กองวิศวกรรมการแพทย์
Medical Engineering Division

วิธีการสอบเทียบเครื่องจำลองสัญญาณชีพทางไฟฟ้า

(WI-ELE-01)

ฉบับแก้ไขครั้งที่ 1 (มีนาคม 2569)

ห้องปฏิบัติการกองวิศวกรรมการแพทย์

กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ

ผู้จัดทำ	ผู้ทบทวน	ผู้อนุมัติ
(นางสาวชนากาญ พุฒริ้ว)	(นายแก้วกานต์ แย้มยางบาง)	(นางสาวธนษา ชินภาณุพงศ์)
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ	หัวหน้าห้องปฏิบัติการ	ผู้จัดการห้องปฏิบัติการ
สอบเทียบด้านไฟฟ้า	สอบเทียบด้านไฟฟ้า	กองวิศวกรรมการแพทย์
16 / ก.พ / 69	17 / ก.พ. / 69	18 / ก.พ. / 69

สารบัญ

1. คำนำ 3
2. ขอบข่าย 3
3. คำนิยาม 4
4. เครื่องมือและอุปกรณ์และสภาพแวดล้อมในการสอบเทียบ 5
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ 5
4.2 สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขในการสอบเทียบ 6
4.3 เตรียมเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ 6
4.4 การเตรียมเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ (Unit Under Calibration : UUC) 7
5. การสอบเทียบ ECG Simulation 7
5.1 การสอบเทียบการจำลองอัตราการเต้นของหัวใจ (Heart Rate Simulation) 7-8
- การกำหนดจุดสอบเทียบ
- ขั้นตอนการสอบเทียบ
- กระบวนการเก็บข้อมูล
- การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด
5.2 การสอบเทียบการจำลองแรงดันทางไฟฟ้าของสัญญาณชีพแบบพัลส์ (Pulse ECG Amplitude Simulation) 9-15
- การกำหนดจุดสอบเทียบ
- ขั้นตอนการสอบเทียบ
- กระบวนการเก็บข้อมูล
- การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด
6. การสอบเทียบ Invasive Blood pressure simulation 16-26
- การกำหนดจุดสอบเทียบ
- ขั้นตอนการสอบเทียบ
- กระบวนการเก็บข้อมูล
- การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด
7. การสอบเทียบ Baseline Respiration 27-32

- การกำหนดจุดสอบเทียบ
- ขั้นตอนการสอบเทียบ
- กระบวนการเก็บข้อมูล
- การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

8. การสอบเทียบ Temperature simulation 33-43
- การกำหนดจุดสอบเทียบ
- ขั้นตอนการสอบเทียบ
- กระบวนการเก็บข้อมูล
- การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

9. ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบ 44-47

9. เอกสารอ้างอิง 48

10. ภาคผนวก 49-50

1.คำนำ

เอกสารวิธีการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐานทดสอบเครื่องมือแพทย์ทางไฟฟ้า อธิบายและใช้อ้างอิงลำดับขั้นตอนการสอบเทียบ UUC ประเภทเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (Vital Sign Simulator) ด้วยการวัดโดยตรง จัดทำขึ้นโดยห้องปฏิบัติการของกองวิศวกรรมการแพทย์ กรมสนับสนุนบริการสุขภาพ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการสอบเทียบเครื่องมือวัดประเภทเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (Vital Sign Simulator) ที่กำเนิดแรงดันทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานทางไฟฟ้า เช่น สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (ECG) ความดันโลหิตแบบรุกล่ำ (Invasive Blood Pressure: IBP) การตรวจสอบการหายใจที่สภาวะพื้นฐาน (Baseline Respiration) และการจำลองค่าอุณหภูมิ (Temperature) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้การสอบเทียบเป็นไปอย่างถูกต้อง

2.ขอบข่าย

เป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดประเภทเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (Vital Sign Simulator) ตามช่วงการวัดและขีดความสามารถดังตาราง 1

สาขาการวัด	รายการสอบเทียบ	ขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด *	มาตรฐาน/เทคนิค/วิธี/เครื่องมือที่ใช้
เครื่องมือแพทย์ Medical Device	ECG Simulator Amplitude 0.5 mV to 2.0 mV	0.0020 mV	Direct measurement with DC Voltage standard
	Invasive blood pressure signal Direct measurement with simulator		
	0 mmHg	0.33 mmHg	Direct measurement with DC Voltage standard
	50 mmHg	0.47 mmHg	
	100 mmHg	0.47 mmHg	
	240 mmHg	1.1 mmHg	
	Baseline Respiration 0.5 kΩ to 2.0 kΩ	0.013 kΩ	Direct measurement with resistance standard
	Body temperature signal Direct measurement with simulator 37 °C and 40 °C	0.068 °C	

* แสดงเป็นค่าความไม่แน่นอน (±) โดยทั่วไป k = 2 ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95 %

ตารางที่ 1 ช่วงการวัดและขีดความสามารถ

3. คำนิยาม

เครื่องมือวิเคราะห์ทวน2

เครื่องมือที่ถูกออกแบบให้สามารถทวนสอบเครื่องมือแพทย์ที่ใช้งานในสถานบริการสุขภาพได้ ซึ่งมีอยู่ 2 ประเภท หากแบ่งตามลักษณะการทำงานคือ (1) เครื่องมือวิเคราะห์ทวนสอบเครื่องมือแพทย์ แบบที่สร้างสัญญาณเป็นการจำลองสัญญาณชีพ (Patient Simulator) เพื่อป้อนสัญญาณดังกล่าวแก่เครื่องมือแพทย์ เพื่อตรวจวิเคราะห์การทำงานขงเครื่องมือแพทย์ว่ามีการทำงานที่ถูกต้องหรือไม่ (2) เครื่องมือวิเคราะห์ทวนสอบเครื่องมือแพทย์ แบบที่วัดวิเคราะห์สัญญาณจากเครื่องมือแพทย์ (Medical Device Analyzer)

การเลื่อน (Drift)

การเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่องหรือการเปลี่ยนแปลงที่เป็นขั้นตามเวลาในค่าบ่งชี้อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลง\สมบัติเชิงมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด

การทวนซ้ำได้ของเครื่องมือวัด (Repeatability of a Measuring Instrument)

ความสามารถของเครื่องมือวัด (ในกรณีนี้หมายถึงทั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ) ในการให้การตอบสนองที่คล้ายคลึงกัน ใกล้เคียงกันสำหรับการใช้งานซ้ำๆ ด้วยตัวกระตุ้น คงเดิม ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานตามนิยามที่กำหนดไว้

ความไม่แน่นอนการวัดขยาย (Expanded Measurement Uncertainty)

ผลคูณของความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมและตัวประกอบคลอบคลุมซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งในการรายงานผลการสอบเทียบจะใช้ในการรายงานถึงค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบนั้นๆ

ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน (Standard Uncertainty)

ความไม่แน่นอนการวัดซึ่งแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty)

ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานซึ่งได้จากการใช้ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานแต่ละตัวที่เชื่อมสัมพันธ์กับปริมาณเข้าในแบบจำลองการวัด

ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement)

พารามิเตอร์ที่ไม่มีค่าเป็นลบที่ใช้บ่งบอกลักษณะเฉพาะของการกระจายของค่าปริมาณของสิ่งที่ถูกวัด โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ใช้ และอาจกล่าวได้ว่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของคุณภาพของผลการวัด ทำให้ผลการวัดนั้นสามารถเปรียบเทียบกับผลการวัด สิ่งอ้างอิง สมบัติเฉพาะ หรือมาตรฐานอื่นๆได้โดยปกติแล้วการประมาณความไม่แน่นอนโดยเป็นไปตาม GUM ซึ่งได้รับการยอมรับโดยทั่วไป

ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor)

ตัวเลขที่มากกว่าหนึ่งที่นำมาคูณกับความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนการวัดขยาย

4. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

เครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบตามตารางที่ 2 และมีวัสดุอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบต้องเตรียมให้พร้อม เช่น Adaptor, Connector ต่างๆ เป็นต้น

ที่	ชื่อเครื่องมือ	ยี่ห้อ	รุ่น	หมายเลขเครื่อง (Serial Number)	ขีดความสามารถ (Capacity)	ช่วงการใช้งาน
1	Digital Multimeter	KEITHLEY	DMM7510	4346136	DC Voltage 100mV to10000 V Resistance 1Ω to 1GΩ	DC Voltage 0 to 100 mV Resistance 1 kΩ – 100k Ω
2	Multi-Calibrator	Fluke	5500A	8920016	DC Voltage 0 to 1020 V	0 to 32.9999 V
3	Digital Thermo-Hygrometer	OMAGA	RF2000A Series	Q83043	Temperature: 20°C to +60°C Relative humidity: 0 to 95%RH	20-26 °C,40-70%RH

ตารางที่ 2 รายการเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

4.2 สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขที่ใช้ในการสอบเทียบ

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบมีการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการอยู่ที่ 23 °C ± 3 °C และค่าความชื้นสัมพัทธ์ อยู่ที่ 55 %RH ± 15 %RH และไม่มีสนามแม่เหล็กรบกวน หรือ มอเตอร์ขนาดใหญ่ในขณะทำการสอบเทียบ

4.3 การเตรียมเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ

4.3.1 ขั้นตอนการเตรียมเครื่อง Digital Multimeter ยี่ห้อ Keithley รุ่น DMM7510

1. ตรวจสอบขั้วต่อ (Input Terminals) ว่าสะอาดและไม่มีสิ่งสกปรก
2. กดปุ่ม Power ด้านหน้าเครื่อง
3. Warm-up เครื่องรุ่นนี้ต้องการเวลา Warm-up อย่างน้อย **90 นาที** เพื่อให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) เป็นไปตาม Spec 7.5 Digit และบันทึกการ Warm-up ลงในข้อมูล INPUT
4. Autozero: ตรวจสอบในเมนู Settings ว่าฟังก์ชัน Autozero ถูกตั้งค่าเป็น On

4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมเครื่อง Multi-Product Calibrator ยี่ห้อ Fluke รุ่น 5500A

1. ตรวจสอบสายไฟ AC และสายกราวด์ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์
2. เปิดสวิตช์ Power ด้านหลังเครื่อง และกดปุ่ม Power ด้านหน้า
3. ปล่อยให้เครื่องอุ่นระบบ (Warm-up) อย่างน้อย **30 นาที** (หากไม่ได้ใช้งานนานเกิน 30 วัน แนะนำให้ Warm-up 1 ชั่วโมง) และบันทึกการ Warm-up ลงในข้อมูล INPUT
4. กดปุ่ม OHM ZERO เพื่อทำการปรับค่าศูนย์เฉพาะฟังก์ชันความต้านทาน (Ohms-only Zero) เพื่อชดเชยค่า Error ภายในเครื่องก่อนเริ่มงาน

4.3.3 Total Instrument Zero ของเครื่อง Multi-Product Calibrator ยี่ห้อ Fluke รุ่น 5500A

1. เปิดเครื่อง Fluke 5500A และรออุ่นเครื่อง (Warm-up) อย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้วงจรภายในเสถียร
2. กดปุ่ม RESET ที่หน้าปัดเครื่อง เพื่อเคลียร์สถานะการทำงานเดิม
3. เสียบอุปกรณ์ Copper Short เข้าที่ขั้วต่อ **TC** ด้านหน้าเครื่องให้แน่น

(หมายเหตุ: หากต้องการทำ Ohms-only Zero ไม่ต้องเสียบอุปกรณ์นี้)

4. กดปุ่ม **SETUP** หน้าจอจะแสดงเมนูหลัก
5. กดปุ่ม Softkey ที่ระบุคำว่า **CAL** (Calibration) เพื่อเข้าสู่เมนูข้อมูลการสอบเทียบ
6. กดปุ่ม Softkey ที่ระบุคำว่า **CAL** อีกครั้ง เพื่อเข้าสู่เมนูคำสั่งการสอบเทียบ
7. กดปุ่ม **ZERO** หากต้องการปรับค่าศูนย์ทั้งหมด (Total Instrument Zero)
8. รอให้เครื่องดำเนินการปรับค่าโดยอัตโนมัติ ห้ามกดปุ่มใดๆ จนกว่ากระบวนการจะเสร็จสิ้น (ใช้เวลาประมาณหลายนาที)
9. เมื่อกระบวนการเสร็จสิ้น กดปุ่ม **RESET** เพื่อให้เครื่องกลับสู่สถานะ Standby พร้อมใช้งาน

บันทึกผลการทำ Total Instrument Zero ลงในแบบฟอร์ม FM-ELE-01 โดยทำทุกๆ 7 วันตามคู่มือผู้ผลิต *(หมายเหตุ:ห้องปฏิบัติการด้านไฟฟ้าเครื่องมือแพทย์ทำทุกวันจันทร์หรือวันแรกของสัปดาห์)*

4.4 การเตรียมเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ (Unit Under Calibration : UUC)

4.4.1 ตรวจสอบคำขอรับบริการสอบเทียบ

- รายละเอียดเครื่องมือที่ระบุตรงกับเครื่องมือ

4.4.2 ตรวจสอบความสมบูรณ์ของเครื่องมือ

- ตรวจสอบความเสียหายภายนอกของ เครื่อง UUC เช่น รอยแตกร้าว รอยบุบ หรือรอยขีดข่วนที่อาจส่งผลต่อการใช้งาน

-ตรวจสอบความสะอาดของขั้วต่อสัญญาณ (Connectors) และช่องเสียบสาย ECG ต่างๆ ว่าไม่มีสิ่งสกปรกหรือการกัดกร่อน

-ตรวจสอบความพร้อมความเสถียรของแหล่งจ่ายไฟ กรณีที่แบตเตอรี่ ให้ตรวจสอบว่าเพียงพอต่อกระบวนการสอบเทียบภายในห้องปฏิบัติการ

-บันทึกข้อมูลของเครื่อง เช่น การบันทึก ชื่อเครื่องมือมาตรฐาน ยี่ห้อ รุ่น และ Serial Number เพื่อใช้ในการออกใบรายงานผล

4.4.3 ศึกษาคู่มือการทำงานของ UUC

-เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการสลับโหมดการทำงาน เช่น การใช้งานปุ่มคำสั่งเพื่อให้สามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้อย่างถูกต้อง

-ตรวจสอบฟังก์ชันต่างๆของเครื่อง UUC เช่น ระบบจำลองแรงดันเลือด (IBP) เนื่องจากฟังก์ชันเหล่านี้เป็นส่วนที่ผู้ผลิตออกแบบให้เป็นออปชันเสริม

-ศึกษาเกณฑ์ความแม่นยำ (Reference & Accuracy Specification) ศึกษาเกณฑ์การอ้างอิง เช่น แอมพลิจูดของ ECG ที่อ้างอิงจาก Lead II เท่านั้น หรือความไวของตัวแปลงสัญญาณ (Transducer Sensitivity) ที่ระดับ 5 หรือ 40 μV/V/mmHg เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการอ่านผล

5. การสอบเทียบ ECG Simulation

5.1 การสอบเทียบการจำลองการเต้นของหัวใจ (Heart Rate Simulation)

อัตราการเต้นของหัวใจ (Heart Rate) คือจำนวนรอบของวงจรการทำงานของหัวใจ (Cardiac Cycle) ที่เกิดขึ้นในหนึ่งนาที ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการไหลเวียนโลหิตและการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติ การที่เครื่องมือแพทย์สามารถตรวจวัดค่านี้ได้อย่างแม่นยำจึงมีความสำคัญวิกฤต (Critical) ในการวินิจฉัยสภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ (Arrhythmia), ภาวะหัวใจเต้นช้า (Bradycardia) หรือเต้นเร็ว (Tachycardia) ซึ่งอาจเป็นอันตรายถึงชีวิต

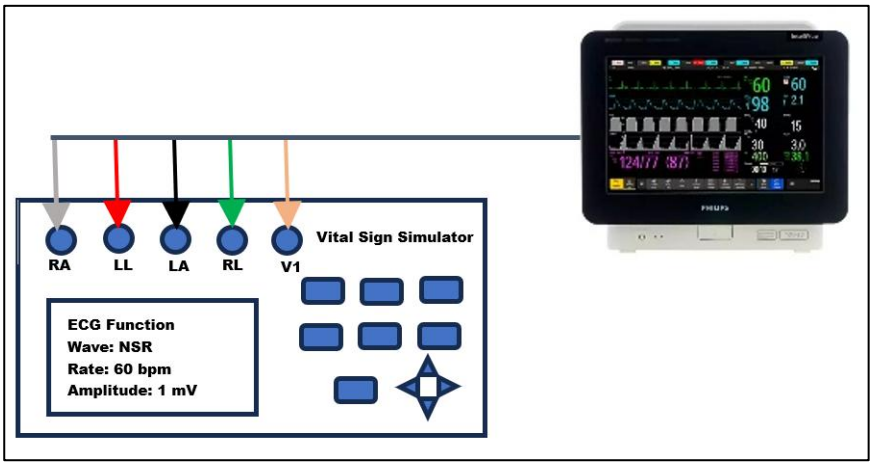
➢ การกำหนดจุดสอบเทียบ

สำหรับเครื่องจำลองสัญญาณชีพ ช่วงการสอบเทียบอัตราการเต้นของหัวใจ จะอยู่ที่ 30 bpm ถึง 300 bpm ตามสเปคของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)

➢ ขั้นตอนการสอบเทียบ

การเตรียมและการจัดตั้ง (Setup)

1. ตั้งค่าอัตราการเต้นหัวใจ (Heart Rate) จากเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (Vital Sign Simulator) ณ จุดที่สอบเทียบพร้อม ติดตั้งสาย ECG Lead อย่างน้อย 3 – 5 lead เพื่อสร้างสัญญาณ ECG ให้กับเครื่องมือแพทย์ (Monitor) เนื่องจากต้องเข้าวงจรยายสัญญาณ ตามรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งสายจาก ECG Out Connector จากเครื่อง Monitor ต่อกับเครื่องออสซิโลสโคป CH3

กระบวนการเก็บข้อมูล

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเก็บค่าจากเครื่องออสซิโลสโคป CH3 จากนั้นนำไปคำนวณค่าในโปรแกรม Excel : ECG Calculation.xlsx

ขั้นตอนที่ 2 ทำการคัดลอกค่าอัตราการเต้นของหัวใจที่ได้จากเครื่องออสซิโลสโคปที่ Sheet : Data ECG

ECG Heart Rate						
UUC Setting	STD (S)	STD (S)	STD (S)	Average (S)	STD (BPM)	SD
30 BPM						
60 BPM						
80 BPM						
100 BPM						
120 BPM						
200 BPM						
300 BPM						

ตารางที่ 3 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ (Heart Rate Simulation)

5.2 การสอบเทียบการจำลองแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบพัลส์ (ECG Pulse Amplitude Simulation)

สัญญาณ ECG Pulse Amplitude คือการสร้างและจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะพัลส์ (DC Pulse) ที่ระดับแรงดันต่ำในช่วงมิลลิโวลต์ (mV) เพื่อจำลองยอดคลื่น R-Wave ของสัญญาณไฟฟ้าหัวใจ โดยเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (Patient Simulator) จะอาศัยแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงภายในที่มีความเสถียรสูง (Stable Reference Voltage) ส่งผ่านเข้าสู่โครงข่ายวงจรแบ่งแรงดันที่ประกอบด้วยความต้านทานค่าความแม่นยำสูง (Precision Resistor Divider Network) เพื่อทำการลดทอนระดับแรงดัน (Attenuation) ให้ได้ค่าตามที่ผู้ใช้งานเลือกกำหนด โดยค่าแรงดันที่จ่ายออกมานี้จะมีลักษณะเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีคาบเวลา (Duration) และอัตราการเต้น (Rate) ที่สัมพันธ์กับฟังก์ชันการทดสอบสมรรถนะ (Performance Test) ของเครื่องติดตามการทำงานของหัวใจ

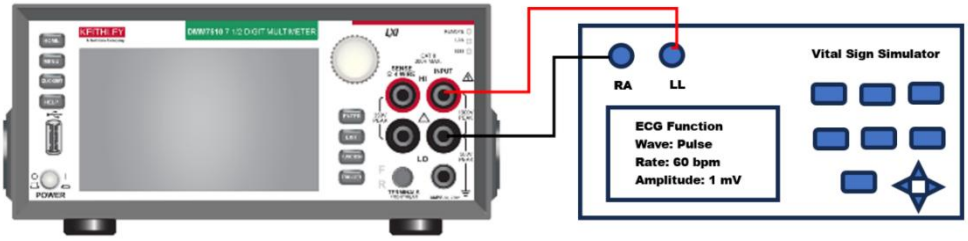
- **การกำหนดจุดสอบทียบ**

  ห้องปฏิบัติการเลือกจุดสอบเทียบที่ 0.5 mV,1.0 mV และ 2.0 mV โดยมีวัตถุประสงค์ครอบคลุมสมรรถนะของเครื่องมือแพทย์

- **ขั้นตอนการสอบเทียบ**

การเตรียมและการติดตั้ง (Setup)

1. ก่อนเริ่มการวัดค่า Amplitude ต้องทำการชดเชยค่าความต้านทานและแรงดันตกค้างในสาย เพื่อไม่ให้ค่าเหล่านี้ไปรวมกับสัญญาณที่จะวัด
2. เชื่อมต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) เข้ากับขั้ว ECG ของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)
   - Hi (สายสีแดง) : เชื่อมต่อกับขั้ว LL (Left Leg) ตามรูปภาพที่ 3
   - Lo (สายสีดำ) : เชื่อมต่อกับขั้ว RA (Right Arm) ตามรูปภาพที่ 3



รูปภาพที่ 3

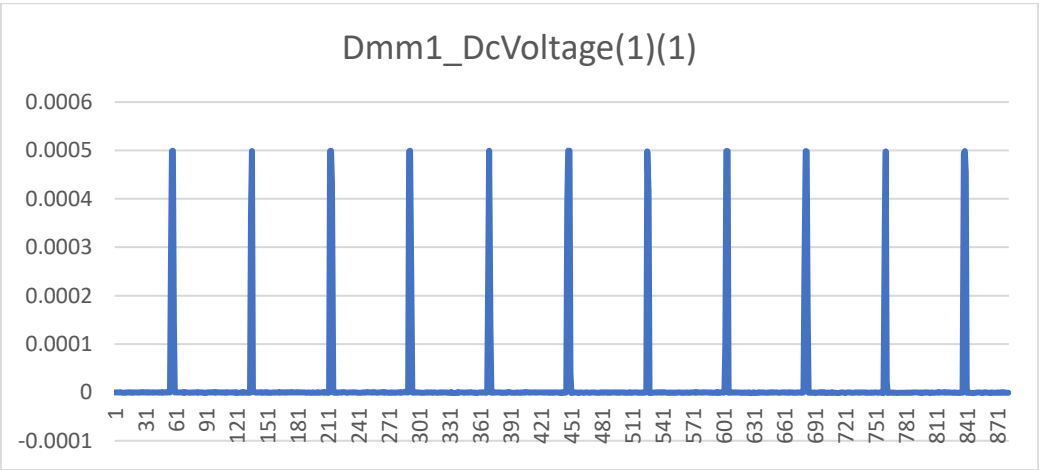
การตั้งค่าเครื่องมือ (Configuration)

1. การตั้งค่าเครื่องมือ STD Keithley DMM7510 ที่โปรแกรม Kickstart
   - ฟังก์ชัน: DC Voltage | Range : 100 mV
   - ตั้งค่า NPLC: 1 | Autozero: ON
   - ตั้งค่า Measure Delay (s) : 0 | Measure Count : 1200-3600
2. การตั้งค่าเครื่องจำลองสัญญาณชีพ UUC
   - เข้าเมนู ECG --> เลือกสัญญาณ Pulse
   - ตั้งค่า Amplitude ตามจุดสอบเทียบ 0.5 , 1 และ 2 mV

กระบวนการเก็บข้อมูล

1. เมื่อเริ่มสร้างสัญญาณจากเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC) ในจำนวนที่กำหนด
2. บันทึกไฟล์เป็น Excel Format ตั้งชื่อเป็น 0.5, 1 และ 2 mV ใน Folder : Amp
3. คัดลอกค่าที่ได้จาก Excel ไปวางที่ Cal Amp ECG เพื่อหา MAX-MIN และ คำนวณ Peak-Peak เพื่อให้ได้เป็น Amplitude

   <u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>



Point	MIN	MAX	Amplitude (V)	Amplitude (mV)
42	-0.00000124	0.000499439	0.000500681	0.50068
124	-0.00000111	0.000498907	0.000498907	0.50002
208	-0.00000103	0.000499092	0.000499092	0.500125

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณและกระบวนการเก็บข้อมูล

4. ทำการคัดลอกค่าที่ได้ 3 ค่าจาก Amplitude (mV) มาลงใน PTS-xx-00xx ใน Sheet ของ Data ECG

ECG Amplitude Pulse				
UUC Setting	STD (mV)	STD (mV)	STD (mV)	Average (mV)
0.5 mV	0.50068	0.50002	0.500125	0.5003
1.0 mV				
2.0 mV				

ตารางที่ 5 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ

5. เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจากเครื่องมือมาตรฐานนำมาปรับแก้ด้วยค่า DC Voltage Zero Offset ที่ระบุไว้ในใบรับรองการสอบเทียบของเครื่องมือมาตรฐานฉบับปัจจุบัน เพื่อรายงานค่าที่แท้จริง

<u>สูตรการคำนวณ</u>

$$V_{Corrected} = V_{Average} + Correction$$

เมื่อ $V_{Corrected}$ = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริง

$V_{Average}$ = ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน)

$Correction$ = ค่าแก้ที่ได้จากใบรับรองการสอบเทียบฉบับปัจจุบัน

หมายเหตุ : ในกรณีค่า Zero Offset ใช้เครื่องหมายตามที่ระบุในใบ Certificate บวกกับค่าที่อ่านได้

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> แทนค่าแรงดันเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน $V_{Average}$ = 0.5003 mV

ค่าแก้ที่ได้จากการสอบเทียบปัจจุบัน (Certificate No.E2U2500060) = -0.00589

$$V_{Corrected} = 0.5003 \text{ mV} + (-0.00589 \text{ mV})$$

$$V_{Corrected} = 0.49441 \text{ mV}$$

Uncertainty Budget Table 0.5 mV

Symbol	Type	Source of uncertainty	Uncertainty Value (+/-)	unit	Probability Distribution	Divisor	Sensitivity Coefficient (C_i)	Standard Uncertainty +/- mV	Degree of Freedom
δV_REP	A	Repeatability of Amplitude Reading STD	0.000205517	mV	Normal	1.0	1.0	0.000205517	2
δV_ACC	B	Uncertainty of STD	0.000959	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0006	∞
δV_DRIFT	B	Drift of STD	0.000959	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0006	∞
δV_RES	B	Resolution of STD 100mV=10nV	0.000005	mV	Rectangular	√3	1.0	0.00000289	∞
δV_EMF	B	Thermal EMF	0.0010	mV	Rectangular	√3	1.0	0.000577	∞
δV_CMR	B	Commode Rejection	0.00000001	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0000000	∞
	-	Combinded Standard Uncertainty			Normal			0.0010	1095.9
	-	Expanded Uncertainty			Normal (K=)			0.001989	2.00

ตารางที่ 6 แสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน ECG Amplitude Function Simulation

6. การสอบเทียบ Invasive Blood Pressure Simulation

การวัดความดันแบบรุกล้ำ (Invasive Blood Pressure - IBP) ในเครื่องจำลองสัญญาณชีพ ทำงานบนหลักการของวงจรสะพานวัด (Wheatstone Bridge Circuit) โดยอาศัยแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกมาเป็นตัวกระตุ้น (Excitation Voltage) เพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานที่แปรผันตามความดันให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าขนาดมิลลิโวลต์ (mV) ความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟฟ้าขาออก (V_{out}) เป็นแบบสัดส่วนเชิงเส้นตามสมการ

$$\boxed{V_{out} = \text{Pressure} \times \text{Sensitivity} \times V_{EXC}}$$

โดยกำหนดค่า Transducer Sensitivity ของตัวแปรสัญญาณทางการแพทย์ส่วนใหญ่เท่ากับ 5 uV/V/mmHg การคำนวณแรงดันไฟฟ้า ณ จุดสอบเทียบ 1 mmHg $V_{EXC} = 5\ V$ เนื่องจากมีการกระตุ้นด้วยแรงดัน 5 V

$$V_{out} = 1\ \text{mmHg} \times 5\mu V \times 5\ V = 0.025\ \text{mV}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ณ จุดสอบเทียบ 50 mmHg $V_{EXC} = 5\ V$

$$V_{out} = 50\ \text{mmHg} \times 5\mu V \times 5\ V = 1.25\ \text{mV}$$

จากสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก Transducer Sensitivity ทำให้สามารถใช้เป็นอัตราส่วนในการแปลงหน่วยจากแรงดันทางไฟฟ้า (mV) เป็นหน่วยความดัน (mmHg) คือ 1 mmHg = 0.025 mV

- **การกำหนดจุดสอบเทียบ**

  ห้องปฏิบัติการกำหนดจุดสอบเทียบมาตรฐานสำหรับฟังก์ชัน Invasive Blood Pressure จำนวน 4 จุด เพื่อครอบคลุมย่านการใช้งานทางการแพทย์ ดังนี้:

  - 0 mmHg (เพื่อทวนสอบจุดศูนย์ของวงจรสะพานวัด (Wheatstone Bridge Circuit)
  - 50 mmHg (ย่านความดันต่ำ)
  - 100 mmHg (ย่านความดันใช้งานปกติ)
  - 240 mmHg (ย่านความดันสูงเพื่อทวนสอบความเชิงเส้นของสัญญาณ)

- **ขั้นตอนการสอบเทียบ**

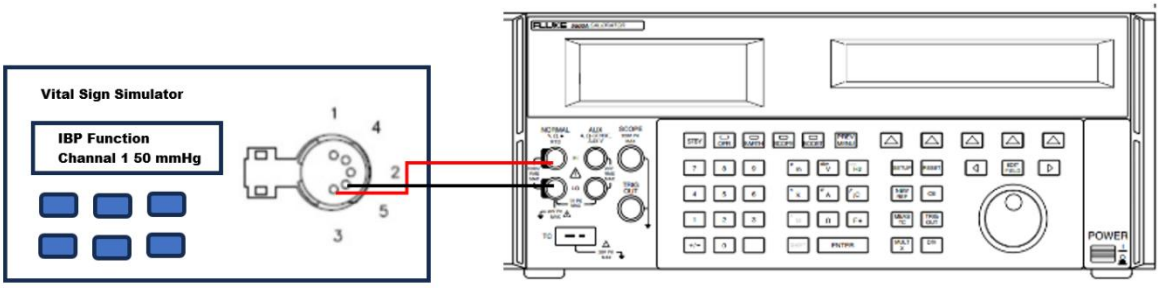
การเตรียมและการติดตั้ง (Setup)

1. การจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อกระตุ้น Transducer Pressure Sensor ตามคู่มือของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ

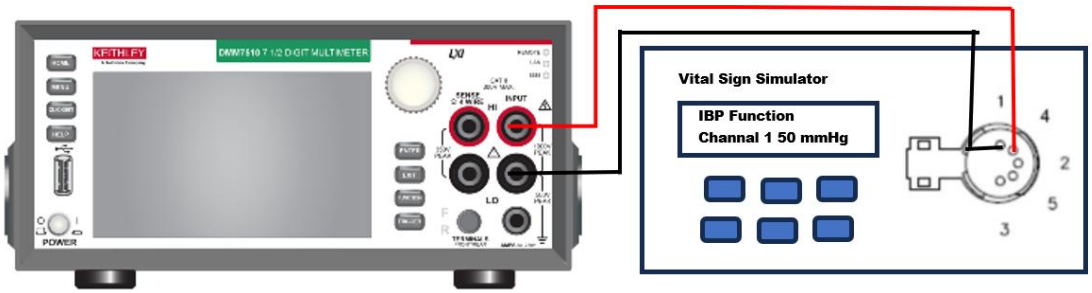
   - ต่อสาย Multi-Product Calibrator ที่ช่อง Normal Hi + | Lo –

   Hi + จากเครื่อง Multi-Product Calibrator ต่อเข้ากับ + Exciter (PIN3) ของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)

   Lo - จากเครื่อง Multi-Product Calibrator ต่อเข้ากับ – Exciter (PIN5) ของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)



2. เชื่อมต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) เข้ากับ Transducer Pressure Sensor ของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)
   - Hi (สายสีแดง) เชื่อมต่อกับ + Output (PIN4)
   - Lo (สายสีดำ) เชื่อมต่อกับ – Output (PIN1)



การตั้งค่าเครื่องมือ (Configuration)

1. การตั้งค่าเครื่องมือ Multi-Product Calibrator
   - ตั้งค่าแรงดัน 5 V
   - Enter เพื่อให้เครื่องอยู่ในโหมดพร้อมใช้ (Standby)
2. การตั้งค่าเครื่องมือ STD Keithley DMM7510 ที่โปรแกรม Kickstart
   - ฟังก์ชัน: DC Voltage | Range : 100 mV
   - ตั้งค่า NPLC: 10 | Autozero: ON
   - ตั้งค่า Measure Delay (s) : 2 วินาที | Measure Count : 3 ครั้ง
3. การตั้งค่าเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)
   - เข้าเมนู IBP
   - ตั้งค่า Pressure ให้สอดคล้องกับ Channel ที่ติดตั้งไว้ ตามจุดสอบเทียบ 0,50,100 และ 240 mmHg

กระบวนการเก็บข้อมูล

1. เริ่มที่จุด 0 mmHg ทำการ OPR แรงดันไฟฟ้า 5 V
2. ชดเชยค่าความต้านทานและแรงดันตกค้างในสายที่โปรแกรม Kickstart
3. กด Start เพื่อเริ่มเก็บค่าตามที่ตั้งค่าไว้
4. คัดลอกค่าที่ได้หน่วย V ลง PTS-xx-00xx ใน Sheet ของ DATA IBP ช่อง STD Reading (V) การรายงานเป็น mmHg นำค่า Average (mV) แปลงโดยเข้าสมการจะหารด้วย 0.025 mV

5. เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยจากเครื่องมือมาตรฐานนำมาปรับแก้ด้วยค่า DC Voltage Zero Offset ที่ระบุไว้ในใบรับรองการสอบเทียบของเครื่องมือมาตรฐานฉบับปัจจุบัน เพื่อรายงานค่าที่แท้จริง

<u>สูตรการคำนวณ</u>

$$V_{Corrected} = V_{Average} + Correction$$

เมื่อ $V_{Corrected}$ = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่แท้จริง

$V_{Average}$ = ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน)

$Correction$ = ค่าแก้ที่ได้จากใบรับรองการสอบเทียบฉบับปัจจุบัน

หมายเหตุ : ในกรณีค่า Zero Offset ใช้เครื่องหมายตามที่ระบุในใบ Certificate บวกกับค่าที่อ่านได้

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> แทนค่าแรงดันเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน $V_{Average}$ = 0.5003 mV

ค่าแก้ที่ได้จากการสอบเทียบปัจจุบัน (Certificate No.E2U2500060) = -0.00589

$$V_{Corrected} = 1.255736 \text{ mV} + (-0.00589 \text{ mV})$$

$$V_{Corrected} = 1.249846 \text{ mV}$$

Invasive Blood Pressure Simulation					
UUC Setting	STD (mV)	STD (mV)	STD (mV)	Average (mV)	V corrected
0 mmHg					
50 mmHg	1.25586	1.255776	1.255572	1.55736	1.249846
100 mmHg					
240 mmHg					

ตารางที่ 7 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ หน่วย mV

6. เมื่อได้ค่าแรงดันไฟฟ้าจากนั้นนำมาแปลงเป็นหน่วยแรงดันโดยใช้สมการความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก Transducer Sensitivity

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

$$V_{out} = \text{Pressure} \times \text{Sensitivity} \times V_{EXC}$$

$$\text{Pressure} = \frac{V_{out}}{\text{Sensitivity} \times V_{EXC}}$$

แทนค่า Sensitivity = $5\mu V$, $V_{EXC} = 5\ V$ และ $V_{out} = 1.249846\ mV$

$$\text{Pressure} = \frac{\text{V}_{\text{out}}}{\text{Sensitivity} \times \text{V}_{\text{EXC}}}$$

$$\text{Pressure} = \frac{1.249846}{5\mu\text{V} \times 5}$$

$$\text{Pressure} = 49.994\ mmHg$$

- **การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด**

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด Invasive Blood Pressure Simulation ซึ่งจะได้ลักษณะความสัมพันธ์ ทางสมการดังต่อไปนี้

$$V_{IBP} = (V_{UUC} - V_{STD}) + \delta V_{REP} + \delta V_{ACC} + \delta V_{DRIFT} + \delta V_{RES} + \delta V_{EMF} + \delta V_{CMR} + \delta V_{EXC} + \delta V_{VAR} + \delta V_{IN} + \delta V_{ZERO}$$

เมื่อ V_{IBP} = ค่าความคลาดเคลื่อนของ IBP Simulation

V_{UUC} = ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งค่า ณ เครื่องที่ถูกสอบเทียบ (UUC Setting)

V_{STD} = ค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือมาตรฐาน

δV_{REP} = ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดซ้ำ (Repeatability)

δV_{ACC} = 1 Year Accuracy of Standard DMM7510

δV_{DRIFT} = ค่าความไม่แน่นอนจากการเลื่อนค่าของเครื่องมือมาตรฐาน (Drift)

δV_{RES} = ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องมือมาตรฐาน

δV_{EMF} = ค่าความไม่แน่นอนจากผลของแรงดันไฟฟ้าความร้อน (Thermal EMF)

δV_{CMR} = ค่าความไม่แน่นอนจาก Common Mode Rejection ของระบบการวัด

δV_{EXC} = ค่าความไม่แน่นอนที่เพิ่มขึ้นจาก Excitation Voltage Input (5500A)

δV_{VAR} = ค่าความไม่แน่นอนจากการผันผวนที่เกิดจากแหล่งจ่าย Voltage Input (5500A)

δV_{IN} = ค่าความไม่แน่นอนจากการเลื่อนค่าของเครื่องมือที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย Voltage Input (5500A)

δV_{ZERO} = ค่าความไม่แน่นอนจากชดเชยค่าศูนย์ของเครื่องมือที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย Voltage Input (5500A)

1. **หาค่าความไม่แน่นอน Type A**

δV_{REP} ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดซ้ำ (Repeatability) เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด Type A จากการสอบเทียบ UUC ได้จากการคำนวณทางสถิติ (การวัดซ้ำ) มีลักษณะการกระจายเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ตัวหาร = 1

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ในการหาค่าความไม่แน่นอน Type A มีขั้นตอนดังนี้

- หาค่าเฉลี่ยของการวัด ($\overline{\text{X}}$)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

เมื่อ $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

X = ค่าที่วัดได้ครั้งใด ๆ

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

แทนค่าผลการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

$$\bar{X} = \frac{1.25586+1.25576+1.255776}{3}$$

$\bar{X}$ = 1.255736 mV

- หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

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

เมื่อ $S(X_i)$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

X_i = ค่าที่วัดได้ครั้งใด ๆ

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

2. หาค่าความไม่แน่นอน Type B

δV_{ACC} (1 Year Accuracy of Standard DMM7510) เป็นข้อกำหนด 1 ปีจากผู้ผลิต มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ดูจากคู่มือ Digital Multimeter, 7.5 digit, Model : DMM7510

Range : 100 mV = 18 ppm of reading + 9.5 ppm of range , Reading : 2.5 mV

$$\delta V_{ACC} = \frac{(18\times10^{-6} \times 2.5\ mV)+(9.5\times10^{-6})\times100\ mV)}{\sqrt{3}}$$

$$\delta V_{ACC} = 0.0006\ mV$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.0006 mV

δV_{RES} (Resolution of Standard) เป็นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการปัดเศษจุดทศนิยมจากการอ่านตัวเลขตำแหน่งสุดท้ายของการอ่านค่าของเครื่องมือมาตรฐาน Standard (ทำ Resolution ให้อยู่ในรูปของ

Semi-range ด้วยการหารสอง), มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ค่าละเอียดของ Standard ที่อ่านได้ 0.00001 mV ต้องหารด้วย 2 = 0.000005 mV

= 0.000005 / √3

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.000000289 mV (ดังตารางที่ 8)

δV_{EMF} (Thermal emf) เป็นค่าความไม่แน่นอนจากแรงดันไฟฟ้าความร้อนที่เกิดขึ้น ณ จุดต่อของวัสดุต่างชนิดกันเมื่ออุณหภูมิต่างกัน The Expression-of-Uncertainty-and-Confidence-in Measurement-M3003 ระบุให้พิจารณาค่านี้เป็นพิเศษสำหรับแรงดันต่ำ โดยกำหนดค่าประมาณที่ 1 μV (หรือ 0.001 mV) มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution) ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดค่า</u>

แทนค่า 0.0010 mV (แปลง 1.0 μV ให้เป็น mV)

= 0.0010 / √3

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.000577 mV (ดังตารางที่ 8)

δV_{CMR} (Effect of common-mode rejection ratio ; ECMRR) ในทางอุดมคติ มัลติมิเตอร์ทั่วๆ ไป การต่อวงจรการวัดจะถูกแยกอิสระจากระดับอ้างอิงของสายดิน (Earth-referenced) แต่อย่างไรก็ดี จะมีความต้านทานที่มีค่าอนันต์อยู่ระหว่างขั้ว LO ของมัลติมิเตอร์และสายดิน (Earth Ground) จะส่งผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าค่าต่ำๆ นั่นคือจะเกิดค่าแรงดัน Floating ตกคร่อมระหว่างขั้วต่อ LO ของมัลติมิเตอร์ กับ Ground ซึ่งผลของการเกิดสิ่งนี้ เรียกว่า Common Mode Rejection (CMR) ซึ่งค่า CMR นี้ ขึ้นอยู่กับความสามารถในการกำจัดแรงดัน Floating ของ Digital Multimeter (DMM7510) เอง โดยปกติผู้ผลิตจะบอกมากับคู่มือของเครื่องมือว่าค่า CMR เท่าไรในการวัดแต่ละครั้ง โดยจะบอกมาในรูปของ dB (Decibel) ดังนั้น สามารถที่จะแปลงค่าจาก dB เป็น Voltage ได้ ดังสมการต่อไปนี้ มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

เมื่อ dB = Common mode rejection of Digital Multimeter= 140 dB

V_{ref} = อ้างอิงจากแรงดันไฟฟ้าเต็มสเกลของย่านที่ใช้งาน

ดังนั้น V_{CM} = 10^(-140/20) * V_{ref}

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ที่ Range 100 mV แทนค่า = 10^(-140/20) * 100 mV

= 0.00000001 mV

= 0.00000001 / √3

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.000000001 mV (ดังตารางที่ 8)

δV_{EXC} (Excitation Voltage) ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าภายนอก (Excitation Voltage) จากเครื่องมือมาตรฐาน เพื่อกระตุ้นการทำงานของวงจรตัวแปรสัญญาณในฟังก์ชัน IBP ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันกระตุ้นนี้จะส่งผลกระทบต่อสัญญาณขาออก (Output Signal) ตามสัดส่วนความไวของเครื่องมือที่ทำการสอบเทียบ โดยที่มาของหลักการเรียกว่า "Sensitivity Analysis" หรือการวิเคราะห์ความไวของระบบ ตามแนวทางของ GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) และ The Expression-of-Uncertainty-and-Confidence-in-Measurement-M3003 มีการกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular)

<u>อัตราส่วน (Ratio)</u>

$$\frac{\delta V_{EXC}}{V_{out}} = \frac{\delta V_{5500A}}{V_{5500A}}$$

<u>สูตรที่ใช้ในการคำนวณ</u>

$$\delta V_{EXC} = V_{out} \times \frac{\delta V_{5500A}}{V_{5500A}}$$

เมื่อ δV_{EXC} = ความไม่แน่นอนเนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากระตุ้น

V_{out} = ค่าแรงดันขาออกของจุดสอบเทียบนั้นๆ (ที่จุด 1.25 mV ที่จุด 50 mmHg)

δV_{5500A} = ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งจ่ายแรงดันกระตุ้น

V_{5500A} = ค่าแรงดันกระตุ้นที่ตั้งไว้ (5 V หรือ 5000 mV)

<u>วิธีการคิดค่า</u>

δV_{5500A} เป็นข้อกำหนด 1 ปีจากผู้ผลิต (ให้ค่ามาในรูปของ Absolute Uncertainty ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ซึ่งค่านี้ได้รวม Error และ Calibration Uncertainty ไว้เรียบร้อยแล้ว) มีลักษณะการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) , มีค่าองศาอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ infinity ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของแหล่งจ่าย

ดูจากคู่มือ Multi-Product Calibrator , Model 5500A

Range : 0 to 32.99999 V -> Accuracy ±0.005% of output + 50μV (0.05 mV)

นำค่าแรงดันเนื่องจากจ่าย แรงดัน 5 *V* ให้ Pressure Transducer 5000 mV x 0.005% = 0.25 mV

$$\delta V_{5500A} = \frac{(0.005\% \times 5\ V) + (50\mu V)}{\sqrt{3}}$$

$$\delta V_{5500A} = 0.433\ mV$$

เมื่อได้ค่าความไม่แน่นอนของแหล่งจ่ายแรงดันแล้วให้นำไปแทนค่าในสูตร

$$\delta V_{EXC} = V_{out} \times \frac{\delta V_{5500A}}{V_{5500A}}$$

$$\delta V_{EXC} = 1.25mV \times \frac{0.433}{5000}\ mV = 0.0001083\ mV$$

$$\delta V_{EXC} = \frac{0.0001083\ mV}{\sqrt{3}}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน 0.0001 mV (ดังตารางที่ 8)

δV_{VAR} (Variable source supply) ค่าความไม่แน่นอนจากการผันผวนที่เกิดจากแหล่งจ่าย Voltage Input (5500A) ห้องปฏิบัติการได้ทำการทดลองจำลองสภาวะแรงดันกระตุ้นตกลง 0.02 V และบันทึกผลต่างของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก แต่ละจุดสอบเทียบเพื่อนำมาใช้เป็นขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด เนื่องจากข้อมูลมีความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นเท่าๆกัน จึงประเมินเป็นการกระจายตัวเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) โดยมีสมการดังนี้

$$\boxed{u_{VAR} = \frac{Drift_{0.02V}}{\sqrt{3}}}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.0029 mV (ดังตารางที่ 8)

δV_{IN} (Drift input Voltage) ค่าความไม่แน่นอนจากการเลื่อนค่าของเครื่องมือที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย Voltage Input (5500A) เนื่องจากมีการใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก เครื่องมือมาตรฐานที่จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระตุ้น (Calibrator) มีค่าความคลาดเคลื่อนสะสมตามระยะเวลาการใช้งาน (Drift) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสัญญาณแรงดันขาออกของเครื่องจำลองสัญญาณชีพเพื่อให้ประเมินผลกระทบนี้ได้อย่างแม่นยำ ห้องปฏิบัติการจึงใช้วิธี "เทียบบัญญัติไตรยางศ์" โดยอิงจากฐานข้อมูลการทดลองความผันผวนของแหล่งจ่ายที่ระดับ 0.02 V ดังนี้:

ขั้นที่ 1: ตั้งสมมติฐานจากผลการทดลอง

หากแรงดันกระตุ้นเปลี่ยนไป 0.02 V จะส่งผลให้สัญญาณขาออกมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ $Drift_{0.02V}$ (ผลต่างที่เก็บค่าได้จริง ณ จุดสอบเทียบนั้นๆ)

ขั้นที่ 2: เทียบบัญญัติไตรยางศ์เพื่อหาผลกระทบจาก Drift

ยกตัวอย่างเป็นการเลื่อนค่าปัจจุบันหากแรงดันกระตุ้นเปลี่ยนไป 0.00007 V จะส่งผลให้สัญญาณขาออกมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุด (ขอบเขต a) เท่ากับ

$$\boxed{a = \frac{Drift_{0.02V} \times Drift\ of\ Calibrator}{0.02}}$$

หมายเหตุ : หากมีข้อมูลของการเลื่อนค่าของเครื่องมือมาตรฐานแต่ละปี ให้ทำการอัพเดตในตารางการคำนวณ Uncertainty Budget Template

เนื่องจากค่า Drift มีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันในขอบเขต ±a จึงประเมินการกระจายตัวเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) โดยมีสมการคือ

$$\boxed{\delta V_{IN} = \frac{a}{\sqrt{3}}}$$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> ที่จุดสอบเทียบ 100 mmHg หากผลต่าง Drift จากการทดลอง 0.02 V มีค่าเท่ากับ 0.01 mV เมื่อเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายคาดเคลื่อน 0.00007 V

$$a = \frac{0.01 \times 0.00007}{0.02} = 0.00035\ mV$$

$$\delta V_{IN} = \frac{0.00035}{\sqrt{3}}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.000010 mV (ดังตารางที่ 8)

δV_{ZERO} ค่าความไม่แน่นอนจากชดเชยค่าศูนย์ของเครื่องมือที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย Voltage Input (5500A) ในทางอุดมคติ เมื่อเครื่องจำลองสัญญาณชีพตั้งค่าการจำลองความดันโลหิตที่ 0 mmHg สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ควรมีค่าเท่ากับ 0 mV อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความไม่สมดุลของวงจรความต้านทานภายใน (Bridge Unbalance) จึงอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกค้างขนาดเล็ก (Offset Voltage) ออกมาพร้อมกับสัญญาณหลัก s ห้องปฏิบัติการทำการทดสอบวัดค่าแรงดันขาออกขณะจ่ายแรงดันกระตุ้นและตั้งค่าความดันที่ 0 mmHg พบว่ามีแรงดันตกค้างสูงสุดอยู่ที่ 0.0005 mV ห้องปฏิบัติการจึงนำค่านี้มาประเมินเป็นขอบเขตความคลาดเคลื่อน (a) และเนื่องจากความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันในขอบเขตดังกล่าว จึงประเมินการกระจายตัวเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) โดยมีสมการการประเมินดังนี้

$$\delta V_{ZERO} = \frac{0.0005\ mV}{\sqrt{3}}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.0003 mV (ดังตารางที่ 8)

3. **หาค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty)**
   เป็นการนำค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นมารวมกันแบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง (Root Sum Square) ดังนี้

$$u_c = \sqrt{(u_{RES})^2 + (u_{ACC})^2 + (u_{DRIFT})^2 + (u_{REP})^2 + (u_{CMR})^2 + (u_{EXC})^2 + (u_{VAR})^2 + (u_{IN})^2 + (u_{ZERO})^2}$$

4. **หาค่าองศาความเป็นอิสระที่มีประสิทธิผล (ν_{eff})** โดยใช้สูตรการคำนวณของ Welch-Satterthwaite

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

5. **หาตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor, *k*)** จากตาราง Student’s “ t ” Distribution ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45% (แต่โดยทั่วไปจะเรียกว่าที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95%)

6. หาค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty)

$$U = k\ u_c(y)$$

เมื่อ U = Expanded Uncertainty

k = Coverage Factor

$u_c(y)$ = ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

7. วิธีการแปลงหน่วยเพื่อออกใบรายงานผล

วิธีการแปลงหน่วยจาก mV เป็น mmHg โดย 0.025 mV = 1 mmHg จากสมการสมการความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟฟ้าขาออกจาก Transducer Sensitivity

<u>วิธีการคิดค่า</u> U = 0.0020 mV

$$U = 0.0061\ mV \times \frac{1\ mmHg}{0.025\ mV}$$

$$U = 0.244\ mmHg$$

<u>ดังนั้น</u> ค่าความไม่แน่นอนของ Invasive Blood Pressure ที่จุดสอบเทียบ 50 mmHg เท่ากับ 0.08 mmHg

Uncertainty Budget Table | 50 mmHg | 1.25 | mV

Symbol	Type	Source of uncertainty	Uncertainty Value (+/-)	unit	Probability Distribution	Divisor	Sensitivity Coefficient (C_i)	Standard Uncertainty +/- mV	Degree of Freedom		
δV_REP	A	Repeatability of Voltage Reading STD	0.00009	mV	Normal	1.0	1.0	0.0001	2		
δV_ACC	B	Uncertainty of STD	0.0010	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0006	∞		
δV_DRIFT	B	Drift of STD	0.0010	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0006	∞		
δV_RES	B	Resolution of STD 100mV=10nV	0.000050	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0000	∞		
δV_EMF	B	Thermal EMF	0.0010	mV	Rectangular	√3	1.0	0.000577	∞		
δV_CMR	B	Commode Rejection	0.0000001	mV	Rectangular	√3	1.0	0.00000	∞		
δV_EXC	B	Auucracy voltage input for uuc (5500A)	0.00010825	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0001	∞		
δV_VAR	B	Variable soruce supply 0.02 V	0.005	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0029	∞	0.02	0.005
δV_IN	B	dift input Voltage	0.0000175	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0000	∞	0.00007	0.0000175
δV_ZERO	B	Zero baesline	0.0005	mV	Rectangular	√3	1.0	0.0003	∞		
	-	Combinded Standard Uncertainty			Normal			0.0031	3300157.1	mmHg	
	-	Expanded Uncertainty			Normal (K=)			0.0061	2.00	0.245179544	

ตารางที่ 8 ตารางแสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน Invasive Blood Pressure Simulation

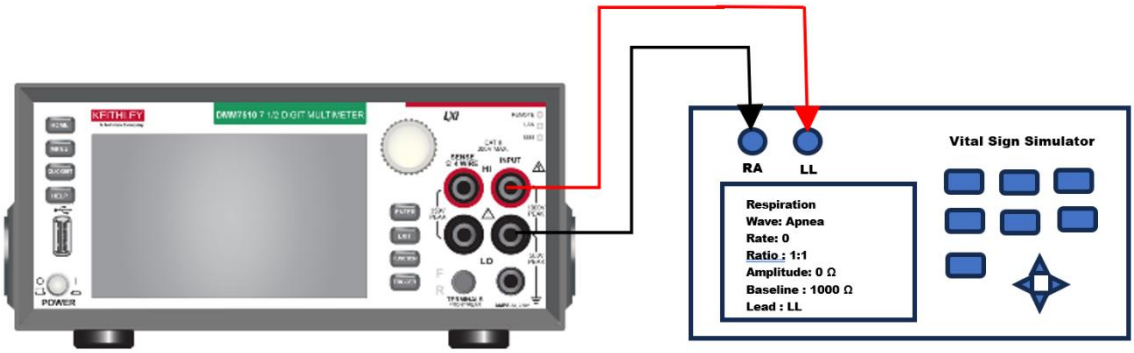
7. การสอบเทียบ Baseline Respiration Simulation

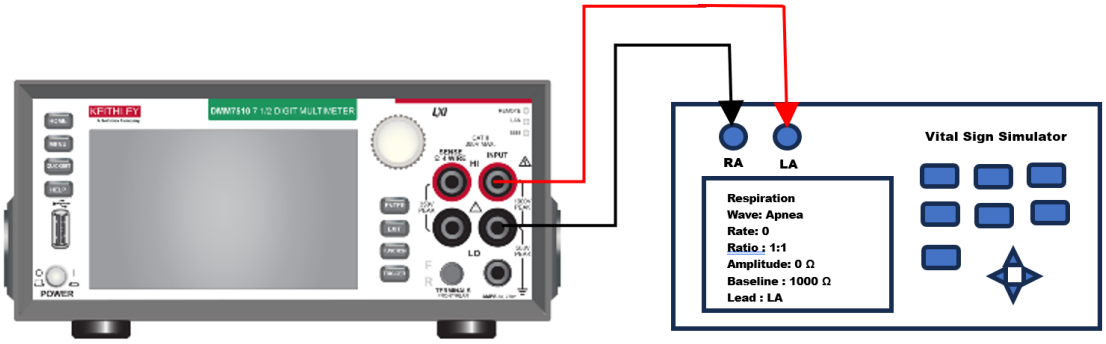
การจำลองการหายใจใช้วิธี Transthoracic Impedance คือการเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้า ระหว่างขั้ววัด RA และ LL โดยเครื่อง UUC จะจ่ายกระแสไฟฟ้าความถี่สูงออกมาเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้

➢ ขั้นตอนการสอบเทียบ Baseline Respiration (หน่วย kΩ)

การเตรียมและการติดตั้ง (Setup)

1. ก่อนเริ่มการวัดค่า Baseline Respiration ต้องทำการชดเชยค่าความต้านทานและแรงดันตกค้างในสาย เพื่อไม่ให้ค่าเหล่านี้ไปรวมกับสัญญาณที่จะวัด
2. เชื่อมต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) เข้ากับขั้ว ECG ของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)
    - Hi (สายสีแดง) : เชื่อมต่อกับขั้ว LL (Left Leg) หรือ LA (Left Arm)
    - Lo (สายสีดำ) : เชื่อมต่อกับขั้ว RA (Right Arm)





การตั้งค่าเครื่องมือ (Configuration)

1. การตั้งค่าเครื่องมือ STD Keithley DMM7510 ที่โปรแกรม Kickstart
    - ฟังก์ชัน: 4 Wire Resistance | Range : 1-10 kΩ (ตามที่ตั้งค่าจาก UUC)
    - ตั้งค่า NPLC: 10 | Autozero: ON
    - ตั้งค่า Measure Delay (s) : 2 | Measure Count : 3 ครั้ง

2. การตั้งค่าเครื่องจำลองสัญญาณชีพ UUC
   - เข้าเมนู ECG ปรับสัญญาณ Amplitude ให้เหลือน้อยที่สุด
   - เข้าเมนู Respiration ตั้งค่า Rate 0 bpm, Amplitude 1 Ω และ I:E Ratio 1:1
   - ตั้งค่า Baseline ตามจุดสอบเทียบ 0.5 ,1, 1.5 และ 2 kΩ

กระบวนการเก็บข้อมูล

1. เมื่อเริ่มสร้างสัญญาณจากเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC) ตั้งค่าตามจุดสอบเทียบ
2. ทำการคัดลอกค่าที่ได้ 3 ค่าจาก Baseline Respiration (Ω) มาลงใน PTS-xx-00xx ใน Sheet ของ DATA Respiration

Baseline Respiration Simulation				
UUC Setting	STD (kΩ)	STD (kΩ)	STD (kΩ)	Average (kΩ)
500 Ω	0.49980	0.49979	0.499791	0.49979
1000 Ω				
1500 Ω				
2000 Ω				

ตารางที่ 9 บันทึกผลการสอบเทียบ Baseline Respiration Simulation

➢ **การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด**

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด Baseline Respiration Simulation ซึ่งจะได้ลักษณะความสัมพันธ์ทางสมการดังต่อไปนี้

$$R_{Baseline} = (R_{uuc} - R_{STD}) + \delta R_{REP} + \delta R_{ACC} + \delta R_{DRIFT} + \delta R_{RES} + \delta R_{RATIO} + \delta R_{AMP} + \delta R_{RATE}$$

เมื่อ $R_{Baseline}$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทาน Baseline Respiration

R_{uuc} = ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ตั้งค่า ณ เครื่องที่ถูกสอบเทียบ (UUC Setting)

δR_{REP} = ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดซ้ำ (Repeatability)

δR_{ACC} = 1 Year Accuracy of Standard DMM7510

δR_{DRIFT} = ค่าความไม่แน่นอนจากการเลื่อนไถลของเครื่องมือมาตรฐาน (Drift)

δR_{RES} = ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องมือมาตรฐาน

δR_{RATIO} = ความไม่แน่นอนจากผลกระทบของอัตราส่วนการหายใจ

δR_{AMP} = ความไม่แน่นอนจากผลกระทบของการตั้งค่าแอมพลิจูด

δR_{RATE} = ความไม่แน่นอนจากผลกระทบของการตั้งค่าอัตราการหายใจ

1. **ค่าความไม่แน่นอน Type A**

δR_{REP} (Repeatability) เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด Type A จากการสอบเทียบ UUC ได้จากการคำนวณทางสถิติ (การวัดซ้ำ) มีลักษณะการกระจายเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ตัวหาร = 1

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ในการหาค่าความไม่แน่นอน Type A มีขั้นตอนดังนี้

- หาค่าเฉลี่ยของการวัด ($\overline{X}$)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

เมื่อ $\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

X = ค่าที่วัดได้ครั้งใด ๆ

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

แทนค่าผลการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

$$\bar{x} = \frac{0.49354+0.4974081+0.497337}{3} = 0.4973662\ k\Omega$$

- หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

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

เมื่อ $S(X_i)$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

X_i = ค่าที่วัดได้ครั้งใด ๆ

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

แทนค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ณ จุดสอบเทียบ 0.5 kΩ จากการวัด 3 ครั้ง ดังนี้โดยมีค่าเฉลี่ย = 0.49979 kΩ

$$S(X_i) = \frac{\sqrt{(0.4973535-0.4973662)^2+(0.4974081-0.4973662)^2+(0.497337-0.4973662)^2}}{3-1}$$

$S(X_i)$ = 0.0000372 kΩ

$(u_a) = \frac{S(Xi)}{\sqrt{n}}$ = 0.000021485 kΩ

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน δR_{REP} = 0.000001735 kΩ (ดังตารางที่ 10)

2. ค่าความไม่แน่นอน Type B

δR_{ACC} (1 Year Accuracy of Standard DMM7510) เป็นข้อกำหนด 1 ปีจากผู้ผลิต มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ดูจากคู่มือ Digital Multimeter, 7.5 Digit, Model : DMM7510

Range : 1 kΩ ,Setting : 0.5 kΩ Accuracy ±41 ppm of reading + 3 ppm of range

$$\text{Accuracy} = \pm\,(40 \times 10^{-6} \times 0.5\ \text{k}\Omega) + (3 \times 10^{-6} \times 1\text{k}\Omega)$$

$$= \pm\ 0.0000235\ \text{k}\Omega$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.000025/√3 = 0.0000136 kΩ (ดังตารางที่ 10)

<u>Note :</u> 1 Year Accuracy ครอบคลุม Error และ uncertainty แล้ว เนื่องจากกระบวนการทวนสอบผลการสอบเทียบ

δR_{RES} (Resolution of Standard) เป็นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการปัดเศษจุดทศนิยมจากการอ่านตัวเลขตำแหน่งสุดท้ายของการอ่านค่าของ Standard (ทำ Resolution ให้อยู่ในรูปของ Semi-range ด้วยการหารสอง), มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ค่าละเอียดของ Standard ที่อ่านได้ 0.00001 kΩ ต้องหารด้วย 2 = 0.000005 kΩ

$$\delta R_{RES} = 0.00005\ /\ \sqrt{3}$$

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.000029 kΩ (ดังตารางที่ 10)

δR_{RATIO} (Respiration I:E Ratio Effect) ความไม่แน่นอนจากผลกระทบของอัตราส่วนการหายใจ เครื่องจำลองสัญญาณชีพยังสามารถปรับตั้งค่าอัตราส่วนเวลาการหายใจเข้าต่อการหายใจออก (Inspiration Expiration Ratio หรือ I:E Ratio) ได้ การปรับเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณจากสภาวะสมมาตร (อัตราส่วน 1:1) ไปสู่สภาวะที่ไม่สมมาตร (เช่น อัตราส่วน 1:5) ทำให้ส่งผลกระทบต่ออัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling) ของเครื่องมัลติมิเตอร์มาตรฐาน ทำให้ค่าความต้านทานเฉลี่ยที่อ่านได้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Shift) ไปจากเดิม ห้องปฏิบัติการจึงทำการประเมินผลกระทบนี้ โดยการหาค่าผลต่างของความต้านทานที่อ่านได้ระหว่างการตั้งค่าอัตราส่วน 1:1 และ 1:5 เพื่อนำมาใช้เป็นขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด (a) และเนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการชดเชยรูปคลื่นดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันในทุกสัดส่วนการจำลองสัญญาณ จึงพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ซึ่งหาค่าความไม่แน่นอน ได้โดยการนำค่าผลต่างที่ทดสอบได้มาหารด้วยรากที่สองของสาม ดังสมการ

$$\boxed{\delta R_{RATIO} = \frac{|R_{1:1} - R_{1:5}|}{\sqrt{3}}}$$

R_{AMP} (Respiration Amplitude Effect) ความไม่แน่นอนจากผลกระทบของการตั้งค่าแอมพลิจูด ในการจำลองสัญญาณการหายใจ เครื่องจำลองสัญญาณชีพจะสร้างความแปรปรวนของความต้านทานซ้อนทับลงบนค่าพื้นฐาน (Baseline) โดยมีขนาดความกว้างตามการตั้งค่าแอมพลิจูด (Amplitude หรือ Delta) การเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูด (เช่น การเปรียบเทียบระหว่างการตั้งค่า 0.5 Ω และ 3.0 Ω) จะส่งผลต่อขนาดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งออกมา ซึ่งความกว้างของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปนี้อาจรบกวนเสถียรภาพของวงจรจำลองสัญญาณและการประมวลผลหาค่าเฉลี่ยของเครื่องมัลติมิเตอร์มาตรฐาน ทำให้ค่าความต้านทานที่แสดงผลเกิดการเลื่อนไหล (Shift) ไปจากสภาวะอ้างอิง เพื่อควบคุมความเสี่ยงนี้ ห้องปฏิบัติการจึงประเมินผลกระทบโดยการหาผลต่างของความต้านทานที่วัดได้ระหว่างสภาวะที่มีการตั้งค่าแอมพลิจูดแตกต่างกัน เพื่อนำค่าส่วนต่างนั้นมาใช้เป็นขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด (a) และเนื่องจากผลกระทบจากการขยายขนาดสัญญาณมีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันในการใช้งานจริง จึงพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ซึ่งคำนวณหาความไม่แน่นอนมาตรฐาน ได้โดยนำผลต่างที่พบมาหารด้วยรากที่สองของสาม ดังสมการ

$$\delta R_{AMP} = \frac{|R_{AMP0} - R_{AMP5}|}{\sqrt{3}}$$

R_{RATE} (Respiration Rate Effect) ความไม่แน่นอนจากผลกระทบของการตั้งค่าอัตราการหายใจ ในการจำลองสัญญาณการหายใจ เครื่องจำลองสัญญาณชีพจะสร้างการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานโดยสามารถกำหนดความถี่หรืออัตราการหายใจ (Respiration Rate) ได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ไม่เกิดการหายใจ คือ 0 bpm กับสภาวะที่มีอัตราการหายใจ คือ 20 bpm พบว่าความถี่ของการปรับเปลี่ยนสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลต่อพฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าและไปรบกวนช่วงเวลาการสุ่มเก็บข้อมูลของเครื่องมัลติมิเตอร์มาตรฐาน ทำให้ค่าความต้านทานพื้นฐาน (Baseline) ที่แสดงผลเกิดการเลื่อนไหล (Shift) ไปจากสภาวะอ้างอิง เพื่อครอบคลุมความเสี่ยงทางมาตรวิทยานี้ ห้องปฏิบัติการจึงประเมินผลกระทบโดยการทดสอบเก็บค่าจริงเพื่อหาผลต่างของความต้านทานที่อ่านได้ระหว่างการตั้งค่าอัตราการหายใจที่แตกต่างกัน เพื่อนำค่าส่วนต่างนั้นมาใช้เป็นขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด (a) และเนื่องจากผลกระทบจากความถี่นี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันในทุกสภาวะการจำลองสัญญาณ จึงพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ซึ่งหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานได้โดยนำผลต่างที่พบมาหารด้วย √3 ดังสมการ

$$\delta R_{RATE} = \frac{|R_{20\ bpm} - R_{0\ bpm}|}{\sqrt{3}}$$

3. **หาค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty)**
เป็นการนำค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นมารวมกันแบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง (Root Sum Square) ดังนี้

$$u_c = \sqrt{(u_{REP})^2 + (u_{ACC})^2 + (u_{DRIFT})^2 + (u_{RES})^2 + (u_{RATIO})^2 + (u_{AMP})^2 + (u_{RATE})^2}$$

4. **หาค่าองศาความเป็นอิสระที่มีประสิทธิผล (ν_{eff})** โดยใช้สูตรการคำนวณของ Welch-Satterthwaite

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

5. **หาตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor, *k*)** จากตาราง Student's " t " Distribution ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45% (แต่โดยทั่วไปจะเรียกว่าที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95%)
6. **หาค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty)**

$$U = k\ u_c$$

เมื่อ U = Expanded Uncertainty

k = Coverage Factor

u_c = ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

RA&LL

Uncertainty Budget Table **0.5 kΩ**

Symbol	Type	Source of uncertainty	Uncertainty Value (+/-)	unit	Probability Distribution	Divisor	Sensitivity Coefficient (C_i)	Standard Uncertainty +/-kΩ	Degree of Freedom
δR_REP	A	Repeatability of Resistance Reading STD	0.000021485	kΩ	Normal	1.0	1.0	0.0000215	2
δR_ACC	B	Uncertainty of STD	0.0000235	kΩ	Rectangular	√3	1.0	0.0000136	∞
δR_DRIFT	B	Drift of STD	0.0000235	kΩ	Rectangular	√3	1.0	0.0000136	∞
δR_RATIO	B	ratio setting of uuc	0.0000020	kΩ	Rectangular	√3	1.0	0.0000012	∞
δR_AMP	B	Amplitude setting of uuc	0.0109448	kΩ	Rectangular	√3	1.0	0.0063190	∞
δR_RATE	B	Rate setting of uuc	0.0009337	kΩ	Rectangular	√3	1.0	0.0005391	∞
δR_RES	B	Resolution of STD	0.000005	kΩ	Rectangular	√3	1.0	0.0000029	∞
	-	Combinded Standard Uncertainty			Normal			0.0063420	1.52E+10
	-	Expanded Uncertainty			Normal (K=)			0.0126840	2.00

ตารางที่ 10 ตารางแสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน Baseline Respiration Simulation

8. การสอบเทียบ Temperature Simulation

การจำลองอุณหภูมิทางการแพทย์ส่วนใหญ่ (เช่น YSI 400 และ YSI700 Series) ใช้หลักการของ **เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor)** ซึ่งความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (Negative Temperature Coefficient - NTC) เครื่อง Simulator จะจำลองค่าความต้านทานที่ตรงกับอุณหภูมินั้นๆ ตามตารางมาตรฐาน

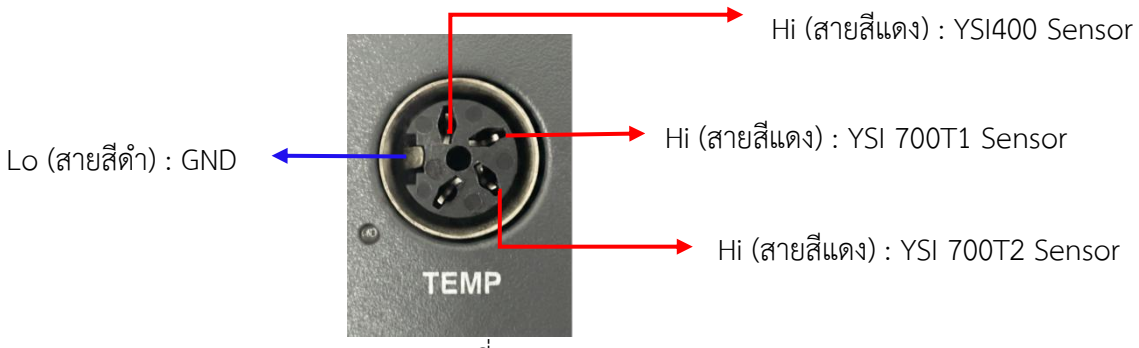
- **การกำหนดจุดสอบเทียบ**

  ห้องปฏิบัติการกำหนดจุดสอบเทียบที่อุณหภูมิ 37 °C และ 40 °C เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิวิกฤต (Critical Range) ในการวินิจฉัยและติดตามอาการผู้ป่วยทางการแพทย์ โดยจุด 37 °C เป็นตัวแทนของอุณหภูมิร่างกายปกติ (Normal Body Temperature) และ 40 °C เป็นตัวแทนของสภาวะไข้สูง (High Fever)

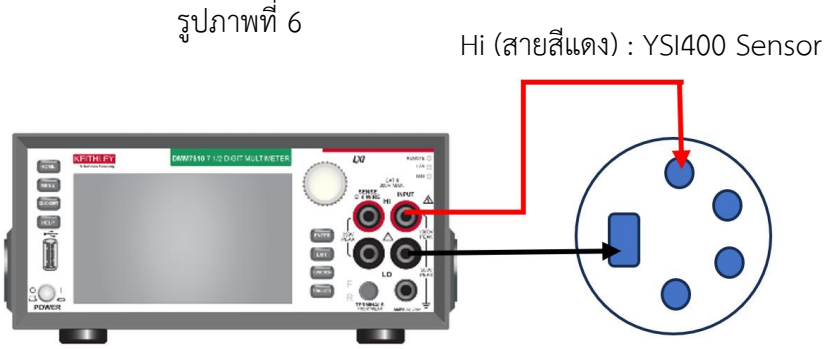
- **ขั้นตอนการสอบเทียบ Temperature Simulation (หน่วย kΩ)**

การเตรียมและการติดตั้ง (Setup)

1. ก่อนเริ่มการวัดค่า Baseline Respiration ต้องทำการชดเชยค่าความต้านทานและแรงดันตกค้างในสาย เพื่อไม่ให้ค่าเหล่านี้ไปรวมกับสัญญาณที่จะวัด
2. เชื่อมต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) เข้ากับ YSI Sensor ของเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC)
   - Hi (สายสีแดง) : เชื่อมต่อกับ YSI400 YSI700T1 และ YSI700T2 ตามรูปที่ 6
   - Lo (สายสีดำ) : เชื่อมต่อกับ GND ของ Sensor ตามรูปที่ 6



รูปภาพที่ 6

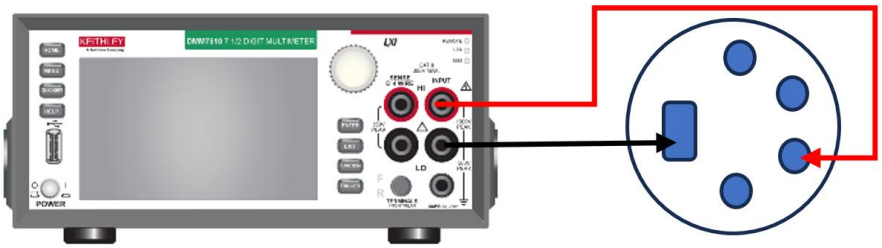


ตัวอย่างการต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) กับ YSI400 Sensor

Hi (สายสีแดง) : YSI 700T1 Sensor

ตัวอย่างการต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) กับ YSI 700T1 Sensor

Hi (สายสีแดง) : YSI 700T2 Sensor



ตัวอย่างการต่อสายจากเครื่อง Keithley DMM7510 (STD) กับ YSI 700T2 Sensor

การตั้งค่าเครื่องมือ (Configuration)

1. การตั้งค่าเครื่องมือ STD Keithley DMM7510 ที่โปรแกรม Kickstart
    - ฟังก์ชัน: 4 Wire Resistance | Range : 1-100 kΩ (ตามที่ตั้งค่าจาก UUC)
    - ตั้งค่า NPLC: 10 | Autozero: ON
    - ตั้งค่า Measure Delay (s) : 2 | Measure Count : 3 ครั้ง
2. การตั้งค่าเครื่องจำลองสัญญาณชีพ UUC
    - เข้าเมนู Temperature
    - ตั้งค่า Temperature ตามจุดสอบเทียบ 37 °C และ 40 °C

กระบวนการเก็บข้อมูล

1. เมื่อเริ่มสร้างสัญญาณจากเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC) ตั้งค่าตามจุดสอบเทียบ
2. กดปุ่ม Start ที่โปรแกรม Kick Start

3. ทำการคัดลอกค่าที่ได้ 3 ค่ามาลงใน PTS-xx-00xx ใน Sheet ของ Data TEMP ช่อง STD

Temperature Simulation					
TYPE	UUC Setting	STD (Ω)	STD (Ω)	STD (Ω)	Average (Ω)
YSI 400	37	1357.1070	1357.1010	1357.0860	1357.098
	40				
YSI 700 T1	37				
	40				
YSI 700 T2	37				
	40				

ตารางที่ 11 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ Temperature Simulation หน่วย Ω

Temperature Simulation					
TYPE	UUC Setting	STD (kΩ)	STD (kΩ)	STD (kΩ)	Average (kΩ)
YSI 400	37	1.357107	1.3571010	1.3570860	1.3571
	40				
YSI 700 T1	37				
	40				
YSI 700 T2	37				
	40				

ตารางที่ 12 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ Temperature Simulation หน่วย kΩ

4. การแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นอุณหภูมิด้วยการใช้สมการ Steinhart-Hart

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความต้านทาน ชนิด NTC มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Curve) ห้องปฏิบัติการจึงนำค่าความต้านทานที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานทางไฟฟ้าหน่วย Ω มาคำนวณย้อนกลับเป็นหน่วยอุณหภูมิ (K) โดยใช้ สมการ Steinhart-Hart

$$\boxed{\frac{1}{T} = A + Bln(R) + C\left(In(R)\right)^3}$$

เมื่อ ค่า T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน K)

ค่า A, B, C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตามนิดของ Probe Type ตามตารางแสดงสัมประสิทธ์ของ Probe Type

$\ln R$ คือ ธรรมชาติลอกาลิทึมของตัวต้านทาน

ชนิดของมาตรฐานการจำลอง (Probe Type)	ค่าความต้านทานที่ 25 °C	ค่า A	ค่า B	ค่า C
YSI 400 Series (Standard NTC)	2252 Ω	1.468×10^{-3}	2.383×10^{-4}	1.007×10^{-7}
YSI 700 Series (T1)	6000 Ω	1.289×10^{-3}	2.356×10^{-4}	0.943×10^{-7}
YSI 700 Series (T2)	30000 Ω	1.032×10^{-3}	2.385×10^{-4}	1.580×10^{-7}

ตารางที่13 แสดงสัมประสิทธ์ของ Probe Type

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าอุณหภูมิจากค่าความต้านทาน (สำหรับจุดสอบเทียบ 37 °C)

ตั้งค่าการจำลองอุณหภูมิของเครื่อง UUC : 37 °C (Probe Type : YSI400)

ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จาก Digital Multimeter : 1,357.1 Ω

แทนค่าลงในสมการ

$$\frac{1}{T} = A + Bln(R) + C\left(In(R)\right)^3$$

$$\frac{1}{T} = 1.468 \times 10^{-3} + 2.383 \times 10^{-4} ln(1356.98) + 1.007 \times 10^{-7}\left(In(1356.98)\right)^3$$

$$T = 36.9725\ °\mathrm{C}$$

5. การแปลงอุณหภูมิและการหาค่าความไวสำหรับการประเมินความไม่แน่นอน (Temperature Conversion and Sensitivity Coefficient: c_i) ในการปฏิบัติงานสอบเทียบ ค่าความต้านทานไฟฟ้า หน่วย Ω ที่อ่านได้จากเครื่องจำลองสัญญาณ จะถูกนำมาแปลงเป็นหน่วยอุณหภูมิ หน่วย K (เคลวิน) หรือ °C (องศา) ผ่านสมการ Steinhart-Hart พื่อชดเชยคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ของเซนเซอร์ชนิด NTC อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการประเมินความไม่แน่นอนของการวัด แหล่งความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ถูกประเมินไว้ในหน่วยความต้านทานไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการจึงจำเป็นต้องหาค่าความไว (Sensitivity Coefficient: c_i) เพื่อใช้เป็นตัวคูณแปลงหน่วยความไม่แน่นอนให้กลับมาเป็นหน่วยอุณหภูมิห้องปฏิบัติการจึงประยุกต์ใช้หลักการทางแคลคูลัส โดยการหาอนุพันธ์ของสมการ Steinhart-Hart เทียบกับความต้านทาน $\frac{dT}{dR}$ เพื่อหาความชัน ณ จุดสอบเทียบ

นั้นๆ ซึ่งค่าสัมบูรณ์ของผลลัพธ์ที่ได้ จะสะท้อนถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อความต้านทานเปลี่ยนไป 1 โอห์ม และถูกนำไปใช้เป็นตัวคูณในตาราง Uncertainty Budget ดังความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี้:

สมการแปลงค่าความต้านทานเป็นอุณหภูมิ (Steinhart-Hart Equation):

$$T = \left[A + Bln(R) + C\left(In(R)\right)^3\right]^{-1}$$

สมการ Sensitivity Coefficient Equation

$$c_i = \frac{|dT|}{|dR|} = \frac{|-T^2[B + 3C(lnR)^2]|}{|R|}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิที่คำนวณได้ในหน่วยเคลวิน

R คือ ความต้านทานในหน่วยโอห์ม

A, B, C คือค่าสัมประสิทธิ์ตามนิดของ Probe Type ตามตารางแสดงสัมประสิทธ์ของ Probe Type

- **การประเมินค่าความไม่แน่นอน**

ตัวอย่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด Temperature Simulation ซึ่งจะได้ลักษณะความสัมพันธ์ทางสมการดังต่อไปนี้

$$R_{TEMP} = (R_{uuc} - R_{STD}) + \delta R_{REP} + \delta R_{ACC} + \delta R_{DIFT} + \delta R_{RES} + \delta R_{HEAT} + \delta R_{FIT} + \delta T_{UUC}$$

เมื่อ R_{TEMP} = ค่าความคลาดเคลื่อนของความต้านทานภายในเครื่องจำลองสัญญาณชีพ

R_{uuc} = ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ตั้งค่า ณ เครื่องที่ถูกสอบเทียบ (UUC Setting)

δR_{ACC} = 1 Year Accuracy of Standard DMM7510

δR_{DRIFT} = ค่าความไม่แน่นอนจากการเลื่อนไถลของเครื่องมือมาตรฐาน (Drift)

δR_{RES} = ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องมือมาตรฐาน

δR_{HEAT} = ค่าความไม่แน่นอนจากกความร้อนสะสมภายในตัวเซนเซอร์ (Self-Heating Effect)

δR_{FIT} = ค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนของสมการคณิตศาสตร์ (Curve Fitting Error)

δT_{UUC} = ค่าวามไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ (Resolution of UUC)

1. ค่าความไม่แน่นอน Type A

δR_{REP} (Repeatability) เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิด Type A จากการสอบเทียบ UUC ได้จากการคำนวณทางสถิติ (การวัดซ้ำ) มีลักษณะการกระจายเป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ตัวหาร = 1

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ในการหาค่าความไม่แน่นอน Type A มีขั้นตอนดังนี้

- หาค่าเฉลี่ยของการวัด ($\overline{X}$)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

เมื่อ $\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

X = ค่าที่วัดได้ครั้งใด ๆ

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

แทนค่าผลการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

$$\bar{x} = \frac{1.35699+1.35698+1.35697}{3} = 1.35698\text{k}\Omega$$

- หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

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

เมื่อ $S(X_i)$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยของการวัด

X_i = ค่าที่วัดได้ครั้งใด ๆ

n = จำนวนครั้งที่ทำการวัด

$$s(x_i) = \frac{\sqrt{(1.35699-1.35698)^2+(1.35698-1.35698)^2+(1.35708-1.35689)^2}}{3-1}$$

$S(X_i)$ = 0.000010 kΩ

$(u_a) = \frac{S(Xi)}{\sqrt{n}}$ = 0.0000026kΩ

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน = 0.0000026 kΩ (ดังตารางที่ 14)

2. ค่าความไม่แน่นอน Type B

δR_{ACC} (1 Year Accuracy of Standard DMM7510) เป็นข้อกำหนด 1 ปีจากผู้ผลิต มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดค่า</u>

ดูจากคู่มือ Digital Multimeter, 7.5 Digit, Model : DMM7510

Range : 1.355 kΩ ,Setting : 37 Accuracy ±42 ppm of reading + 3 ppm of range

Accuracy $= \pm (42 \times 10^{-6} \times 1355\ \Omega) + (3 \times 10^{-6} \times 10000\Omega)$

= ± 0.00058691 kΩ (ดังตารางที่ 14)

หมายเหตุ: ผลลัพธ์นี้จะถูกนำไปคูณกับค่าความไว (c_i) ของแต่ละจุดสอบเทียบ เพื่อแปลงกลับเป็นความไม่แน่นอนในหน่วยอุณหภูมิต่อไป

<u>Note :</u> 1 Year Accuracy ครอบคลุม Error และ uncertainty แล้ว เนื่องจากกระบวนการทวนสอบผลการสอบเทียบ

δR_{RES} (Resolution of Standard) เป็นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการปัดเศษจุดทศนิยมจากการอ่านตัวเลขตำแหน่งสุดท้ายของการอ่านค่าของ Standard (ทำ Resolution ให้อยู่ในรูปของ Semi-range ด้วยการหารสอง), มีลักษณะการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution), ตัวหาร = √3

<u>วิธีการคิดคำนวณ</u>

ค่าละเอียดของ Standard ที่อ่านได้ 0.00001 kΩ ต้องหารด้วย 2 = 0.000005 kΩ

δR_{RES} = 0.00005 / √3

= 0.000029 kΩ (ดังตารางที่ 14)

หมายเหตุ: ผลลัพธ์นี้จะถูกนำไปคูณกับค่าความไว (c_i) ของแต่ละจุดสอบเทียบ เพื่อแปลงกลับเป็นความไม่แน่นอนในหน่วยอุณหภูมิต่อไป

δR_{HEAT} (Self-Heating Effect) เป็นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความร้อนสะสมภายในตัวเซนเซอร์ โดยธรรมชาติของเครื่องมือมาตรฐาน Digital Multimeter จะทำการวัดค่าความต้านทานโดยการส่ง "กระแสไฟฟ้าทดสอบ (Test Current : I) ไหลผ่านตัวต้านทานจำลองภายในเครื่อง Simulator ตามกฎของจูล (Joule's Law of Heating) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทาน จะเกิดการสูญเสียพลังงานออกมาในรูปของความร้อน หรือเรียกว่า "กำลังไฟฟ้า (Power: P)" ส่งผลให้อุณหภูมิที่จุดวัดนั้นสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิสภาวะปกติ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Self-Heating ซึ่งหากไม่นำมาคำนวณชดเชย จะทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อน (Bias) ไปจากความเป็นจริง

<u>วิธีการคำนวณ</u>

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณกำลังไฟฟ้าสะสม (Power Dissipation)

สูตรความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้า

$$\boxed{P = I^2 \times R}$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าสะสม (Walt)

I คือ กระแสทดสอบจาก Specification ของ Digital Multimeter DMM7510

R คือ ค่าความต้านทาน ณ จุดสอบเทียบ (เช่น 1355Ω ที่จุดอุณหภูมิ 37 °C YSI400)

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

นำกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้มาหาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง โดยอ้างอิงค่าการระบายความร้อนของเซนเซอร์ (Dissipation Constant) ตามมาตรฐานผู้ผลิต *YSI*

$$\Delta T = \frac{P\ (W)}{DC\ (mW/°C)}$$

เมื่อ ΔT คือ ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง °C

P คือ กำลังไฟฟ้าสะสม (Walt)

DC คือ ค่าคงที่การระบายความร้อน (Dissipation Constant : mV/°C)

หมายเหตุ *:* กำหนดค่าคงที่การระบายตวามร้อนที่ 1 mV/°C สำหรับอากาศนิ่ง

ขั้นตอนที่ 3 การนำมาประเมินค่าความไม่แน่นอน

เนื่องจากความร้อนสะสมที่คำนวณได้ (ΔT) ถือเป็นขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด *(a)* ที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันตลอดช่วงเวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซนเซอร์ ห้องปฏิบัติการจึงประเมินลักษณะของข้อมูลเป็น การกระจายตัวแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution)

ดังนั้น การหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (*Standard Uncertainty:* u) สำหรับแหล่งความคลาดเคลื่อนนี้ จึงคำนวณได้จากการนำค่า *ΔT* มาหารด้วย *√3* โดยมีสมการดังนี้:

$$\delta R_{HEAT} = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$$

หมายเหตุ: ค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณได้จากสมการนี้ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส °C จึงสามารถนำไปรวมกับ Budget อื่นๆ ได้โดยกำหนดค่า Sensitivity Coefficient (C_i) เท่ากับ 1

δR_{FIT} (Curve Fitting Error) เป็นค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนของสมการคณิตศาสตร์ ในการแปลงค่าความต้านทานเป็นอุณหภูมิ ห้องปฏิบัติการใช้สมการทางคณิตศาสตร์ Steinhart-Hart ร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์มาตรฐานของเซนเซอร์เพื่อชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) ของวัสดุ ในทางปฏิบัติ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการอ้างอิงค่าสัมประสิทธิ์แบบครอบคลุมแทนการหาค่าเฉพาะตัวของเซนเซอร์แต่ละหัว ย่อมก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนตกค้าง (Residual Fitting Error) ซ่อนอยู่ในระบบ ห้องปฏิบัติการจึงจำเป็นต้องประเมินผลกระทบนี้เพื่อความสมบูรณ์ของการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอน โดยได้กำหนดขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุดไว้ที่ 0.03 °C ซึ่งเพียงพอต่อการครอบคลุมความเสี่ยงทางมาตรวิทยาในช่วงการสอบเทียบทางการแพทย์ และเนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันภายในขอบเขตที่ประเมินไว้ จึงพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานได้ ดังสมการ

$$\delta R_{FIT} = \frac{0.03\ °\mathrm{C}}{\sqrt{3}}$$

หมายเหตุ: ค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณได้จากสมการนี้ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส °C จึงสามารถนำไปรวมกับ Budget อื่นๆ ได้โดยกำหนดค่า Sensitivity Coefficient (c_i) เท่ากับ 1

δR_{SEN} (Sensitivity coefficient) ค่าความไม่แน่นอนในการแปลงค่าด้วยสมการ Steinhart-Hart จะเกิดความคลาดเคลื่อนตกค้าง (Residual Error) เมื่อเทียบกับตารางมาตรฐานของเซนเซอร์ ห้องปฏิบัติการจึงจำเป็นต้องประเมินความคลาดเคลื่อนนี้กลับให้อยู่ในรูปของความต้านทานไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องกับระบบการคำนวณ จากการประเมินครอบคลุมทุกย่านการวัดและทุกมาตรฐานหัววัด (YSI 400, YSI 700T1 และ YSI 700T2) พบว่าผลกระทบเชิงความต้านทานมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.000078 kΩ เพื่อความรัดกุมและครอบคลุมความเสี่ยงทางมาตรวิทยาทั้งหมด (Worst-case scenario estimation) ห้องปฏิบัติการจึงกำหนดขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด (a) คงที่ไว้ที่ 0.0001 kΩ สำหรับทุกการวัด และเนื่องจากข้อผิดพลาดจากแบบจำลองนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่าๆ กัน จึงพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ซึ่งหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ได้โดยการนำค่าขอบเขตดังกล่าวมาหารด้วย √3 ดังสมการ

$$\delta R_{SEN} = \frac{0.00001\mathrm{k\Omega}}{\sqrt{3}}$$

หมายเหตุ: ผลลัพธ์นี้จะถูกนำไปคูณกับค่าความไว (c_i) ของแต่ละจุดสอบเทียบ เพื่อแปลงกลับเป็นความไม่แน่นอนในหน่วยอุณหภูมิต่อไป

δT_{uuc} (Resolution of UUC) ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ ในการสอบเทียบเครื่องจำลองสัญญาณชีพ (UUC) ค่าอุณหภูมิที่ถูกตั้งค่าหรือแสดงผลบนหน้าจอจะมีขีดจำกัดความละเอียด (Resolution) ตามการแสดงผลของตัวเลขดิจิทัล ซึ่งความละเอียดที่มีขีดจำกัดนี้ (ตัวอย่างเช่น 0.1 °C) จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบจากการปัดเศษหรือการตัดเศษทศนิยม (Rounding or Truncation Error) ที่ซ่อนอยู่ เนื่องจากเราไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงในหลักทศนิยมถัดไปได้ ห้องปฏิบัติการจึงจำเป็นต้องนำผลกระทบนี้มาพิจารณาเป็นอีกหนึ่งแหล่งความไม่แน่นอนของการวัด โดยกำหนดให้ขอบเขตความคลาดเคลื่อนสูงสุด (a) มีค่าเท่ากับกึ่งหนึ่งของความละเอียดของหน้าจอแสดงผลและเนื่องจากค่าความจริงมีโอกาสที่จะอยู่ ณ ตำแหน่งใดก็ได้เท่าๆ กันภายในช่วงขอบเขตของการปัดเศษนี้ จึงพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ได้โดยการนำค่ากึ่งหนึ่งของความละเอียดดังกล่าวมาหารด้วย √3 ดังสมการ

$$\delta R_{uuc} = \frac{0.1°\mathrm{C}}{2\sqrt{3}}$$

3. หาค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty)

เป็นการนำค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นมารวมกันแบบรากที่สองของผลรวมของค่าที่ยกกำลังสอง (Root Sum Square) ดังนี้

$$u_c = \sqrt{(u_{REP})^2 + (u_{ACC})^2 + (u_{DRIFT})^2 + (u_{RES})^2 + (u_{HEAT})^2 + (u_{FIT})^2 + (u_{SEN})^2 + (u_{UUC})^2}$$

4. หาค่าองศาความเป็นอิสระที่มีประสิทธิผล (v_{eff}) โดยใช้สูตรการคำนวณของ Welch-Satterthwaite

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

5. หาตัวประกอบครอบคลุม (Coverage Factor, *k*) จากตาราง Student's " t " Distribution ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45% (แต่โดยทั่วไปจะเรียกว่าที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95%)

6. หาค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty)

$$U = k\ u_c$$

เมื่อ U = Expanded Uncertainty

k = Coverage Factor

u_c = ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม

Uncertainty Budget Table **1.355**

Symbol	Type	Source of uncertainty	Uncertainty Value (+/-)	unit	Probability Distribution	Divisor	Sensitivity Coefficient (C_i)	Standard Uncertainty +/- °C	Degree of Freedom
δR_REP	A	Repeatability of Resistance Reading STD	0.0000058	kΩ	Normal	1.0	0.000018	0.0000000001	2
δR_ACC	B	Uncertainty of STD	0.00008691	kΩ	Rectangular	√3	0.000018	0.000000001	∞
δR_DRIFT	B	Drift of STD	0.00008691	kΩ	Rectangular	√3	0.000018	0.000000001	∞
δR_RES	B	Resolution of STD	0.000005	kΩ	Rectangular	√3	0.000018	0.0000000001	∞
δR_HEAT	B	Self Heating Effect	0.0000002	kΩ	Rectangular	√3	0.000018	2.54E-12	∞
δR_FIT	B	fitting error (Math model form material)	0.03	°C	Rectangular	√3	1.0	0.0173205	∞
δR_SEN	B	Sensitivity cofficien	0.0001	kΩ	Rectangular	√3	0.000018	0.000000001	∞
δR_UUC	B	Resolution of UUC	0.05	°C	Rectangular	√3	1.0	0.0289	∞
	-	Combinded Standard Uncertainty			Normal			0.0337	2.19E+34
	-	Expanded Uncertainty			Normal (K=)			0.06733003	2.00

ตารางที่ 14 ตารางแสดงแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน Temperature Simulation

7. ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบ

Certificate Number : PTS-69-0012
Page: 1 of 4

Medical Engineering Division
Department of Health Service Support, Ministry of Public Health
88/33 Moo.4 Satharanasuk 8 rd, Taladkwuon subdistrict, Muang district, Nonthaburi, 11000
Tel. /Fax : 0-2149-5691 E-mail : lab.medeng@gmail.com

Certificate of Calibration

Equipment :	Vital Sign Simulator
Manufacturer :	Fluke
Model :	Prosim 8
Serial Number:	2729555
ID Number:	บ.1732
Department :	Medical Engineering Division
Address :	88/33 Moo.4 Satharanasuk 8 rd, Tumbon Taladkwuon, Umphur Muang, Nonthaburi, 11000
Environment Condition :	23 °C ± 3 °C
	55 %RH ± 15 %RH
Calibration Date :	19 February 2026

MEASUREMENT METHOD

Vital Sign Simulator was calibrated by comparison with Digital Multimeter and Oscilloscope. Calibration was conducted using in-house method, according to measure the resistance, DC voltage and frequency.

UNCERTAINTY OF MEASUREMENT

The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k=2$ such that the coverage probability corresponds to approximately 95%.

Receive Date : 22 January 2026 **Issue Date :** 2 March 2026

Calibrated by : Chanakarn **Approved by :** Ch. Thanasa

Miss Chanakarn Putrio Miss Thanasa Chinpanupong

Kaewkan.

Mr. Kaewkan Yaembangyang

"The results relate only to the items tested/calibrated or value assigned. Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of MED"

Certificate Number : PTS-69-0012
Page: 2 of 4

Medical Engineering Division
Department of Health Service Support, Ministry of Public Health
38/33 Moo.4 Satharanasuk 8 rd, Tumbon Taladkwuon, Umphur Muang, Nonthaburi, 11000
Tel /Fax: 0-2149-5691 E-mail : lab_medeng@hotmail.com

Certificate of Calibration

TRACEABILITY

The measurement is traceable to SI Unit by Certificate in table below.

Instrument	Manufacterer/Model	Serial No.	Cert. No.	Calibrated by	Due date
Digital Multimeter	Keithley/DMM7510	4346136	E2U2500060	NA Caltechnologies	5 March 2026
Multi-Product Calibrator	Fluke/5500A	8920016	E2U2500067	NA Caltechnologies	5 March 2026
Mixed Domain Oscilloscope	Tektronix/MDO 3014	C043011	E3U2500265	NA Caltechnologies	5 March 2026

MEASUREMENT RESULTS :

Description	Unit	True Vaule	UUC Value	Correction	Uncertainty (±)
ECG Simulation					
Rate at 1 mV	BPM	30.0	30	0	0.68
		60.0	60	0	0.92
		80.0	80	0	1.5
		100.0	100	0	1.5
		120.0	120	0	1.5
		200.0	200	0	1.5
		300.1	300	0	1.5
ECG Amplitude					
Setting : ECG /Performance /Pulse Amplitude / 60 BPM					
Port RA&LL	mV	0.5	0.5	0	0.0020
		1.0	1	0	0.0020
		2.0	2	0	0.0020
Invasive Blood pressure Simulation					
Port : IBP Channal 1	mmHg	-0.2	0	0	0.33
		50.0	50	0	0.47
		100.4	100	0	0.47
		241.1	240	1	1.1
Port : IBP Channal 2	mmHg	50.0	50	0	0.47
		100.4	100	0	0.47

"The results relate only to the items tested/calibrated or value assigned. Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of MED"

Certificate Number : PTS-69-0012
Page: 3 of 4

Medical Engineering Division
Department of Health Service Support, Ministry of Public Health
38/33 Moo.4 Satharanasuk 8 rd, Tumbon Taladkwuon, Umphur Muang, Nonthaburi, 11000
Tel /Fax: 0-2149-5691 E-mail : lab_medeng@hotmail.com

Certificate of Calibration

Baseline Respiration Simulation

Setting : Respiration / Rate 0 bpm / Amplitude 1 Ω / Ratio 1:1

Description	Unit	True Vaule	UUC Value	Correction	Uncertainty (±)
Port : RA&LL	kΩ	0.5	0.5	0	0.013
		1.0	1.0	0	0.013
		1.5	1.5	0	0.013
		2.0	2.0	0	0.013
Port : RA&LA	kΩ	0.5	0.5	0	0.013
		1.0	1.0	0	0.013
		1.5	1.5	0	0.013
		2.0	2.0	0	0.013

Beseline Respriation

RL-RA Impedance Tests	Ω	492.1	500	-8	0.59
		997.9	1000	-2	0.66
		1503.7	1500	4	0.64
		2009.3	2000	9	0.64
RL-LL Impedance Tests	Ω	495.5	500	-4	0.60
		1001.0	1000	1	0.58
		1506.1	1500	6	0.68
		2012.4	2000	12	0.60
RL-LA Impedance Tests	Ω	489.1	500	-11	0.60
		993.8	1000	-6	0.59
		1499.0	1500	-1	0.58
		2005.7	2000	6	0.58
V1-RL Impedance Tests	Ω	742.1	730	12	0.63
V2-RL Impedance Tests	Ω	744.1	730	14	0.59
V3-RL Impedance Tests	Ω	743.1	730	13	0.83
V4-RL Impedance Tests	Ω	744.8	730	15	0.68
V5-RL Impedance Tests	Ω	743.2	730	13	0.95
V6-RL Impedance Tests	Ω	742.8	730	13	0.59

"The results relate only to the items tested/calibrated or value assigned. Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of MED"

Certificate Number : PTS-69-0012
Page: 4 of 4

Medical Engineering Division
Department of Health Service Support, Ministry of Public Health
38/33 Moo.4 Satharanasuk 8 rd, Tumbon Taladkwuon, Umphur Muang, Nonthaburi, 11000
Tel /Fax: 0-2149-5691 E-mail : lab_medeng@hotmail.com

Certificate of Calibration

Respiration Simulation Cont.

Description	Unit	True Vaule	UUC Value	Correction	Uncertainty (±)
Impedance Variation 0.5 Ω	Ω	0.40	0.5	0	0.58
Impedance Variation 1.0 Ω	Ω	0.81	1.0	0	0.58
Impedance Variation 3.0 Ω	Ω	2.38	3.0	-1	0.58
Respiration Rate	BPM	15.0	15.0	0	0.58
Respiration Rate	BPM	20.1	20.0	0	0.58
Respiration Rate	BPM	30.1	30.0	0	0.58

Temperature

Description		Unit	True Vaule	UUC Value	Correction	Uncertainty (±)
400 Mode	At 37 °C	°C	37.0	37	0	0.068
	At 40 °C		40.0	40	0	0.068
700 T1 Mode	At 37 °C		37.0	37	0	0.068
	At 40 °C		40.0	40	0	0.068
700 T2 Mode	At 37 °C		36.9	37	0	0.068
	At 40 °C		39.9	40	0	0.068

Note. UUC = Unit Under Calibration

This result of calibration was found accurate as shown on date and place of calibration only.

End of Certificate

"The results relate only to the items tested/calibrated or value assigned. Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of MED"

9. เอกสารอ้างอิง

1. The expression of uncertainty and confidence in measurement M3003
2. Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters EURAMET cg-15 Version 3.0 (02/2015)
3. User's Manual Model DMM7510 7½ Digit Graphical Sampling Multimeter
4. Model 1756 Test Lead Kit General Purpose Test Lead Information
5. Operator Manual 5500A Multi-Product Calibrator
6. Wireless Temperature and Humidity Data Logger OM-CP-RFRHTemp2000A
7. Users Manual ProSim™ 8 Vital Signs Simulator
8. ISO/IEC Guide 98-3:2008 — Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)
9. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration Laboratories
10. YSI Precision Thermistors & Probes
11. Steinhart, J. S., & Hart, S. R. (1968). Calibration curves for thermistors. Deep-Sea Research, 15, 497-503
12. Certificate of Digital Multimeter (DMM7510) Cert. No. E2U2500060

10.ภาคผนวก

ภาคผนวก 1

แสดงค่าของ Student's "t" distribution

Degrees of freedom v	Values of $t_p(v)$ from the t-distribution for degrees of freedom v that define an interval that encompasses specified fractions p of the corresponding distribution					
	p = 68.27%	p = 90%	p = 95%	p = 95.45%	p = 99%	p = 99.73%
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.01	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

ตารางที่ 5 Student's " t " Distribution

ภาคผนวก 2

Resistance versus Temperature -10 to +59°C

Thermistor Mix		L Mix	L Mix	L Mix	B Mix	B Mix	B Mix	B Mix	B Mix	H Mix	H Mix	H Mix	H Mix	H Mix
Ω at 25°C		100	300	1000	2252	3000	5000	6000	10,000	10,000	30,000	100,000	300,000	1 MEG
°F	°C													
+14.0	-10	354.1	1191	4232	12.46K	16.60K	27.67K	33.20K	55.33K	47.54K	158K	565.5K		
15.8	9	340.0	1140	4042	11.81K	15.72K	26.21K	31.47K	52.44K	45.27K	150K	535.6K		
17.6	8	326.7	1091	3862	11.19K	14.90K	24.83K	29.81K	49.69K	43.11K	142.4K	507.5K		
19.4	7	313.9	1045	3691	10.60K	14.12K	23.54K	28.24K	47.07K	41.07K	135.2K	481K		
21.2	6	301.7	1001	3529	10.05K	13.39K	22.32K	26.78K	44.63K	39.14K	128.5K	456K		
23.0	5	290.1	958.9	3374	9.530K	12.70K	21.17K	25.40K	42.34K	37.31K	122.1K	432.4K		
24.8	4	278.9	919.0	3228	9.050K	12.05K	20.08K	24.10K	40.17K	35.57K	116K	410.2K		
26.6	3	268.3	881.0	3088	8.590K	11.44K	19.06K	22.88K	38.13K	33.93K	110.3K	389.2K		
28.4	2	258.2	844.8	2956	8.150K	10.86K	18.10K	21.72K	36.19K	32.37K	104.9K	369.4K		
+30.2	-1	248.5	810.3	2830	7.741K	10.31K	17.19K	20.62K	34.37K	30.89K	99.80K	350.7K		
32.0	0	239.2	777.5	2710	7355	9796	16.33K	19.60K	32.66K	29.49K	94.98K	333.1K	1088K	3966K
+33.8	+1	230.3	746.2	2596	6989	9310	15.52K	18.62K	31.03K	28.15K	90.41K	316.4K	1030K	3740K
35.6	2	221.9	716.3	2487	6644	8851	14.75K	17.70K	29.50K	26.89K	86.09K	300.6K	975.3K	3529K
37.4	3	213.8	687.8	2384	6319	8417	14.03K	16.84K	28.06K	25.69K	81.99K	285.7K	923.8K	3330K
39.2	4	206.0	660.6	2286	6011	8006	13.34K	16.02K	26.69K	24.55K	78.11K	271.6K	875.2K	3144K
41.0	5	198.6	634.6	2192	5719	7618	12.70K	15.24K	25.40K	23.46K	74.44K	258.3K	829.5K	2969K
42.8	6	191.5	609.9	2102	5444	7252	12.09K	14.50K	24.17K	22.43K	70.96K	245.7K	786.3K	2804K
44.6	7	184.6	586.2	2017	5183	6905	11.51K	13.81K	23.02K	21.45K	67.66K	233.8K	745.6K	2649K
46.4	8	178.1	563.6	1936	4937	6576	10.96K	13.15K	21.92K	20.52K	64.53K	222.5K	707.2K	2504K
48.2	9	171.9	542.1	1859	4703	6265	10.44K	12.53K	20.88K	19.63K	61.56K	211.9K	671K	2367K
50.0	10	165.9	521.5	1785	4482	5971	9951	11.94K	19.90 K	18.79K	58.75K	201.7K	636.8K	2238K
51.8	11	160.1	501.7	1714	4273	5692	9486	11.38K	18.97K	17.98K	56.07K	192.2K	604.5K	2117K
53.6	12	154.6	482.9	1647	4074	5427	9046	10.85K	18.09K	17.22K	53.54K	183.1K	574K	2003K
55.4	13	149.3	464.9	1582	3886	5177	8628	10.35K	17.26K	16.49K	51.13K	174.5K	545.2K	1896K
57.2	14	144.2	447.6	1521	3708	4939	8232	9879	16.47K	15.79K	48.84K	166.3K	518K	1795K
59.0	15	139.4	431.2	1462	3539	4714	7857	9429	15.71K	15.13K	46.67K	158.6K	492.3K	1700K
60.8	16	134.7	415.4	1406	3378	4500	7500	9000	15K	14.50K	44.60K	151.3K	468K	1610K
62.6	17	130.2	400.2	1353	3226	4297	7162	8595	14.33K	13.90K	42.64K	144.3K	444.9K	1525K
64.4	18	125.9	385.8	1302	3081	4105	6841	8209	13.68K	13.33K	40.77K	137.7K	423.2K	1446K
66.2	19	121.7	371.9	1253	2944	3922	6536	7844	13.07K	12.79K	38.99K	131.4K	402.6K	1370K
68.0	20	117.7	358.6	1206	2814	3748	6247	7497	12.50K	12.26K	37.30K	125.5K	383.1K	1299K
69.8	21	113.9	345.9	1161	2690	3583	5972	7167	11.94K	11.77K	35.70K	119.8K	364.6K	1232K
71.6	22	110.2	333.7	1118	2572	3426	5710	6853	11.42K	11.29K	34.17K	114.5K	347.1K	1169K
73.4	23	106.7	322.0	1077	2460	3277	5462	6554	10.92K	10.84K	32.71K	109.4K	330.6K	1110K
75.2	24	103.3	310.8	1038	2354	3135	5225	6272	10.45K	10.41K	31.32K	104.5K	314.9K	1053K
77.0	25	100.0	300.0	1000	2252	3000	5000	6000	10.00K	10.00K	30.00K	100.0K	300.0K	1000K
78.8	26	96.9	289.7	963.9	2156	2872	4787	5744	9574	9605	28.74K	95.51K	285.9K	949.7K
80.6	27	93.8	279.8	929.4	2064	2750	4583	5499	9165	9227	27.54K	91.34K	272.5K	902.2K
82.4	28	90.9	270.3	896.3	1977	2633	4389	5267	8779	8867	26.4K	87.38K	259.8K	857.2K
84.2	29	88.1	261.1	864.5	1894	2523	4204	5046	8410	8523	25.31K	83.6K	247.8K	814.7K
86.0	30	85.4	252.4	834.0	1815	2417	4029	4836	8060	8194	24.27K	80.00K	236.4K	774.5K
87.8	31	82.8	243.9	804.8	1739	2317	3861	4633	7722	7880	23.28K	76.58K	225.6K	736.5K
89.6	32	80.3	235.9	776.8	1667	2221	3702	4441	7402	7579	22.33K	73.32K	215.3K	700.5K
91.4	33	77.8	228.1	749.9	1599	2130	3549	4260	7100	7291	21.43K	70.22K	205.5K	666.4K
93.2	34	75.5	220.6	724.1	1533	2042	3404	4084	6807	7016	20.57K	67.26K	196.2K	634.1K
95.0	35	73.2	213.4	699.4	1471	1959	3266	3919	6532	6752	19.74K	64.44K	187.4K	603.6K
96.8	36	71.1	206.5	675.6	1412	1880	3134	3762	6270	6500	18.96K	61.75K	179K	574.6K
98.6	37	69.0	199.8	652.7	1355	1805	3008	3610	6017	6258	18.21K	59.19K	171K	547.2K
100.4	38	67.0	193.4	630.8	1301	1733	2888	3466	5777	6026	17.49K	56.75K	163.5K	521.2K
102.2	39	65.0	187.3	609.7	1249	1664	2773	3328	5546	5805	16.8K	54.42K	156.3K	496.6K
104.0	40	63.1	181.4	589.5	1200	1598	2663	3197	5329	5592	16.15K	52.19K	149.4K	473.2K
105.8	41	61.3	175.7	570.0	1152	1535	2559	3069	5116	5389	15.52K	50.07K	142.9K	451K
107.6	42	59.6	170.2	551.2	1107	1475	2459	2949	4916	5193	14.92K	48.04K	136.7K	430K
109.4	43	57.9	164.9	533.2	1064	1418	2363	2835	4725	5006	14.35K	46.11K	130.8K	410K
111.2	44	56.2	159.8	515.9	1023	1363	2272	2726	4543	4827	13.8K	44.26K	125.1K	391.1K
113.0	45	54.7	154.9	499.2	983.8	1310	2184	2621	4369	4655	13.28K	42.5K	119.8K	373.1K
114.8	46	53.1	150.1	483.2	946.2	1260	2101	2521	4202	4489	12.77K	40.81K	114.7K	356.1K
116.6	47	51.7	145.6	467.8	910.2	1212	2021	2425	4042	4331	12.29K	39.2K	109.8K	339.8K
118.4	48	50.2	141.2	452.9	875.8	1167	1944	2333	3889	4179	11.83K	37.66K	105.2K	324.4K
120.2	49	48.9	137.0	438.6	842.8	1123	1871	2246	3743	4033	11.39K	36.19K	100.8K	309.8K
122.0	50	47.5	132.9	424.8	811.3	1081	1801	2162	3603	3893	10.97K	34.78K	96.54K	295.9K
123.8	51	46.2	128.9	411.6	781.1	1040	1734	2081	3469	3758	10.57K	33.44K	92.52K	282.7K
125.6	52	45.0	125.1	398.8	752.2	1002	1670	2004	3340	3629	10.18	32.15K	88.69K	270.1K
127.4	53	43.8	121.5	386.5	724.5	965.0	1608	1930	3217	3504	9807	30.92K	85.04K	258.1K
129.2	54	42.6	117.9	374.7	697.9	929.6	1549	1859	3099	3385	9450	29.74K	81.55K	246.7K
131.0	55	41.5	114.5	363.2	672.5	895.8	1493	1792	2986	3270	9109	28.61K	78.22K	235.9K
132.8	56	40.4	111.2	352.2	648.1	863.3	1439	1727	2878	3160	8781	27.53K	75.04K	225.6K
134.6	57	39.3	108.0	341.6	624.8	832.2	1387	1665	2774	3054	8467	26.5K	72.01K	215.8K
136.4	58	38.3	105.0	331.3	602.4	802.3	1337	1605	2675	2952	8166	25.5K	69.11K	206.4K
138.2	59	37.3	102.0	321.5	580.9	773.7	1290	1548	2580	2854	7876	24.56K	66.34K	197.5K