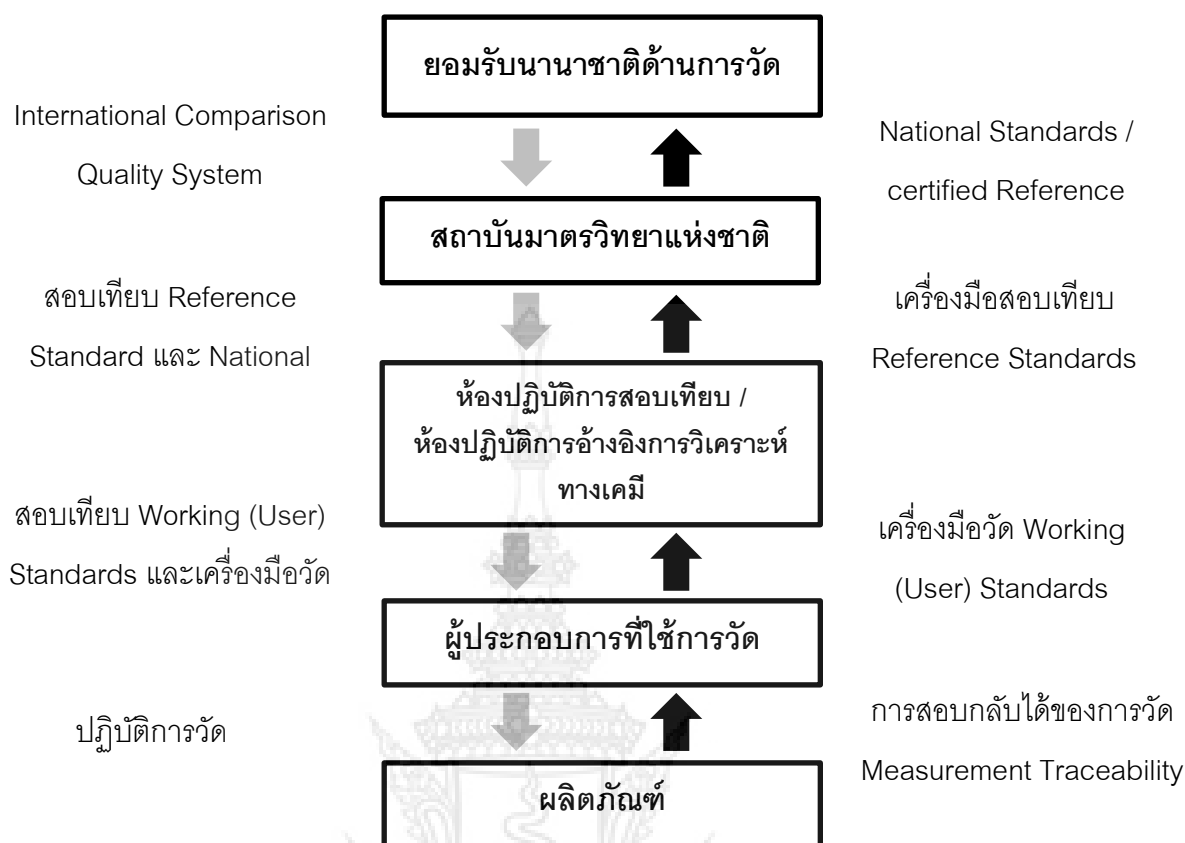
4. การสอบเทียบที่กระทำภายในภาคอุตสาหกรรม

การสอบเทียบในระดับนี้มีจุดประสงค์ เพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องมือตรวจและทดสอบทั้งหมดที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงภายในโรงงาน โดยที่มาตรฐานอ้างอิงนั้นจะต้องได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ด้วยเช่นกัน

2.6.2 ความสามารถสอบกลับได้ (Traceability)

ความสามารถสอบกลับได้ หมายถึง สมบัติของผลการวัดที่สามารถโยงกับมาตรฐานแห่งชาติ อันเป็นที่ยอมรับโดยการเปรียบเทียบอย่างต่อเนื่อง และจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วย หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงกระบวนการย้อนกลับของการสอบเทียบ จากมาตรฐานสากล มาตรฐานแห่งชาติจนถึงเครื่องมือของผู้ใช้งาน ซึ่งความสามารถสอบกลับได้ของการวัดจะประกอบด้วย

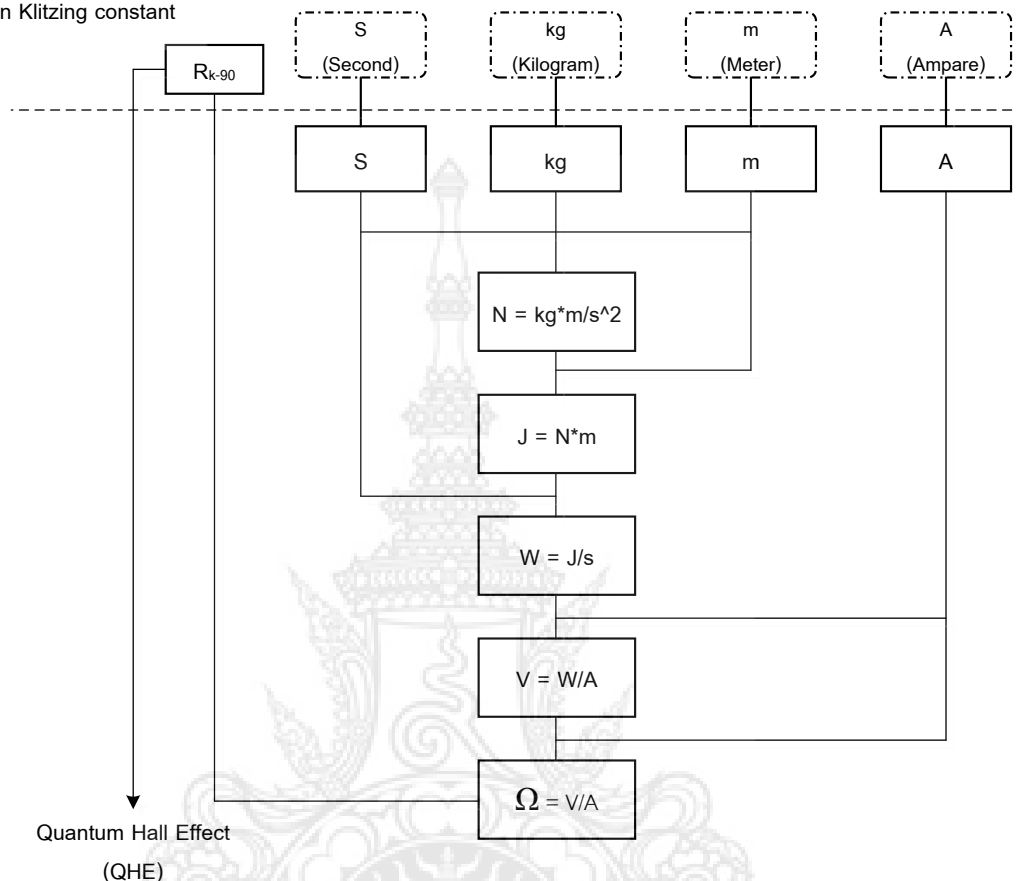
1. มีการสอบกลับอย่างต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ จากผู้ใช้งานเครื่องมือกลับไปยังมาตรฐานแห่งชาติหรือมาตรฐานระหว่างประเทศ
2. มีความไม่แน่นอนของการวัด การสอบกลับแต่ละขั้นตอนจะต้องคำนวณตามวิธีที่กำหนดไว้และรายงานค่าของการวัด เพื่อให้สามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวมทุกขั้นตอนได้
3. ทำเป็นเอกสาร ทำการสอบเทียบตามเอกสาร อีกทั้งผลของการสอบเทียบต้องเป็นเอกสารเช่นกัน
4. มีความสามารถ ห้องปฏิบัติการหรือองค์กรที่ทำการสอบเทียบในขั้นตอนหนึ่งหรือมากกว่าของห่วงโซ่การสอบกลับ จะต้องแสดงให้เห็นถึงความสามารถทางเทคนิค เช่น แสดงด้วยการได้รับการรับรองความสามารถตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025
5. อ้างถึงหน่วยวัด SI ห่วงโซ่ของการสอบเทียบ ถ้าเป็นไปได้จะต้องสิ้นสุดที่มาตรฐานภูมิ ที่ทำให้เป็นจริงของหน่วยวัด SI
6. ระยะเวลาการสอบเทียบ การสอบเทียบจะต้องกระทำซ้ำตามช่วงเวลาที่เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับหลายๆ ตัวแปร เช่น ความถี่ของการใช้งาน การนำไปใช้งาน เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของห่วงโซ่การสอบกลับ

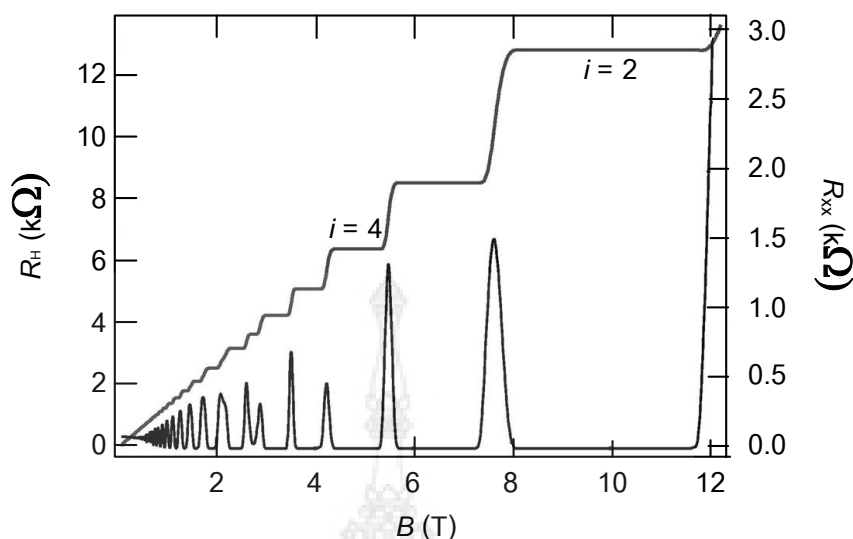
ดังนั้นจะขอยกตัวอย่างของการสอบกลับของความมาตรฐานที่ได้จากสมการ $R = E / I$ ไปสู่ระบบ SI Units ดังแสดงในภาพที่ 2.3

SI Defined Base Units

CIPM Assigned
von Klitzing constant

ภาพที่ 2.3 แสดงการสอบกลับของความต้านทานไปสู่ระบบ SI Units

Quantum Hall effect (QHE) หรือ Quantum Hall Resistance (QHR) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางควอนตัมซึ่งผู้ค้นพบโดย Klaus von Klitzing โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน มอสเฟต (Si – MOSFET) ไปวางไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 1.2 เคลวิน และปล่อยสนามแม่เหล็กความเข้มสูงประมาณ 10 เทสลา อุปกรณ์ดังกล่าวจะสร้างความต้านทานคงที่ขึ้นมาโดยสามารถแสดงได้ดังภาพค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟผลการทดลองของ QHE ที่อุณหภูมิ 1.2 เคลวิน

2.7 การนำกระบวนการทางสถิติมาวิเคราะห์ผลการวัด

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงสถิติที่จำเป็นต้องใช้ในการประเมินความไม่แน่นอนในการวัด โดยจะเริ่มจากค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การสุ่มและประชากร การกระจายและระดับความเชื่อมั่น ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้จำเป็นที่จะใช้ในการประเมินความไม่แน่นอน โดยการประเมินความไม่แน่นอนสามารถหาได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

2.7.1 การหาค่าเฉลี่ย (Average)

$$\bar{y} = y_1 + y_2 + \dots + y_n \quad (2-1)$$

เมื่อ y_1 = ข้อมูลที่ทำการวัด

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

2.7.2 การหาส่วนเบี่ยงเบน (Deviation) คือ ค่าที่แตกต่างกันระหว่างผลการวัดครั้งใด ๆ กับค่ากลางของชุดการวัดนั้นๆ ดังสมการที่ (2-2)

$$Deviation = (y_i - \bar{y}) \quad (2-2)$$

2.7.3 การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

สามารถหาได้ดังนี้

1. หาค่าเฉลี่ย ตามสมการ (2-1)
2. หาผลรวมกำลังสองของส่วนเบี่ยงเบน (s)

$$s = (y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_i - \bar{y})^2 \quad (2-3)$$

3. หาความแปรปรวน (Variance)

$$v = \frac{s}{n-1} \quad (2-4)$$

4. หาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ)

$$\sigma = \sqrt{v} \quad (2-5)$$

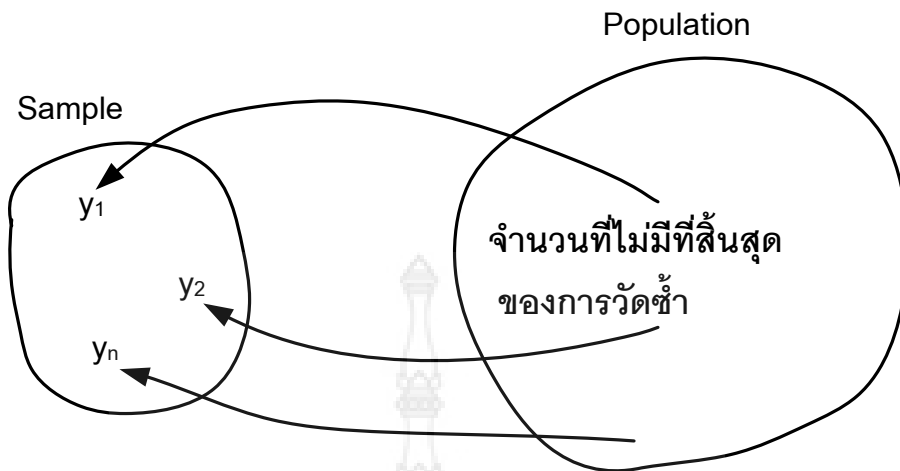
หรือ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2-6)$$

เมื่อ $n - 1 = \text{Degree of Freedom } (Y)$ หมายถึง จำนวนค่าต่างๆ ที่มีอิสระสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ เมื่อมีการกำหนดสิ่งใดสิ่งหนึ่งไว้ เช่น มีข้อมูล 5 จำนวน ถ้าผลรวมทั้งหมดของข้อมูลเป็น 100 จะเห็นว่ามีข้อมูลอยู่ 4 จำนวน ที่จะเป็นค่าอะไรก็ได้ แต่ข้อมูลตัวสุดท้ายจะต้องเป็นข้อมูลค่าใดค่าหนึ่ง ที่รวมกับข้อมูล 4 จำนวนแรก แล้วทำให้ผลรวมของข้อมูลทั้งหมดรวมเป็น 100

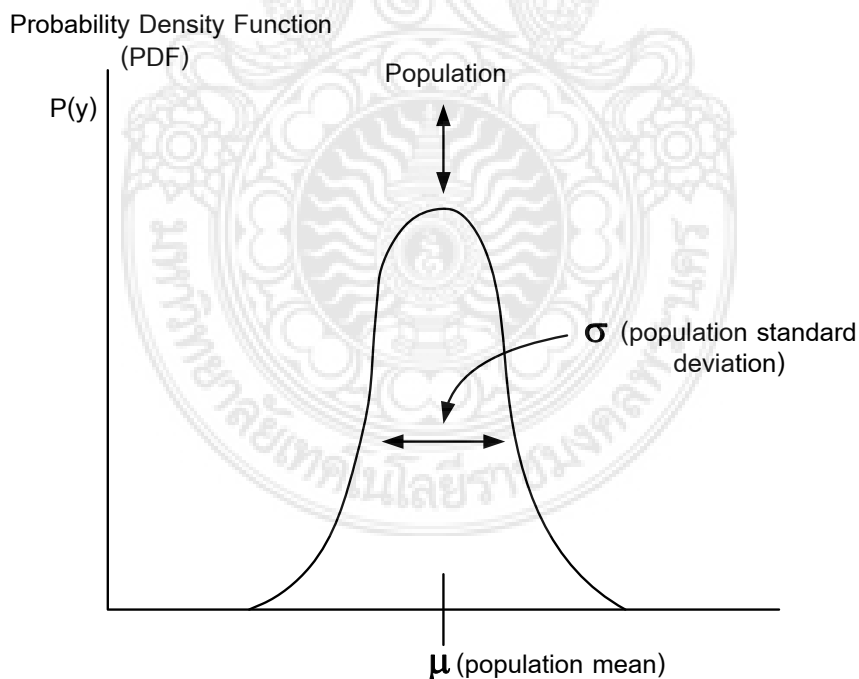
2.7.4 การหาตัวอย่างและประชากร (Sample and Population)

สำหรับตัวอย่างและประชากรทางสถิติที่นำมาใช้กับข้อมูลการวัดสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 2.5



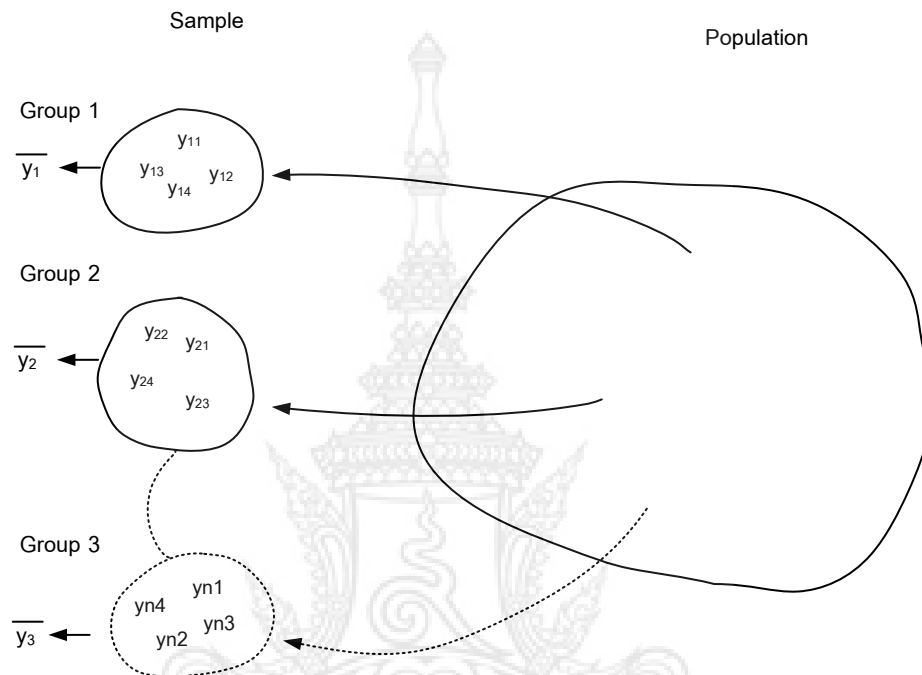
ภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างและประชากรของข้อมูลการวัด

จากภาพที่ 2.6 ถ้านำข้อมูลประชากรมาเขียนในฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) สามารถแสดงได้ดังภาพ 2.6



ภาพที่ 2.6 PDF ของประชากรการวัด

จากภาพที่ 2.7 ในทางปฏิบัติไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของประชากรการวัดได้ ดังนั้นจึงมีการนำพารามิเตอร์ของประชากรการวัดมาทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการทางสถิติ จะทำได้กลุ่มตัวอย่างที่ได้จากประชากรการวัด ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงกลุ่มตัวอย่างที่มาจากประชากรการวัด

จากภาพที่ 2.7 ถ้าให้จำนวนตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีค่าเท่ากัน และค่าจากประชากรมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถประมาณว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มเท่ากัน ดังนั้นเมื่อทำการหาค่าโพลของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Pooled Standard Deviation) โดยทำการหาผลรวมทางสถิติของส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม จะได้ว่า

$$\sigma_p^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} + \dots + \frac{\sigma_n^2}{n_n} \tag{2-7}$$

เมื่อ

$$n_1 = n_2 = \dots = n_n = n \tag{2-8}$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots \dots \sigma_n = \sigma \quad (2-9)$$

จากสมการ (2-7) จะได้ว่า

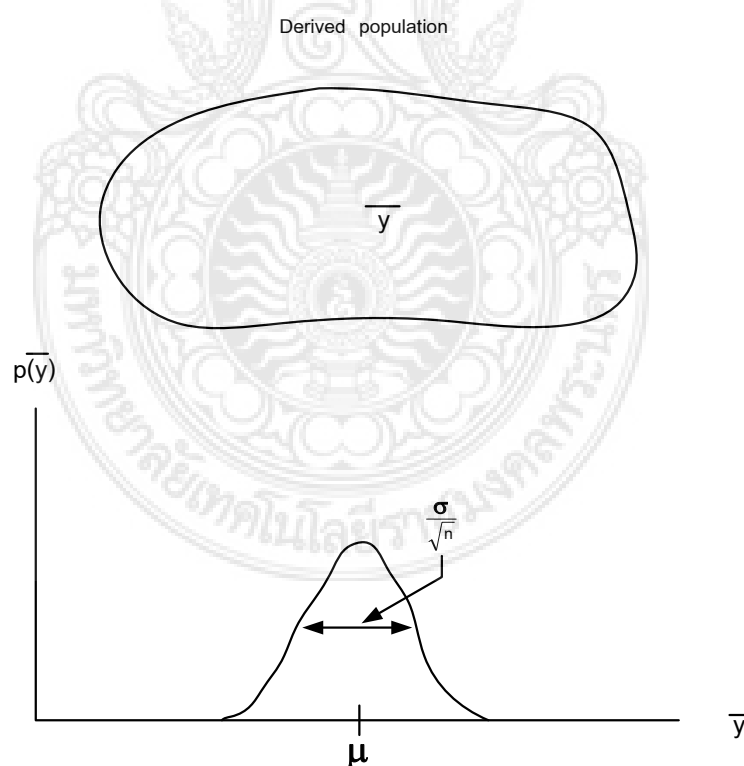
$$\sigma_p^2 = \frac{\sigma^2 + \sigma^2 + \dots \dots \sigma^2}{n} = \frac{n\sigma^2}{n} \quad (2-10)$$

ดังนั้น Pooled Standard Deviation มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_p = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-11)$$

เมื่อทำการเขียน Pooled Standard Deviation ในรูปของ PDF สามารถแสดงได้ดังภาพที่

2.8



ภาพที่ 2.8 แสดง Pooled Standard Deviation ในรูปของ PDF

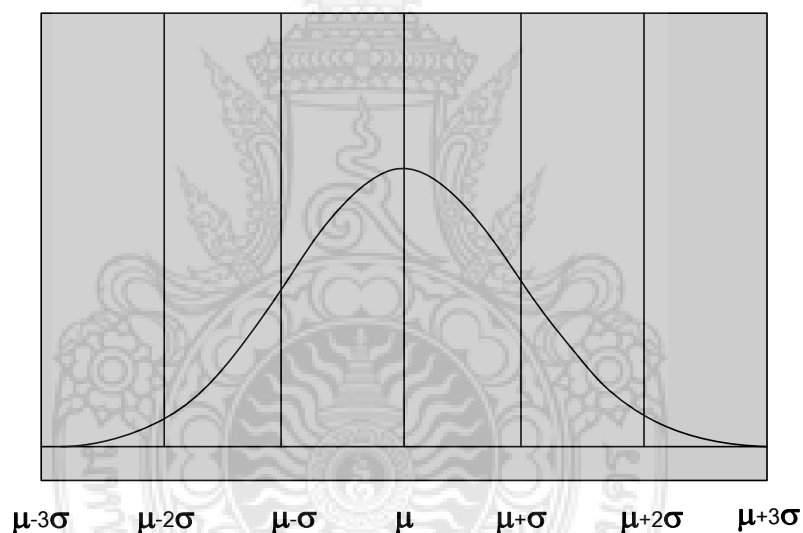
2.7.5 การแจกแจง (Distribution)

โดยทั่วไปการแจกแจงข้อมูลทางสถิติสามารถกระจายได้หลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงการแจกแจงที่พบเห็นในระบบการวัดทั่วไป

1. การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

โดยทั่วไปการแปรผันของประชากรของผลการวัดหรือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นในหัวข้อ 2.7.4 จะมีรูปแบบการแจกแจงแบบโค้งมาตรฐานหรือแบบระฆังคว่ำ ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.9 และสามารถคำนวณหาการแจกแจงแบบปกติ ได้จากสมการที่ (2-12)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-(x - \mu)^2 / 2\sigma^2\right] \quad (2-12)$$



$$\pm\sigma : P = 0.6826 = 68.3 \%$$

$$\pm 2\sigma : P = 0.9544 = 95.5 \%$$

$$\pm 3\sigma : P = 0.9974 = 99.7 \%$$

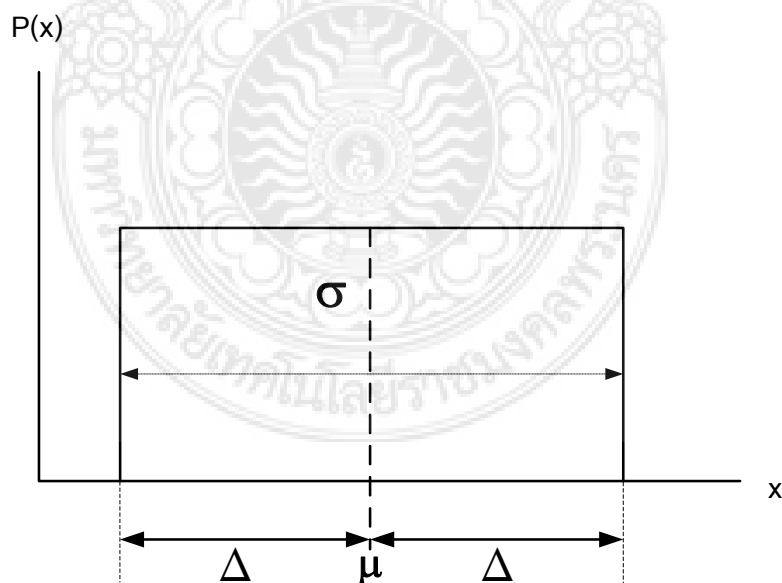
ภาพที่ 2.9 การแจกแจงข้อมูลแบบปกติ

จากภาพที่ 2.9 จะพบว่าการแจกแจงข้อมูลที่ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) และระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) ต่างๆ โดยช่วงความเชื่อมั่น หมายถึง ช่วงการประมาณค่าที่ครอบคลุมพารามิเตอร์ตั้งแต่ขีดจำกัดล่างถึงขีดจำกัดบนและกำหนดเป็นค่า $\pm k\sigma$ โดย k เป็นค่าที่ 1, 2 หรือ 3 สำหรับระดับความเชื่อมั่น เป็นการประมาณค่าที่ครอบคลุมพารามิเตอร์ตั้งแต่ขีดจำกัดล่างถึงขีดจำกัดบนเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น 68.3%, 95.5% และ 99.7% โดยทั่วไปในการประเมินความไม่แน่นอนมักนิยมใช้การแจกแจงแบบที (t-distribution) ซึ่งมีการแจกแจงคล้ายคลึงกับแบบปกติและสามารถหาค่าคงที่ได้ง่าย

2. การแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution)

เป็นการแจกแจงของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าที่วัดได้ทั้งหมดอย่างเท่าเทียมกันตลอดพิสัยที่กำหนด และไม่มีค่าใดๆ พ้นจากค่าพิสัยนี้ดังแสดงในภาพที่ 2.10 และสามารถคำนวณค่าการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้ดังสมการที่ (2-13)

$$\sigma^2 = \int_{\mu-\Delta}^{\mu+\Delta} x^2 P dx = p \int_{\mu-\Delta}^{\mu+\Delta} x^2 dx \quad (2-13)$$



ภาพที่ 2.10 แสดงการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากภาพที่ 2.10 จะได้ว่า

$$P = \frac{1}{2\Delta} \quad (2-14)$$

และ

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\Delta} \int_{\mu-\Delta}^{\mu+\Delta} x^2 dx = \frac{1}{2\Delta} \left[\frac{x^3}{3} \right]_{\mu-\Delta}^{\mu+\Delta} \quad (2-15)$$

และ

$$\mu + \Delta = \Delta, \quad \mu - \Delta = \Delta$$

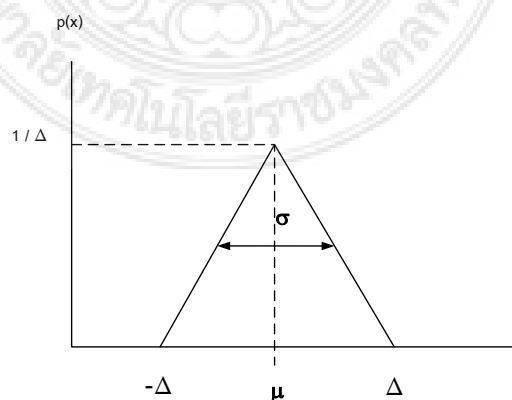
$$\sigma^2 = \frac{1}{2\Delta} \left[\frac{\Delta^3}{3} - \frac{-\Delta^3}{3} \right] \quad (2-16)$$

ดังนั้นสมการรูปแบบการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะเป็น

$$\sigma = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (2-17)$$

3. การแจกแจงแบบสามเหลี่ยม (Triangular Distribution)

เป็นรูปแบบการแจกแจงของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าที่วัดได้ที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงกลางมากกว่าด้านข้างทั้ง 2 ด้าน



ภาพที่ 2.11 การแจกแจงแบบสามเหลี่ยม

จากภาพ สามารถคำนวณหาค่าการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma^2 = \int_{\mu-\Delta}^{\mu+\Delta} x^2 P dx = p \int_{\mu-\Delta}^{\mu+\Delta} x^2 dx \quad (2-18)$$

เมื่อ

$$P = \frac{1}{\Delta^2} x + \frac{1}{\Delta} ; -\Delta \leq x \leq \mu \quad (2-19)$$

$$P = -\frac{1}{\Delta^2} x + \frac{1}{\Delta} ; \mu \leq x \leq \Delta \quad (2-20)$$

จะได้ว่า

$$\sigma^2 = \int_{\mu-\Delta}^{\mu} x^2 \left[\frac{1}{\Delta^2} x + \frac{1}{\Delta} \right] dx + \int_{\mu}^{\mu+\Delta} x^2 \left[-\frac{1}{\Delta^2} x + \frac{1}{\Delta} \right] dx \quad (2-21)$$

$$\sigma^2 = \left[\frac{1}{\Delta^2} \cdot \frac{x^4}{4} + \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{x^3}{3} \right]_{\mu-\Delta}^{\mu} + \left[\frac{1}{\Delta^2} \cdot \frac{x^4}{4} + \frac{1}{\Delta} \cdot \frac{x^3}{3} \right]_{\mu}^{\mu+\Delta} \quad (2-22)$$

และเมื่อ $\mu + \Delta = \Delta, \quad \mu - \Delta = \Delta \quad (2-23)$

ดังนั้นสมการรูปแบบการแจกแจงแบบสามเหลี่ยมจะเป็น

$$\sigma = \frac{\Delta}{\sqrt{6}} \quad (2-24)$$

2.8 ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement)

การประเมินความไม่แน่นอน หมายถึง ขอบเขตที่กำหนดไว้แน่นอนร่วมกับผลการวัด ซึ่งบอกลักษณะการแจกแจงของค่าที่ได้จากการวัดซ้ำๆ กันที่มีเหตุผลว่าเป็นปริมาณที่ถูกต้อง สำหรับการแนวทางการประเมินความไม่แน่นอนในการวัด ในที่นี่จะใช้แนวทางตาม ISO/TAG4 : January 1993 "Guide to the expression of uncertainty in measurement" ซึ่งเป็นมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป

2.8.1 รูปแบบกระบวนการวัด (Modeling the Measurement)

ปริมาณที่ถูกรวัด Y เป็น Output ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณ input ต่างๆ X_1, X_2, \dots, X_n ในรูปแบบความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน f

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2-25)$$

จากสมการที่ 2-25 ฟังก์ชัน f จะรวมปริมาณต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของผลการวัด อาจประกอบไปด้วย ค่าการวัดและปริมาณต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการวัด แต่เนื่องจากองค์ประกอบต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถทราบค่าจริงได้อย่างแน่นอน จึงต้องใช้ค่าประเมินแทน โดย x_i แทน X_i และ output Y เป็น y ดังนั้นจากสมการ (2-25) เมื่อแทนค่าจะได้สมการที่ (2-26) ดังนี้

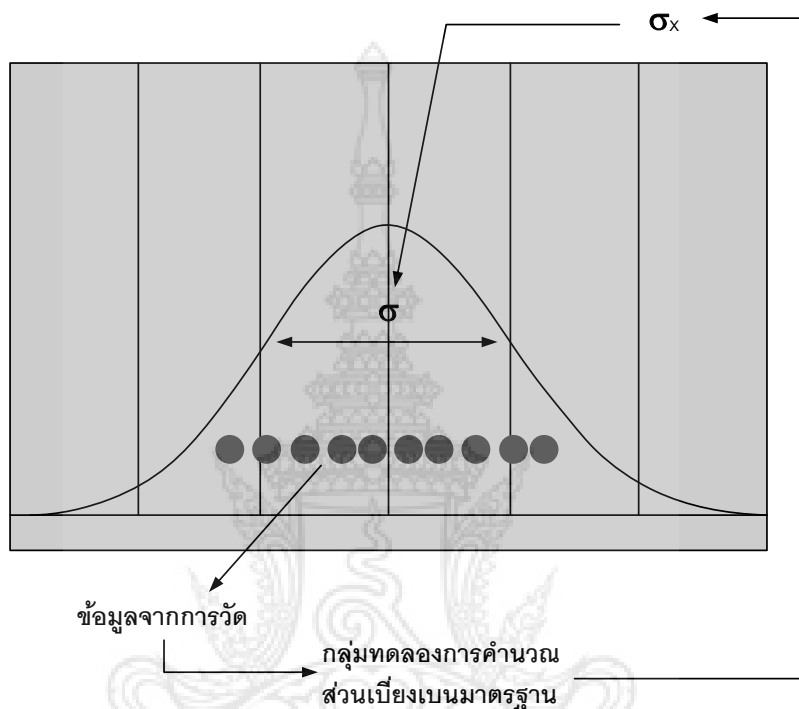
$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-26)$$

เมื่อทำการพิจารณาสมการ (2-26) จะพบว่าปริมาณ x_i ในแต่ละตัวก็มีความไม่แน่นอนอยู่ทุกตัว ความไม่แน่นอนเหล่านี้เรียกว่า ความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty) $u(x_i)$ ซึ่งสามารถประเมินได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ x_i แต่ละตัว ทำนองเดียวกันกับปริมาณ y ก็จะไม่มีความแน่นอนอยู่ด้วย ดังนั้นผลรวมของความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณ x_i และความไม่แน่นอนของปริมาณ y ว่า ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty) หรือ $u_c(y)$ ซึ่งก็คือการประเมินส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ y นั้นเอง การประเมินความไม่แน่นอนสามารถกระทำดังนี้

1. หาค่า $u(x_i)$ ที่มาจาก Type A และ Type B
2. หาค่า $u_c(y)$ ที่เกิดจากการรวมกันของ $u(x_i)$
3. หาค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty) โดย $U = k \cdot u_c(y)$ (ทั่วไปใช้ประมาณ 95%)
4. การรายงานผลการวัด จะรายงานเป็น $Y = y \pm U$

2.8.2 การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A

สำหรับการประเมินความไม่แน่นอนแบบนี้ เป็นการประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงการประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อปริมาณ input x_i ที่ได้จากการสังเกต n ครั้ง ภายใต้เงื่อนไขการวัดที่สภาวะเดียวกัน สามารถหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-27)$$

เมื่อ

\bar{x} = ค่าเฉลี่ยจากการวัด n ครั้ง

x_i = ค่าวัดผลการวัดครั้งที่ i

ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มตัวอย่างสามารถหาค่าได้ดังสมการ

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-28)$$

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.28 สามารถประมาณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของผลการวัดเป็น

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2-29)$$

ดังนั้นรูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A จะอยู่ในรูปแบบ

$$u(x_i) = s(\bar{x}) \quad (2-25)$$

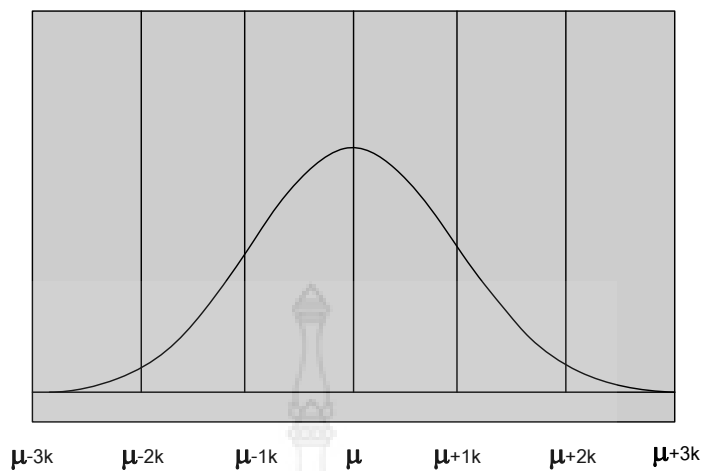
2.8.3 การประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B

เป็นการประเมินความไม่แน่นอนมาตรฐาน โดยมักเป็นความไม่แน่นอนที่ทราบในลักษณะการแจกแจงในครั้งก่อนข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิต พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำมาใช้ ข้อมูลใบรับรองการสอบเทียบและข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงหรือคู่มือ

โดยทั่วไปความไม่แน่นอนที่ได้จากใบรับรองการสอบเทียบ รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จะแจกแจงแบบปกติดังรูปที่ 2.30 และอยู่ในรูปแบบ

$$u(x_i) = \frac{u}{k} \quad (2-30)$$

k = ค่า Coverage Factor ที่ระดับความเชื่อมั่น 68.27%, 95%, 99.7% ค่า $k = 1, 2, 3$ ตามลำดับ

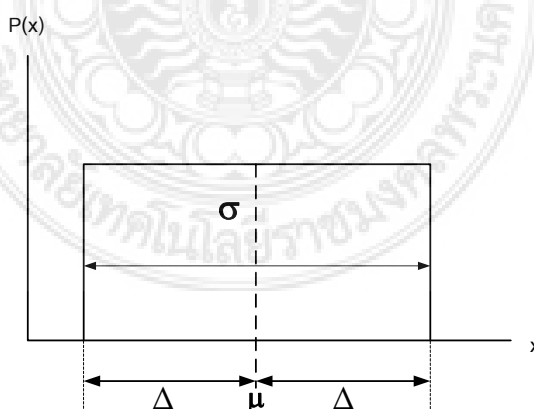


ภาพที่ 2.13 แสดงลักษณะการแจกแจงของความไม่แน่นอนแบบปกติ

กรณีที่ทราบขอบเขตการแจกแจงที่แน่นอนของความไม่แน่นอน เช่นจากข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิต หรือ ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงหรือคู่มือ เป็นต้น รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จะแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังภาพที่ 2.14

$$u(x_i) = \frac{u}{\sqrt{3}} \quad (2-31)$$

จากภาพที่ 2.31 ค่าความไม่แน่นอน u จะมีค่าเท่ากับ Δ



ภาพที่ 2.14 แสดงลักษณะการแจกแจงของความไม่แน่นอนที่ทราบขอบเขตการแจกแจงที่แน่นอน

2.8.4 ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม เป็นความไม่แน่นอนมาตรฐานของ y หรือได้มาจากการรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณ input ต่างๆ x_1, x_2, \dots, x_n และใช้ตัวย่อเป็น $u_c(y)$ โดยทั่วไปสามารถแบ่งการรวมกันของความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณ input ได้ 2 กรณี คือ กรณีปริมาณอินพุตไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorrelated input quantities) และกรณีปริมาณอินพุตมีสหสัมพันธ์ (Correlate input quantities) สามารถอธิบายโดยสังเขปได้ดังต่อไปนี้

ปริมาณอินพุตไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorrelated input quantities) คือ กรณีที่ปริมาณอินพุตเป็นอิสระต่อกันในเชิงสถิติ สามารถหาความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมได้จากผลของการ แจกแจงความน่าจะเป็นของปริมาณอิสระเหล่านี้รวมกัน โดยความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $u_c(y)$ เป็นรากที่สองที่เป็นบวกของความแปรปรวนรวม (Combined variance) $u_c^2(y)$ ซึ่งกำหนดให้มีค่าดังสมการ (2-32)

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2-32)$$

จากสมการ (2-32) ค่า f เป็นฟังก์ชันที่กำหนดในสมการ (2-31) และ $u(x_i)$ เป็นความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณอินพุตแต่ละตัว ซึ่งอาจเป็นความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A หรือ Type B ก็ได้ สำหรับ $\partial f / \partial x_i$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity coefficients) มีค่าเท่ากับ $\partial f / \partial X_i$ ที่ได้จากการประเมิน $X_i = x_i$ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปริมาณเอาต์พุตประมาณ y จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าจากการที่ปริมาณอินพุตประมาณ x_i มีการเปลี่ยนแปลงดังภาพที่

การเปลี่ยนแปลงใน y โดยปริมาณเล็กน้อย Δx_i ในปริมาณอินพุตประมาณ x_i จะเป็นดังสมการ (2-33)

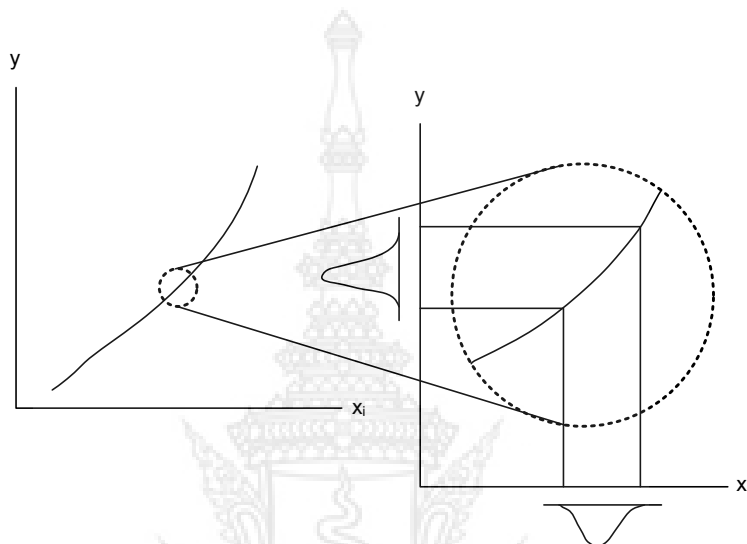
$$(\Delta y)_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot (\Delta x_i) \quad (2-33)$$

ถ้าการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณอินพุตประมาณ x_i ความแปรผันสอดคล้องใน y เป็น $(\partial f / \partial x_i) \cdot u(x_i)$ ผลรวมความแปรปรวนสามารถพิจารณาได้ว่า เป็นผลรวมของเทอมที่ต่างเป็นตัวแทนของปริมาณอินพุตประมาณ x_i ที่ก่อให้เกิดปริมาณเอาต์พุตประมาณ y ดังสมการ

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2(y) \quad (2-34)$$

เมื่อ

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}, \quad u_i(y) = |c_i| u(x_i) \quad (2-35)$$



ภาพที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอาต์พุต
ปริมาณ y และปริมาณอินพุตปริมาณ x_i

ปริมาณอินพุตมีสหสัมพันธ์ (Correlated input quantities) หมายถึง กรณีที่ปริมาณอินพุตตั้งแต่สองอินพุตขึ้นไป ขึ้นต่อกันหรือมีสหสัมพันธ์กัน ความแปรปรวนรวม $u_c^2(y)$ ซึ่งเกี่ยวกับผลการวัดเป็น

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2-36)$$

$$= \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2-37)$$

เมื่อ x_i และ x_j เป็นการประมาณของ X_i และ X_j ส่วน $u(x_i, x_j)$ เป็นความแปรปรวนร่วม (Covariance) ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับ x_i และ x_j องศาของสหสัมพันธ์ ระหว่าง x_i และ x_j ปริมาณจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังนี้

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (2-38)$$

เมื่อ $\gamma(x_i, x_j) = \gamma(x_j, x_i)$ และ $-1 \leq \gamma(x_i, x_j) \leq +1$ ถ้าประมาณ x_i และ x_j เป็นอิสระต่อกัน $\gamma(x_i, x_j) = 0$ และการเปลี่ยนแปลงในปริมาณหนึ่งจะไม่มีผลกับปริมาณอื่น เมื่อนำเทอมจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มาแทนในเทอมของแปรปรวนรวมของสมการ (2-37) จะได้ว่า

$$2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)\gamma(x_i, x_j) \quad (2-39)$$

เมื่อนำค่าในสมการ (2-35) แทนในสมการ (2-36) จะกลายเป็นสมการดังนี้

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_i c_j u(x_i)u(x_j)\gamma(x_i, x_j) \quad (2-40)$$

ถ้าปริมาณอินพุตประมาณมีสหสัมพันธ์กันด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $\gamma(x_i, x_j) = +1$ สมการที่ (2-34) จะลดรูปลงเป็นสมการดังนี้

$$u_c^2(y) = [\sum_{i=1}^n c_i u(x_i)]^2 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 \quad (2-41)$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนของมาตรฐานรวม $u_c(y)$ เป็นการบวกกันโดยตรงของความไม่แน่นอนมาตรฐานของปริมาณอินพุตประมาณ x_i ที่ทำให้เกิดปริมาณเอาต์พุตประมาณ y

2.8.5 ความไม่แน่นอนขยาย

โดยทั่วไปความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $u_c(y)$ ที่คำนวณได้เป็นค่าความไม่แน่นอนที่อยู่ในช่วงระดับความเชื่อมั่น 68.27% แต่ตามมาตรฐานทั่วไปมักกำหนดให้ใช้ช่วงความเชื่อมั่น 95% ถึง 99.7% ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการขยายความไม่แน่นอนให้อยู่ในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด สำหรับความไม่แน่นอนขยาย U สามารถหาได้จากสมการ

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2-42)$$

เมื่อ k เป็นค่าตัวประกอบครอบคลุม ซึ่งมีวิธีการหาค่า ดังต่อไปนี้

1. หาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $u_c(y)$
2. ทำการประเมินองศาอิสระประสิทธิภาพ v_{eff} ของ $u_c(y)$ จากสูตรของ Welch-Satterthwaite ดังนี้

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2-43)$$

จากสมการ (2-35) $u_i(y) = |c| u(x_i)$ ถ้า $u(x_i)$ มาจากการประเมิน Type A องศาอิสระของความไม่แน่นอนมาตรฐานจะหาได้จากวิธีทางสถิติ ในกรณีทั่วไปของการวัด เมื่อ $x_i = \bar{X}$ และ $u(x_i) = s(\bar{X})$ ค่าองศาอิสระของ $u(x_i)$ จะมีค่าเป็น $n - 1$ นอกเหนือจากนี้ถ้า n ใช้กำหนดจากความชันและจุดตัดของเส้นตรงโดยวิธี Least-Squares ค่าองศาอิสระ $u(x_i)$ จะมีค่าเป็น $n - 2$ สำหรับ Least-Squares Fit ของ m พารามิเตอร์ด้วยข้อมูล n จุดค่าองศาอิสระ $u(x_i)$ แต่ละพารามิเตอร์จะมีค่าเป็น $n - m$ ส่วนความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ $u(x_i)$ ที่มาจากการประเมิน Type B ถ้าสามารถกำหนดขอบเขตการแจกแจงได้ ค่าองศาอิสระของ $u(x_i)$ อาจคิดให้เป็น $v \rightarrow \infty$ สำหรับกรณีอื่นสามารถประมาณจากสมการ

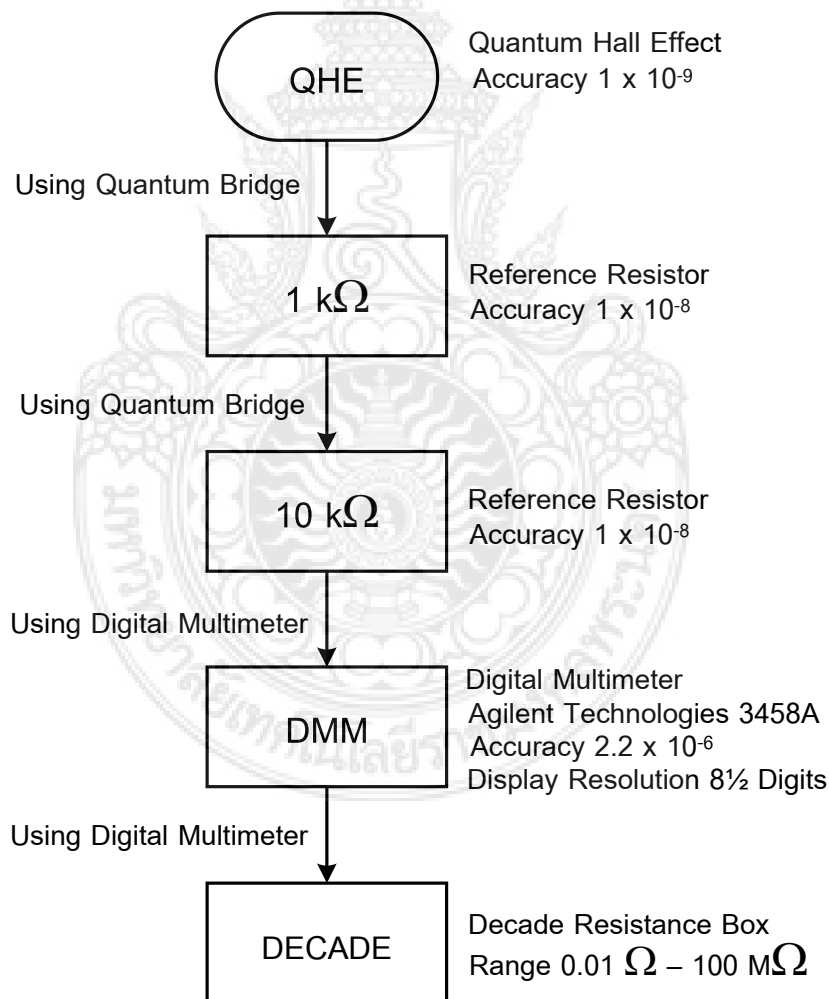
$$v_1 \approx \frac{1}{2} \frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^2 \quad (2-44)$$

3. หาตัวประกอบ t ค่า $t_p(v_{eff})$ ตามลำดับความเชื่อมั่น p ในตาราง t ถ้าค่าองศาอิสระไม่ใช่จำนวนเต็มหรือไม่มีตาราง ให้ปัดค่าสู่จำนวนค่าองศาอิสระที่ต่ำกว่า
4. นำค่า k ที่ได้จาก $k = t_p(v_{eff})$ ไปคำนวณหา $U = k \cdot u_c(y)$

สำหรับการรายงานผลการวัด โดยทั่วไปจะรายงานในรูปแบบ $Y = y \pm U$ ที่ระดับความเชื่อมั่น $p\%$ โดยทั่วไปนิยมใช้ 95% และค่าตัวประกอบครอบคลุม k โดยทั่วไปนิยมใช้ $k = 2$

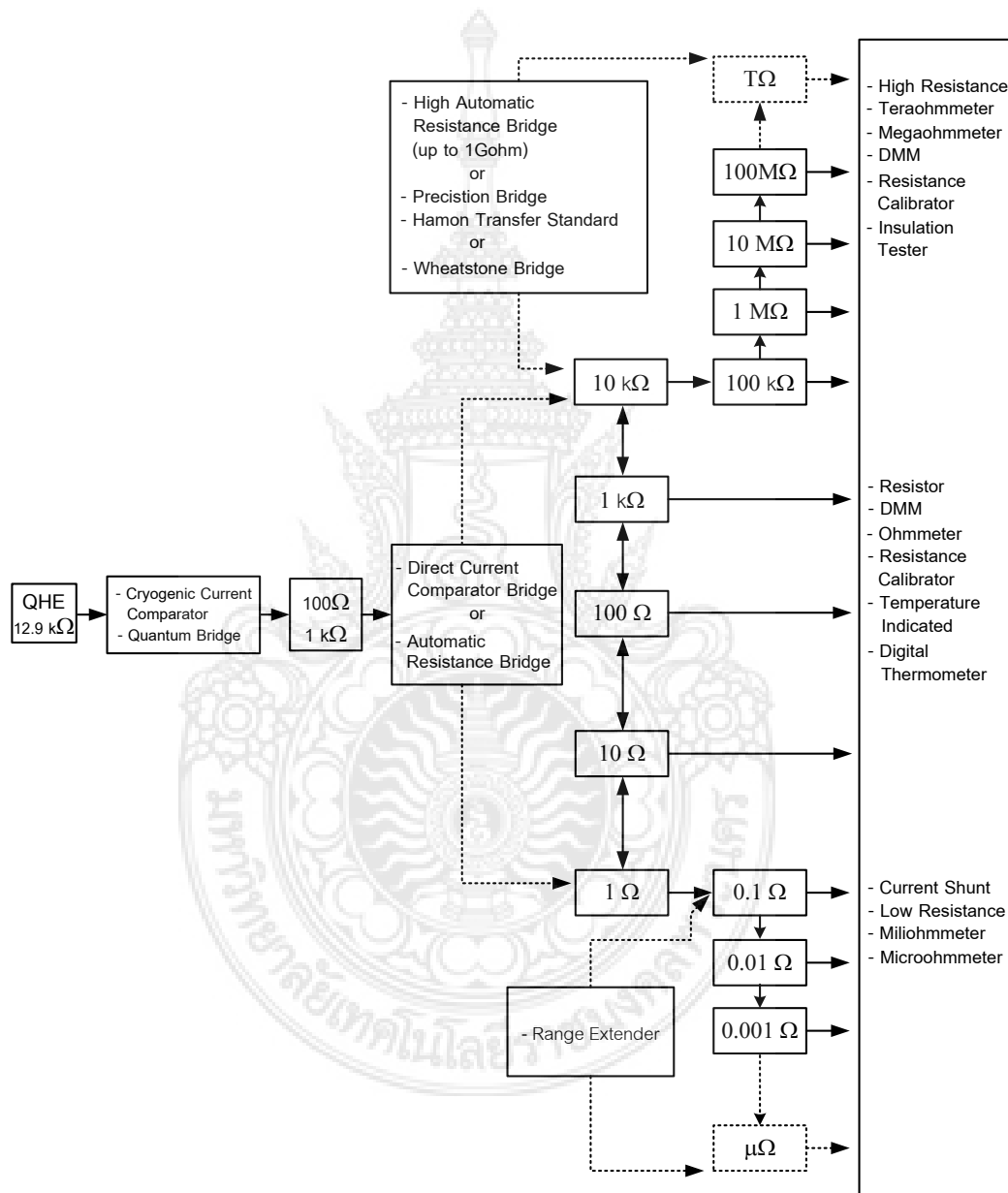
2.9 การวัดความต้านทาน

มาตรฐานความต้านทานที่เชื่อถือได้มากที่สุดตัวหนึ่งคือมาตรฐานความต้านทานเชิงควอนตัม ซึ่งเป็นมาตรฐานปฐมภูมิ มาตรฐานความต้านทานที่ทั่วโลกยอมรับจะถูกส่งผ่านมายังตัวต้านทานมาตรฐานซึ่งจะถูกควบคุมอุณหภูมิเพื่อรักษามาตรฐานตัวต้านทานให้มีค่าความต้านทานคงที่มากที่สุด จากนั้นจะใช้เป็นตัวต้านทานอ้างอิงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับดิจิตอลมัลติมิเตอร์ 8½หลัก Agilent รุ่น 3458A ซึ่งได้ใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ทำการวัดชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ (decade resistor box) เพื่อหาค่าความผิดพลาดของชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ โดยดูขั้นตอนการส่งผ่านการวัดค่าความต้านทานมาตรฐานจากผังงาน (Flowchart) ดังภาพที่ 2.16 พร้อมทั้งแสดงระบบการวัดและการถ่ายค่าความถูกต้องของความต้านทาน ภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.16 ผังขั้นตอนการส่งผ่านค่าความต้านทานมาตรฐาน

จากการวัดค่าความถูกต้องของค่าจากการวัดได้อ้างอิงมาจาก Quantum Hall Effect (QHE) ซึ่งจะสร้างค่าความต้านทานถูกส่งผ่านตัวต้านทานมาตรฐานที่ขนาด $10\text{k}\Omega$ และขนาด $1\text{k}\Omega$ เพื่อใช้ในการอ้างอิงและจะถูกส่งผ่านมายัง Digital Multimeter Agilent 3458A เพื่อใช้ในการวัดค่าความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ขนาด $0.01\Omega - 100\text{M}\Omega$

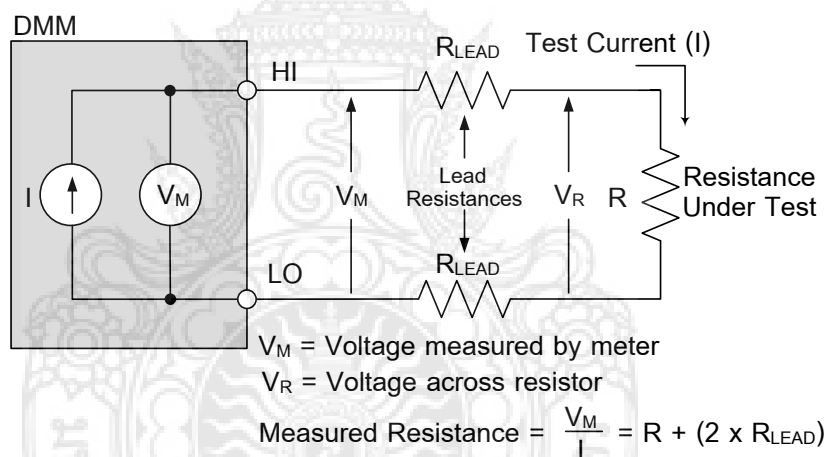


ภาพที่ 2.17 แสดงระบบการวัดและถ่ายทอดความถูกต้องของความต้านทาน

2.9.1. การวัดความต้านทาน

เมื่อพิจารณาในส่วนของโอห์มมิเตอร์จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสและโวลต์มิเตอร์ โดยมีคุณลักษณะขึ้นอยู่กับมิเตอร์ที่นำมาใช้ ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกมิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับระบบที่จะทำการวัด และในส่วนของ การเชื่อมต่อมีสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดต่อการวัดที่สามารถหลีกเลี่ยงได้และลดผลกระทบได้นั้นคือสายตัวนำและขั้วต่อสาย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.16

จากภาพที่ 2.18 เมื่อพิจารณาในส่วนของสายตัวนำ และเมื่อกระแสไฟฟ้า I ไหลจากขั้ว HI ผ่าน R_{LEAD} , R, และ R_{LEAD} ครบวงจรที่ขั้ว LO ทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมที่สาย ขณะเดียวกันแรงเคลื่อนที่มิเตอร์สามารถอ่านได้จะเท่ากับแรงตกคร่อมสายและแรงตกคร่อมความต้านทานที่ทำการวัด



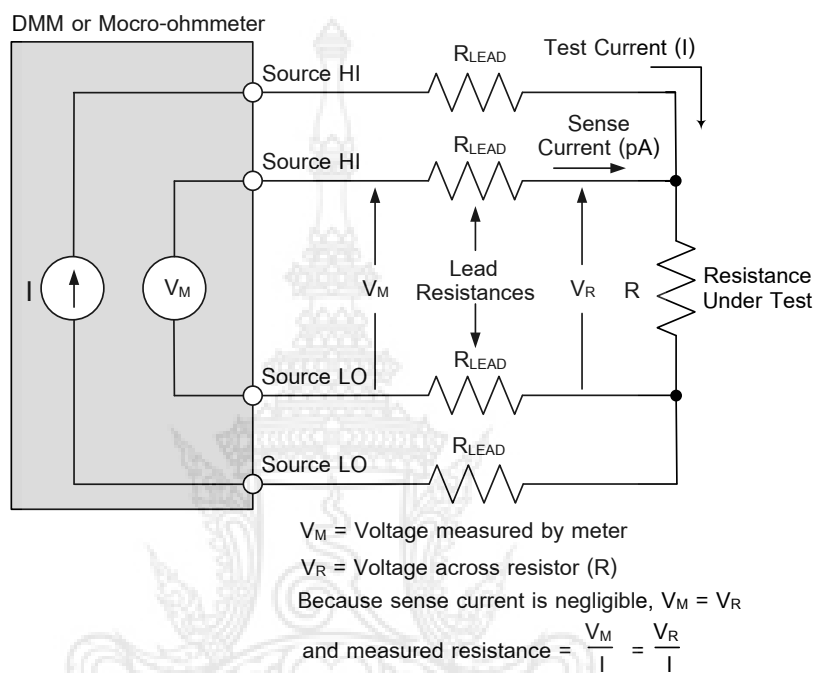
ภาพที่ 2.18 แสดงการวัดตัวต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์แบบ 2 สาย

เมื่อ V_M = แรงเคลื่อนตกคร่อมของมิเตอร์

V_R = แรงเคลื่อนตกคร่อมตัวต้านทานที่วัดได้

ค่าตัวต้านทานที่ต้องการวัดคือ R แต่ความต้านทานที่มิเตอร์วัดได้หรือแสดงค่าจะเป็นผลรวมระหว่างค่าของความต้านทาน ที่ต้องการวัดกับค่าของความต้านทาน ที่เกิดขึ้นของสายคือ $R + 2R_{LEAD}$ เนื่องจากแรงเคลื่อนของมิเตอร์ (V_M) ที่วัดได้นั้น มีค่าไม่เท่ากับแรงเคลื่อนตกคร่อมของความต้านทาน V_R ดังนั้นมิเตอร์จะสามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้องจะต้องทำให้แรงเคลื่อนตก

คร่อมของมิเตอร์เท่ากับแรงเคลื่อนตกคร่อมของความต้านทานที่วัด นั่นคือ $V_M = V_R$ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการลดขนาดแรงเคลื่อนตกคร่อมสายให้มีค่าน้อยลง สามารถทำได้ 2 วิธีคือ การลดค่าความต้านทานของสายและการวัดความต้านทานแบบ 4 สาย (4 wire) นั่นเอง



ภาพที่ 2.19 แสดงการวัดความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์แบบ 4 สาย

จากรูปเมื่อกระแสไฟฟ้า I ไหลออกจากขั้ว Source HI ผ่าน R_{LEAD} , R , และ R_{LEAD} ครอบวงจรที่ขั้ว Source LO ในขณะเดียวกันโวลต์มิเตอร์จะทำการวัดค่าแรงเคลื่อน ซึ่งแรงเคลื่อนที่โวลต์มิเตอร์ที่อ่านค่าได้จะมีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทานที่ทำการวัด เนื่องจากความต้านทานของโวลต์มิเตอร์มีค่าสูงมาก จึงทำให้มีกระแสไฟฟ้าน้อยมากหรือแทบไม่มีไหลผ่าน R_{LEAD} จึงทำให้ไม่มีแรงเคลื่อนตกคร่อมสาย R_{LEAD} ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{Measured Resistance} = \frac{V_M}{I} = \frac{V_R}{I} \quad (2-45)$$

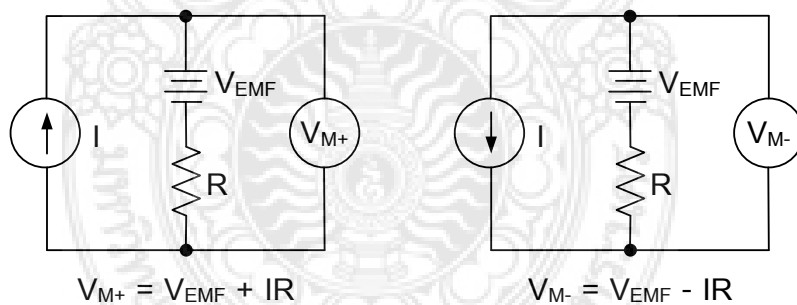
จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมมิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับแรงเคลื่อนตกคร่อมตัวต้านทานที่วัด จึงทำให้โอห์มมิเตอร์สามารถแสดงค่าได้อย่างถูกต้อง

2.9.2. ความร้อนที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Thermal EMF)

สำหรับในส่วนของขั้วต่อ หากขั้วต่อไม่มีสิ่งสกปรกและกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ปกติ สิ่งที่มีผลกระทบกับการวัดคือ Thermal EMF ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นตรงจุดเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิดกัน ขนาดของแรงเคลื่อนนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาใช้และอุณหภูมิที่จุดเชื่อมต่อ โดยแรงเคลื่อนนี้มีนัยสำคัญเมื่อทำการวัดความต้านทานต่ำ โดยแต่ละจุดเชื่อมต่อและขั้วต่อสามารถก่อให้เกิดแรงเคลื่อน Thermal EMF ได้ วิธีหลีกเลี่ยงเบื้องต้นคือการเลือกใช้วัสดุที่นำมาเป็นตัวนำ ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่ออาจเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรืออาจใช้สายตัวนำที่มีคุณลักษณะเฉพาะที่เป็น Low Thermal EMF ในบางครั้งวัสดุที่ใช้เชื่อมต่อมักเป็นคนละชนิดและสายตัวนำประเภท Low Thermal EMF ก็มักจะหายากและมีราคาสูง ดังนั้นจึงมีวิธีการกำจัด Thermal EMF ได้ 3 วิธี คือ

1.วิธีการกลับขั้วกระแส (Current Reversal Method) (ที่มา: บทความจากวารสาร Metrology Info สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ)

วิธีการนี้ Thermal EMF สามารถกำจัดได้โดยการวัด 2 ครั้ง ด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางตรงกันข้าม สำหรับการใช่วิธีดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับสภาวะที่แรงเคลื่อน EMF มีค่าคงที่ ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 วิธีการกลับขั้วกระแส

(แบบ Positive Polarity และแบบ Negative Polarity ตามลำดับ)

จากภาพที่ 2.20 แบบ Positive Polarity (ซ้าย) จะพบว่าแหล่งจ่ายกระแสป้อนกระแสต้านบวกให้วงจรแรงเคลื่อนมิเตอร์มีค่าเป็น

$$V_{M+} = V_{EMF} + IR \quad (2-46)$$

และเมื่อป้อนกระแสทางด้านลบ (Negative Polarity ขวา) แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำมีค่าเป็น

$$V_{M-} = V_{EMF} - IR \quad (2-47)$$

เมื่อนำทั้งสองสมการมารวมกัน จะสามารถกำจัด Thermal EMF ได้ดังนี้

$$V_M = \frac{V_{M+} - V_{M-}}{2} \quad (2-48)$$

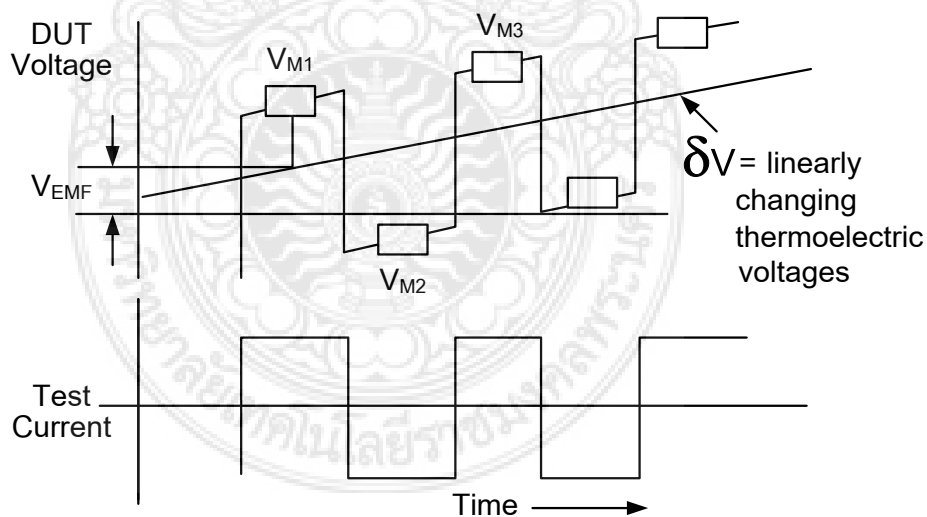
$$V_M = IR \quad (2-49)$$

2. วิธีการคำนวณข้อมูล (Delta Method) (ที่มา: บทความจากวารสาร

Metrology Info สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ)

ในกรณีที่แรงเคลื่อนมีการเปลี่ยนแปลงควรใช้วิธีการกำจัดแบบ Delta Method ดัง

ภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 วิธีการคำนวณข้อมูล

จากรูปที่ 2.21 แสดงถึงแรงเคลื่อนที่ตกคร่อมความต้านทานที่วัดได้ในฟังก์ชันของเวลาที่จ่ายกระแสสลับชั่ว แรงเคลื่อนที่วัด (V_{M1} , V_{M2} , V_{M3} , etc.) จะอยู่ในแต่ละช่วงเวลาของชั่วที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในแต่ละแรงเคลื่อนที่วัดจะรวมถึง Offset ของแรงเคลื่อน EMF ที่คงที่ (V_{EMF}) และ Offset ของแรงเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลง (δV) ซึ่งการเลื่อนตัวของแรงเคลื่อนนี้จะประเมินในลักษณะเชิงเส้นเมื่อเทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$V_{M1} = V_1 + V_{EMF} \quad (2-50)$$

$$V_{M2} = V_2 + V_{EMF} + \delta V \quad (2-51)$$

$$V_{M3} = V_3 + V_{EMF} + \delta V \quad (2-52)$$

เมื่อ V_1 , V_2 , และ V_3 = แรงเคลื่อนตกคร่อม DUT

การกำจัดแรงเคลื่อน EMF ทั้งคู่สามารถพิจารณาการคำนวณโดยใช้ผลการวัดทั้ง 3 ค่า ดังต่อไปนี้

$$V_A = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} \quad (2-53)$$

$$V_A = \frac{(V_1 + V_{EMF}) - (V_2 + V_{EMF} + \delta V)}{2} \quad (2-54)$$

$$V_A = \frac{(V_1 - V_2)}{2} - \frac{\delta V}{2} \quad (2-55)$$

กำหนดให้ V_A เป็นเทอมของครึ่งหนึ่งของผลต่างการวัดแรงเคลื่อน 2 ค่าแรก และ V_B เป็นผลต่างของครึ่งหนึ่งของแรงเคลื่อนที่วัดค่า 2 และค่าที่ 3 จะได้ว่า

$$V_B = \frac{V_{M3} - V_{M2}}{2} \quad (2-56)$$

$$= \frac{(V_3 + V_{EMF} + 2\delta V) - (V_2 + V_{EMF} + \delta V)}{2} \quad (2-57)$$

$$= \frac{(V_3 - V_2)}{2} - \frac{\delta V}{2} \quad (2-58)$$

โดย V_A และ V_B เป็นผลจากการเคลื่อนตัวของแรงเคลื่อน EMF แต่ V_A และ V_B มีขนาดเท่ากันและมีทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นแรงเคลื่อนที่อ่านจะเป็นค่าเฉลี่ยของ V_A และ V_B โดยคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$V_{Final} = \frac{V_A - V_B}{2} = \frac{V_1 + V_3 + 2V_2}{4} \quad (2-58)$$

ซึ่งจะพบว่าแรงเคลื่อน EMF ทั้งสองถูกกำจัดออกไปจากระบบการวัดแล้ว ในการใช้วิธีนี้ แต่จะจุดข้อมูลจะเป็นค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวของค่าแรงเคลื่อนที่เวลาต่างๆ ดังนั้นผลการวัดค่าเฉลี่ยจะมีการรบกวนต่ำกว่าการใช้ Current Reversal Method เมื่อข้อมูลที่วัดเป็นช่วงระยะเวลาเท่ากัน

3. วิธีชดเชยความต้านทานออฟเซต (Offset Compensated Ohms Method)

(ที่มา: บทความจากวารสาร Metrology Info สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ)

จากภาพที่ 2.22 เมื่อกระแส ON แรงเคลื่อนที่มิเตอร์มีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนตกคร่อมความต้านทานที่วัดได้และ Thermal EMF จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{M1} = V_{EMF} + IR \quad (2-60)$$

และเมื่อกระแส OFF จะได้แรงเคลื่อนมิเตอร์เป็น

$$V_{M2} = V_{EMF} \quad (2-61)$$

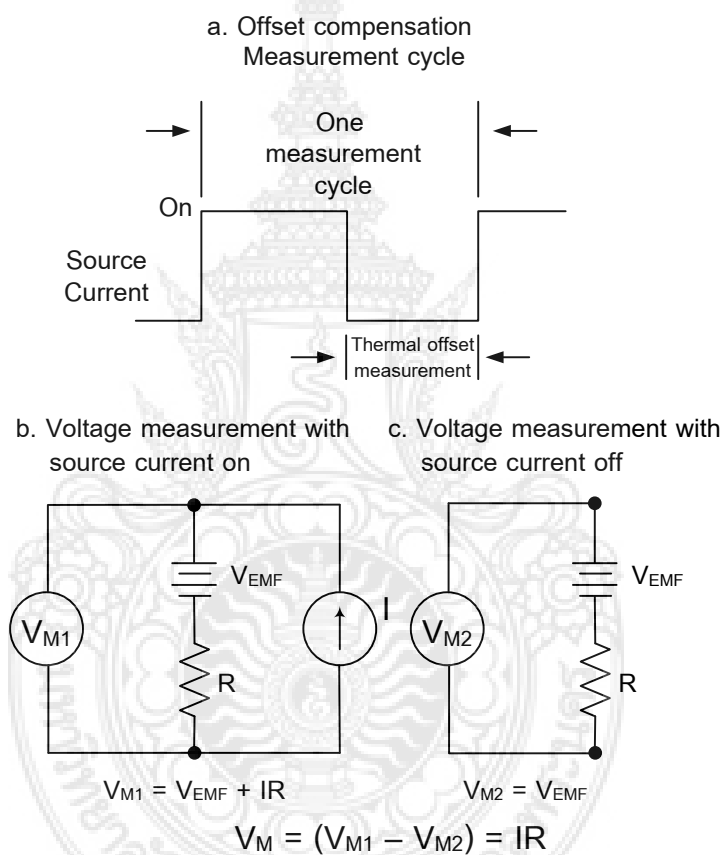
เมื่อทำการรวมแรงเคลื่อนในหนึ่งรอบการวัด สามารถคำนวณหาแรงเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$V_M = V_{M1} - V_{M2} \quad (2-62)$$

$$= (V_{EMF} + IR) - V_{EMF} \quad (2-63)$$

$$= IR \quad (2-64)$$

ดังนั้นจะพบว่าแรงเคลื่อนจาก Thermal EMF จะสามารถถูกกำจัดออกไปได้จาก
กระบวนการวัด



ภาพที่ 2.22 วิธีชดเชยความต้านทานออฟเซต

(Offset Compensated Ohms Method)

2.9.3 ความร้อนจากอุปกรณ์ (Device Heating)

ความร้อนของอุปกรณ์จะเกิดขึ้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน ซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในกรณีการวัดความต้านทานต่ำ เนื่องจากการวัดความต้านทานต่ำนิยมใช้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าตัวต้านทาน การกระจายพลังงานอุปกรณ์สามารถหาได้จากสูตร

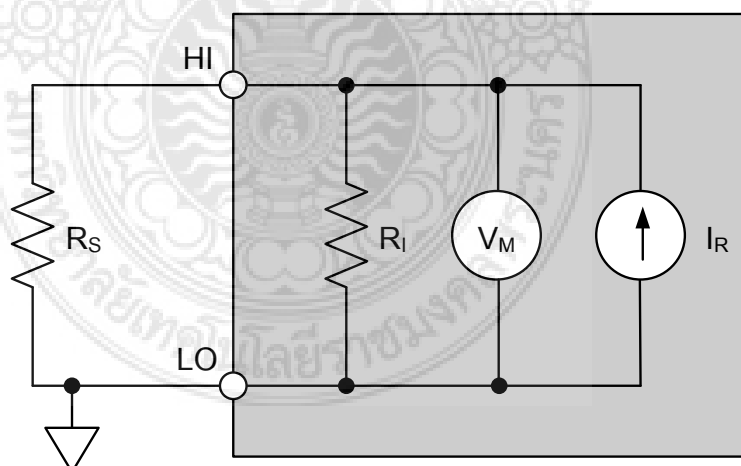
$$P = I^2 R \quad (2-65)$$

จากความสัมพันธ์ตามสูตร พบว่าค่าพลังงานที่กระจายอยู่ในอุปกรณ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม I^2 ดังนั้นมีเพียงวิธีเดียวที่จะช่วยให้อุปกรณ์ทำความร้อนได้รับผลกระทบน้อยที่สุดคือต้องมีกระแสไฟฟ้าให้น้อยที่สุด ในขณะที่รักษาแรงดันไฟฟ้าในอุปกรณ์เอาไว้ ถ้ากระแสไฟฟ้าไม่ลดลง จะต้องทำให้ช่องทางการจ่ายกระแสไฟฟ้าแคบลงและเร็วในการตอบสนองของโวลต์มิเตอร์

โดยส่วนมากไมโครโอห์มมิเตอร์จะไม่มีข้อจำกัดสำหรับการตั้งค่ากระแสไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากช่วงที่กำหนด ในกรณีวิธีการอื่นๆ ต้องใช้การลดความร้อนในอุปกรณ์ ซึ่งวิธีการอย่างง่ายแต่มีประสิทธิภาพคือการใช้เครื่องมือที่มีกลไกการวัดแบบ one-short trigger ในขณะที่อยู่ในโหมดนี้เครื่องจะสามารถใช้งานได้เพียงครั้งเดียว โดยจะส่งกระแสไฟฟ้าแบบช่วงสั้นๆ ไปยังอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบ Device Under Test (DUT) ในระหว่างการวัด จะทำให้เกิดค่า error ที่น้อยที่สุดในอุปกรณ์ทำความร้อน

2.9.4 ผลกระทบจากโหลด (Loading Effect)

ผลกระทบจากโหลดมักเกิดขึ้นในกรณีที่โหลดที่นำมาวัดไม่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานภายในของอุปกรณ์การวัด เช่น ในกรณีการวัดความต้านทานดังภาพที่ 2.23



Electrometer Ohmmeter

Measuring R_s

$$\text{Indicating } R_M = \frac{V_M}{I_R} = R_s \left(\frac{R_i}{R_s + R_i} \right)$$

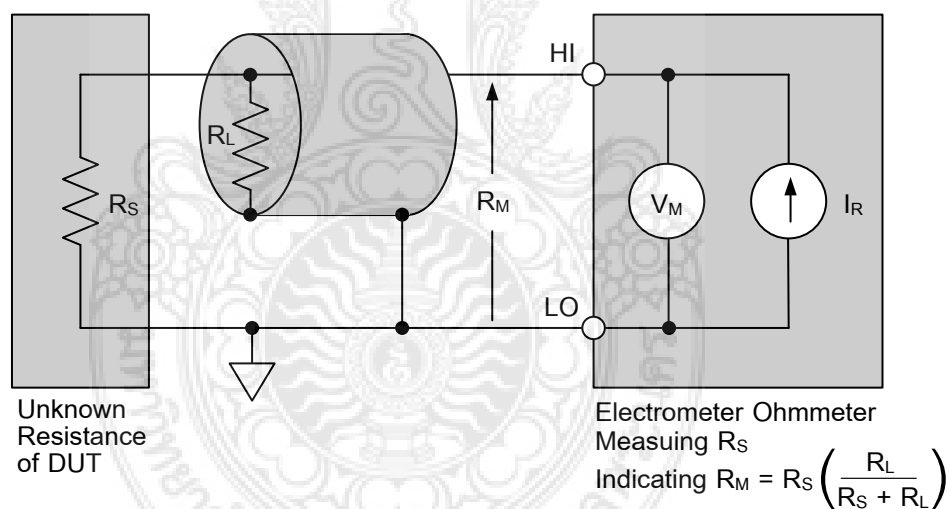
ภาพที่ 2.23 การวัดความต้านทานที่มีผลกระทบจากโหลด

จากภาพที่ 2.23 เมื่อทำการวัดความต้านทานที่ย่านวัดสูงๆ อาจทำให้เกิดผลกระทบจากโหลด (Loading Effect) เนื่องจากในขณะที่ทำการวัดความต้านทาน เครื่องวัดจะต้องจ่ายกระแส (I_R) ไปยังชุดความต้านทาน (R_S) ถ้าชุดความต้านทานที่ทำการวัด มีค่าความต้านทานสูงแต่เครื่องวัดมีค่าความต้านทาน (R_L) เท่ากับหรือน้อยกว่า จะทำให้กระแส (I_R) จากเครื่องวัดไหลไปยัง (R_L) มากกว่า (R_S) ทำให้มีการวัดค่าความต้านทานที่

2.9.5 การป้องกันการรั่วไหลของความต้านทาน (Guarding)

การวัดค่าความต้านทานและกระแสไฟฟ้าที่มีแรงดันสูง จะใช้วิธีการป้องกันความต้านทานที่เกิดขึ้น ณ จุดเชื่อมต่อ ซึ่งจะสามารถช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการรั่วไหลของความต้านทาน และทำให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาการติดตั้งการวัดค่าความต้านทานที่ไม่ได้ทำการป้องกัน สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.24



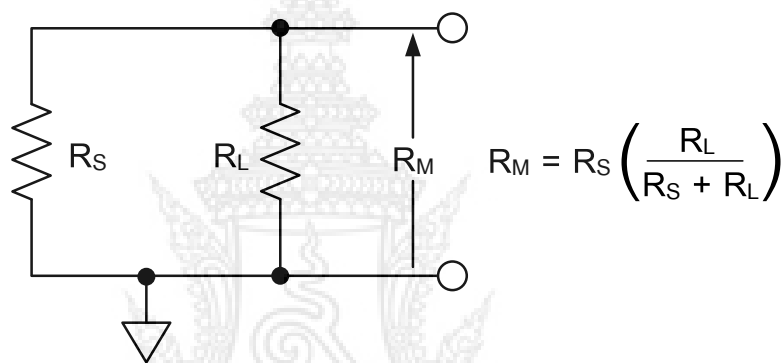
ภาพที่ 2.24 การแสดงการรั่วไหลของจากรัดตั้ง

จากภาพที่ 2.24 พบว่าเมื่ออิเล็กทรอนิกส์หรือโอห์มมิเตอร์ทำการปล่อยกระแสไฟฟ้า (I_R) ผ่านตัวต้านทานที่ไม่ทราบค่า (R_S) และทำการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง DUT ได้ค่า V_M และสมมติมิเตอร์มีความต้านทานที่ไม่ทราบค่า เราจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานได้จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law):

$$R_M = \frac{V_M}{I_R} \tag{2-66}$$

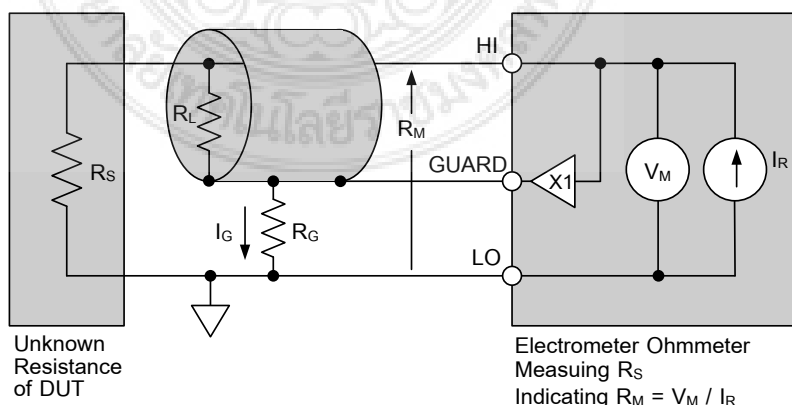
ถ้ากำหนดให้ความต้านทานที่รั่วไหลในสายไฟเป็น R_L ขนานกับตัวต้านทานที่ไม่ทราบค่า R_S จะทำให้ความต้านทานที่วัดได้ R_M มีค่าลดลง สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.25 ดังนั้นค่า R_M คำนวณได้จากสูตร

$$R_M = \left(\frac{R_L}{R_S + R_L} \right) \tag{2-67}$$



ภาพที่ 2.25 วงจรการรั่วไหลของกระแสจากการ์ดติดตั้ง

จากผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถป้องกันได้โดยการสร้างการ์ดป้องกันให้สายไฟด้วยตัวแอมพลีไฟเออร์ ดังภาพที่ 2.26



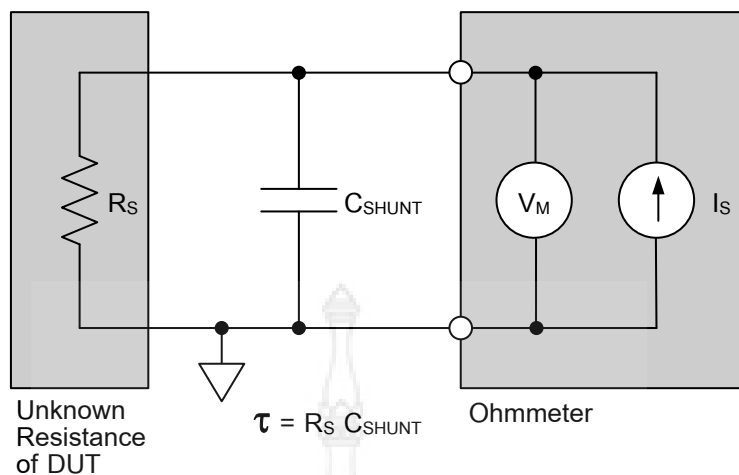
ภาพที่ 2.26 การ์ดติดตั้งแบบมีแอมพลีไฟเออร์

จากภาพ เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม RL มีค่าเป็นศูนย์ กระแสไฟฟ้าทดสอบทั้งหมดจะไหลผ่าน IR ตัวต้านทาน RS และความต้านทานจากแหล่งจ่ายสามารถคำนวณค่าได้อย่างถูกต้อง กระแสไฟฟ้าที่รั่วไหล IG จะไหลผ่านระหว่างสายไปยังกราวด์ โดยผ่าน RG แต่เมื่อทำการติดตั้งตัว แอมพลิไฟเออร์กระแสไฟฟ้าจะวิ่งผ่านแอมพลิไฟเออร์ที่มีความต้านทานต่ำมากกว่ากระแสไฟฟ้า จากแหล่งจ่ายแทน

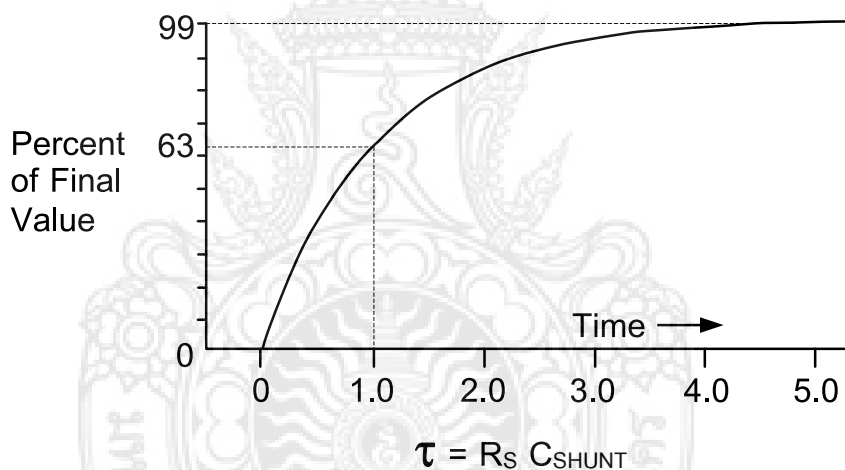
2.9.6 เวลาการวัด (Setting Time)

เวลาการวัดของระบบวงจรไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญเมื่อทำการวัดความต้านทานสูง เวลาการวัดของการวัดได้รับอิทธิพลจาก Shunt Capacitance ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อของสายเคเบิ้ล การ ยึดและ DUT (Device Under Test) ดังแสดงในภาพที่ 2-27 กำหนดให้ Shunt capacitance เป็น CSHUNT ต้องถูกชาร์จด้วยแรงดันจากกระแสไฟฟ้า IS ช่วงเวลาที่ต้องการใช้ในการชาร์จของตัว เก็บประจุสามารถหาค่าได้จากช่วงเวลาคงที่ของ RC (1 ช่วงเวลาคงที่, $\tau = R_s C_{SHUNT}$) แสดง ความสัมพันธ์เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังภาพที่ 2-28 จากกราฟจะเห็นว่า จะต้องรอประมาณ 4-5 วินาที จึงจะได้ค่าที่คงที่ เมื่อการวัดมีความต้านทานที่สูง เวลาการวัดยังต้องเพิ่มเป็นช่วงนาที่ ขึ้นอยู่กับจำนวนของ Shunt capacitance ในระบบ ยกตัวอย่างเช่น ถ้า CSHUNT มีค่าเพียง 10pF และความต้านทานมีค่าเป็น $1\text{ T}\Omega$ จะได้ค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที ดังนั้นเมื่อเวลา ผ่านไป 50 วินาทีจะต้องอ่านค่าได้ 1% ของค่าสุดท้าย

ในทำนองเดียวกันค่าต่ำสุดของเวลาเมื่อทำการวัดค่าความต้านทานสูง จะต้องรักษา Shunt Capacitance ในระบบให้มีค่าที่น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แม้ว่าการป้องกันอาจช่วยลด การเวลาลงได้ สุดท้ายแรงดันจากแหล่งจ่าย และวิธีวัดกระแสไฟฟ้าของการวัดความต้านทานเป็น วิธีที่เร็วที่สุดที่ช่วยลดค่าเวลา



ภาพที่ 2.27 ผลของการเกิดช่วงเวลาการวัด



ภาพที่ 2.28 แสดงถึงระยะเวลาการวัดที่เกิดขึ้น

2.10 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยบทนี้ ได้ทำการศึกษาค้นคว้าจากบทความหรืองานวิจัยอื่นๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งมีรายการอ้างอิงดังนี้

กองศักดิ์ ทองบุญ หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามาตรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 งานศึกษาวิจัยพัฒนาวิธีการวัดความต้านทาน ที่สามารถสอบเทียบความต้านทานสูงในระดับเทระโอห์ม โดยใช้เทคนิคการวัดแบบวีดสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ที่พัฒนาขึ้น

ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

คู่มือการแสดงผลของความไม่แน่นอนในการวัด โดยกำหนดกฎทั่วไปสำหรับการประเมินและแสดงความไม่แน่นอนในการวัดว่าสามารถปฏิบัติตามในระดับต่าง ๆ ของความถูกต้องและในหลายสาขาจากการปฏิบัติจนถึงพื้นฐานของการวิจัย

Low Level Measurement, Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements

การวัดย่านความถี่ต่ำมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นคู่มือการปฏิบัติที่จะทำให้มีความแม่นยำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงระดับต่ำจะมีประโยชน์ทั้งเป็นข้อมูลอ้างอิงในคู่มือและช่วยในการทำความเข้าใจในการวัดระดับต่ำพร้อมข้อสังเกตในห้องปฏิบัติการ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ (Decade Resistance Box) โดยเริ่มอธิบายตั้งแต่ขั้นตอนการเลือกตัวต้านทานที่นำมาใช้ทำชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้มีค่าตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 100 เมกะโอห์ม และทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลการวัดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้โดยใช้ดิจิทัลมัลติมิเตอร์รุ่น Agilent 3458A เป็นตัวอ้างอิงในการทดสอบการวัด เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้กับชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ที่สร้างขึ้น รวมถึงศึกษารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบการวัดและการนำกระบวนการทางสถิติมาใช้ในการประเมินหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัด เพื่อหาค่าความผิดพลาดของชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการวัดในลำดับถัดไป

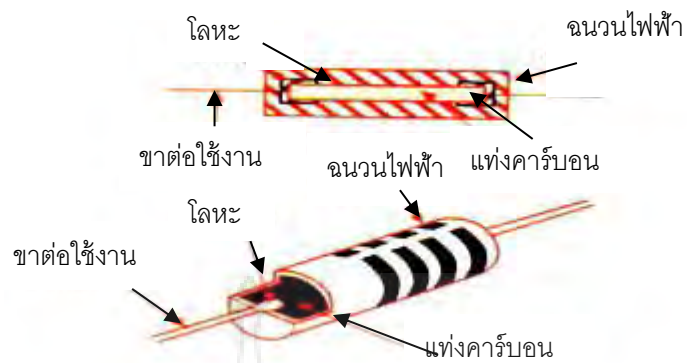
3.2 การเลือกชนิดของตัวต้านทานในการทำตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้

(ที่มา: [Online] Available: <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-02.html>)

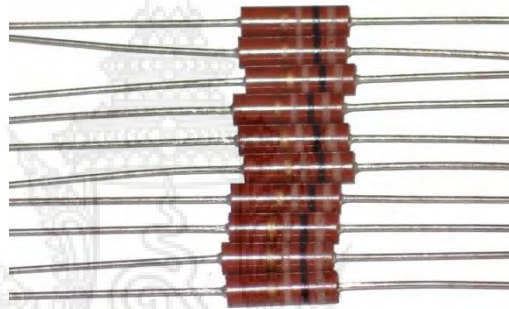
ปัจจุบันมีการนำความต้านทานหลากหลายชนิดไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น การนำไปใช้เป็นตัวมาตรฐานการตรวจวัด เป็นต้น การเลือกใช้ตัวต้านทานแต่ละประเภทจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานนั้นๆ ด้วย โดยประเภทของตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ที่นิยมนำมาใช้ในวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปมีดังนี้

1. ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition Resistor)

เป็นตัวต้านทานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีราคาถูก โครงสร้างทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานที่เกิดจากการผสมกันระหว่างผงคาร์บอนและผงของฉนวน อัตราส่วนผสมของวัสดุทั้งสองชนิดนี้จะทำให้ค่าความต้านทานมีค่ามากน้อยเปลี่ยนแปลงได้ตามต้องการ บริเวณปลายทั้งสองด้านของตัวต้านทานต่อด้วยลวดตัวนำ บริเวณด้านนอกของตัวต้านทานจะฉาบด้วยฉนวน มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก



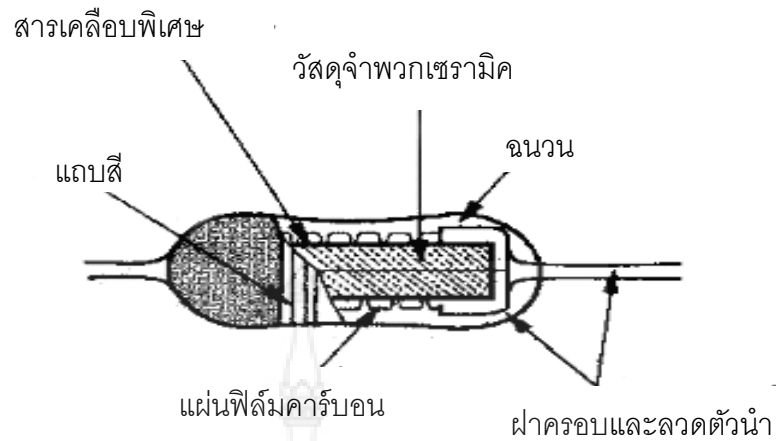
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม

2. ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน (Carbon Film Resistor)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอน เป็นตัวต้านทานแบบค่าคงที่โดยการฉาบผงคาร์บอนลงบนแท่งเซรามิคซึ่งเป็นฉนวน หลังจากที่ทำกรเคลือบแล้วจะตัดฟิล์มเป็นวงแหวนเหมือนเกลียวน็อต ในกรณีที่เคลือบฟิล์มคาร์บอนในปริมาณน้อยจะทำให้ได้ค่าความต้านทานสูง แต่ถ้าเพิ่มฟิล์มคาร์บอนในปริมาณมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าความต้านทานต่ำ ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะมีค่าความผิดพลาด $\pm 5\%$ ถึง $\pm 20\%$ ทนกำลังวัตต์ตั้งแต่ 1/8 วัตต์ ถึง 2 วัตต์ มีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 โอห์มถึง 100 เมกะโอห์ม



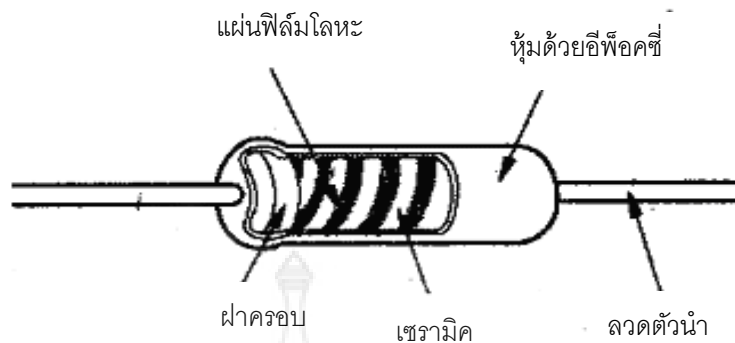
ภาพที่ 3.3 โครงสร้างตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างตัวต้านทานฟิล์มคาร์บอน

3. ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor)

ตัวต้านทานแบบฟิล์มโลหะทำมาจากแผ่นฟิล์มบางของแก้วและโลหะหลอมเข้าด้วยกัน แล้วนำไปเคลือบเซรามิค ทำเป็นรูปทรงกระบอก แล้วตัดแผ่นฟิล์มที่เคลือบออกให้ได้ค่าความต้านทานตามที่ต้องการ ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการเคลือบด้วยสารอีพ็อกซี (Epoxy) จึงทำให้ตัวต้านทานชนิดนี้มีค่าความผิดพลาด $\pm 0.1\%$ ถึงประมาณ $\pm 2\%$ ซึ่งถือว่ามีค่าความผิดพลาดน้อยมาก นอกจากนี้ยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากภายนอกได้ดี และสัญญาณรบกวนน้อยเมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่น ๆ



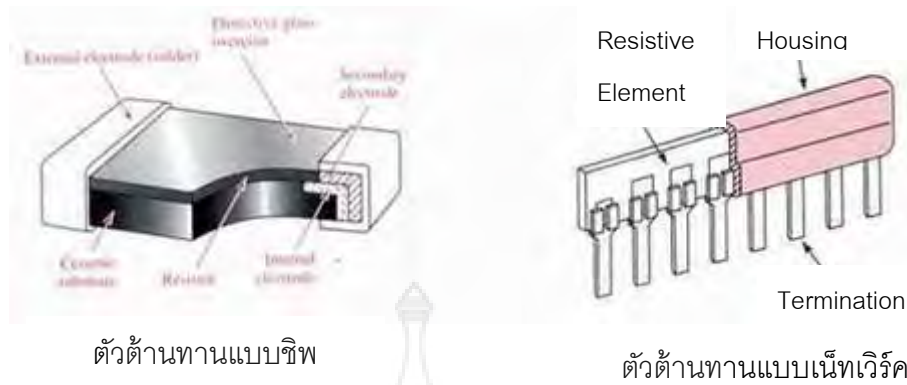
ภาพที่ 3.5 โครงสร้างตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ



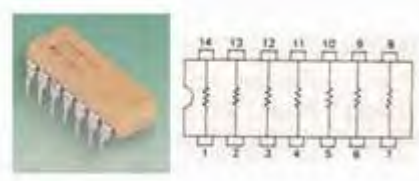
ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างตัวต้านทานฟิล์มโลหะ

4. ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา (Thick Film Network Resistor)

โครงสร้างของตัวต้านทานแบบนี้ทำมาจากแผ่นฟิล์มหนา มีรูปแบบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน ดังภาพที่ 3.7 แสดงตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนาประเภทไร้ขา (Chip Resistor) ตัวต้านทานชนิดนี้ต้องใช้เทคโนโลยี SMT (Surface Mount Technology) ในการผลิต มีอัตราทนกำลังประมาณ 0.063 วัตต์ ถึง 500 วัตต์ และมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$ ถึง $\pm 5\%$



ตัวต้านทานแบบไร้ขา

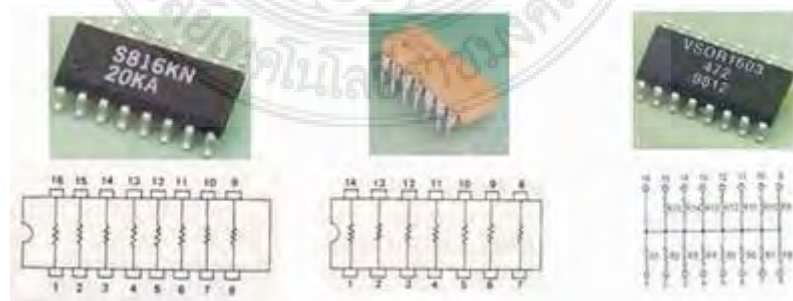


ตัวต้านทานแบบดิฟไอซี

ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา

5. ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มบาง (Thin Film Resistor)

โครงสร้างของตัวต้านทานชนิดนี้ทำมาจากแผ่นฟิล์มบาง มีลักษณะรูปร่างเหมือนกับตัว IC (Integrate Circuit) ใช้เทคโนโลยี SMT (Surface Mount Technology) ในการผลิตเช่นเดียวกับตัวต้านทานแบบแผ่นฟิล์มหนา โดยส่วนใหญ่จะมีขาทั้งหมด 16 ขา การใช้งานต้องบัดกรีเข้ากับแผ่นลายวงจร อัตราทนกำลัง 50 มิลลิวัตต์ มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.1\%$ และอัตราทนกำลัง 100 มิลลิวัตต์ จะมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$ ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 50 VDC



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มบาง

6. ตัวต้านทานชนิดไวร์วาวด์ (Wire Wound Resistor)

โครงสร้างของตัวต้านทานชนิดนี้เกิดจากการใช้ลวดพันลงบนเส้นลวดแกนเซรามิก หลังจากนั้นต่อลวดตัวนำด้านหัวและท้ายของเส้นลวดที่พัน ส่วนค่าความต้านทานขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเป็นลวดตัวนำ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเซรามิกและความยาวของลวดตัวนำ ชั้นตอนสุดท้ายจะเคลือบด้วยสารประเภทเซรามิกบริเวณรอบนอกอีกครั้งหนึ่ง ค่าความต้านทานของตัวต้านทานแบบนี้จะมีค่าต่ำเพราะต้องการให้มีกระแสไหลได้สูง ทนความร้อนได้ดี สามารถระบายความร้อนโดยใช้อากาศถ่ายเท



ภาพที่ 3.9 ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดไวร์วาวด์

7. ตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Resistor)

ตัวต้านทานชนิดนี้มีโครงสร้างตัวต้านทานที่เคลือบด้วยออกไซด์โลหะ ประเภทดีบุกลงบนวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน โดยอัตราส่วนของออกไซด์โลหะ จะเป็นตัวกำหนดค่าความต้านทานให้กับตัวต้านทานชนิดนี้ คุณสมบัติพิเศษสำหรับตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ คือ สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี

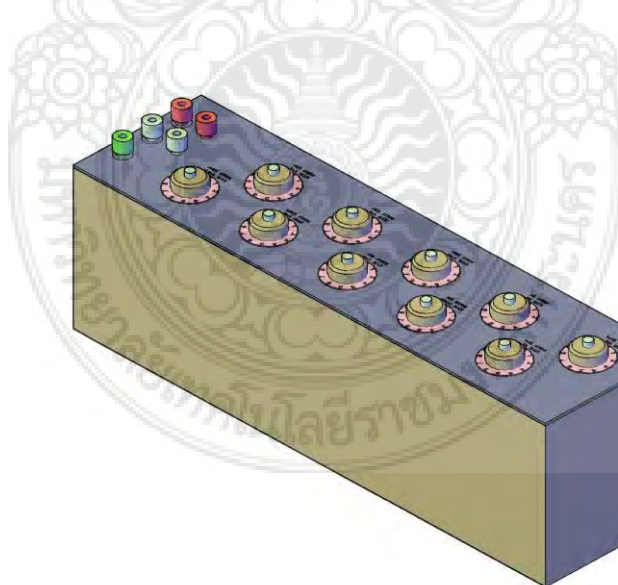


ภาพที่ 3.10 ตัวอย่างตัวต้านทานชนิดออกไซด์ของโลหะ

จากการศึกษาการเลือกตัวต้านทานในบทความวิจัยเรื่อง การศึกษาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานหลายชนิดขนาด 1 กิโลโอห์ม[4] จากบทความวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละชนิดที่ใช้งานทั่วไปและหาสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของตัวต้านทานแต่ละชนิด แล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อนำไปเป็นแนวทางในการเลือกตัวต้านทานไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยศึกษาคุณสมบัติของตัวต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ชนิดต่างๆที่มีขนาดกำลังต่างกันจะเห็นได้ว่าตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) เป็นตัวต้านทานที่มีสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิน้อยที่สุดตัวหนึ่งประกอบกับมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างน้อยจึงทำให้ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะเป็นตัวเลือกในการใช้ในการสร้างกล่องชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ขนาด 0.01 โอห์ม ถึง 100 เมกะโอห์มและหาค่าความผิดพลาดของเครื่องพร้อมทั้งทำการประเมินหาค่าความไม่แน่นอน

3.3 วิธีการสร้างชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้

ชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้เป็นเครื่องมือที่มีค่าความต้านทานหลายค่าอยู่ภายในกล่องโดยเข้าถึงได้โดยผ่านทางสวิตช์ปรับค่าได้เพื่อปรับค่าความต้านทานตามที่ต้องการ โดยทำการสร้างกล่องชุดความต้านทานมาตรฐานและเลือกใช้ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) และสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ย่าน 0.01โอห์ม ถึง 100 เมกะโอห์มดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แสดงชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ (Decade Resistance Box)

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

การสร้างชุดตัวต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้โดยมีจำนวน 10 ชุดปรับค่าได้และใน 1 ชุดปรับค่าได้จะมีความต้านทาน 10 ค่าความต้านทานมีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือที่จำเป็น

- หัวแร้ง
- ตะกั่วหรือโลหะบัดกรีตะกั่ว
- คัตเตอร์
- คีมลอกสายไฟและคีมตัดสายไฟ

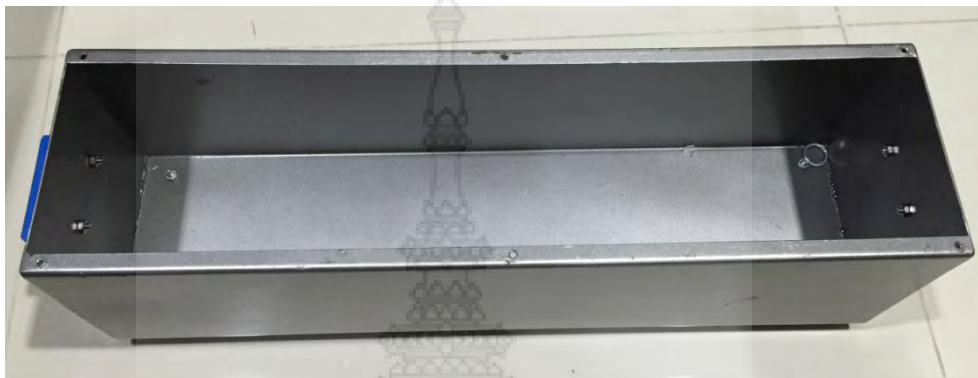
2. อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการประกอบ

- | | |
|-------------------------------------------------|---------------|
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 0.01 โอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 0.1 โอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 1 โอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 10 โอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 100 โอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 1 กิโลโอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 10 กิโลโอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 100 กิโลโอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 1 เมกะโอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะขนาด 10 เมกะโอห์ม | จำนวน 10 ตัว |
| - กล่องเหล็กขนาด 130 mm. x 480 mm. x 150 mm. | จำนวน 1 กล่อง |
| - แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 130mm. x480mm. x2mm. | จำนวน 1 แผ่น |
| - เต้ารับสีแดง | จำนวน 2 ตัว |
| - เต้ารับสีดำ | จำนวน 2 ตัว |
| - เต้ารับสีเขียว | จำนวน 1 ตัว |
| - ปุ่มปรับระดับ | จำนวน 10 ตัว |
| - สายไฟ | จำนวน 1 ม้วน |

3. ส่วนประกอบ

1. กล่องเหล็ก

ทำการออกแบบและสร้างกล่องเหล็กหนา 2mm. แบบเปิดขนาดกว้าง 130 mm. ยาว 480 mm. สูง 150 mm. เป็นตัวหุ้มป้องกันเพื่อไม่ให้ตัวด้านทานภายในได้รับการกระแทกเสียหาย



ภาพที่ 3.12 แสดงกล่องเหล็กหนาแบบเปิดกว้าง

2. แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหนา

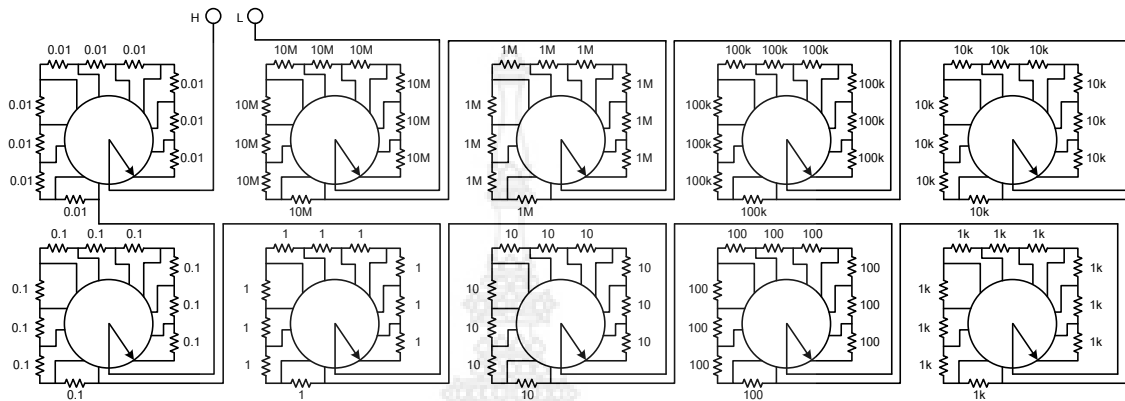
เลือกแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 130 mm. ยาว 480 mm. หนา 2 mm. เพื่อเป็นแผ่นยึดกับตัวป้อนปรับระดับของตัวด้านทานพร้อมเจาะรูเพื่อใส่ป้อนปรับระดับและทำการพื้นที่สีลงที่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อบอกขนาดของตัวด้านทานในแต่ละป้อนปรับระดับ ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แสดงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมพร้อมเจาะรู

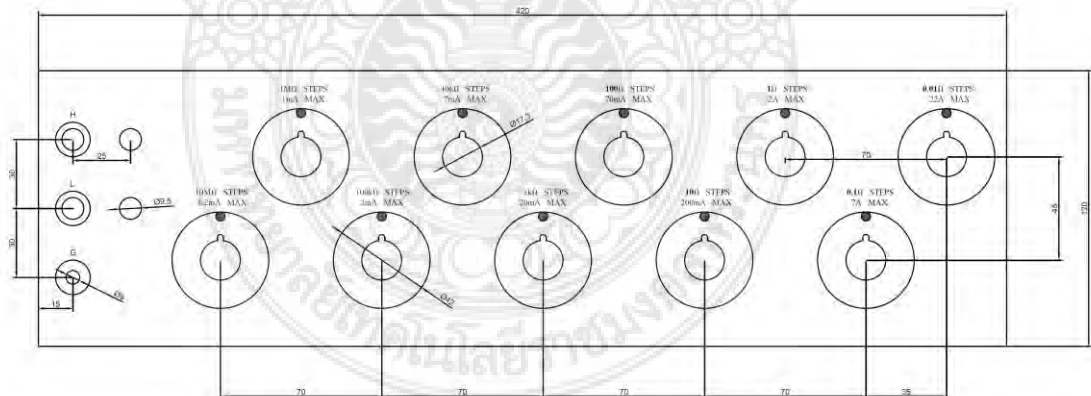
3.3.2 ขั้นตอนในการสร้างชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้

1. ออกแบบวงจรชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ตั้งแต่ความต้านทานขนาด 0.01 โอห์มจนถึง 100 เมกะโอห์ม ดังภาพที่ 3.14

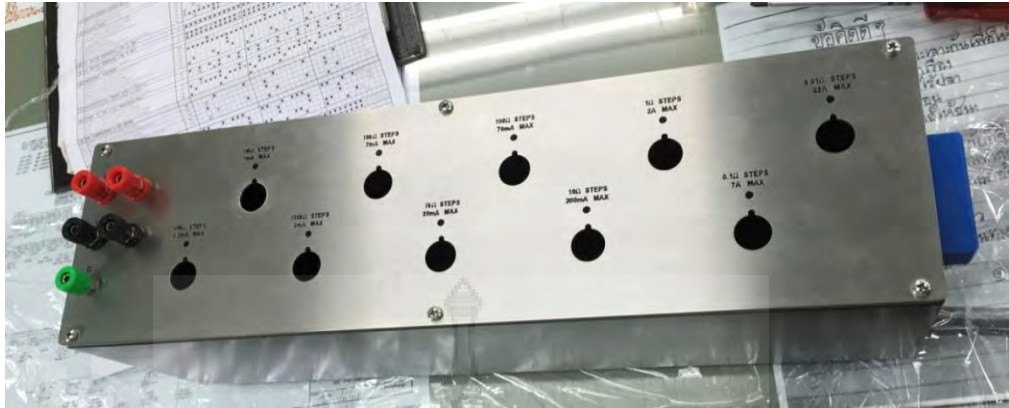


ภาพที่ 3.14 แสดงวงจรการต่อกล่อง

2. ทำการเจาะรูทั้ง 10 รูเพื่อรองรับการใช้ปุ่มปรับค่าได้ทั้ง 10 ชุดตามแบบที่ได้ ออกแบบไว้แล้วตามภาพที่ 3.15 และภาพที่ 3.16

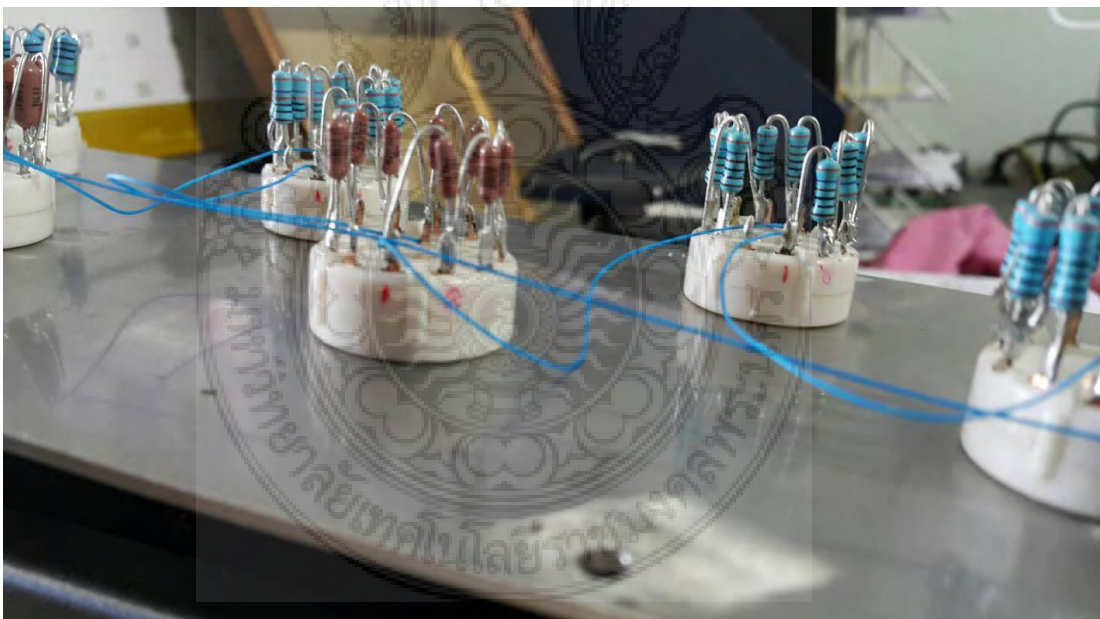


ภาพที่ 3.15 แสดงแบบขนาดการเจาะรู

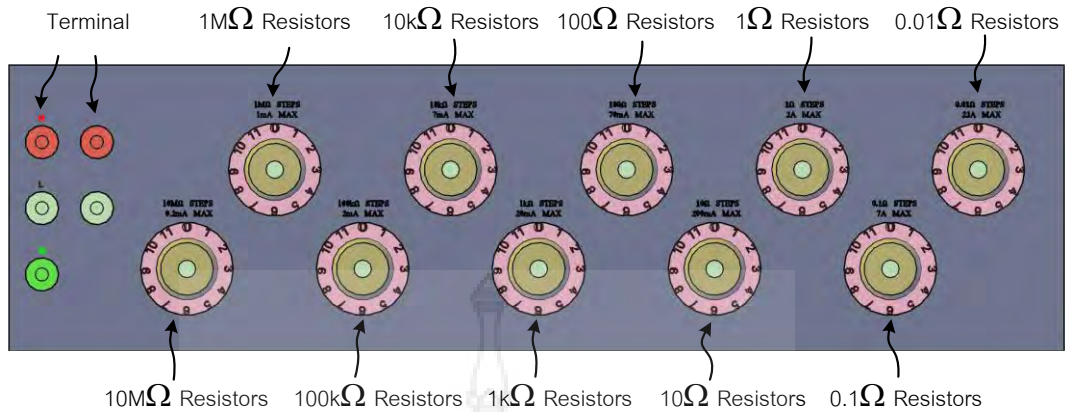


ภาพที่ 3.16 แสดงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบปุ่มปรับ

3. เริ่มการบัดกรีตัวต้านทานขนาดโอห์มที่เท่ากันจำนวน 10 ตัวเข้ากับชุดปุ่มปรับระดับ โดยจะบัดกรีเป็นแบบอนุกรม (Series) และทำทั้งหมดจำนวน 10 ชุดปุ่มปรับระดับ โดยเรียงระดับ จาก 0.01 โอห์ม จนถึง 100 เมกะโอห์ม ตามลำดับดังภาพที่ 3.17 และภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.17 แสดงการต่อบัดกรีตัวต้านทาน



ภาพที่ 3.18 แสดงแบบปุ่มปรับแต่ละตัวด้านทาน

4. หลังจากการทำบัดกรีชุดตัวต้านทานเข้ากับปุ่มปรับระดับ จากนั้นทำการเจาะรูเพื่อยึดเต้ารับทั้ง 5 ตัวเข้ากับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม โดยจะทำการเป็นแบบวัดได้ทั้งประเภท 2 สายและประเภท 4 สายพร้อมทั้งมีสายกราวด์ (เต้ารับสีเขียว) และต่อสายไฟแบบอนุกรมระหว่างเต้ารับและชุดตัวต้านทานปรับค่าได้ทั้ง 10 ชุด ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 แสดงขั้วต่อเต้ารับ

5. เมื่อทำการติดตั้งยัดชุดปั๊มปรับและเด้ารับเข้ากับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเรียบร้อยแล้ว จากนั้นต่อลูกบิดเข้ากับปั๊มปรับระดับทั้ง 10 ชุด เป็นขั้นตอนสุดท้าย ก็จะได้กล่องมาตรฐานตัว ด้านทานปรับได้ ดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 แสดงการประกอบลูกบิดที่ปั๊มปรับ

3.4 อุปกรณ์การวัดและวิธีการวัด

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

1. มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Multimeter : DMM)

ใช้มัลติมิเตอร์แบบดิจิทัลยี่ห้อ Agilent Model 3458A ในการวัดซึ่งย่านวัดความต้านทานของมัลติมิเตอร์จะสามารถวัดค่าได้ตั้งแต่ 10โอห์ม – 1จิกะโอห์ม



ภาพที่ 3.21 มัลติมิเตอร์ดิจิทัลยี่ห้อ Agilent Model 3458A

2. สายไฟ Low Thermal EMF

ใช้สายไฟแบบ Low Thermal EMF ในการทำการวัดซึ่งจะทำให้มีค่าความต้านทานที่ตกคร่อมของสายต่ำมากเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากสาย

3. กล้องชุดความต้านทานมาตรฐานปรับปรับค่าได้

กล้องชุดความต้านทานมาตรฐานปรับปรับค่าได้โดยมีย่านวัดตั้งแต่ขนาด

0.01 โอห์ม-100 เมกะโอห์ม โดยและสามารถทนกระแสสูงสุด

ความต้านทานชุดปรับที่ 1 ขนาด 0.01 โอห์ม-0.1 โอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 22 A
ความต้านทานชุดปรับที่ 2 ขนาด 0.1 โอห์ม-1 โอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 7 A
ความต้านทานชุดปรับที่ 3 ขนาด 1 โอห์ม-10 โอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 2 A
ความต้านทานชุดปรับที่ 4 ขนาด 10 โอห์ม-100 โอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 0.2 A
ความต้านทานชุดปรับที่ 5 ขนาด 100 โอห์ม-1 กิโลโอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 7 mA
ความต้านทานชุดปรับที่ 6 ขนาด 1 กิโลโอห์ม-10 กิโลโอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 20 mA
ความต้านทานชุดปรับที่ 7 ขนาด 10 กิโลโอห์ม-100 กิโลโอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 7 mA
ความต้านทานชุดปรับที่ 8 ขนาด 100 กิโลโอห์ม-1 เมกะโอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 2 mA
ความต้านทานชุดปรับที่ 9 ขนาด 1 เมกะโอห์ม-10 เมกะโอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 1 mA
ความต้านทานชุดปรับที่ 10 ขนาด 10 เมกะโอห์ม-100 เมกะโอห์ม	ทนกระแสได้สูงสุด 0.2 mA

3.5 วิธีการวัดและค่าผิดพลาด (Measurement Method and Errors)

วิธีการวัดในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะใช้วิธีการวัดโดยตรงที่สภาวะอุณหภูมิห้อง 23 องศาเซลเซียส ± 2 องศาเซลเซียสและความชื้น 50 เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ± 10 เปอร์เซ็นต์โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 การวัดโดยตรง (Direct Measurements)

การวัดโดยตรงเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมาก โดยนำเครื่องมือวัดตั้งย่านให้ถูกต้องเหมาะสมกับชนิดและปริมาณที่ต้องการวัด จากนั้นทำการต่อเครื่องวัดตรงเข้ากับปริมาณที่ต้องการจะวัดและอ่านค่าที่แสดงผลทางหน้าจอของเครื่องวัด วิธีการวัดโดยตรงสะดวกในการวัดและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งข้อจำกัดหรือขีดจำกัดของวิธีการวัดโดยตรงนี้อยู่ที่ค่าความถูกต้องและความผิดพลาดของระบบ เช่น การสูญเสีย (Losses) ผลกระทบจากโหลด (Loading Effect) เป็นต้นสามารถหลีกเลี่ยงและลดทอนได้

3.5.2 วิธีการวัดขั้วต่อแต่ละจุด

สำหรับในส่วนของการวัดขั้วต่อ หากขั้วต่อไม่มีสิ่งสกปรกและกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ปกติ สิ่งที่มีผลกระทบต่อผลการวัดคือ Thermal EMF ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นตรงจุดเชื่อมต่อของโลหะต่างชนิดกัน ขนาดของแรงเคลื่อนนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาใช้และอุณหภูมิที่จุดเชื่อมต่อ โดยแรงเคลื่อนนี้มีนัยสำคัญเมื่อทำการวัดความต้านทานต่ำ โดยแต่ละจุดเชื่อมต่อและขั้วต่อสามารถก่อให้เกิดแรงเคลื่อน Thermal EMF ได้ วิธีหลีกเลี่ยงเบื้องต้นคือการเลือกใช้วัสดุที่นำมาเป็นตัวนำ ซึ่งใช้ในการเชื่อมต่ออาจเป็นวัสดุชนิดเดียวกันหรืออาจใช้สายตัวนำที่มีคุณลักษณะเฉพาะที่เป็น Low Thermal EMF ในบางครั้งวัสดุที่ใช้เชื่อมต่อกันมักเป็นคนละชนิดและสายตัวนำประเภท Low Thermal EMF ก็มักจะหายากและมีราคาสูง ดังนั้นจึงมีวิธีการกำจัด Thermal EMF ได้ 3 วิธี คือ Current Reversal Method, Delta Method, Offset Compensated Ohms Method สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในหัวข้อ 2.9.2 สำหรับการวัดขั้วต่อของ Decade Resistance Box สามารถทำได้โดยการวัดค่าความต้านทานจุดต่อด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์

3.5.3 วิธีการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย

สำหรับการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย ได้ทำการศึกษาข้อผิดพลาดของผลการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย โดยจะแสดงในหัวข้อที่ 4.1

3.5.4 ผลกระทบจากโหลด

ปกติผลกระทบโหลดจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีความต้านทานที่ต้องการรู้ค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าความต้านทานภายในมิเตอร์ รายละเอียดดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.9.4 สำหรับบพนี้ จะทำการศึกษาผลกระทบโหลดโดยใช้มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายใน 10 เมกะโอห์ม มาวัดค่าความต้านทานในย่าน 1 เมกะโอห์ม ถึง 100 เมกะโอห์ม โดยจะแสดงผลการศึกษาในบทถัดไป

3.5.5 ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม

เมื่อทำการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรมจะทำให้มีค่าความผิดพลาดคลาดเคลื่อน \pm ในแต่ละปุ่มปรับซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อ (Junction) ตัวต้านทาน ค่าความต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะมีค่า $R_t + \Delta_t$ ดังนั้นค่าความผิดพลาดในตัวต้านทานแต่ละตัวที่ต่อกันแบบอนุกรม สามารถคำนวณได้ดังสมการข้างล่างนี้

$$\begin{aligned}
 R_t + \Delta_t = & R_1 + \Delta_1 + R_2 + \Delta_2 + R_3 + \Delta_3 \\
 & + R_4 + \Delta_4 + R_5 + \Delta_5 + R_6 + \Delta_6 \\
 & + R_7 + \Delta_7 + R_8 + \Delta_8 + R_9 + \Delta_9 \\
 & + R_{10} + \Delta_{10}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

เมื่อ

R_t = ความต้านทานมาตรฐานรวม

Δ_t = ค่าความผิดพลาดรวมของการต่ออนุกรม

R_n = ความต้านทานมาตรฐาน n ใดๆ

Δ_n = ค่าความผิดพลาดในตัวต้านทาน n ใดๆ

ซึ่งผลการวัดค่าความต้านทานคลาดเคลื่อนจะกล่าวถึงในบทถัดไป

3.5.6 ความเสถียรของชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ (Stability of Decade Resistance Box)

สำหรับการศึกษาความเสถียรของ Decade Resistance Box ที่สร้างขึ้นนี้ เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในแต่ละช่วงเวลา โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการวัด 5 ครั้ง โดยแต่ละช่วงเวลาในการวัดห่างกัน 3 เดือนต่อครั้ง โดยซึ่งจะหาค่าความเสถียรภาพดังสมการที่ 3.7

$$R_{St} = \frac{(R_{1m} - R_{4m}) + (R_{4m} - R_{7m}) + (R_{7m} - R_{10m}) + (R_{10m} - R_{1m'})}{4}
 \tag{3.2}$$

R_{St} = ความเสถียรของความต้านทาน

R_{1m} = ค่าการวัดความต้านทานเดือนที่ 1 (เดือนกุมภาพันธ์ 2558)

R_{4m} = ค่าการวัดความต้านทานเดือนที่ 4 (เดือนพฤษภาคม 2558)

R_{7m} = ค่าการวัดความต้านทานเดือนที่ 7 (เดือนสิงหาคม 2558)

R_{10m} = ค่าการวัดความต้านทานเดือนที่ 10 (เดือนพฤศจิกายน 2558)

$R_{1m'}$ = ค่าการวัดความต้านทานเดือนที่ 13 (เดือนกุมภาพันธ์ 2559)

3.6 การวิเคราะห์ผลการวัดทางสถิติ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะทำการวิเคราะห์ผลของการสูญเสียจากการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย ผลกระทบจากโหลด ผลการวัดจากข้อต่อแต่ละจุด (Thermal EMF) ความเสถียรภาพของตัวต้านทาน รวมถึงการประเมินความไม่แน่นอนในการวัด เพื่อหาค่าความถูกต้องของ Decade Resistance Box ที่สร้างขึ้น โดยจะแสดงผลการวัดที่ได้กล่าวมานี้ ในบทถัดไป ซึ่งบางค่าสามารถคำนวณหาค่าจากสมการความสัมพันธ์ดังนี้

3.6.1 ความไม่แน่นอน

ค่าความไม่แน่นอนต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากระบบการวัด โดยจะแยกประเภทของความไม่แน่นอนแบบ Type A ที่ได้จากการวัดค่าซ้ำๆ และความไม่แน่นอนแบบ Type B ที่ได้จากการเก็บประวัติข้อมูลการวัดซึ่งรูปแบบการวัดสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

1. ความไม่แน่นอนแบบ Type A

สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$u = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

เมื่อ $s(x_i)$ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน $s(x_i)$ สามารถหาค่าได้จากสมการดังนี้

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

เมื่อ \bar{x} = ค่าเฉลี่ยจากการวัด n ครั้ง

x_i = ค่าวัดผลการวัดครั้งที่ i

และค่าเฉลี่ย คำนวณค่าได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.5)$$

เมื่อปริมาณ input x_i ที่ได้จากการสังเกต n ครั้ง ภายใต้เงื่อนไขการวัดที่สภาวะเดียวกัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ความไม่แน่นอน Type A จะสามารถหาได้จากความไม่แน่นอน $u(x_4)$ ค่าการวัดซ้ำ (Repeatability of Measurement)

2. ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B

โดยทั่วไปความไม่แน่นอนที่ได้จากไปรับรองการสอบเทียบ รูปแบบความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จะแจกแจงแบบปกติดังรูปที่ 2.9 และอยู่ในรูปแบบ

$$u(x_i) = \frac{u}{k} \quad (3.6)$$

เมื่อ k = ค่า Coverage Factor

โดยค่า k ขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่น ซึ่งระดับความเชื่อมั่น 68.27%, 95%, 99.7% ค่า $k = 1, 2, 3$ ตามลำดับ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ความไม่แน่นอน Type B จะสามารถหาได้จากความไม่แน่นอน $u(x_1)$ สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Temperature Coefficient) , $u(x_2)$ ค่าความละเอียดของเครื่องวัด (Resolution) และ $u(x_3)$ ค่าความแม่นยำในการวัด (Accuracy)

3. การรวมค่าความไม่แน่นอนแบบ Type A และ Type B

การรวมกันนี้ต้องใช้วิธีทางสถิติเรียกว่า root sum of the squares ผลของการรวมเรียกว่า combined uncertainty ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ 3.5

$$\text{combined uncertainty} = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots} \quad (3.7)$$

เมื่อ ค่า a, b, c, d คือค่าความไม่แน่นอนแต่ละ input

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถหาค่าความไม่แน่นอนรวม $u_c(y)$ ได้จาก

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3) + u^2(x_4)} \quad (3.8)$$

$u(x_1)$ = สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ (Temperature Coefficient)

$u(x_2)$ = ค่าความละเอียดของเครื่องวัด (Resolution)

$u(x_3)$ = ค่าความแม่นยำในการวัด (Accuracy)

$u(x_4)$ = ค่าการวัดซ้ำ (Repeatability of Measurement)

4. ความไม่แน่นอนขยาย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $u_c(y)$ ที่คำนวณได้เป็นค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น σ ในตามมาตรฐานสากลระดับความเชื่อมั่นที่ใช้งานทั่วไปจะใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 2σ หรือ 95% ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณหาความไม่แน่นอนดังกล่าวที่เป็นความไม่แน่นอนขยาย U ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3.9)$$

สำหรับการหาค่า k จำเป็นที่จะต้องใช้ค่า Effective Degrees of Freedom, $veff$ สามารถหาได้โดยใช้สมการ Welch-Satterthwaite ดังสมการ 3.8 และทำการเปิดตารางการกระจายแบบที (Student's t distribution) เพื่อหาค่า k จากตาราง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$veff = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (3.10)$$

3.7 รูปแบบการวัด (Measurement Model)

สำหรับรูปแบบการวัดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Digital Multimeter (DMM)} = \text{Resistor} + \text{Measurement System} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \text{Indicated Value} + \text{Errors} + \text{DMM Uncertainty} &= \text{Resistance Value} \\ &+ \text{Errors} + \text{Resistor Uncertainty} + \text{System Error} + \text{System Uncertainty} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$R_{\text{IND}} + \Delta_{\text{DMM}} + (\delta_{\text{ACC}} + \delta_{\text{RES}}) = R + (\Delta_{\text{I}} + \Delta_{\text{RST}}) + \delta_{\text{RTEMP}} + (\Delta_{\text{SYS}} + \Delta_{\text{CB}} + \delta_{\text{REP}}) \quad (3.12)$$

R_{IND} = ค่าความต้านทานที่แสดงในหน้าจอ Digital Multimeter (DMM)

Δ_{DMM} = ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากโหลด (Loading Effect) ซึ่งทำให้เกิดการอ่านค่าผิดพลาด สำหรับการวัดในการทำวิจัยนี้เครื่องวัดมีค่า Input Impedance มากกว่า $10\text{G}\Omega$ จึงไม่มีผลกระทบต่อกรวัด

δ_{ACC} = ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ที่เกิดจากการวัด ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ DMM โดยสามารถหาได้จากข้อมูลของผู้ผลิต

δ_{RES} = ค่าความละเอียดของ DMM ซึ่งดูได้จากหน้าจอที่แสดงผลของมิเตอร์ของ DMM หรือคุณสมบัติที่มาจากผู้ผลิต

R = ค่าความต้านทานของตัวต้านทานที่จะทำการทดสอบ

Δ_{I} = ค่าความต้านทานที่เกิดจากการเชื่อมต่อของตัวต้านทานแบบอนุกรม

Δ_{RST} = ความเสถียร (Stability) ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวต้านทาน

δ_{RTEMP} = ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในกรณีนี้มีค่าไม่เกิน $100 \text{ ppm} / 1^\circ\text{C}$ สำหรับความต้านทานชนิดฟิล์มโลหะซึ่งนำมาใช้ในการทำ Decade

Δ_{SYS} = ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างโลหะ 2 ชนิดซึ่งจะทำให้เกิด Thermal EMF ในกรณีนี้มีค่าน้อยมากเนื่องจากใช้สาย Low Thermal ในการเชื่อมต่อ

Δ_{CB} = ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากความต้านทานของสายในกรณีนี้มีค่าความผิดพลาดน้อยมากเนื่องจากการวัดเป็นแบบ 4 สาย

δ_{REP} = ผลที่เกิดจากการวัดซ้ำ (Repeatability) จำนวน n ครั้งในกรณีนี้ $n = 5$

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์มถึง 100 เมกโอห์ม ด้วยชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ที่สร้างขึ้น นำมาวัดหาค่าความสูญเสียที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย ผลกระทบจากโหลด การวัดระหว่างสายตัวนำต่างชนิด ความต้านทานที่ขั้วต่อ ค่าความเสถียร และนำผลของการวัดมาประเมินความไม่แน่นอนในการวัด เพื่อหาความถูกต้องของชุดความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้ที่สร้างขึ้น

4.2 ผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย

ตารางการเปรียบเทียบความต้านทานที่มีความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย และ แบบ 4 สายกับชุดค่าความต้านทานมาตรฐานปรับค่าได้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัด แบบ 2 สาย, 4 สายที่ความต้านทาน 0.01โอห์ม ถึง 0.10 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
0.01	0.01216	0.01146	0.00070	5.73074
0.02	0.02273	0.02161	0.00113	4.95601
0.03	0.03382	0.03215	0.00168	4.95713
0.04	0.04407	0.04271	0.00136	3.09333
0.05	0.05501	0.05349	0.00153	2.77508
0.06	0.06519	0.06357	0.00162	2.48504
0.07	0.07591	0.07449	0.00142	1.87503
0.08	0.08625	0.08476	0.00149	1.73140
0.09	0.09677	0.09510	0.00167	1.72913
0.1	0.10647	0.10574	0.00072	0.68002

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สาย ที่ R 0.10 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
0.1	0.10314	0.10172	0.00143	1.38319
0.2	0.20432	0.20281	0.00151	0.73902
0.3	0.30552	0.30403	0.00149	0.48661
0.4	0.40765	0.40612	0.00154	0.37695
0.5	0.50889	0.50593	0.00296	0.58231
0.6	0.61063	0.60919	0.00144	0.23582
0.7	0.71276	0.71097	0.00179	0.25067
0.8	0.81405	0.81259	0.00146	0.17935
0.9	0.91476	0.91347	0.00129	0.14102
1	1.01686	1.01541	0.00145	0.14260

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 1 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
1	0.99622	0.99513	0.00108	0.10874
2	1.99173	1.98979	0.00194	0.09757
3	2.98513	2.98388	0.00125	0.04199
4	3.98124	3.97963	0.00161	0.04044
5	4.97751	4.97562	0.00189	0.03797
6	5.97493	5.97299	0.00194	0.03247
7	6.97063	6.96985	0.00079	0.01129
8	7.96870	7.96692	0.00178	0.02230
9	8.96539	8.96359	0.00179	0.02000
10	9.96087	9.96025	0.00062	0.00622

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 10โอห์ม ถึง 100 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
10	10.00270	9.99832	0.00438	0.04382
20	20.00381	19.99906	0.00475	0.02373
30	30.00572	30.00145	0.00427	0.01422
40	40.00939	40.00546	0.00393	0.00983
50	50.00972	50.00558	0.00414	0.00827
60	60.01242	60.00846	0.00396	0.00660
70	70.01588	70.01186	0.00402	0.00574
80	80.02539	80.02173	0.00365	0.00456
90	90.02875	90.02524	0.00351	0.00390
100	100.03193	100.02840	0.00353	0.00353

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 100โอห์ม ถึง 1,000 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
100	100.12641	100.12092	0.00549	0.00548
200	200.23872	200.23212	0.00660	0.00330
300	300.35192	300.34395	0.00797	0.00265
400	400.44172	400.43285	0.00887	0.00221
500	500.48482	500.47468	0.01013	0.00202
600	600.58425	600.57332	0.01093	0.00182
700	700.69175	700.67982	0.01193	0.00170
800	800.78712	800.77462	0.01250	0.00156
900	900.89395	900.88028	0.01367	0.00152
1000	1000.98982	1000.97552	0.01430	0.00143

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 1,000โอห์ม ถึง 10,000 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
1000	999.9377833	999.92650	0.01128	0.00113
2000	2000.476717	2000.44443	0.03228	0.00161
3000	3000.615383	3000.58577	0.02962	0.00099
4000	4001.132383	4001.10110	0.03128	0.00078
5000	5001.11205	5001.08177	0.03028	0.00061
6000	6000.895383	6000.87010	0.02528	0.00042
7000	7000.78005	7000.76043	0.01962	0.00028
8000	8001.099717	8001.07943	0.02028	0.00025
9000	9001.362717	9001.34177	0.02095	0.00023
10000	10001.85738	10001.82177	0.03562	0.00036

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 10,000โอห์ม ถึง 100,000 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
10000	10009.58972	9999.70943	9.88028	0.09871
20000	20010.25205	20000.45943	9.79262	0.04894
30000	30008.52205	29998.67943	9.84262	0.03280
40000	40008.12872	39998.57610	9.55262	0.02388
50000	50009.16205	49999.76610	9.39595	0.01879
60000	60007.48872	59998.12943	9.35928	0.01560
70000	70009.25205	69999.90943	9.34262	0.01334
80000	80009.24205	80000.08277	9.15928	0.01145
90000	90010.66538	90001.75277	8.91262	0.00990
100000	100010.06872	100001.28610	8.78262	0.00878

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 100,000โอห์ม ถึง 1,000,000 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
100000	100123.1554	100071.7218	51.4336	0.05137
200000	200212.3121	200165.0028	47.3093	0.02363
300000	300281.1787	300232.7361	48.4426	0.01613
400000	400388.0121	400346.6028	41.4093	0.01034
500000	500514.5121	500478.7694	35.7426	0.00714
600000	600546.2121	600510.7694	35.4426	0.00590
700000	700524.1787	700494.7528	29.4260	0.00420
800000	800524.9121	800499.0694	25.8426	0.00323
900000	900532.0454	900512.5694	19.4759	0.00216
1000000	1000504.8121	1000492.8028	12.0093	0.00120

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 1,000,000โอห์ม ถึง 10,000,000 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
1000000	1000482.645	1000444.169	38.4759	0.00385
2000000	2000970.079	2000876.903	93.1760	0.00466
3000000	3000743.045	3000611.436	131.6093	0.00439
4000000	4005150.379	4004759.103	391.2759	0.00977
5000000	5000186.379	4999383.103	803.2759	0.01606
6000000	6000223.712	5998422.103	1801.6093	0.03003
7000000	7000679.379	7000444.769	234.6093	0.00335
8000000	7999445.712	7995884.103	3561.6093	0.04452
9000000	8998401.045	8993704.103	4696.9426	0.05220
10000000	9996562.379	9995148.769	1413.6093	0.01414

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย, 4 สายที่ R 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000 โอห์ม

Nominal Resistance	2 Wire (Ω)	4 Wire (Ω)	Diff. 2 W - 4 W (Ω)	% Error
10000000	10105721.38	10098818.44	6902.943	0.06831
20000000	20243308.38	20235469.44	7838.943	0.03872
30000000	30330552.71	30312169.44	18383.276	0.06061
40000000	40336949.38	40324266.10	12683.276	0.03144
50000000	50483302.71	50458152.77	25149.943	0.04982
60000000	60599676.05	60588389.44	11286.609	0.01862
70000000	70653406.05	70621212.77	32193.276	0.04557
80000000	80757222.71	80755492.77	1729.943	0.00214
90000000	90505142.71	90493729.44	11413.276	0.01261
100000000	100828672.71	100733862.77	94809.943	0.09403

จากข้อมูลการวัดจะพบว่าค่าความต้านทานที่ใช้วิธีวัดแบบ 2 สายจะมีค่าสูงกว่าวิธีการวัดแบบ 4 สายเนื่องจากการวัดแบบ 2 สายจะถูกรวมค่าความต้านทานของสายที่วัดไปด้วย

4.3 ผลกระทบจากโหลด

โดยจะใช้เครื่องมือวัด 2 เครื่อง คือ Digital Multimeter รุ่น 3458A ยี่ห้อ Agilent และ Digital Multimeter รุ่น F205 ยี่ห้อ Fluke จะได้ผลตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000 โอห์ม ถึง 100,000โอห์ม

Nominal Resistance	Agilent 3458A (Ω)	Fluke F205 (Ω)
10000	10000.2	9950.0
20000	20000.9	19960.0
30000	29999.0	29960.0
40000	39998.7	39970.0
50000	49999.8	49970.0
60000	59998.1	59980.0
70000	69999.9	OL
80000	80000.0	OL
90000	90001.3	OL
100000	100000.5	OL

ตารางที่ 4.12 ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000 โอห์ม ถึง 1,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	Agilent 3458A (Ω)	Fluke F205 (Ω)
100000	100073.7	OL
200000	200160.1	OL
300000	300233.7	OL
400000	400337.1	OL
500000	500457.3	OL
600000	600499.2	OL
700000	700475.0	OL
800000	800472.5	OL
900000	900481.8	OL
1000000	1000455.7	OL

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000 โอห์ม ถึง 10,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	Agilent 3458A (Ω)	Fluke F205 (Ω)
1000000	1000486	OL
2000000	2000105	OL
3000000	3000463	OL
4000000	4000135	OL
5000000	5000169	OL
6000000	6000220	OL
7000000	7000030	OL
8000000	7999472	OL
9000000	8998431	OL
10000000	9996779	OL

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงผลกระทบจากโหลดจากเครื่องวัดค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000 โอห์ม ถึง 100,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	Agilent 3458A (Ω)	Fluke F205 (Ω)
10000000	10106376	OL
20000000	20240057	OL
30000000	30329250	OL
40000000	40433500	OL
50000000	50538530	OL
60000000	60590220	OL
70000000	70650550	OL
80000000	80726590	OL
90000000	90805940	OL
100000000	100822180	OL

จากผลการวัดในตารางจะพบว่า DMM Input Impedance 10เมกโอห์ม จะไม่สามารถวัดค่าตั้งแต่ 70กิโลโอห์ม จะไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากปัญหาผลกระทบของโหลด

4.4 ผลการวัดระหว่างสายตัวนำต่างชนิด

โดยจะใช้สายไฟฟ้า 2 ชนิด คือ สายทั่วไป (Normal) และ Low Thermal มาทำการเปรียบเทียบ จะได้ผลตามตารางดังต่อไปนี้ ซึ่งจะแทนสายไฟแบบทั่วไปเป็น Wire A และ สายแบบ Low Thermal เป็น Wire B

ตารางที่ 4.15 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01โอห์ม ถึง 0.1โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
0.01	0.02985	0.01517	0.01468	49.17923
0.02	0.04092	0.02693	0.01399	34.18866
0.03	0.05198	0.03806	0.01392	26.77953
0.04	0.06211	0.04817	0.01394	22.44405
0.05	0.07211	0.05922	0.01289	17.87547
0.06	0.08233	0.06944	0.01289	15.65650
0.07	0.09422	0.08002	0.01420	15.07111
0.08	0.10367	0.09046	0.01321	12.74236
0.09	0.11385	0.09277	0.02108	18.51559
0.1	0.12437	0.10515	0.01922	15.45160

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
0.1	0.12064	0.10691	0.01373	11.38097
0.2	0.22254	0.20808	0.01446	6.49771
0.3	0.32339	0.30933	0.01406	4.34769
0.4	0.42521	0.41136	0.01385	3.25721
0.5	0.52683	0.51282	0.01401	2.65930
0.6	0.62830	0.61446	0.01384	2.20277
0.7	0.73006	0.71655	0.01351	1.85053
0.8	0.83153	0.81762	0.01391	1.67282
0.9	0.93307	0.91853	0.01454	1.55830
1	1.03477	1.02063	0.01414	1.36649

ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
1	1.03152	0.99974	0.03178	3.08089
2	2.00553	1.99535	0.01018	0.50760
3	3.00237	2.98907	0.01330	0.44298
4	4.00826	3.98485	0.02341	0.58404
5	4.99935	4.98084	0.01851	0.37025
6	5.99214	5.97819	0.01395	0.23280
7	7.00275	6.97427	0.02848	0.40670
8	7.99954	7.97215	0.02739	0.34239
9	8.97921	8.96861	0.01060	0.11805
10	9.97802	9.96266	0.01536	0.15394

ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 10โอห์ม ถึง 100โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
10	10.03390	10.00599	0.02791	0.27816
20	20.02705	20.00694	0.02011	0.10041
30	30.03075	30.00913	0.02162	0.07199
40	40.03703	40.01285	0.02418	0.06039
50	50.03777	50.01326	0.02451	0.04898
60	60.04093	60.01591	0.02502	0.04167
70	70.04648	70.01934	0.02714	0.03875
80	80.06693	80.02904	0.03789	0.04732
90	90.07282	90.03220	0.04062	0.04510
100	100.07534	100.03528	0.04006	0.04003

ตารางที่ 4.19 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 100โอห์ม ถึง 1,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
100	100.16545	100.12970	0.03575	0.03569
200	200.27750	200.24270	0.03480	0.01738
300	300.39050	300.35580	0.03470	0.01155
400	400.48140	400.44550	0.03590	0.00896
500	500.52440	500.48850	0.03590	0.00717
600	600.62540	600.58780	0.03760	0.00626
700	700.73230	700.69510	0.03720	0.00531
800	800.82860	800.79040	0.03820	0.00477
900	900.93660	900.89700	0.03960	0.00440
1000	1001.03230	1000.99280	0.03950	0.00395

ตารางที่ 4.20 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000 โห์ม ถึง 10,000 โห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
1000	1000.5750	1000.5121	0.06290	0.00629
2000	2001.1250	2001.0530	0.07200	0.00360
3000	3001.2850	3001.1920	0.09300	0.00310
4000	4001.8190	4001.7060	0.11300	0.00282
5000	5001.8150	5001.6890	0.12600	0.00252
6000	6001.6260	6001.4740	0.15200	0.00253
7000	7001.5340	7001.3580	0.17600	0.00251
8000	8001.8620	8001.6710	0.19100	0.00239
9000	9002.1390	9001.9390	0.20000	0.00222
10000	10003.6600	10002.4250	1.23500	0.01235

ตารางที่ 4.21 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000 โห์ม ถึง 100,000 โห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
10000	10000.544	10000.217	0.32700	0.00327
20000	20001.550	20000.870	0.68000	0.00340
30000	29999.950	29998.990	0.96000	0.00320
40000	40000.140	39998.740	1.40000	0.00350
50000	50001.390	49999.770	1.62000	0.00324
60000	60000.560	59998.010	2.55000	0.00425
70000	70000.280	69999.710	0.57000	0.00081
80000	80002.940	79999.780	3.16000	0.00395
90000	90005.740	90001.330	4.41000	0.00490
100000	100003.570	100000.500	3.07000	0.00307

ตารางที่ 4.22 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000โอห์ม ถึง 1,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
100000	100086.850	100073.680	13.1700	0.01316
200000	200176.200	200160.100	16.1000	0.00804
300000	300235.900	300233.700	2.2000	0.00073
400000	400385.400	400337.100	48.3000	0.01206
500000	500491.200	500457.300	33.9000	0.00677
600000	600551.600	600499.200	52.4000	0.00873
700000	700544.800	700472.000	72.8000	0.01039
800000	800556.100	800472.500	83.6000	0.01044
900000	900707.500	900481.800	225.7000	0.02506
1000000	1000581.500	1000455.700	125.8000	0.01257

ตารางที่ 4.23 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000โอห์ม ถึง 10,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
1000000	1007223.00	1000486.00	6737.000	0.66887
2000000	2001288.00	2000105.10	1182.900	0.05911
3000000	3001445.00	3000463.00	982.000	0.03272
4000000	4000560.00	4000135.00	425.000	0.01062
5000000	5002446.00	5000169.00	2277.000	0.04552
6000000	6002215.00	6000220.00	1995.000	0.03324
7000000	7002553.00	7000030.00	2523.000	0.03603
8000000	8000115.00	7999472.00	643.000	0.00804
9000000	9001354.00	8998431.00	2923.000	0.03247
10000000	10000309.00	9996779.00	3530.000	0.03530

ตารางที่ 4.24 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานระหว่างสายไฟทั่วไปกับสายไฟ Low Thermal โดยที่ค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000โอห์ม ถึง 100,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
10000000	10115206.0	10106376.0	8830.000	0.08729
20000000	20249770.0	20240057.0	9713.000	0.04797
30000000	30330620.0	30329250.0	1370.000	0.00452
40000000	40457030.0	40433500.0	23530.000	0.05816
50000000	50576050.0	50538530.0	37520.000	0.07419
60000000	60599940.0	60590220.0	9720.000	0.01604
70000000	70687320.0	70650550.0	36770.000	0.05202
80000000	80794450.0	80726590.0	67860.000	0.08399
90000000	90816910.0	90805940.0	10970.000	0.01208
100000000	100835840.0	100822180.0	13660.000	0.01355

ผลจากการวัดจะพบว่าค่าความต้านทานที่ได้จากการใช้สายชนิด B (Low Thermal) มีค่าใกล้เคียงกับค่า Nominal มากกว่าการใช้สายชนิด A

4.5 ความต้านทานที่ขั้วต่อ

โดยทั่วไปจุดต่อมีผลต่อการวัดซึ่งก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดต่อความต้านทานรวม เนื่องจากเกิดความต้านทานระหว่างจุดต่อ โดยแทนค่าตัวต้านทานที่มีจุดต่อเป็น Resistor A และต้านทานที่ไม่มีจุดต่อเป็น Resistor B มาทำการเปรียบเทียบ จะได้ผลตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.25 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 0.1 โอห์ม

Nominal Resistance	Resistor A (Ω)	Resistor B (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
0.01	0.01342	0.01088	0.00254	18.92697
0.02	0.01402	0.01101	0.00301	21.46933
0.03	0.01366	0.01083	0.00283	20.71742
0.04	0.01343	0.01088	0.00255	18.98734
0.05	0.01310	0.01089	0.00221	16.87023
0.06	0.01318	0.01016	0.00302	22.91351
0.07	0.01261	0.01036	0.00225	17.84298
0.08	0.01374	0.01080	0.00294	21.39738
0.09	0.01448	0.01094	0.00354	24.44751
0.10	0.01449	0.01052	0.00397	27.39821

ตารางที่ 4.26 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
0.1	0.11569	0.11155	0.00414	3.57853
0.2	0.11893	0.11365	0.00528	4.43959
0.3	0.11388	0.11013	0.00375	3.29294
0.4	0.11798	0.11127	0.00671	5.68740
0.5	0.11778	0.11077	0.00701	5.95177
0.6	0.11476	0.11010	0.00466	4.06065
0.7	0.11427	0.11101	0.00326	2.85289
0.8	0.11418	0.11018	0.00400	3.50324
0.9	0.12170	0.11169	0.01001	8.22514
1.0	0.11908	0.11210	0.00698	5.86161

ตารางที่ 4.27 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
1	1.05441	1.05326	0.00115	0.10907
2	1.05413	1.05301	0.00112	0.10625
3	1.05221	1.04507	0.00714	0.67857
4	1.05227	1.04519	0.00708	0.67283
5	1.05066	1.04177	0.00889	0.84613
6	1.04457	1.04315	0.00142	0.13594
7	1.04559	1.04216	0.00343	0.32804
8	1.05447	1.04710	0.00737	0.69893
9	1.05431	1.04450	0.00981	0.93047
10	1.03921	1.03041	0.00880	0.84680

ตารางที่ 4.28 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 10 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
10	10.05901	10.05235	0.00666	0.06621
20	10.05739	10.05390	0.00349	0.03470
30	10.05785	10.05332	0.00453	0.04504
40	10.06059	10.05692	0.00367	0.03648
50	10.05627	10.05334	0.00293	0.02914
60	10.05931	10.05601	0.00330	0.03281
70	10.06426	10.05490	0.00936	0.09300
80	10.06450	10.06437	0.00013	0.00129
90	10.05982	10.05966	0.00016	0.00159
100	10.06095	10.05713	0.00382	0.03797

ตารางที่ 4.29 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 100โอห์ม ถึง 1,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
100	100.17652	100.17181	0.00471	0.00470
200	100.16590	100.15923	0.00667	0.00666
300	100.16603	100.15930	0.00673	0.00672
400	100.13977	100.13181	0.00796	0.00795
500	100.09406	100.08839	0.00567	0.00566
600	100.15885	100.15014	0.00871	0.00870
700	100.16020	100.15561	0.00459	0.00458
800	100.14594	100.14016	0.00578	0.00577
900	100.16224	100.15761	0.00463	0.00462
1000	100.16917	100.16272	0.00645	0.00644

ตารางที่ 4.30 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000โอห์ม ถึง 10,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
1000	999.96340	999.9621	0.00130	0.00013
2000	1000.36890	1000.3420	0.02690	0.00269
3000	1000.20240	1000.2010	0.00140	0.00014
4000	1000.65990	1000.6370	0.02290	0.00229
5000	998.97380	998.9240	0.04980	0.00499
6000	999.07820	999.0490	0.02920	0.00292
7000	999.06510	999.0355	0.02960	0.00296
8000	1000.42350	1000.4162	0.00730	0.00073
9000	1000.36810	1000.3530	0.01510	0.00151
10000	1000.53940	1000.5369	0.00250	0.00025

ตารางที่ 4.31 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000โอห์ม ถึง 100,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
10000	10000.4920	10000.052	0.44000	0.00440
20000	10000.3460	10000.186	0.16000	0.00160
30000	9998.7060	9998.606	0.10000	0.00100
40000	9999.3910	9999.241	0.15000	0.00150
50000	9996.4160	9996.036	0.38000	0.00380
60000	9999.4690	9999.129	0.34000	0.00340
70000	10001.0830	10000.163	0.92000	0.00920
80000	10000.7750	10000.075	0.70000	0.00700
90000	10000.3730	10000.193	0.18000	0.00180
100000	10000.3320	10000.062	0.27000	0.00270

ตารางที่ 4.32 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000โอห์ม ถึง 1,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
100000	100076.870	100073.970	2.90000	0.00290
200000	100088.020	100084.120	3.90000	0.00390
300000	100074.890	100072.590	2.30000	0.00230
400000	99825.790	99822.190	3.60000	0.00361
500000	99892.710	99889.640	3.07000	0.00307
600000	100046.420	100040.120	6.30000	0.00630
700000	99995.050	99990.150	4.90000	0.00490
800000	100014.570	100013.070	1.50000	0.00150
900000	100026.870	100025.370	1.50000	0.00150
1000000	99994.560	99989.260	5.30000	0.00530

ตารางที่ 4.33 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000โอห์ม ถึง 10,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
1000000	999056.40	998436.60	619.80000	0.06204
2000000	1000361.60	1000229.00	132.60000	0.01326
3000000	1000252.00	1000121.00	131.00000	0.01310
4000000	1000308.90	1000075.40	233.50000	0.02334
5000000	1000466.00	1000185.00	281.00000	0.02809
6000000	1000505.40	1000244.00	261.40000	0.02613
7000000	1000264.40	1000139.00	125.40000	0.01254
8000000	1000467.00	1000297.00	170.00000	0.01699
9000000	1000630.90	1000221.80	409.10000	0.04088
10000000	1000325.00	1000157.80	167.20000	0.01671

ตารางที่ 4.34 ตารางแสดงผลการวัดตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวต้านทานที่มีจุดต่อและไม่มีจุดต่อโดยมีค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000โอห์ม ถึง 100,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	A Wire (Ω)	B Wire (Ω)	Diff. A - B (Ω)	% Error
10000000	10039261.0	10037776.0	1485.00000	0.01479
20000000	10056259.0	10054700.0	1559.00000	0.01550
30000000	10041060.0	10039290.0	1770.00000	0.01763
40000000	10075712.0	10074100.0	1612.00000	0.01600
50000000	10063223.0	10062110.0	1113.00000	0.01106
60000000	10050759.0	10049338.0	1421.00000	0.01414
70000000	10065909.0	10064027.0	1882.00000	0.01870
80000000	10045475.0	10043770.0	1705.00000	0.01697
90000000	10061830.0	10059950.0	1880.00000	0.01868
100000000	10025987.0	10024390.0	1597.00000	0.01593

4.6 ค่าความเสถียร (Stability)

โดยจะทำการวัดและเก็บค่าทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งใช้เวลาห่างกัน 3 เดือนต่อ 1 ครั้ง การวัด ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ 2558 ถึง กุมภาพันธ์ 2559 ได้ผลการวัดดังนี้

ตารางที่ 4.35 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01โอห์ม ถึง 0.1โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
0.01	0.01108	0.01127	0.01130	0.01110	0.01149	2.0225
0.02	0.02084	0.02065	0.02033	0.02017	0.02069	1.4875
0.03	0.03145	0.03226	0.03273	0.03323	0.03314	1.5583
0.04	0.04197	0.04282	0.04334	0.04336	0.04307	1.0500
0.05	0.05269	0.05363	0.05414	0.05336	0.05348	1.1750
0.06	0.06284	0.06386	0.06401	0.06358	0.06358	0.6667
0.07	0.07374	0.07454	0.07518	0.07547	0.07489	0.8250
0.08	0.08386	0.08503	0.08538	0.08492	0.08554	0.8125
0.09	0.09455	0.09531	0.09544	0.09510	0.09609	0.6167
0.10	0.10513	0.10584	0.10626	0.10562	0.10629	0.6105

ตารางที่ 4.36 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.1โอห์ม ถึง 1โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
0.1	0.10102	0.10232	0.10181	0.10189	0.10218	0.1200
0.2	0.20230	0.20338	0.20276	0.20379	0.20333	0.1189
0.3	0.30329	0.30478	0.30402	0.30464	0.30399	0.1850
0.4	0.40520	0.40641	0.40674	0.40646	0.40526	0.1887
0.5	0.50237	0.50794	0.50747	0.50808	0.51676	0.1875
0.6	0.60871	0.60978	0.60907	0.60955	0.60034	0.1446
0.7	0.71031	0.71185	0.71076	0.71131	0.71022	0.1525
0.8	0.81217	0.81363	0.81198	0.81278	0.81287	0.1250
0.9	0.91281	0.91431	0.91328	0.91432	0.91381	0.1133
1.0	1.01452	1.01628	1.01542	1.01602	1.01567	0.0892

ตารางที่ 4.37 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1โอห์ม ถึง 10โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
1	0.99335	0.99505	0.99700	0.99377	0.99348	0.0818
2	1.98909	1.99042	1.98985	1.98678	1.98557	0.0772
3	2.98279	2.98434	2.98451	2.98362	2.97799	0.0687
4	3.97890	3.98018	3.97981	3.97951	3.97656	0.0306
5	4.97442	4.97624	4.97619	4.98060	4.97488	0.0600
6	5.97181	5.97375	5.97341	5.97339	5.96750	0.0341
7	6.96992	6.97005	6.96957	6.97400	6.97146	0.0271
8	7.96656	7.96786	7.96635	7.97079	7.96781	0.0320
9	8.96291	8.96493	8.96294	8.96046	8.95666	0.0286
10	9.95913	9.96132	9.96029	9.95927	9.95649	0.0176

ตารางที่ 4.38 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 10โอห์ม ถึง 100โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
10	9.9997	10.0013	9.9940	9.9992	9.9928	0.0510
20	20.0002	20.0016	19.9954	19.9953	19.9940	0.0113
30	30.0027	30.0040	29.9976	30.0060	29.9963	0.0214
40	40.0062	40.0079	40.0022	40.0023	40.0011	0.0054
50	50.0065	50.0079	50.0023	50.0030	50.0003	0.0052
60	60.0093	60.0103	60.0058	60.0062	60.0037	0.0036
70	70.0122	70.0138	70.0097	70.0117	70.0081	0.0041
80	80.0218	80.0228	80.0206	80.0222	80.0192	0.0024
90	90.0255	90.0267	90.0235	90.0241	90.0212	0.0022
100	100.0288	100.0298	100.0266	100.0306	100.0247	0.0035

ตารางที่ 4.39 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 100โอห์ม ถึง 1,000โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
100	100.12	100.12	100.12	100.13	100.13	0.0046
200	200.23	200.23	200.23	200.24	200.24	0.0018
300	300.34	300.34	300.34	300.35	300.36	0.0017
400	400.43	400.43	400.43	400.44	400.43	0.0015
500	500.48	500.47	500.48	500.46	500.49	0.0032
600	600.57	600.57	600.58	600.57	600.57	0.0013
700	700.68	700.67	700.69	700.67	700.68	0.0013
800	800.77	800.77	800.78	800.78	800.80	0.0012
900	900.88	900.87	900.89	900.89	900.89	0.0008
1000	1000.97	1000.97	1000.99	1000.98	1001.00	0.0011

ตารางที่ 4.40 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000โอห์ม ถึง 10,000โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
1000	999.88	999.88	1000.02	999.97	999.98	0.0050
2000	2000.40	2000.41	2000.52	2000.44	2000.42	0.0027
3000	3000.53	3000.54	3000.68	3000.65	3000.64	0.0016
4000	4001.04	4001.05	4001.21	4000.98	4000.50	0.0055
5000	5001.01	5001.02	5001.21	5000.98	5000.58	0.0042
6000	6000.78	6000.81	6001.02	6000.68	6000.02	0.0052
7000	7000.66	7000.69	7000.93	7000.76	6999.94	0.0045
8000	8000.97	8001.00	8001.27	8000.98	8000.24	0.0041
9000	9001.22	9001.25	9001.55	9001.46	9000.70	0.0033
10000	10001.69	10001.73	10002.04	10001.98	10001.09	0.0033

ตารางที่ 4.41 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000โอห์ม ถึง 100,000โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
10000	9999.6	9999.6	9999.9	9999.5	9999.7	0.0026
20000	20000.2	20000.3	20000.9	20000.5	20000.7	0.0016
30000	29998.4	29998.5	29999.2	29998.9	29999.0	0.0011
40000	39998.1	39998.3	39999.3	39999.1	39999.3	0.0010
50000	49999.2	49999.5	50000.6	50000.3	50000.6	0.0010
60000	59997.5	59997.9	59999.0	59999.5	59999.5	0.0008
70000	69999.3	69999.6	70000.9	69999.2	69999.3	0.0012
80000	79999.4	79999.8	80001.0	80001.9	80002.1	0.0008
90000	90001.1	90001.5	90002.7	90002.7	90002.9	0.0005
100000	100000.7	100001.1	100002.1	100002.5	100002.4	0.0005

ตารางที่ 4.42 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 100,000โอห์ม ถึง 1,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
100000	100074	100074	100068	100062	100066	0.0041
200000	200166	200161	200169	200161	200150	0.0040
300000	300235	300230	300234	300221	300226	0.0023
400000	400344	400338	400358	400360	400378	0.0029
500000	500476	500476	500484	500476	500489	0.0014
600000	600512	600512	600508	600517	600512	0.0007
700000	700501	700495	700488	700490	700495	0.0007
800000	800502	800501	800494	800501	800507	0.0007
900000	900524	900508	900506	900513	900519	0.0009
1000000	1000505	1000490	1000484	1000487	1000496	0.0009

ตารางที่ 4.43 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,000,000โอห์ม ถึง 10,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
1000000	1000499	1000463	1000371	1000323	1000538	0.0098
2000000	2001165	2001321	2000144	1994388	2000276	0.1622
3000000	3001008	3000954	2999871	2994545	3002312	0.1186
4000000	4015389	4000809	3998078	3993660	4001364	0.1840
5000000	5001165	5000842	4996141	4995546	5001129	0.0560
6000000	6001115	6000924	5993226	5995315	6000339	0.0625
7000000	7001266	7001121	6998946	6995653	7000454	0.0372
8000000	8000821	8000839	7985991	7993215	7998179	0.0845
9000000	9000552	9000241	8980318	8984454	8989330	0.0812
10000000	10000485	10000234	9984726	9993409	9994650	0.0642

ตารางที่ 4.44 ตารางแสดงผลการวัดค่าความต้านทานระหว่างเดือน ก.พ. 2558 ถึง ก.พ. 2559 โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 10,000,000โอห์ม ถึง 100,000,000โอห์ม

Nominal Resistance	Feb-15 (Ω)	May-15 (Ω)	Aug-15 (Ω)	Nov-15 (Ω)	Feb-16 (Ω)	Stability %
10000000	10108224.4	10105354.4	10082876.4	10040206	10061534	0.2234
20000000	20250809.4	20250419.4	20145179.4	20144770	20146520	0.1347
30000000	30355629.4	30345689.4	30115189.4	30255620	30255850	0.3176
40000000	40475259.4	40452329.4	40045209.4	40322030	40316250	0.4454
50000000	50599279.4	50583679.4	50131499.4	50251050	50269790	0.3030
60000000	60692929.4	60665539.4	60406699.4	60482940	60491510	0.1546
70000000	70789959.4	70729389.4	70344289.4	70212320	70243450	0.2174
80000000	80905459.4	80826599.4	80534419.4	80719450	80737510	0.1794
90000000	90952279.4	90539409.4	89989499.4	90341010	90321970	0.3704
100000000	100910049	100995369	100296169	100610840	100764810	0.3133

4.7 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน

นำผลการวัดที่ได้ มาประเมินค่าความไม่แน่นอนของค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 100เมกะโอห์มของ Decade ที่สร้างขึ้นโดยหาค่า Expanded uncertainty ที่ 95% ดังแสดงผลในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.45 ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 0.01 โอห์ม ถึง 1โอห์ม

Nominal Valve	Expanded uncertainty		Nominal Valve	Expanded uncertainty	
	(Ω)	%		(Ω)	%
0.01	0.00102	10.155	0.1	0.00203	2.032
0.02	0.00191	9.533	0.2	0.00212	1.061
0.03	0.00193	6.441	0.3	0.00186	0.620
0.04	0.00158	3.961	0.4	0.00149	0.372
0.05	0.00132	2.638	0.5	0.00822	1.643
0.06	0.00130	2.164	0.6	0.00368	0.614
0.07	0.00169	2.421	0.7	0.00153	0.219
0.08	0.00174	2.171	0.8	0.00419	0.524
0.09	0.00173	1.925	0.9	0.00430	0.478
0.10	0.00152	1.522	1.0	0.00430	0.430

ตารางที่ 4.46 ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1 โอห์ม ถึง 100โอห์ม

Nominal Valve	Expanded uncertainty		Nominal Valve	Expanded uncertainty	
	(Ω)	%		(Ω)	%
1	0.00513	0.513	10	0.00412	0.041
2	0.00132	0.066	20	0.00535	0.027
3	0.00197	0.066	30	0.00786	0.026
4	0.00111	0.028	40	0.00956	0.024
5	0.00340	0.068	50	0.01183	0.024
6	0.00218	0.036	60	0.01407	0.023
7	0.00344	0.049	70	0.01634	0.023
8	0.00328	0.041	80	0.01862	0.023
9	0.00289	0.032	90	0.02095	0.023
10	0.00245	0.025	100	0.02330	0.023

ตารางที่ 4.47 ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 100 โอห์ม ถึง 10,000โอห์ม

Nominal Valve	Expanded uncertainty		Nominal Valve	Expanded uncertainty	
	(Ω)	%		(Ω)	%
100	0.02584	0.026	1000	0.23988	0.024
200	0.04769	0.024	2000	0.46586	0.023
300	0.07068	0.024	3000	0.69867	0.023
400	0.09355	0.023	4000	0.95943	0.024
500	0.11629	0.023	5000	1.17794	0.024
600	0.13925	0.023	6000	1.43313	0.024
700	0.16243	0.023	7000	1.65940	0.024
800	0.18603	0.023	8000	1.88680	0.024
900	0.20904	0.023	9000	2.10769	0.023
1000	0.23230	0.023	10000	2.34347	0.023

ตารางที่ 4.48 ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความต้านทานตั้งแต่10,000 โอห์ม ถึง 1,000,000โอห์ม

Nominal Valve	Expanded uncertainty		Nominal Valve	Expanded uncertainty	
	(Ω)	%		(Ω)	%
10000	2.3233	0.023	100000	23.6718	0.024
20000	4.6458	0.023	200000	47.1163	0.024
30000	6.9647	0.023	300000	70.0651	0.023
40000	9.2883	0.023	400000	94.0820	0.024
50000	11.6084	0.023	500000	116.3995	0.023
60000	13.9368	0.023	600000	139.5166	0.023
70000	16.2416	0.023	700000	162.7751	0.023
80000	18.5788	0.023	800000	185.9659	0.023
90000	20.9038	0.023	900000	209.2545	0.023
100000	23.2209	0.023	1000000	232.4835	0.023

ตารางที่ 4.49 ตารางแสดงผลการประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยค่าความต้านทานตั้งแต่ 1,00,000โอห์ม ถึง 100,000,000โอห์ม

Nominal Valve	Expanded uncertainty		Nominal Valve	Expanded uncertainty	
	(Ω)	%		(Ω)	%
1000000	246.65	0.025	10000000	37558.66	0.376
2000000	3786.73	0.189	20000000	76684.44	0.383
3000000	4049.03	0.135	30000000	127652.90	0.426
4000000	10598.76	0.265	40000000	223558.28	0.559
5000000	3579.23	0.072	50000000	276591.77	0.553
6000000	4762.80	0.079	60000000	156764.22	0.261
7000000	3041.44	0.043	70000000	360291.86	0.515
8000000	8590.16	0.107	80000000	178661.69	0.223
9000000	12220.23	0.136	90000000	462031.46	0.513
10000000	8284.45	0.083	100000000	367395.81	0.367



บทที่ 5

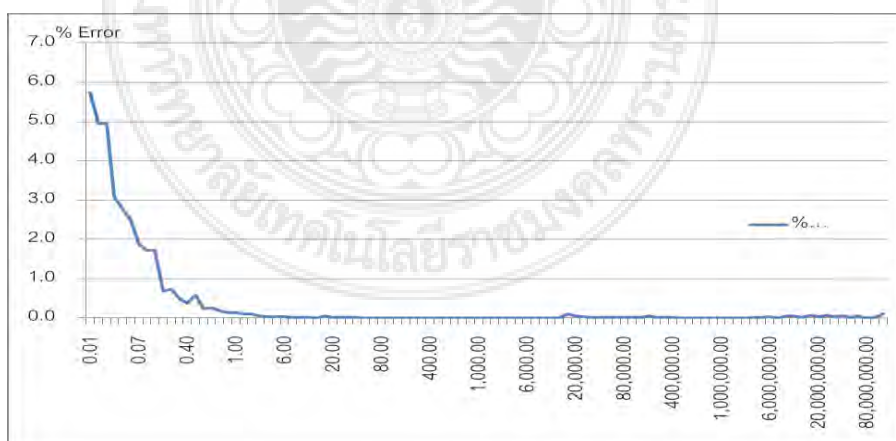
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการวัดค่าความต้านทานด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ โดยทำการจัดสร้าง Decade Resistance Box ด้วยตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะในย่าน 0.01 โอห์ม ถึง 100 เมกะโอห์ม และทำการศึกษาผลกระทบของการวัดในสภาวะแวดล้อมที่ถูกรักษา ณ อุณหภูมิห้อง 23 องศาเซลเซียส ± 2 องศาเซลเซียสและความชื้น 50 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นสัมพัทธ์ ± 10 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงศึกษาผลของความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สาย และ 4 สาย , ผลกระทบจากโหลด , ผลการวัดระหว่างสายตัวนำต่างชนิด , ความต้านทานที่ขั้วต่อ , ค่าความเสถียรภาพและผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

5.2 สรุปผลความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย

ในส่วนของการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สายพบในย่านความต้านทาน 0.01 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม จะมีค่าความผิดพลาดตั้งแต่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ และในย่านความต้านทานมากกว่า 10 โอห์ม จะมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 0.1 เปอร์เซ็นต์

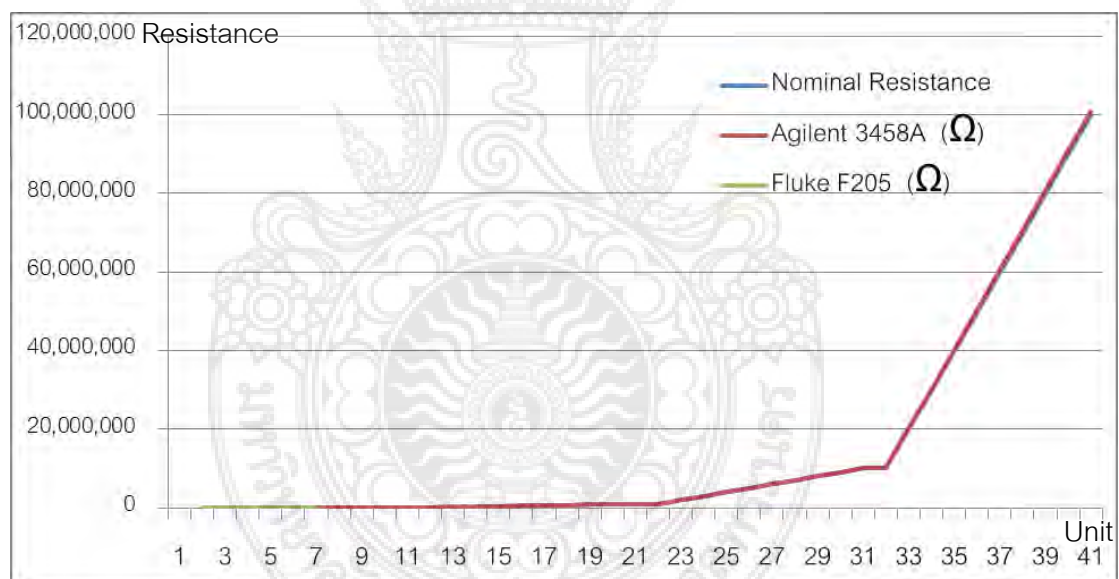


ภาพที่ 5.1 กราฟความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย

จากภาพที่ 5.1 จะพบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดแบบ 2 สายและ 4 สาย จะมีผลมากต่อความต้านทานในย่านความต้านทานต่ำๆ และจะมีต่อการวัดความต้านทานในย่านสูง น้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทาน

5.3 สรุปผลผลกระทบจากโหลด

ในส่วนของผลกระทบโหลดจากการวัดจะพบว่าถ้าใช้ DMM ที่มี Input Impedance สูงๆ เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานที่วัดจะมีผลกระทบของโหลดน้อย เช่น DMM รุ่น F205 ยี่ห้อ Fluke ที่มีค่า Input Impedance ขนาด 10 เมกะโอห์ม วัดความต้านทานใน ค่ามากกว่า 60 กิโลโอห์ม DMM จะไม่สามารถอ่านค่าความต้านทานได้ แต่ DMM รุ่น 3458A ยี่ห้อ Agilent จะสามารถวัดค่าความต้านทานสูงได้เนื่องจาก Input Impedance มีขนาดมากกว่า 10 จิกะโอห์มโดยสามารถแสดงค่าผิดพลาดเทียบจากค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 5.1



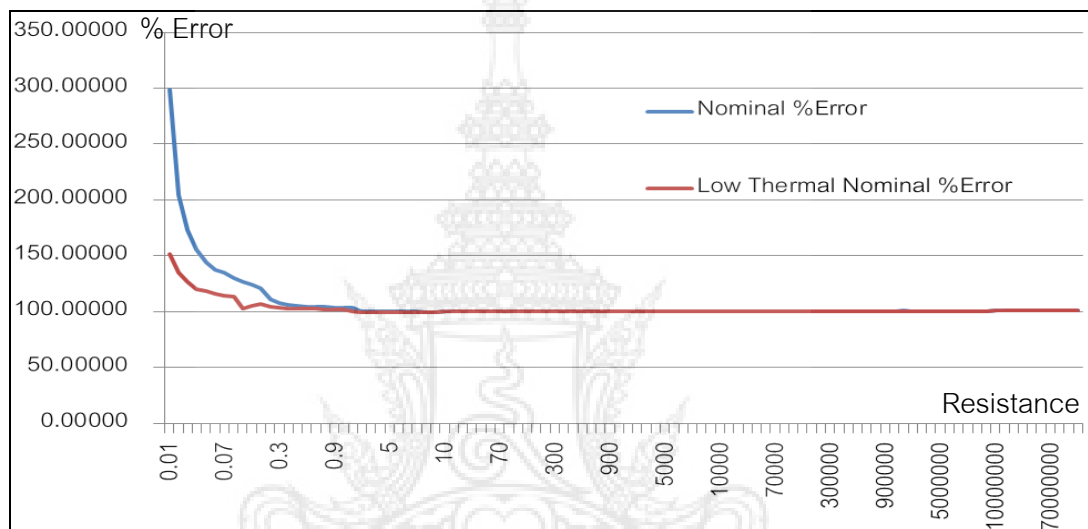
ภาพที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับค่าความผิดพลาดจากผลกระทบโหลด

จากภาพที่ 5.2 จะพบว่าค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นจะสัมพันธ์กับกับค่าความผิดพลาดที่เกิดจากผลกระทบของโหลดโดยเมื่อความต้านทานเพิ่มขึ้นค่าความผิดพลาดก็จะเพิ่มสูงตามไป

ด้วยดังนั้นการแก้ไขปัญหามลกระทบของไหลตครใช้ DMM ที่มี Input Impedance ที่มีค่าสูงเมื่อเทียบกับความต้านทานที่วัด

5.4 ผลการวัดระหว่างสายตัวนำต่างชนิด

จากผลการวัดในหัวข้อ 4.3 จะพบว่า Thermal EMF มีผลกับค่าที่วัดโดยเฉพาะการวัดในย่านที่ความต้านทานที่ต่ำซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.3

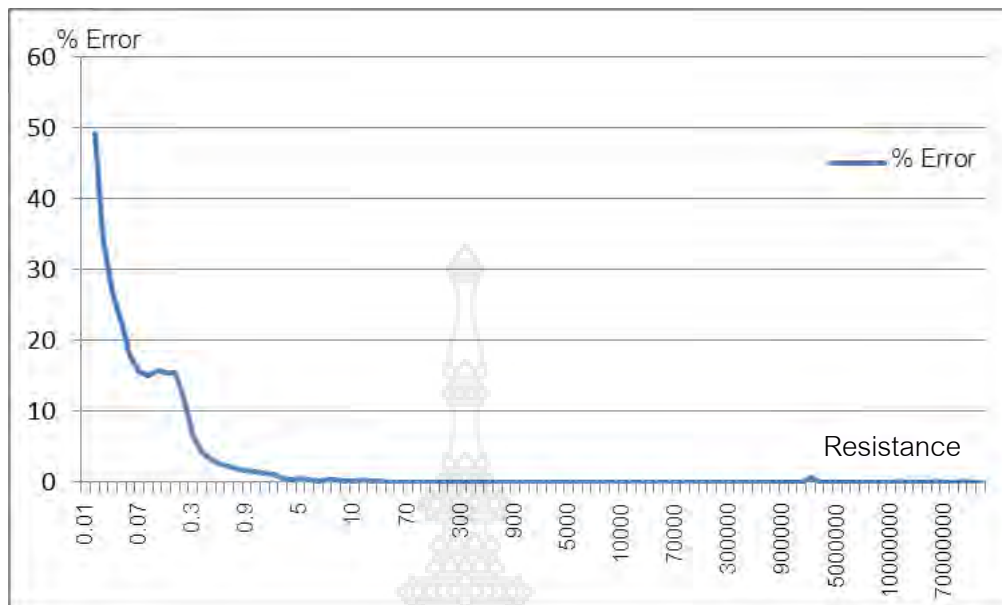


ภาพที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าความผิดพลาดจาก Thermal EMF

จากภาพที่ 5.3 จะพบว่าการใช้สาย Low Thermal จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า Nominal มากกว่าการใช้สายแบบธรรมดา รวมถึงค่าความผิดพลาดจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่วัดโดยค่าความผิดพลาดจะสูงเมื่อค่าความต้านทานมีค่าต่ำและค่าความผิดพลาดลดลงเมื่อมีค่าความต้านทานสูงขึ้น

5.5 ความต้านทานที่ขั้วต่อ

จากผลการวัดในหัวข้อ 4.4 จะพบว่าความต้านทานที่ขั้วต่อมีผลกับค่าที่วัดโดยเฉพาะการวัดในย่านที่ความต้านทานที่ต่ำซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและค่าความผิดพลาดจากขั้วต่อ

จากภาพที่ 5.4 จะพบว่าความผิดพลาดที่ขั้วต่อจะมีค่ามากที่สุด 49.17 เปอร์เซ็นต์ ในย่าน 0.01 โอห์ม ถึง 0.1 โอห์ม และจะมีค่าความผิดพลาดลดลงเมื่อความต้านทานที่วัดมีค่าสูงขึ้น

5.6 ค่าความเสถียรของความต้านทาน

จากผลการวัดในหัวข้อ 4.5 จะพบว่าในรอบ 1 ปีจะมีค่าความเสถียรในแต่ละย่านความต้านทานดังตารางต่อไปนี้

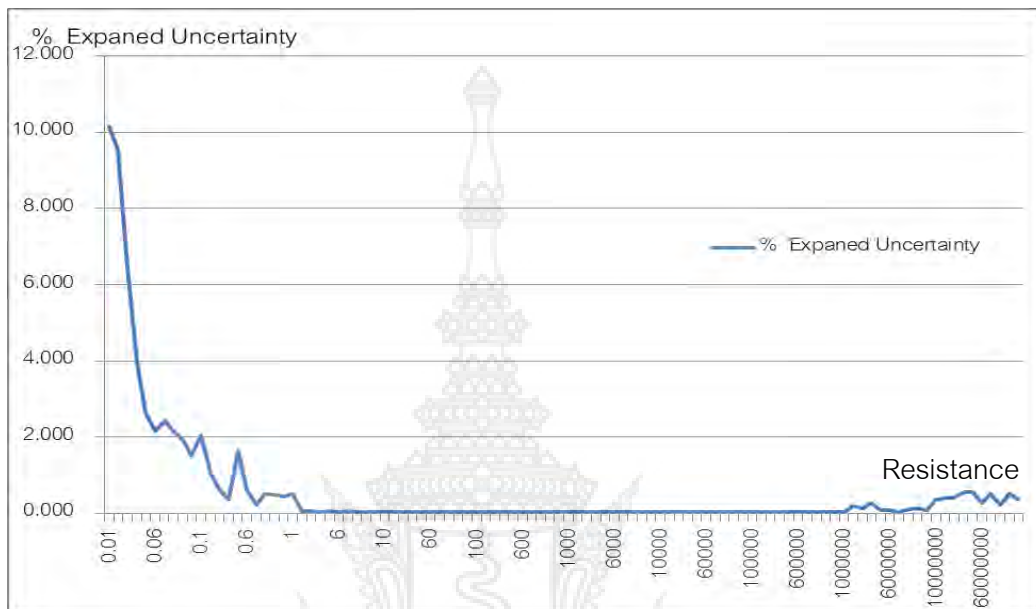
ตารางที่ 5.1 เปอร์เซ็นต์ค่าความเสถียรของความต้านทานแต่ละย่าน

Nominal Resistance	Stability %
0.01 - 0.1	2.0225
0.1 - 1.0	0.1887
1.0 - 10	0.0818
10 - 100	0.0510
100 - 1,000	0.0046
1,000 - 10,000	0.0055
10,000 - 100,000	0.0026
100,000 - 1,000,000	0.0041
1,000,000 - 10,000,000	0.1840
10,000,000 - 100,000,000	0.4454

จากตารางที่ 5.1 สรุปผลการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเสถียรในแต่ละย่านวัดสูงสุดได้ดังนี้
 ย่านที่ 0.01โอห์ม ถึง 0.1โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 2.023 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 0.1โอห์ม ถึง 1.0โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.188 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 1.0โอห์ม ถึง 10โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.081 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 10โอห์ม ถึง 100โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.015 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 100โอห์ม ถึง 1,000โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.005 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 1,000โอห์ม ถึง 10,000โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.006 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 10,000โอห์ม ถึง 100,000โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.003 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 100,000โอห์ม ถึง 1,000,000โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.004 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 1,000,000โอห์ม ถึง 10,000,000โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.184 เปอร์เซ็นต์
 ย่านที่ 10,000,000โอห์ม ถึง 100,000,000โอห์มมีค่าความเสถียรไม่เกิน 0.445 เปอร์เซ็นต์

5.7 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

จากผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์โดย
จากภาพที่ 5.5 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์ค่าความไม่แน่นอนในการวัดความต้านทานแต่ละย่าน

จากภาพที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ค่าความไม่แน่นอนจะขึ้นอยู่กับเครื่องวัดที่ใช้ในการวัด จะเห็นได้ว่าในย่าน 0.01 โอห์ม ถึง 1 โอห์ม มีค่าความไม่แน่นอนที่สูงเนื่องจากเครื่องวัดที่นำมาใช้มีย่านการใช้งานต่ำสุด 10 โอห์ม และในย่านการวัดความต้านทานมากกว่า 10 เมกะโอห์มจะมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดสูงขึ้นเนื่องจากค่าความถูกต้องของเครื่องวัด สำหรับรายละเอียดของเครื่องวัดสามารถดูได้ในภาคผนวกที่ ก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดจะเห็นว่าในส่วนของการวัด 2 สายและ 4 สายชนิดของสายตัวนำและความต้านทานที่ขั้วต่อจะมีผลต่อการวัดความต้านทานในย่านต่างๆในส่วนของผลกระทบของโหลดจะมีผลต่อการวัดค่าความต้านทานสูง สำหรับการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดย่านการวัดและความถูกต้องของเครื่องวัดจะมีผลต่อความไม่แน่นอนของการวัดความต้านทาน

เอกสารอ้างอิง

- B.J. Pritchard and G. W. Small., "Temperature Coefficient Variation in Heat Treated Evanohm and Their Effect on the Transient Behavior of the NML 1 Ω Resistors," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 42(2), 1993, pp. 557-561.
- H.Sasaki, H.Nishinaka, K. Shida. Automated measurement system for 1- Ω Omega standard resistor using a modified Wheatstone bridge Conf. Digest of CPEM 1990, 122-123
- Schumacher, B., Warnecke, P., "Transport behavior of commercially available 100/spl Omega/ standard resistors," CPEM 2000 Conference Digest, 2000, pp.486-487.
- WU. Jian, LI. Zheng-kun, and CHEN. Le, "Research on Analysis and Measurement Method for Thermal Resistance of Precision Resistor," ICIEA. 2014 IEEE Conference, 2014, pp. 1510-1514.
- J.H. Dellinger, "The Temperature Coefficient of Resistance of Copper," Bulletin of the Bureau of Standards, Vol.7, No.1, PP.88 – 90.
- Sorsdal, T., "Determination of Standard Resistor Temperature Coefficients," CPEM 2002 Conference Digest, 2002, pp. 46-47.
- G.R.Jones and R.E.Elmquist. Characterization of loading effects in precision 1 Ω Resistor Conf. Digest of CPEM 2008, Broomfield: 2008, 392-393.
- J.Lan,Z.Zhang,Z.Li,Q.He,B.Han,S.Li,and G.Wang.High Precision Measurement of the Load Effect of the Resistor. Conf. Digest of CPEM 2008,Washington D.C : 2012,380-381
- Low Level Measurement. Precision DC Current Voltage and Resistance Measurements. 5-th edition. Keithley Instruments, Inc.
- Calibration: Philosophy in Practice. Second Edition, Fluke Corporation 1994.
- ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization

for Standardization, Geneva, 1995. ISBN 92-67-10188-9

The Measurement of Electrical Quantities. National Measurement Institute.

September 2009.

ISO 9000:2005 Quality Management Systems-Fundamentals and vocabulary.

ISO 9001:2008 Quality Management Systems-Requirements.

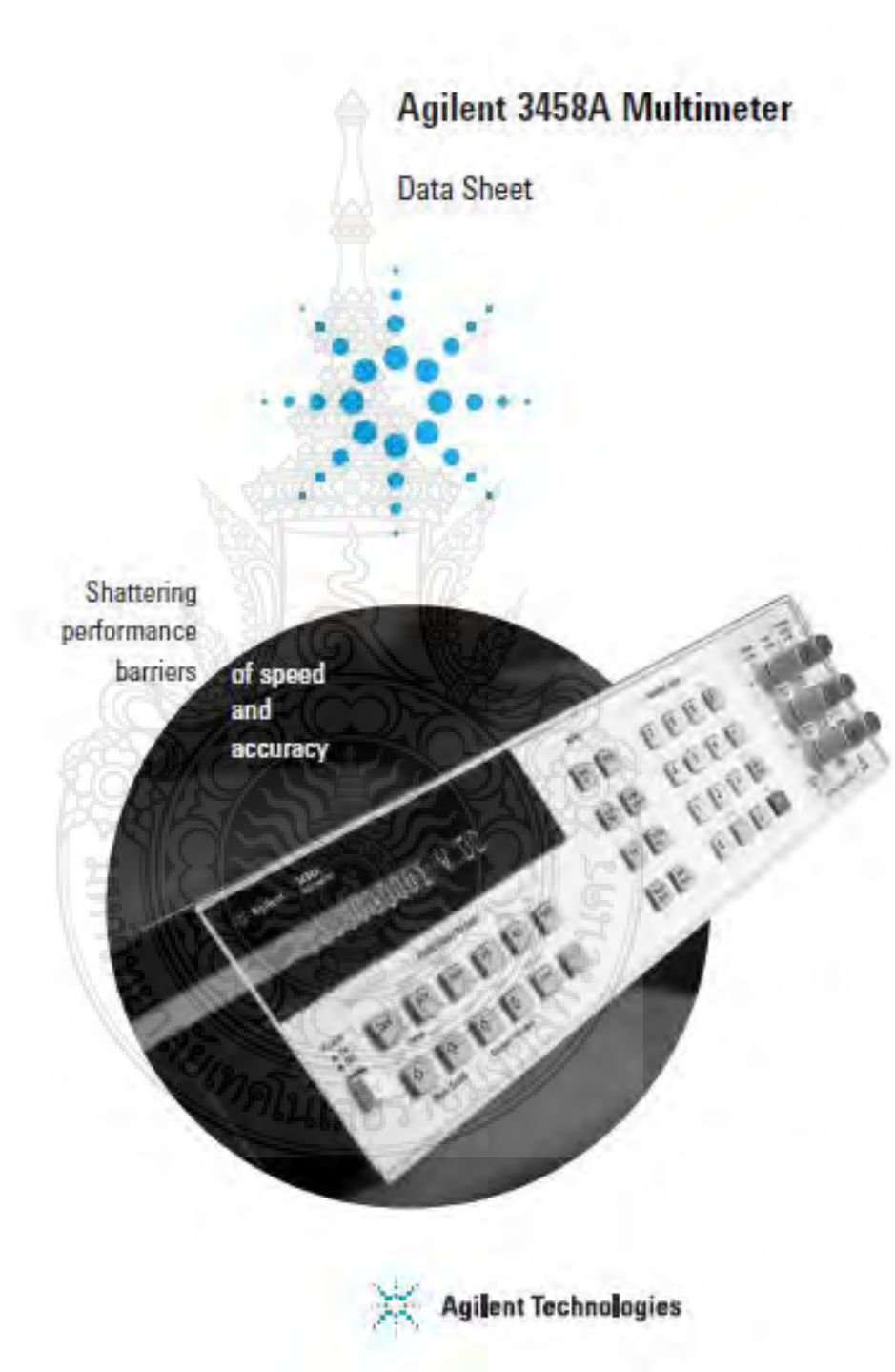






ภาคผนวก ก

Specification Agilent 3458A Multimeter



ภาคผนวก ก (ต่อ)

Performance Highlights

dc volts

- 5 ranges: 0.1 V to 1000 V
- 8.5 to 4.5 digit resolution
- Up to 100,000 readings/sec (4.5 digits)
- Maximum sensitivity: 10 nV
- 0.6 ppm 24 hour accuracy
- 8 ppm (4 ppm optional)/year voltage reference stability

Ohms

- 9 ranges: 10 Ω to 1 G Ω
- Two-wire and four-wire ohms with offset compensation
- Up to 50,000 readings/sec (5.5 digits)
- Maximum sensitivity: 10 $\mu\Omega$
- 2.2 ppm 24 hour accuracy

ac volts

- 6 ranges: 10 mV to 1000 V
- 1 Hz to 10 MHz bandwidth
- Up to 50 readings/sec with all readings to specified accuracy
- Choice of sampling or analog true rms techniques
- 100 ppm best accuracy

dc current

- 8 ranges: 100 nA to 1 A
- Up to 1,350 readings/sec (5.5 digits)
- Maximum sensitivity: 1 pA
- 14 ppm 24 hour accuracy

ac current

- 5 ranges: 100 μ A to 1 A
- 10 Hz to 100 kHz bandwidth
- Up to 50 readings/sec
- 500 ppm 24 hour accuracy

Frequency and period

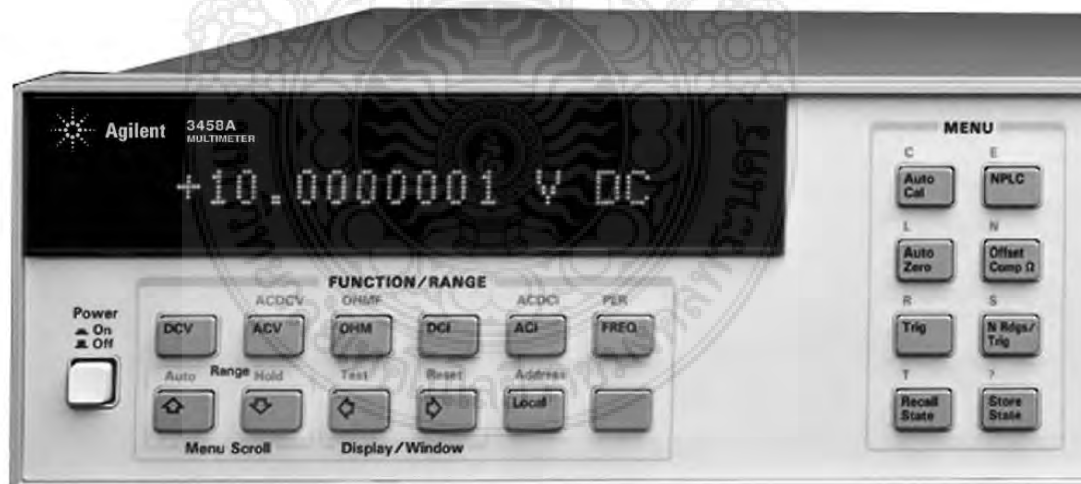
- Voltage or current ranges
- Frequency: 1 Hz to 10 MHz
- Period: 100 ns to 1 sec
- 0.01% accuracy
- ac or dc coupled

Maximum speeds

- 100,000 readings/sec at 4.5 digits (16 bits)
- 50,000 readings/sec at 5.5 digits
- 6,000 readings/sec at 6.5 digits
- 60 readings/sec at 7.5 digits
- 6 readings/sec at 8.5 digits

Measurement set-up speed

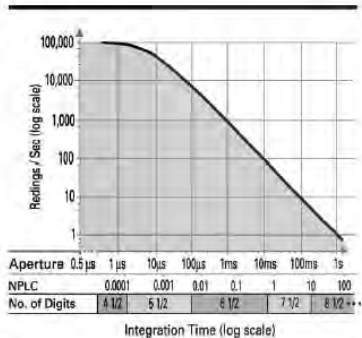
- 100,000 readings/sec over GPIB or with internal memory
- 110 autoranges/sec
- 340 function or range changes/sec
- Post-processed math from internal memory



ภาคผนวก ก (ต่อ)

DC Voltage continued

Reading Rate¹ (Auto-Zero ON)



Temperature Coefficient (Auto-Zero ON)

For a stable environment ± 1°C add the following additional error for AZERO OFF

Range	Error
100 mV - 10 V	5 μV/°C
100 V - 1000 V	500 μV/°C

Selected Reading Rates¹

NPLC	Aperture	Digits	Bits	Readings / Sec	
				A-Zero Off	A-Zero On
0.0001	1.4 μs	4.5	16	100,000 ³	4,130
0.0006	10 μs	5.5	18	50,000	3,150
0.01	167 μs ²	6.5	21	5,300	930
0.1	1.67 ms ²	6.5	21	502	245
1	16.6 ms ²	7.5	25	60	29.4
10	0.166 s ²	8.5	28	6	3
100		8.5	28	36 / min	18 / min
1000		8.5	28	3.6 / min	1.8 / min

¹ For PRESE, DELAY, B, DISP, OFF, FORMAT, DIR, ARRANGE, OFF.

² Aperture is selected independent of line frequency (LFREQ). Time apertures are for 60 Hz NPLC values, while 1 NPLC = 1 / LFREQ. For 50 Hz and NPLC calibrated, aperture will increase by 1.2 and reading rates will decrease by 0.83x.

³ For OFFFORMAT, BINT.

⁴ 10¹⁰ Ω to Guard with guard open.

⁵ 10¹² Ω to Guard to Earth.

Maximum Input

	Rated Input	Non-Destructive
HI to LO	± 1000 V pk	± 1200 V pk
LO to Guard ⁴	± 200 V pk	± 350 V pk
Guard to Earth ⁵	± 500 V pk	± 1000 V pk

Input Terminals

Terminal Material: Gold-plated Tellurium Copper
Input Leakage Current: <20 pA at 25°C

Section 2: Resistance

Two-wire and Four-wire Ohms (OHM and OHMF Functions)

Range	Full Scale	Maximum Resolution	Current / Source	Test Voltage	Open Circuit	Maximum Lead Resistance (OHMF)	Maximum Series Offset (OCOMP ON)	Temperature Coefficient (ppm of Reading + ppm of Range) / °C	
								Without ACAL ⁵	With ACAL ⁶
10 Ω	12.00000	10 μΩ	10 mA	0.1 V	12 V	20 Ω	0.01 V	3 + 1	1 + 1
100 Ω	120.00000	10 μΩ	1 mA	0.1 V	12 V	200 Ω	0.01 V	3 + 1	1 + 1
1 kΩ	1.2000000	100 μΩ	1 mA	1.0 V	12 V	150 Ω	0.1 V	3 + 0.1	1 + 0.1
10 kΩ	12.0000000	1 mΩ	100 μA	1.0 V	12 V	1.5 kΩ	0.1 V	3 + 0.1	1 + 0.1
100 kΩ	120.000000	10 mΩ	50 μA	5.0 V	12 V	1.5 kΩ	0.5 V	3 + 0.1	1 + 0.1
1 MΩ	1.20000000	100 mΩ	5 μA	5.0 V	12 V	1.5 kΩ		3 + 1	1 + 1
10 MΩ	12.0000000	1 Ω	500 nA	5.0 V	12 V	1.5 kΩ		20 + 20	5 + 2
100 MΩ ⁷	120.000000	10 Ω	500 nA	5.0 V	5 V	1.5 kΩ		100 + 20	25 + 2
1GΩ ⁷	1.20000000	100 Ω	500 nA	5.0 V	5 V	1.5 kΩ		1000 + 20	250 + 2

⁴ Current source is ± 5% absolute accuracy.

⁵ Additional error from load or lead ACAL is 1°C.

⁶ Additional error from lead is 0.1°C.

⁷ Absoluteness is computed from 10 MΩ, no unrolled with range.

ภาคผนวก ก (ต่อ)

Resistance continued

Accuracy¹ (ppm of Reading + ppm of Range)

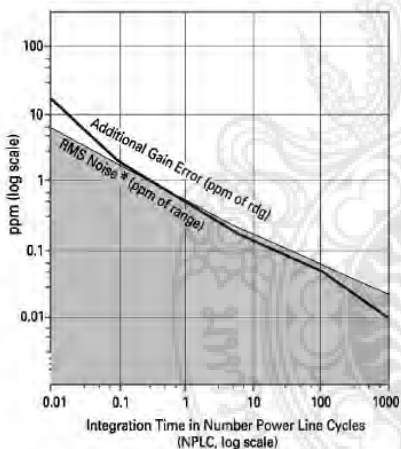
Range	24 Hour ²	90 Day ³	1 Year ³	2 Year ³
10 Ω	5 + 3	15 + 5	15 + 5	20 + 10
100 Ω	3 + 3	10 + 5	12 + 5	20 + 10
1 kΩ	2 + 0.2	8 + 0.5	10 + 0.5	15 + 1
10 kΩ	2 + 0.2	8 + 0.5	10 + 0.5	15 + 1
100 kΩ	2 + 0.2	8 + 0.5	10 + 0.5	15 + 1
1 MΩ	10 + 1	12 + 2	15 + 2	20 + 4
10 MΩ	50 + 5	50 + 10	50 + 10	75 + 10
100 MΩ	500 + 10	500 + 10	500 + 10	0.1% + 10
1 GΩ	0.5% + 10	0.5% + 10	0.5% + 10	1% + 10

- ¹ Specifications are for PRESET; NPLC 100; OCOMP ON; OHMF.
- ² Total ± 1°C.
- ³ Specifications for 90 Day, 1 year, and 2 year are within 24 hours and ± 1°C of last ACAL. Total ± 5°C.
Add 3 ppm of reading additional error for factory traceability of 10 kΩ to US NIST. Traceability is the absolute error relative to National Standards associated with the source of last external calibration.

Two-Wire Ohms Accuracy

For Two-Wire Ohms (OHM) accuracy, add the following offset errors to the Four-Wire Ohms (OHMF) accuracy.
24 Hour: 50 mΩ. 90 Day: 150 mΩ. 1 Year: 250 mΩ. 2 Year: 500 mΩ

Additional Errors



Range	Multiplier
10 Ω to 100 Ω	x10
1k Ω to 100 kΩ	x1
1 MΩ	x1.5
10 MΩ	x2
100 MΩ	x120
1 GΩ	x1200

For RMS noise error, multiply RMS noise result from graph by multiplier in chart. For peak noise error, multiply RMS noise error by 2.

Settling Characteristics

For first reading error following range change, add the total 90 day measurement error for the current range. Preprogrammed settling delay times are for < 200 pF external circuit capacitance.

Selected Reading Rates⁴

NPLC ⁵	Aperture	Digits	Readings / Sec	
			Auto-Zero Off	Auto-Zero On
0.0001	1.4 μs	4.5	100,000 ⁷	4,130
0.0006	10 μs	5.5	50,000	3,150
0.01	167 μs ⁶	6.5	5,300	930
0.1	1.66 ms ⁶	6.5	592	245
1	16.6 ms ⁶	7.5	60	29.4
10	0.166 s ⁶	7.5	6	3
100	7.5	7.5	36 / min	18 / min

Measurement Consideration

Agilent recommends the use of Teflon[®] cable or other high impedance, low dielectric absorption cable for these measurements.

Maximum Input

	Rated Input Non-Destructive	
HI to LO	± 1000 V pk	± 1000 V pk
HI & LO Sense to LO	± 200 V pk	± 350 V pk
LO to Guard	± 200 V pk	± 350 V pk
Guard to Earth	± 500 V pk	± 1000 V pk

Temperature Coefficient (Auto-Zero Off)

For a stable environment ± 1°C add the following error for AZERO OFF: (ppm of Range) / °C

Range	Error	Range	Error
10 Ω	50	1 MΩ	1
100 Ω	50	10 MΩ	1
1 kΩ	5	100 MΩ	10
10 kΩ	5	1 GΩ	100
100 kΩ	1		

- ⁴ For PRESET; DELAY 0; DISP OFF; DFORMAT DINT; ARANGE OFF.
For OHMF or OCOMP ON, the maximum reading rates will be slower.
- ⁵ Ohms measurements at rates < NPLC 1 are subject to potential noise pickup. Care must be taken to provide adequate shielding and guarding to maintain measurement accuracies.
- ⁶ Aperture is selected independent of line frequency (LFREQ). These apertures are for 60 Hz NPLC values where 1 NPLC = 1 / LFREQ. For 50 Hz and NPLC indicated, aperture will increase by 1.2 and reading rates will decrease by 0.833.
- ⁷ For DFORMAT SINT.
- ⁸ Teflon is a registered trademark of E. I. duPont de Nemours and Co.

ภาคผนวก ก (ต่อ)

1 / DC Voltage

DC Voltage

Range	Full Scale	Maximum Resolution	Input Impedance	Temperature Coefficient (ppm of Reading + ppm of Range) / °C	
				Without ACAL ¹	With ACAL ²
100 mV	120.000000	10 nV	>10 GΩ	1.2 ± 1	0.15 ± 1
1 V	1.20000000	10 nV	>10 GΩ	1.2 ± 0.1	0.15 ± 0.1
10 V	12.00000000	100 nV	>10 GΩ	0.5 ± 0.01	0.15 ± 0.01
100 V	120.000000	1 μV	10 MΩ ± 1%	2 ± 0.4	0.15 ± 0.1
1000 V	1050.00000	10 μV	10 MΩ ± 1%	2 ± 0.04	0.15 ± 0.01

Accuracy³ (ppm of Reading (ppm of Reading for Option 002) + ppm of Range)

Range	24 Hour ⁴	90 Day ⁵	1 Year ⁵	2 Year ⁵
100 mV	2.5 ± 3	5.0 (3.5) ± 3	9 (5) ± 3	14 (10) ± 3
1 V	1.5 ± 0.3	4.6 (3.1) ± 0.3	8 (4) ± 0.3	14 (10) ± 0.3
10 V	0.5 ± 0.05	4.1 (2.6) ± 0.05	8 (4) ± 0.05	14 (10) ± 0.05
100 V	2.5 ± 0.3	6.0 (4.5) ± 0.3	10 (6) ± 0.3	14 (10) ± 0.3
1000 V ⁶	2.5 ± 0.1	6.0 (4.5) ± 0.1	10 (6) ± 0.1	14 (10) ± 0.1

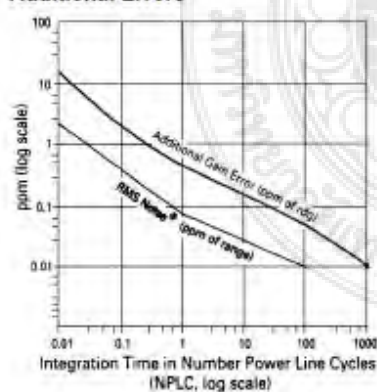
Transfer Accuracy/Linearity

Range	10 Min. Tref ± 0.5°C	
	(ppm of Reading + ppm of Range)	Conditions
100 mV	0.5 ± 0.5	Following 4 hour warm-up. Full scale to 10% of full scale measurements on the 1000 V range are within 5% of the initial measurement value and following measurement setting. Tref is the starting ambient temperature. Measurements are made on a fixed range (>4 min.) using accepted metrology practices.
1 V	0.3 ± 0.1	
10 V	0.05 ± 0.05	
100 V	0.5 ± 0.1	
1000 V	1.5 ± 0.05	

Setting Characteristics

For first reading or range change error, add 0.0001% of input voltage step additional error. Reading settling times are affected by source impedance and cable dielectric absorption characteristics.

Additional Errors



Noise Rejection (dB)⁷

	AC NMR ⁸	AC ECMR	DC ECMR
NPLC = 1	0	90	140
NPLC = 1	60	150	140
NPLC = 10	60	150	140
NPLC = 100	60	160	140
NPLC = 1000	75	170	140

*RMS Noise

Range	Multipher
0.1 V	x20
1 V	x2
10 V	x1
100 V	x2
1000 V	x1

For RMS noise error, multiply RMS noise result from graph by multiplier in chart. For peak noise error, multiply RMS noise error by 3.

- Additional error from Tcal or last ACAL = 1 °C.
- Additional error from Tcal = 5 °C.
- Specifications are for PRESET, NPLC 100.
- For fixed range (> 4 min.), MATH NULL and Tcal ± 1 °C.
- Specifications for 90 day, 1 year and 2 year are within 24 hours and = 1 °C of last ACAL; Tcal = 5 °C, MATH NULL and fixed range.
ppm of Reading specifications for High Stability (Option 002) are in parentheses.
Without MATH NULL, add 0.15 ppm of Range to 10 V, 0.7 ppm of Range to 1 V, and 7 ppm of Range to 0.1 V. Without math null and for fixed range less than 4 minutes, add 0.25 ppm of Range to 10 V, 1.7 ppm of Range to 1 V and 17 ppm of Range to 0.1 V.
Add 2 ppm of reading additional error for Agilent factory traceability to US NIST. Traceability error is the absolute error relative to National Standards associated with the source of last external calibration.
- Add 12 ppm X (Vin/1000)² additional error for inputs > 100 V.

- Applies for 1 kΩ unbalance in the LO lead and ± 0.1% of the line frequency currently set for LFREQ.
- For line frequency ± 1%, ACNMR is 40 dB for NPLC ≥ 1, or 55 dB for NPLC ≥ 100. For line frequency = 5%, ACNMR is 30 dB for NPLC ≥ 100.



ภาคผนวก ข

Specification Clamp Chauvin Arnoux Multimeter F205

▪ CLAMP MULTIMETER

F205

ENGLISH

User's manual

ภาคผนวก ข (ต่อ)

English

Clamp Multimeter F205

- In DC: depends on the remanence. Can be corrected by the "DC zero" function of the HOLD key
- In AC: <150mA

Specific characteristics in MAX/MIN mode in current (from 10Hz to 1kHz in AC and AC+DC, and from 0.30 A):

- Uncertainties: add \pm (1% R) to the values in the tables above.
- Capture time of the extrema: approximately 100ms.

Specific characteristics in PEAK mode in current (from 10Hz to 1kHz in AC and AC+DC):

- Uncertainties: add \pm (1.5% R+0.5A) to the values in the tables above.
- PEAK capture time: 1ms min. to 1.5ms max.

4.2.7 True-Inrush measurement

Measurement range	6 A to 600 A AC	6 A to 900 A DC
Specified measurement range	0 to 100% of the measurement range	
Uncertainties	\pm (5% R + 5 pt)	
Resolution	1 A	

Specific characteristics in PEAK mode in True-Inrush (from 10Hz to 1kHz in AC):

- Uncertainties: add \pm (1.5% R+0.5A) to the values in the tables above.
- PEAK capture time: 1ms min. to 1.5ms max.

4.2.8 Continuity measurement

Measurement range	0.0 Ω to 599.9 Ω
Open-circuit voltage	\leq 3,6 V
Measurement current	550 μ A
Uncertainties	\pm (1% R +3 pt)
Buzzer triggering threshold	Adjustable from 1 Ω to 599 Ω (40 Ω is the default)

4.2.9 Resistance measurement

Measurement range (1)	0.0 Ω to 599.9 Ω	600 Ω to 5999 Ω	6.00 k Ω to 59.99 k Ω
Specified measurement range	1 to 100% of the measurement range	0 to 100% of the measurement range	
Uncertainties	\pm (1% R +3 pt)		
Resolution	0.1 Ω	1 Ω	10 Ω
Open-circuit voltage	\leq 3,6 V		
Measurement current	550 μ A	100 μ A	10 μ A

ภาคผนวก ข (ต่อ)

4.2 CHARACTERISTICS UNDER THE REFERENCE CONDITIONS

The uncertainties are expressed in \pm (x% of the reading (R) + y points (pt)).

4.2.1 DC voltage measurement

Measurement range	0.00 V to 59.99 V	60.0 V to 599.9 V	600 V to 1000 V (1)
Specified measurement range	0 to 100% of the measurement range		
Uncertainties	from 0.00V to 5.99V $\pm(1\% R + 10 \text{ pt})$ from 6.00V to 59.99V $\pm(1\% R + 3 \text{ pt})$	$\pm(1\% R + 3 \text{ pt})$	
Resolution	0.01V	0.1V	1V
Input impedance	10M Ω		

Note (1) - The display indicates "+OL" above +2000V and "-OL" below - 2000V in REL mode

- Above 1000V, a repetitive beep indicates that the voltage being measured is greater than the safety voltage for which the device is guaranteed. The display indicates "OL"

4.2.2 AC voltage measurement

Measurement range	0.15 V to 59.99 V	60.0 V to 599.9 V	600 V to 1000V RMS 1400V peak (1)
Specified measurement range (2)	0 to 100% of the measurement range		
Uncertainties	from 0.15V to 5.99V $\pm (1\% R + 10 \text{ pt})$ from 6.00V to 59.99V $\pm (1\% R + 3 \text{ pt})$	$\pm (1\% R + 3 \text{ pt})$	
Resolution	0.01V	0.1V	1V
Input impedance	10M Ω		

Note (1) - The display indicates "OL" above 1000V (1400V in PEAK mode).

- Above 1000V, a repetitive beep indicates that the voltage being measured is greater than the safety voltage for which the device is guaranteed. The display indicates "OL".

- Bandwidth in AC = 3 kHz



ภาคผนวก ค
ตารางการกระจายแบบที (Student't distribution)

Degrees of freedom	p = 0.1	p = 0.05	p = 0.02	p = 0.01	p = 0.002	p = 0.001
1	6.314	12.706	31.821	63.657	318.310	636.620
2	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.598
3	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214	12.924
4	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.767
24	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
120	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	3.373
∞	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291



ภาคผนวก ง
บทความวิจัยในการเลือกชนิดของตัวต้านทาน



RMUTK
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 7



EENET2015

Creative Technology for Green Energy
27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel

**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7**

The 7th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology



Conference Topics

• ไฟฟ้ากำลัง (PW)	• การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
• อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)	• พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
• อิเล็กทรอนิกส์ (EL)	• งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
• ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)	• คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
• ระบบควบคุมและการวัด (CT)	• นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแม่เหล็กมหามคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนบางลิ้มจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพ 10120
<http://www.eenet2015.org>

EENET2015



ภาคผนวก ง (ต่อ)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

การศึกษาสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานหลายชนิดขนาด 1 กิโลโอห์ม

Study on Temperature Coefficient of the Resistor 1 k-Ohm Types

จรุพงษ์ ตรีโกศล¹ ณัฐพร กิ่งพันธุ์² และ ชัยวัฒน์ เจษฎาจินต์³

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โทรศัพท์: 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: jarupong.parujai@gmail.com, nattapong100@gmail.com

²ส่วนงานความต้านทาน ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

โทรศัพท์: 02-577-5100 ต่อ 1219 E-mail: chairwat@nmit.or.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้ศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานของตัวต้านทานแต่ละชนิดที่ใช้งานทั่วไปและหาสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของตัวต้านทานแต่ละชนิดแล้วนำมาเปรียบเทียบเพื่อนำไปเป็นแนวทางในการเลือกตัวต้านทานไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม โดยศึกษาคุณสมบัติของตัวต้านทาน 1 kΩ ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดกำลังต่างกันและทำการควบคุมอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงช่วง 20°C - 30°C โดยกรนำตัวต้านทานชนิดต่างๆแช่ลงในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิพร้อมกับวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ควบคุมในอ่างน้ำมัน จากการศึกษพบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีผลให้ค่าความต้านทานชนิด Carbon Film มีการเปลี่ยนแปลงค่ามากที่สุดและค่าความต้านทานชนิด Wire wound ที่ขนาดกำลังต่ำมีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อยที่สุด

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ, การวัดความต้านทาน, ตัวต้านทานตัวไวเตอร์

Abstract

This article studies the relationship between the variation of temperature and the resistance value of each resistor that we used normally. And we tried to find the temperature coefficient value of each resistor then be compared to be used as a guide in choosing the correct resistor and fit. By studying the properties of the different type of resistor 1 kΩ at the different power to be controlled the variation of temperature between 20 - 30°c. By we immersed the different of type resistor in oil bath temperature controlled and then we measured the value of temperature as temperature controlled in oil bath. From the study, we found that the variation of temperature in Carbon Film was the most changes and the variation of temperature in Wire wound at low power was less changes.

Keywords: Temperature Coefficient, Measured the Resistant, Divider Resistor

1. บทนำ

ปัจจุบันงานทางด้านเครื่องวัดและอุปกรณ์การวัด มีการนำความต้านทานหลากหลายชนิดไปใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ถอดนำไปใช้เป็นตัวมาตรฐาน [1] ตัวตรวจจับต่างๆ ตัวต้านทานขนาดในการวัดกระแสสูง ตัวต้านทานตัวไวเตอร์ในการวัดแรงดันสูง รวมถึงใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบการวัด ในการใช้งานของตัวต้านทานชนิดต่างๆจะขึ้นอยู่กับกรนำมาไปประยุกต์ใช้งานนั้นๆ สำหรับงานบางชนิดต้องการตัวต้านทานที่มีค่าสูงแต่ในบางชนิดอาศัยผลของการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวต้านทานในการใช้งาน ดังนั้นการนำตัวต้านทานไปใช้งานทางด้านต่างๆ จำเป็นที่จะต้องเลือกชนิดของตัวต้านทานให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ ปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงค่าคืออุณหภูมิ [2] โดยการเปลี่ยนแปลงค่าของความต้านทานเนื่องจากอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวต้านทานแต่ละชนิดที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ [3]

ในบทความนี้จะแสดงให้เห็นว่าถ้าอุณหภูมิของตัวนำหรือตัวต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้สภาพความต้านทานของตัวนำประเภท โลหะและวัสดุชนิดต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงหรือทำให้ความต้านทานของตัวนำเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันไปด้วย

2. สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทาน

2.1 หลักการทำงานของอุณหภูมิ

กฎการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (T) โดย สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [4]

$$R_t = R_T f(t) \tag{1}$$

ภาคผนวก ง (ต่อ)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

โดยที่ R_2 คือ ค่าคงที่ ณ อุณหภูมิอ้างอิง (T) นั้นๆ โดยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ α_1 แสดงค่าเป็น α_2 หาได้จากสมการดังนี้

$$\alpha_1 = \frac{1}{R_{t_1}} \left(\frac{dR}{dt} \right)_{t_1} \quad (2)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ทั้งเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นได้จากสมการที่ (1) แทนค่า R_1 ในสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$\alpha_1 = \frac{1}{f(t_1) L} \left(\frac{df(t)}{dt} \right)_{t_1} \quad (3)$$

ดังนั้น ถ้ารู้ค่า $f(t)$ เราก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใดๆ ได้ โดยที่ $f(t)$ มักถูกแสดงค่าของอุณหภูมิ t จากน้อยไปมาก จึงทำให้ค่าความหนาของ α_{t_1} เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าของ α_{t_1} นี้ สามารถใช้ในการคำนวณค่า R ณ อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอ้างอิง t_1 ไม่เพียงใช้ได้ในการวัดทั่วไปเท่านั้น ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้กับอุณหภูมิที่ไกลจาก t_1 ได้ ดังนั้นจากสมการ (2) จะได้ว่า

$$(dR)_{t_1} = \alpha_1 R_{t_1} dt \quad (4)$$

ดังนั้น จาก t ไม่ไกลจาก t_1 มากนัก หาได้จากสมการดังนี้

$$R_1 - R_{t_1} = \alpha_1 R_{t_1} [t - t_1] \quad (5)$$

$$R_1 = R_{t_1} (1 + \alpha_1 [t - t_1]) \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) และ (3) ทำให้เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณเชิงเส้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มากนัก

$$R_1 = R_0 (1 + \alpha_0 t) \quad (7)$$

$$\text{หรือ } f(t) = 1 + \alpha_0 t \quad (8)$$

แทนค่า $f(t)$ ในสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (3) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t_1} \quad (9)$$

$$\text{หรือ } \alpha_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + t_1} \quad (10)$$

และจาก $\frac{dR}{dt} =$ ค่าคงที่ $= \frac{R_1 - R_2}{t_1 - t_2}$ แทนค่าในสมการ (2) จะได้ว่า

$$\alpha_2 R_{t_2} = \frac{R_1 - R_2}{t_1 - t_2}$$

$$\therefore R_1 = R_{t_2} (1 + \alpha_2 [t - t_2]) \quad (11)$$

จะสังเกตว่า สมการที่ (11) คล้ายคลึงกับสมการที่ (6) ยกเว้นในกรณีสมการที่ (11) ไม่ได้ถูกจำกัดในเรื่องของ อุณหภูมิ t ใดๆ จะต้องไม่ไกลจาก t_2 มากนัก เราสามารถสังเกตเห็นจากสมการที่ (11) ว่า ณ อุณหภูมิใดๆ อาจสามารถใส่ค่าอุณหภูมิมาตรฐานได้ รวมถึงค่าอุณหภูมิ 0° (ดังสมการที่ (7)) อีกทั้งค่าของ $f(t)$ ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการ (10) เราจะได้ว่า

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + (t_1 - t_2)} \quad (12)$$

อีกนัยหนึ่งเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์จริงของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใดๆ ได้โดยตรงจากค่าของ α_2 ณ อุณหภูมิอื่นๆ ได้เพื่อความสะดวกจะใช้รูปสมการที่ (13) [4] ในการคำนวณค่า

$$\alpha_1 = \alpha_2 - \alpha_2^2 (t_1 - t_2) + \alpha_2^3 (t_1 - t_2)^2 - \dots \quad (13)$$

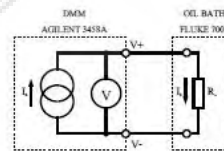
โดยทั่วไปตัวต้านทานจะเป็นโลหะหรือวัสดุผสมดังนั้นเมื่อพิจารณาฟังก์ชันของอุณหภูมิในลักษณะเส้นโค้งจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานที่อุณหภูมิใดๆ [5] ได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_t = R_{ref} [1 + \alpha(t - T_{ref}) + \beta(t - T_{ref})^2] \quad (14)$$

เมื่อ α และ β เป็นค่าคงที่ที่วัดสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและ R_{ref} เป็นค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง T_{ref} โดยจากสมการค่า α จะเป็นตัวบ่งชี้ความชันและ β จะแสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

3. การวัดความต้านทานเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

การวัดตัวต้านทานครั้งนี้ใช้ค่าความต้านทานขนาด $1 \text{ k}\Omega$ โดยใช้ดีจิตอลมัลติมิเตอร์ ในการ วัด และ จะ ทำ การ คำนวณ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิจากวงจรในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรการวัดค่าความต้านทานที่ควบคุมสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ

ภาคผนวก ง (ต่อ)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

ขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานชนิดต่างๆ ขนาด 1kΩ โดยจะทำการแช่ตัวต้านทานขนาด 1kΩ ลงในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิแล้วทำการปรับอุณหภูมิในอ่างน้ำมันให้อยู่ในระดับ 20°C พร้อมกับทำการวัดค่าความต้านทาน จากนั้นจะทำการปรับอุณหภูมิในอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 1°C พร้อมกับทำการวัดค่าความต้านทานทุกครั้งที่ปรับจนถึงอุณหภูมิที่ 30°C โดยจะทำการวัดซ้ำด้วยตัวเปลี่ยนชนิดของตัวต้านทานชนิดต่างๆ ดังนี้ ตัวต้านทานชนิดคาร์บอนผสม (Carbon Composition Resistor) ตัวต้านทานชนิดฟิล์มคาร์บอน (Carbon Film Resistor) ตัวต้านทานชนิดฟิล์มโลหะ (Metal Film Resistor) ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มหนา (Thick Film Network Resistor) ตัวต้านทานชนิดแผ่นฟิล์มบาง (Thin Film Resistor) ตัวต้านทานชนิดไวร์ วาวด์ (Wire Wound Resistor) ตัวต้านทานชนิดเซรามิก (Ceramic Resistor) ตัวต้านทานชนิดฟิล์มอลูมิเนียม (Metal Aluminum Resistor) ในการวัดค่า จากนั้นทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าความต้านทานเพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยใช้ชุดเครื่องมือวัด 8/ชุดหลัก Agilent รุ่น 3458A ที่มีย่านวัด 10 Ω ถึง 1 GΩ โดยย่านวัดที่ 1 kΩ มีความละเอียดสูงสุด 100 μΩ มีควมถูกต้อง 3 ppm of Reading + 0.1 ppm of Range และอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ Fluke รุ่น 7009 ย่านวัด 0°C - 100°C ความเสถียรที่ 25°C ±0.001°C ความละเอียดสูงสุด 0.002°C

4. ผลการทดลองและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิความต้านทาน

จากการวัดค่าความต้านทานของตัวต้านทานขนาด 1kΩ ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดกำลัง 250 mW, 500 mW, 1 W และ 5 W โดยการปรับระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 – 4

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่า α และ β ที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานขนาด 250 mW

Resistor 1 kΩ Types	α	β	Standard Deviation
Carbon Comp. ±5%	0.010000000	0.009000000	0.161833406
Carbon Film ±5%	-0.200000000	0.000090000	0.764789354
Metal Film ±0.1%	-0.020000000	-0.000050000	0.065810088
Metal Film ±0.5%	-0.040000000	0.000080000	0.152356434
Metal Film ±1%	-0.010000000	0.000200000	0.041765926
Metal Film ±2%	0.020000000	0.000010000	0.050856170
Wire Wound ±0.1%	0.004000000	-0.000060000	0.013433452
Metal Al ±0.1%	0.010000000	0.000090000	0.036136796
Ceramic ±5%	-0.010000000	0.000100000	0.042454361
Thick Film ±1%	0.040000000	-0.000100000	0.149172715

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณค่า α และ β ที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานขนาด 500 mW

Resistor 1 kΩ Types	α	β	Standard Deviation
Carbon Film ±5%	-0.200000000	0.000100000	0.795503763
Ceramic ±5%	0.006000000	-0.000400000	0.021025236
Wire Wound ±5%	0.005000000	-0.000200000	0.016963201
Thin Film ±1%	-0.010000000	-0.000100000	0.049408706
Metal Film ±1%	-0.020000000	0.000090000	0.078840330
Metal Film ±2%	-0.020000000	-0.000030000	0.069404526
Metal Oxide ±5%	-0.200000000	0.000100000	0.750325908
Metal Film ±0.1%	0.010000000	0.000040000	0.035004984
Wire Wound ±0.1%	0.007000000	0.000020000	0.023140543
Carbon Comp. ±5%	-0.060000000	-0.004000000	0.220904318

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณค่า α และ β ที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานขนาด 1 W

Resistor 1 kΩ Types	α	β	Standard Deviation
Metal Film ±1%	-0.020000000	0.000010000	0.066001474
Metal Film ±5%	0.100000000	-0.002000000	0.337513055
Wire Wound ±1%	0.000700000	-0.000060000	0.002884536
Wire Wound ±5%	0.100000000	-0.006000000	0.399902250
Metal Oxide ±5%	0.090000000	-0.000200000	0.307901341
Carbon Film ±5%	-0.200000000	0.000100000	0.761152918
Ceramic ±5%	0.004000000	0.000010000	0.014756441

ภาคผนวก ง (ต่อ)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณค่า α และ β ที่ได้จากการวัดค่าความต้านทานขนาด 5 W

Resistor 1 k Ω Types	α	β	Standard Deviation
Wire Wound $\pm 1\%$	0.070000000	0.000070000	0.228238957
Wire Wound $\pm 5\%$	0.100000000	0.000200000	0.403937455
Metal Film $\pm 5\%$	-0.100000000	0.000500000	0.407123154
Thick Film $\pm 5\%$	0.200000000	0.000300000	0.613292962
Ceramic $\pm 1\%$	-0.008000000	0.000030000	0.027925117
Ceramic $\pm 5\%$	-0.000900000	0.000004000	0.003137225

ตารางแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวต้านทานชนิดต่างๆ ที่มีขนาดกำลัง 250 mW 500 mW 1 W และ 5 W โดยค่าของ α จะแสดงถึงความชันของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และค่าของ β จะแสดงถึงความเบี่ยงเบนของการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่า Standard Deviation จะแสดงถึงการเบี่ยงเบนจากค่ากลางของค่าความต้านทานเฉลี่ย

5. สรุป

จากตารางแสดงผลการคำนวณพบว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวต้านทานต่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงค่าได้ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยตัวต้านทานชนิด Carbon Film มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และการเปลี่ยนแปลงค่าไม่ขึ้นกับขนาดของกำลัง ส่วนชนิดของความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงตัวสุดคือชนิด Wire Wound ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับขนาดของกำลังและเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง ความต้านทานชนิด Carbon comp. มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ ไม่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด สำหรับความต้านทานชนิด Ceramic มีการเปลี่ยนแปลงค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อกำลังมีขนาดลดลงค่าการเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มมากขึ้น ความต้านทานชนิด Metal Film, Metal Oxide และ Metal Al มีการเปลี่ยนแปลงค่าค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความถูกต้องแต่มีความเป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูงและตัวต้านทานชนิด Thick Film และ Thin Film มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะค่อนข้างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นจากคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานชนิดต่างๆ จะเห็นว่าความต้านทานแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานแตกต่างกัน ในงานที่ต้องการความต้านทานที่มีค่าคงที่ เช่นความต้านทานขนานในการวัดกระแสหรือความต้านทานตัวไวเดอ์คว ใช้ความต้านทานชนิด Wire wound หรือความต้านทานที่มีค่า α ค่า ในงานที่มีขนาดกำลังสูงเช่นการใช้ตัวต้านทานชนิด Ceramic เพราะมี

ค่า α ค่อนข้างคงที่เมื่อขนาดกำลังวัตต์เพิ่มขึ้น สำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองทางอุณหภูมิค่อนข้างไวควรรใช้ความต้านทานชนิด Carbon หรือใช้ความต้านทานที่มี α สูงและงานที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นควรรใช้ความต้านทานชนิด Metal Film หรือใช้ความต้านทานที่มีค่า β ต่ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณส่วนงานความต้านทาน ฝ่ายมาตรฐานไฟฟ้า สถาบันมาตรฐานแห่งชาติสำหรับความเชื่อถือเพื่อข้อมูลที่เป็ประโยชน์ และห้องปฏิบัติการความต้านทาน ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยที่ตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Schumacher, B., Wamecke, P., "Transport behavior of commercially available 100 /spl Omega/ standard resistors," CPEM 2000 Conference Digest, 2000, pp.486-487.
- [2] B.J. Pritchard and G. W. Small, "Temperature Coefficient Variation in Heat Treated Evanohm and Their Effect on the Transient Behavior of the NML 1 Ω Resistors," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 42(2), 1993, pp. 557-561.
- [3] WU, Jian, LI Zheng-kuo, and CHEN, Le, "Research on Analysis and Measurement Method for Thermal Resistance of Precision Resistor," ICIEA, 2014 IEEE Conference, 2014, pp. 1510-1514.
- [4] J.H. Dellinger, "The Temperature Coefficient of Resistance of Copper," Bulletin of the Bureau of Standards, Vol.7, No.1, PP.88 - 90.
- [5] Sordal, T., "Determination of Standard Resistor Temperature Coefficients," CPEM 2002 Conference Digest, 2002, pp. 46-47.
- [6] G.R.Jones and R.E.Elmquist. Characterization of loading effects in precision 1 Ω Resistor Conf. Digest of CPEM 2008, Broomfield: 2008, 392-393.
- [7] H.Sasaki, H.Nishinaka, K. Chida. Automated measurement system for 1- Ω Omega standard resistor using a modified Wheatstone bridge Conf. Digest of CPEM 1990, 122-123
- [8] J.Lan, Z. Zhang, Z. Li, Q. He, B. Han, S. Li, and G. Wang. High Precision Measurement of the Load Effect of the Resistor. Conf. Digest of CPEM 2008, Washington D.C.: 2012, 380-381





ภาคผนวก จ

ตารางการประเมินความไม่แน่นอน

Uncertainty Budget 0.01 โอห์ม - 0.1 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance		u(x2) Resolution of DMM		u(x3) Accuracy of DMM		u(x4) Repeatability of measurement																	
Dist.		rectangular		rectangular		rectangular		Normal																	
Divisor		$(3^{0.5})$		$2^{*}(3^{0.5})$		$(3^{0.5})$		1																	
Ci		1		1		1		1																	
Vi		∞		∞		∞		4																	
step	Nominal	Value		u_1		Value		u_2		Value		u_3		u_c		g_{eff}	k	U_e	ppm						
Ω	value																								
0.01	0.01	Ω	0.000001	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	288.6751	ppm	0.0000290	Ω	2895.41	ppm	0.000351	Ω	35134.883	ppm	35255.355	ppm	4.0551	2.8803	0.0010	Ω	101545.63
0.02	0.02	Ω	0.000002	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	144.3376	ppm	0.0000290	Ω	1452.04	ppm	0.000661	Ω	33063.424	ppm	33095.809	ppm	4.0157	2.8803	0.0019	Ω	95325.51
0.03	0.03	Ω	0.000003	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	96.2250	ppm	0.0000291	Ω	970.91	ppm	0.000670	Ω	22341.143	ppm	22362.735	ppm	4.0155	2.8803	0.0019	Ω	64411.15
0.04	0.04	Ω	0.000005	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	72.1688	ppm	0.0000292	Ω	730.35	ppm	0.000549	Ω	13730.304	ppm	13750.389	ppm	4.0235	2.8803	0.0016	Ω	39605.10
0.05	0.05	Ω	0.000006	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	57.7350	ppm	0.0000293	Ω	586.01	ppm	0.000457	Ω	9137.396	ppm	9157.078	ppm	4.0346	2.8803	0.0013	Ω	26375.04
0.06	0.06	Ω	0.000007	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	48.1125	ppm	0.0000294	Ω	489.79	ppm	0.000450	Ω	7496.962	ppm	7513.986	ppm	4.0365	2.8803	0.0013	Ω	21642.45
0.07	0.07	Ω	0.000008	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	41.2393	ppm	0.0000295	Ω	421.05	ppm	0.000587	Ω	8392.246	ppm	8403.697	ppm	4.0219	2.8803	0.0017	Ω	24205.08
0.08	0.08	Ω	0.000009	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	36.0844	ppm	0.0000296	Ω	369.50	ppm	0.000602	Ω	7527.201	ppm	7537.235	ppm	4.0214	2.8803	0.0017	Ω	21709.42
0.09	0.09	Ω	0.000010	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	32.0750	ppm	0.0000296	Ω	329.41	ppm	0.000601	Ω	6675.124	ppm	6684.322	ppm	4.0221	2.8803	0.0017	Ω	19252.78
0.1	0.1	Ω	0.000012	Ω	115.47	ppm	0.0000029	Ω	28.8675	ppm	0.0000297	Ω	297.34	ppm	0.000527	Ω	5273.659	ppm	5283.376	ppm	4.0296	2.8803	0.0015	Ω	15217.65

Uncertainty Budget 0.1 โอห์ม - 1 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement																				
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal																				
Divisor		(3 ^{0.5})			2*(3 ^{0.5})			(3 ^{0.5})			1																				
Ci		1			1			1			1																				
Vi		∞			∞			∞			4																				
step	Nominal	Value			u ₁			Value			u ₂			Value			u ₃			u _c		g _{eff}		k		U _e		ppm			
Ω	value																														
0.1	0.1	Ω	0.0000115	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	28.8675	ppm	0.000030	Ω	297.3354	ppm	0.0007046	Ω	7046.176	ppm	7053.451	ppm	4.01655	2.88029	0.0020	Ω	20315.98						
0.2	0.2	Ω	0.0000231	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	14.4338	ppm	0.000031	Ω	152.9978	ppm	0.0007356	Ω	3677.881	ppm	3682.900	ppm	4.02188	2.88029	0.0021	Ω	10607.82						
0.3	0.3	Ω	0.0000346	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	9.6225	ppm	0.000031	Ω	104.8853	ppm	0.0006437	Ω	2145.657	ppm	2151.342	ppm	4.04256	2.88029	0.0019	Ω	6196.49						
0.4	0.4	Ω	0.0000462	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	7.2169	ppm	0.000032	Ω	80.8290	ppm	0.0005139	Ω	1284.757	ppm	1292.485	ppm	4.09712	2.88029	0.0015	Ω	3722.73						
0.5	0.5	Ω	0.0000577	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	5.7735	ppm	0.000033	Ω	66.3953	ppm	0.0028520	Ω	5704.043	ppm	5705.601	ppm	4.00437	2.88029	0.0082	Ω	16433.78						
0.6	0.6	Ω	0.0000693	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	4.8113	ppm	0.000034	Ω	56.7728	ppm	0.0012770	Ω	2128.347	ppm	2132.238	ppm	4.02933	2.88029	0.0037	Ω	6141.46						
0.7	0.7	Ω	0.0000808	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	4.1239	ppm	0.000035	Ω	49.8996	ppm	0.0005254	Ω	750.524	ppm	761.003	ppm	4.22813	2.88029	0.0015	Ω	2191.91						
0.8	0.8	Ω	0.0000924	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	3.6084	ppm	0.000036	Ω	44.7446	ppm	0.0014510	Ω	1813.804	ppm	1818.030	ppm	4.03741	2.88029	0.0042	Ω	5236.45						
0.9	0.9	Ω	0.0001039	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	3.2075	ppm	0.000037	Ω	40.7353	ppm	0.0014884	Ω	1653.819	ppm	1658.349	ppm	4.04400	2.88029	0.0043	Ω	4776.53						
1.0	1.0	Ω	0.0001155	Ω	115.47005	ppm	0.0000029	Ω	2.8868	ppm	0.000038	Ω	37.5278	ppm	0.0014880	Ω	1488.034	ppm	1492.982	ppm	4.05347	2.88029	0.0043	Ω	4300.22						

Uncertainty Budget 1 โอห์ม - 10 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement														
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal														
Divisor		$(3^{0.5})$			$2 \cdot (3^{0.5})$			$(3^{0.5})$			1														
C _i		1			1			1			1														
V _i		∞			∞			∞			4														
step	Nominal	Value		u ₁	Value		u ₂	Value		u ₂	Value		u ₃	u _c		g _{eff}	k	U _e	ppm						
Ω	value	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	ppm	ppm			Ω							
1	1	Ω	0.0001155	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	2.886751	ppm	0.000038	Ω	37.5278	ppm	0.001777	Ω	1776.848	ppm	1780.9941	ppm	4.04	2.8803	0.00513	Ω	5129.779
2	2	Ω	0.0002309	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	1.443376	ppm	0.000046	Ω	23.0940	ppm	0.000465	Ω	232.365	ppm	260.5038	ppm	6.32	2.5247	0.00132	Ω	657.696
3	3	Ω	0.0003464	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.962250	ppm	0.000055	Ω	18.2828	ppm	0.000699	Ω	232.997	ppm	260.6843	ppm	6.27	2.5247	0.00197	Ω	658.152
4	4	Ω	0.0004619	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.721688	ppm	0.000064	Ω	15.8771	ppm	0.000275	Ω	68.827	ppm	135.3627	ppm	59.84	2.0482	0.00111	Ω	277.248
5	5	Ω	0.0005774	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.577350	ppm	0.000072	Ω	14.4338	ppm	0.001214	Ω	242.779	ppm	269.2275	ppm	6.05	2.5247	0.00340	Ω	679.721
6	6	Ω	0.0006928	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.481125	ppm	0.000081	Ω	13.4715	ppm	0.000710	Ω	118.256	ppm	165.8300	ppm	15.47	2.1870	0.00218	Ω	362.665
7	7	Ω	0.0008083	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.412393	ppm	0.000089	Ω	12.7842	ppm	0.001202	Ω	171.683	ppm	207.2965	ppm	8.50	2.3735	0.00344	Ω	492.018
8	8	Ω	0.0009238	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.360844	ppm	0.000098	Ω	12.2687	ppm	0.001114	Ω	139.207	ppm	181.2802	ppm	11.50	2.2612	0.00328	Ω	409.904
9	9	Ω	0.0010392	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.320750	ppm	0.000107	Ω	11.8678	ppm	0.000876	Ω	97.315	ppm	151.4745	ppm	23.48	2.1201	0.00289	Ω	321.141
10	10	Ω	0.0011547	Ω	115.4701	ppm	0.00000289	Ω	0.288675	ppm	0.000115	Ω	11.5470	ppm	0.000379	Ω	37.858	ppm	122.0654	ppm	432.33	2.0105	0.00245	Ω	245.412

Uncertainty Budget 10 โอห์ม - 100 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement														
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal														
Divisor		$(3^{0.5})$			$2*(3^{0.5})$			$(3^{0.5})$			1														
Ci		1			1			1			1														
Vi		∞			∞			∞			4														
step	Nomina	Value			u ₁			Value			u ₂			Value			u ₃			u _c	g _{eff}	k	U _e	ppm	
Ω	value	Ω	ppm	ppm	Ω	ppm	ppm	Ω	ppm	ppm	Ω	ppm	ppm	Ω	ppm	ppm	Ω	ppm	ppm	ppm			Ω		
10	10	Ω	0.00115470	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.2887	ppm	0.000115	Ω	11.54701	ppm	0.0014019	Ω	140.1861	ppm	181.9860	ppm	11.4	2.261	0.0041	Ω	411.500
20	20	Ω	0.00230940	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.1443	ppm	0.000427	Ω	21.36196	ppm	0.0011935	Ω	59.6752	ppm	131.7225	ppm	95.0	2.032	0.0054	Ω	267.629
30	30	Ω	0.00346410	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0962	ppm	0.000497	Ω	16.55071	ppm	0.0016681	Ω	55.6036	ppm	129.2247	ppm	116.7	2.027	0.0079	Ω	261.883
40	40	Ω	0.00461880	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0722	ppm	0.000566	Ω	14.14508	ppm	0.0010318	Ω	25.7955	ppm	119.1589	ppm	1821.3	2.006	0.0096	Ω	239.037
50	50	Ω	0.00577350	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0577	ppm	0.000635	Ω	12.70171	ppm	0.0010447	Ω	20.8937	ppm	118.0306	ppm	4073.6	2.005	0.0118	Ω	236.683
60	60	Ω	0.00692820	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0481	ppm	0.000704	Ω	11.73946	ppm	0.0008509	Ω	14.1817	ppm	116.9285	ppm	18485.4	2.005	0.0141	Ω	234.417
70	70	Ω	0.00808290	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0412	ppm	0.000774	Ω	11.05213	ppm	0.0007019	Ω	10.0275	ppm	116.4304	ppm	72704.8	2.005	0.0163	Ω	233.407
80	80	Ω	0.00923760	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0361	ppm	0.000843	Ω	10.53664	ppm	0.0004442	Ω	5.5530	ppm	116.0827	ppm	763869.6	2.005	0.0186	Ω	232.746
90	90	Ω	0.01039230	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0321	ppm	0.000912	Ω	10.13570	ppm	0.0005542	Ω	6.1582	ppm	116.0775	ppm	504923.2	2.005	0.0209	Ω	232.735
100	100	Ω	0.01154701	Ω	115.470	ppm	0.000002887	Ω	0.0289	ppm	0.000981	Ω	9.81495	ppm	0.0008532	Ω	8.5319	ppm	116.2001	ppm	137626.4	2.005	0.0233	Ω	232.981

Uncertainty Budget 100 โอห์ม – 1,000 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement								
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal								
Divisor		$(3^{0.5})$			$2 \cdot (3^{0.5})$			$(3^{0.5})$			1								
Ci		1			1			1			1								
Vi		∞			∞			∞			4								
step	Nominal	Value		u_1	Value		u_2	Value		u_2	Value		u_3	u_c		g_{eff}	k	U_e	ppm
Ω	value																		
100	100 Ω	0.0115	Ω	115.470 ppm	0.0000289	Ω	0.0289 ppm	0.00098	Ω	9.81495 ppm	0.0053	Ω	53.4957 ppm	127.63799 ppm	129.630	2.0243	0.02584	Ω	258.383
200	200 Ω	0.0231	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.1443 ppm	0.00144	Ω	7.21688 ppm	0.0054	Ω	27.1551 ppm	118.83955 ppm	1467.227	2.0064	0.04769	Ω	238.436
300	300 Ω	0.0346	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0962 ppm	0.00202	Ω	6.73575 ppm	0.0062	Ω	20.6144 ppm	117.48900 ppm	4220.543	2.0053	0.07068	Ω	235.595
400	400 Ω	0.0462	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0722 ppm	0.00260	Ω	6.49519 ppm	0.0061	Ω	15.2262 ppm	116.65060 ppm	13779.731	2.0048	0.09355	Ω	233.865
500	500 Ω	0.0577	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0577 ppm	0.00318	Ω	6.35085 ppm	0.0046	Ω	9.1293 ppm	116.00437 ppm	104283.699	2.0050	0.11629	Ω	232.589
600	600 Ω	0.0693	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0481 ppm	0.00375	Ω	6.25463 ppm	0.0031	Ω	5.1241 ppm	115.75281 ppm	1041620.079	2.0050	0.13925	Ω	232.084
700	700 Ω	0.0808	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0412 ppm	0.00433	Ω	6.18590 ppm	0.0034	Ω	4.8077 ppm	115.73554 ppm	1343326.984	2.0050	0.16243	Ω	232.050
800	800 Ω	0.0924	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0361 ppm	0.00491	Ω	6.13435 ppm	0.0072	Ω	8.9689 ppm	115.98020 ppm	111850.909	2.0050	0.18603	Ω	232.540
900	900 Ω	0.1039	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0321 ppm	0.00548	Ω	6.09425 ppm	0.0063	Ω	7.0208 ppm	115.84371 ppm	296493.028	2.0050	0.20904	Ω	232.267
1000	1000 Ω	0.1155	Ω	115.470 ppm	0.00002887	Ω	0.0289 ppm	0.00606	Ω	6.06218 ppm	0.0073	Ω	7.3088 ppm	115.85984 ppm	252584.559	2.0050	0.23230	Ω	232.299

Uncertainty Budget 1,000 โอห์ม – 10,000 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement														
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal														
Divisor		$(3^{0.5})$			$2 \cdot (3^{0.5})$			$(3^{0.5})$			1														
C _i		1			1			1			1														
V _i		∞			∞			∞			4														
step	Nominal	Value		u ₁	Value		u ₂	Value		u ₂	Value		u ₃	u _c		g _{eff}	k	U _e	ppm						
Ω	value	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	ppm	ppm			Ω							
1000	1000	Ω	0.11547	Ω	115.4701	ppm	0.0000289	Ω	0.02887	ppm	0.005802	Ω	5.802370	ppm	0.03024	Ω	30.24214	ppm	119.5056	ppm	975.355	2.007	0.2399	Ω	239.8761
2000	2000	Ω	0.23094	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.14434	ppm	0.014434	Ω	7.216878	ppm	0.02144	Ω	10.71969	ppm	116.1910	ppm	55210.388	2.005	0.4659	Ω	232.9281
3000	3000	Ω	0.34641	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.09623	ppm	0.020207	Ω	6.735753	ppm	0.03246	Ω	10.82116	ppm	116.1715	ppm	53132.830	2.005	0.6987	Ω	232.8892
4000	4000	Ω	0.46188	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.07217	ppm	0.025981	Ω	6.495191	ppm	0.12031	Ω	30.07708	ppm	119.4996	ppm	996.743	2.007	0.9594	Ω	239.8576
5000	5000	Ω	0.57735	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.05774	ppm	0.031754	Ω	6.350853	ppm	0.10358	Ω	20.71570	ppm	117.4854	ppm	4138.060	2.005	1.1779	Ω	235.5890
6000	6000	Ω	0.69282	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.04811	ppm	0.037528	Ω	6.254628	ppm	0.16930	Ω	28.21669	ppm	119.0321	ppm	1266.753	2.007	1.4331	Ω	238.8549
7000	7000	Ω	0.80829	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.04124	ppm	0.043301	Ω	6.185896	ppm	0.17093	Ω	24.41877	ppm	118.1858	ppm	2194.957	2.006	1.6594	Ω	237.0572
8000	8000	Ω	0.92376	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.03608	ppm	0.049075	Ω	6.134347	ppm	0.17180	Ω	21.47518	ppm	117.6102	ppm	3598.254	2.005	1.8868	Ω	235.8500
9000	9000	Ω	1.03923	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.03208	ppm	0.054848	Ω	6.094253	ppm	0.14884	Ω	16.53782	ppm	116.8074	ppm	9954.723	2.005	2.1077	Ω	234.1880
10000	10000	Ω	1.15470	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.02887	ppm	0.060622	Ω	6.062178	ppm	0.17086	Ω	17.08589	ppm	116.8846	ppm	8760.704	2.005	2.3435	Ω	234.3468

Uncertainty Budget 10,000 โอห์ม – 100,000 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement														
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal														
Divisor		$(3^{0.5})$			$2 \cdot (3^{0.5})$			$(3^{0.5})$			1														
Ci		1			1			1			1														
Vi		∞			∞			∞			4														
step	Nominal	Value		u_1	Value		u_2	Value		u_2	Value		u_3	u_c		g_{eff}	k	U_e	ppm						
Ω	value																								
10000	10000	Ω	1.1547	Ω	115.4701	ppm	0.0002887	Ω	0.0289	ppm	0.0606	Ω	6.0622	ppm	0.07551	Ω	7.5505	ppm	115.8753	ppm	221877.16	2.0050	2.3233	Ω	232.330
20000	20000	Ω	2.3094	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.1443	ppm	0.1443	Ω	7.2169	ppm	0.12154	Ω	6.0771	ppm	115.8549	ppm	528377.85	2.0050	4.6458	Ω	232.289
30000	30000	Ω	3.4641	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0962	ppm	0.2021	Ω	6.7358	ppm	0.15933	Ω	5.3110	ppm	115.7883	ppm	903671.19	2.0050	6.9647	Ω	232.155
40000	40000	Ω	4.6188	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0722	ppm	0.2598	Ω	6.4952	ppm	0.24488	Ω	6.1221	ppm	115.8145	ppm	512292.81	2.0050	9.2883	Ω	232.208
50000	50000	Ω	5.7735	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0577	ppm	0.3175	Ω	6.3509	ppm	0.29409	Ω	5.8817	ppm	115.7941	ppm	600885.87	2.0050	11.6084	Ω	232.167
60000	60000	Ω	6.9282	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0481	ppm	0.3753	Ω	6.2546	ppm	0.41969	Ω	6.9948	ppm	115.8507	ppm	300993.41	2.0050	13.9368	Ω	232.281
70000	70000	Ω	8.0829	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0412	ppm	0.4330	Ω	6.1859	ppm	0.31341	Ω	4.4772	ppm	115.7223	ppm	1785238.29	2.0050	16.2416	Ω	232.023
80000	80000	Ω	9.2376	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0361	ppm	0.4907	Ω	6.1343	ppm	0.53738	Ω	6.7172	ppm	115.8278	ppm	353630.08	2.0050	18.5788	Ω	232.235
90000	90000	Ω	10.3923	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0321	ppm	0.5485	Ω	6.0943	ppm	0.63011	Ω	7.0012	ppm	115.8425	ppm	299812.48	2.0050	20.9038	Ω	232.264
100000	100000	Ω	11.5470	Ω	115.4701	ppm	0.0028868	Ω	0.0289	ppm	0.6062	Ω	6.0622	ppm	0.65600	Ω	6.5600	ppm	115.8150	ppm	388612.71	2.0050	23.2209	Ω	232.209

Uncertainty Budget 100,000 โอห์ม – 1,000,000 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance			u(x2) Resolution of DMM			u(x3) Accuracy of DMM			u(x4) Repeatability of measurement								
Dist.		rectangular			rectangular			rectangular			Normal								
Divisor		$(3^{0.5})$			$2*(3^{0.5})$			$(3^{0.5})$			1								
Ci		1			1			1			1								
Vi		∞			∞			∞			4								
step	Nominal	Value		u ₁	Value		u ₂	Value		u ₂	Value		u ₃	u _c	g _{eff}	k	U _e	ppm	
Ω	value	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	ppm			Ω		
100000	100000	Ω 11.5470	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0029	Ω 0.0289	ppm	Ω 0.6062	Ω 6.0622	ppm	Ω 2.3656	Ω 23.6563	ppm	118.024	ppm	2478.305	2.006	23.6718	Ω 236.7175
200000	200000	Ω 23.0940	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.1443	ppm	Ω 2.8868	Ω 14.4338	ppm	Ω 3.2584	Ω 16.2922	ppm	117.504	ppm	10823.078	2.005	47.1163	Ω 235.5816
300000	300000	Ω 34.6410	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0962	ppm	Ω 3.7528	Ω 12.5093	ppm	Ω 2.6613	Ω 8.8709	ppm	116.484	ppm	118918.755	2.005	70.0651	Ω 233.5504
400000	400000	Ω 46.1880	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0722	ppm	Ω 4.6188	Ω 11.5470	ppm	Ω 6.8764	Ω 17.1910	ppm	117.312	ppm	8674.146	2.005	94.0820	Ω 235.2049
500000	500000	Ω 57.7350	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0577	ppm	Ω 5.4848	Ω 10.9697	ppm	Ω 2.6305	Ω 5.2610	ppm	116.109	ppm	948987.044	2.005	116.3995	Ω 232.7990
600000	600000	Ω 69.2820	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0481	ppm	Ω 6.3509	Ω 10.5848	ppm	Ω 1.2834	Ω 2.1391	ppm	115.974	ppm	34561674.053	2.005	139.5166	Ω 232.5277
700000	700000	Ω 80.8290	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0412	ppm	Ω 7.2169	Ω 10.3098	ppm	Ω 2.3497	Ω 3.3568	ppm	115.978	ppm	5700101.698	2.005	162.7751	Ω 232.5359
800000	800000	Ω 92.3760	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0361	ppm	Ω 8.0829	Ω 10.1036	ppm	Ω 2.0237	Ω 2.5296	ppm	115.939	ppm	17649807.598	2.005	185.9659	Ω 232.4574
900000	900000	Ω 103.9230	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0321	ppm	Ω 8.9489	Ω 9.9433	ppm	Ω 3.4989	Ω 3.8877	ppm	115.963	ppm	3166426.750	2.005	209.2545	Ω 232.5049
1000000	1000000	Ω 115.4701	Ω 115.470	ppm	Ω 0.0289	Ω 0.0289	ppm	Ω 9.8150	Ω 9.8150	ppm	Ω 3.8943	Ω 3.8943	ppm	115.952	ppm	3143635.550	2.005	232.4835	Ω 232.4835

Uncertainty Budget 1,000,000 โอห์ม – 10,000,000 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance		u(x2) Resolution of DMM		u(x3) Accuracy of DMM		u(x4) Repeatability of measurement																	
Dist.		rectangular		rectangular		rectangular		Normal																	
Divisor		$(3^{0.5})$		$2 \cdot (3^{0.5})$		$(3^{0.5})$		1																	
Ci		1		1		1		1																	
Vi		∞		∞		∞		4																	
step	Nominal	Value		u ₁	Value		u ₂	Value		u ₂	Value		u ₃	u _c	g _{eff}	k	U _e	ppm							
Ω	value	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	Ω	Ω	ppm	ppm			Ω								
1000000	1000000	Ω	115.470	Ω	115.470	ppm	0.0289	Ω	0.029	ppm	9.815	Ω	9.815	ppm	40.021	Ω	40.0211	ppm	122.602	ppm	352.290	2.0118	246.655	Ω	246.655
2000000	2000000	Ω	230.940	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.144	ppm	115.470	Ω	57.735	ppm	1289.102	Ω	644.5511	ppm	657.353	ppm	4.327	2.8803	3786.733	Ω	1893.367
3000000	3000000	Ω	346.410	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.096	ppm	144.338	Ω	48.113	ppm	1354.755	Ω	451.5849	ppm	468.591	ppm	4.637	2.8803	4049.029	Ω	1349.676
4000000	4000000	Ω	461.880	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.072	ppm	173.205	Ω	43.301	ppm	3646.541	Ω	911.6353	ppm	919.939	ppm	4.148	2.8803	10598.759	Ω	2649.690
5000000	5000000	Ω	577.350	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.058	ppm	202.073	Ω	40.415	ppm	1278.926	Ω	255.7853	ppm	283.536	ppm	6.039	2.5247	3579.232	Ω	715.846
6000000	6000000	Ω	692.820	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.048	ppm	230.940	Ω	38.490	ppm	1636.410	Ω	272.7349	ppm	298.662	ppm	5.752	2.6578	4762.796	Ω	793.799
7000000	7000000	Ω	808.290	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.041	ppm	259.808	Ω	37.115	ppm	1043.260	Ω	149.0372	ppm	192.154	ppm	11.053	2.2612	3041.436	Ω	434.491
8000000	8000000	Ω	923.760	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.036	ppm	288.675	Ω	36.084	ppm	2820.996	Ω	352.6244	ppm	372.799	ppm	4.997	2.8803	8590.162	Ω	1073.770
9000000	9000000	Ω	1039.230	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.032	ppm	317.543	Ω	35.283	ppm	4101.189	Ω	455.6876	ppm	471.412	ppm	4.581	2.8803	12220.231	Ω	1357.803
10000000	10000000	Ω	1154.701	Ω	115.470	ppm	0.2887	Ω	0.029	ppm	346.410	Ω	34.641	ppm	2874.403	Ω	287.4403	ppm	311.697	ppm	5.531	2.6578	8284.447	Ω	828.445

Uncertainty Budget 10,000,000 โอห์ม – 100,000,000 โอห์ม

		u(x1) Temperature coefficient of Decade Resistance		u(x2) Resolution of DMM		u(x3) Accuracy of DMM		u(x4) Repeatability of measurement																
Dist.		rectangular		rectangular		rectangular		Normal																
Divisor		$(3^{0.5})$		$2*(3^{0.5})$		$(3^{0.5})$		1																
Ci		1		1		1		1																
Vi		∞		∞		∞		4																
step	Nominal	Value		u_1		Value		u_2		Value		u_3		u_c		g_{eff}		k		U_e		ppm		
Ω	value																							
10000000	10000000	Ω	1154.70	Ω	115.470 ppm	Ω	0.289	Ω	0.0289 ppm	Ω	346.41	Ω	34.641 ppm	Ω	12984.046	Ω	1298.405 ppm	1303.989	ppm	4.069	2.880	37558.664	Ω	3755.866
20000000	20000000	Ω	2309.40	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.1443 ppm	Ω	6350.85	Ω	317.543 ppm	Ω	25751.961	Ω	1287.598 ppm	1331.193	ppm	4.570	2.880	76684.438	Ω	3834.222
30000000	30000000	Ω	3464.10	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0962 ppm	Ω	9237.60	Ω	307.920 ppm	Ω	43207.429	Ω	1440.248 ppm	1477.316	ppm	4.428	2.880	127652.901	Ω	4255.097
40000000	40000000	Ω	4618.80	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0722 ppm	Ω	12124.36	Ω	303.109 ppm	Ω	76524.529	Ω	1913.113 ppm	1940.415	ppm	4.233	2.880	223558.284	Ω	5588.957
50000000	50000000	Ω	5773.50	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0577 ppm	Ω	15011.11	Ω	300.222 ppm	Ω	94672.762	Ω	1893.455 ppm	1920.583	ppm	4.234	2.880	276591.768	Ω	5531.835
60000000	60000000	Ω	6928.20	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0481 ppm	Ω	17897.86	Ω	298.298 ppm	Ω	55771.830	Ω	929.530 ppm	983.027	ppm	5.003	2.658	156764.221	Ω	2612.737
70000000	70000000	Ω	8082.90	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0412 ppm	Ω	20784.61	Ω	296.923 ppm	Ω	123084.790	Ω	1758.354 ppm	1786.982	ppm	4.267	2.880	360291.856	Ω	5147.027
80000000	80000000	Ω	9237.60	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0361 ppm	Ω	23671.36	Ω	295.892 ppm	Ω	62232.758	Ω	777.909 ppm	840.255	ppm	5.445	2.658	178661.693	Ω	2233.271
90000000	90000000	Ω	10392.30	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0321 ppm	Ω	26558.11	Ω	295.090 ppm	Ω	157855.962	Ω	1753.955 ppm	1782.350	ppm	4.265	2.880	462031.462	Ω	5133.683
100000000	100000000	Ω	11547.01	Ω	115.470 ppm	Ω	2.887	Ω	0.0289 ppm	Ω	29444.86	Ω	294.449 ppm	Ω	123571.790	Ω	1235.718 ppm	1275.552	ppm	4.541	2.880	367395.811	Ω	3673.958

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายจรรพพงษ์ ตวีโกศล
 วัน เดือน ปีเกิด 6 มีนาคม 2527
 ภูมิลำเนา อำเภอ บางพลี จังหวัด สมุทรปราการ

ประวัติการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วุฒิมัธยมศึกษา ปริญญาตรี	มทร.พระนคร	2551

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน
 หัวหน้างาน บริษัท ไทยเมทัลโปรดิวเซอร์ จำกัด

ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ (ถ้ามี)

-

ทุนการศึกษา (ถ้ามี)

-

