GUIDELINE OF
CALIBRATION OF ELECTRONIC
THERMO-HYGROMETER

TM/CG01/TH01/V01

September 2012

THERMOMETRY METROLOGY DEPARTMENT

NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (THAILAND)

GUIDELINE OF CALIBRATION OF ELECTRONIC THERMO-HYGROMETER

วัตถุประสงค์ : เพื่อแนะนำแนวทางในการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer โดยวิธีการเปรียบเทียบค่าร่วมกับหัววัดความชื้นมาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

CALIBRATION OF ELECTRONIC THERMO-HYGROMETER

สารบัญ

วัตถุประสงค์ 4

ขอบข่าย 4

คำนำ 4

ข้อกำหนดทั่วไป 4

เครื่องมือ 5

สภาวะแวดล้อม 5

ข้อควรระวังโดยทั่วไป 5

ขั้นตอนการสอบเทียบ 6

การรายงานผลการสอบเทียบ 9

การประเมิณค่าความไม่แน่นอน 9

ภาคผนวก ก 13

ภาคผนวก ข 16

ภาคผนวก ค 17

CALIBRATION OF ELECTRONIC THERMO-HYGROMETER

1. วัตถุประสงค์

เอกสารฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer โดยวิธีการเปรียบเทียบค่าร่วมกับหัววัดความชื้นมาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงภายใต้เงื่อนไขการวัดเดียวกัน

2. ขอบข่าย

เอกสารฉบับนี้อธิบายลักษณะทั่วไปของ Electronic Thermo-Hygrometer เครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้ ขั้นตอน และเทคนิคการสอบเทียบ ซึ่งรวมถึงการประมวลผลการสอบเทียบ การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดโดยละเอียด และการรายงานผลการสอบเทียบ

เอกสารฉบับนี้ครอบคลุมการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer ที่มีหลักการทำงานของหัววัดความชื้นสัมพัทธ์ที่สัมพันธ์กับการวัดปริมาณทางไฟฟ้าอย่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้า หรือค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามการดูดซึมความชื้นของหัววัด อันเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารฉบับนี้ใช้เป็นแนวทางสำหรับการสอบเทียบแบบเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายใต้สภาวะความชื้นคงที่ภายในตู้สอบเทียบ (Calibration chamber) ซึ่งสร้างอากาศชื้นด้วยวิธีต่างๆ ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด

3. คำนำ

เอกสารฉบับนี้เกิดขึ้นได้จากกิจกรรมของสมาชิกชมรมมาตรวิทยาสาขาความชื้น ที่มีความประสงค์จะจัดทำแนวทางการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer โดยต้องการให้เป็นแนวทางที่มีการกล่าวถึงวิธีการสอบเทียบที่เหมาะสม ถูกต้องและสอดคล้องกับระบบคุณภาพ 17025 โดยที่เนื้อหาภายในจะต้องครอบคลุมถึงข้อกำหนดทั่วไป เครื่องมือที่จำเป็นต้องใช้งาน ข้อควรระวัง ขั้นตอนการสอบเทียบ และการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด เพื่อให้ผู้สอบเทียบในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ และผู้ใช้งานโรงงานอุตสาหกรรมสามารถนำไปปฏิบัติได้ด้วยตัวเอง

ในเบื้องต้น ห้องปฏิบัติการความชื้น สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ได้รับหน้าที่เป็นผู้จัดทำร่างแนวทางการสอบเทียบดังกล่าวขึ้นมาก่อน แล้วให้สมาชิกชมรมมาตรวิทยาสาขาความชื้นรวมทั้งผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอื่นๆ ให้ความเห็นเพื่อแก้ไขและปรับปรุงร่างดังกล่าวออกมาจนแล้วเสร็จ

ในการนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณสมาชิกชมรมมาตรวิทยาสาขาความชื้น ที่ได้เสียสละเวลาเพื่อให้ความเห็นอันเป็นเป็นประโยชน์และเพิ่มสาระให้กับเอกสารฉบับนี้ ด้วยมีความมุ่งหวังเดียวกันในการพัฒนาศักยภาพของระบบมาตรวิทยา และนักมาตรวิทยาให้เพิ่มพูนขึ้นไปในอนาคต

4. ข้อกำหนดทั่วไป

การวัดในเอกสารนี้ครอบคลุมการวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสอบเทียบใดๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 15 % ถึง 95 % และที่อุณหภูมิอากาศตั้งแต่ 10 °C ถึง 50 °C โดยคาดว่า Electronic Thermo-Hygrometer ที่ถูกสอบเทียบมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Electronic Thermo-Hygrometer ประกอบด้วยหัววัด (Sensor) และภาคแสดงผล (Read Out) โดยหัววัดความชื้นมีหน้าที่ส่งสัญญาณทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในขณะนั้นไปยังภาคแสดงผลเพื่อประมวลผลและแปลงค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ได้รับเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ รวมทั้งแสดงค่าความชื้นออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer ในที่นี้จะไม่ทำการสอบเทียบแยกส่วนของหัววัดและภาคแสดงผล

โดยทั่วไปค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่แสดงในภาคแสดงผลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอากาศในขณะนั้นด้วย แต่สำหรับ Electronic Thermo-Hygrometer ที่มีความถูกต้องสูงอาจมีการชดเชยผลจากอุณหภูมิมาให้แล้ว อย่างไรก็ตามจุดอุณหภูมิสอบเทียบควรเป็นจุดเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้งานจริง

ความชื้นที่เป็นที่สนใจในเอกสารฉบับนี้ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ซึ่งนิยามของความชื้นสัมพัทธ์คือ ค่าร้อยละของอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ขณะนั้นเทียบกับปริมาณไอน้ำมากสุดที่จะมีอยู่ได้ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน ในที่นี้จะไม่ขอกล่าวถึงการวัดปริมาณความชื้นในเนื้อวัสดุ (Moisture)

5. เครื่องมือ

5.1 **แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ/ความชื้น (Temperature/Humidity Generator)**

แหล่งกำเนิดอากาศชื้น (Humidity Generator) หมายถึงอุปกรณ์ให้กำเนิดอากาศชื้นสำหรับสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นโดยอาจใช้เป็นแหล่งกำเนิดค่ามาตรฐานทางความชื้นโดยตรง หรือเป็นแหล่งกำเนิดอากาศชื้นสำหรับการ

สอบเทียบก็ได้ ซึ่งโดยปกติแล้วช่วงในการสร้างอากาศชื้นมักอยู่ระหว่าง 15 %rh ถึง 95 %rh และอุณหภูมิอากาศได้ตั้งแต่ 10 °C ถึง 50 °C

5.2 **เครื่องมือมาตรฐานในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Standard Hygrometer)**

ถ้าเป็นไปได้เครื่องมือวัดที่ใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบควรมีความถูกต้องมากกว่าเครื่องมือที่ต้องการสอบเทียบอย่างน้อย 4 เท่า หรือมีเกณฑ์การยอมรับที่ดีกว่าเครื่องมือที่ทำการสอบเทียบ เครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานความถูกต้องสูงซึ่งอาจใช้ Electronic Thermo - Hygrometer หรือ Psychometer หรือใช้ Dew-point Hygrometer ที่มีความถูกต้องที่ดีกว่าอย่างน้อย 4 เท่าเป็นมาตรฐานในการสอบเทียบ

ทั้งนี้ จะต้องมีการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างใช้งาน (Intermediate Check) เครื่องมือในทุกๆ 6 เดือน ให้เป็นไปตามเกณฑ์ความใช้ได้ของเครื่องมือที่ได้กำหนดไว้ระหว่างปี ซึ่งอาจกำหนดโดยอ้างอิงจากคู่มือการใช้งาน หรือจากประวัติของผลการสอบเทียบ

6. สภาวะแวดล้อม

ห้องปฏิบัติการควรมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง (23 ± 5) °C และความชื้นสัมพัทธ์ (55 ± 15) % หรือควรควบคุมอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน ± 5 °C และความชื้นให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน ± 15 % ทั้งนี้สภาวะแวดล้อมจะต้องไม่ส่งผลกระทบกับความถูกต้องของกระบวนการสอบเทียบ

7. ข้อควรระวังโดยทั่วไปของ Electronic Thermo - Hygrometer

7.1 เวลาในการตอบสนองของหัววัดความชื้นที่เป็นสารกึ่งตัวนำในแต่ละชนิดไม่เท่ากัน และอาจจะขึ้นอยู่กับฟิลเตอร์กรองอากาศที่ประกอบอยู่ หากต้องการให้เวลาตอบสนองในการอ่านค่าความชื้นของหัววัดเร็วขึ้น สามารถถอดฟิลเตอร์กรองอากาศออกได้ แต่ต้องระวังการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการสอบเทียบ

7.2 หลีกเลี่ยงการวัดที่มีการสั่นสะเทือน หรือแหล่งกำเนิดความร้อนอื่นๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดค่าผิดพลาดจากการอ่านได้

7.3 หลีกเลี่ยงการวัดในก๊าซ ละอองอากาศ หรือฝุ่นละอองที่อาจทำให้เกิดการปนเปื้อน ควรตรวจสอบว่าผลจากการปนเปื้อนนั้นส่งผลกระทบต่อผลการสอบเทียบหรือไม่

7.4 อย่าทิ้งหัววัดในบรรยากาศที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 80%rh เป็นเวลานาน ระหว่างช่วงเวลาที่ไม่ได้ใช้งานควรเก็บ Electronic Thermo – Hygrometer ไว้ในสภาวะแวดล้อมของความชื้นและอุณหภูมิที่มีการควบคุมหรือตามคำแนะนำของผู้ผลิต เพื่อลดผลกระทบที่อาจทำให้หัววัดเสื่อมสภาพ

7.5 ห้ามป้อนแรงดันไฟฟ้าไปที่หัววัดความชื้นโดยตรง

8. ขั้นตอนเตรียมความพร้อมก่อนการสอบเทียบ

8.1 ตรวจสอบและบันทึกสภาพความสมบูรณ์ของ Electronic Thermo-Hygrometer เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถใช้งานได้ตามปกติ โดยทำการตรวจทั้งทางกายภาพ และทางไฟฟ้า รวมถึงแหล่งจ่ายพลังงานในส่วนของการใช้งานได้ของ Electronic Thermo-Hygrometer

8.2 ควรเก็บ Electronic Thermo-Hygrometer ที่ต้องการสอบเทียบไว้ในสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการ

9. ขั้นตอนการสอบเทียบ

9.1 เมื่อพบว่า Electronic Thermo-Hygrometer ที่ต้องการสอบเทียบมีความผิดพลาดมากกว่าเกณฑ์การยอมรับ และหากสามารถปรับเทียบเครื่องมือนั้นได้ ควรทำการปรับเทียบให้ความผิดพลาดไม่เกินกว่าเกณฑ์การยอมรับ หรือตามข้อกำหนดที่ปรากฏในคู่มือของเครื่องมือวัดความชื้นชนิดนั้นๆ

ข้อแนะนำ

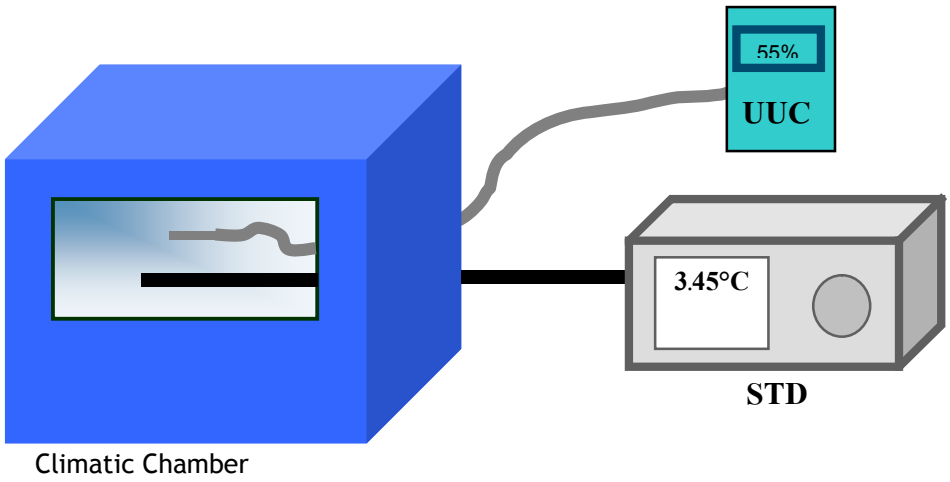
หากมีการปรับเทียบควรมีการแจ้งลูกค้าก่อน

9.2 ติดตั้งเครื่องมือในการสอบเทียบดังรูปที่ 1 โดยติดตั้งให้หัววัดความชื้นมาตรฐานและ Electronic Thermo-Hygrometer ที่ถูกสอบเทียบอยู่ใกล้กันมากที่สุด เพื่อให้หัววัดทั้งสองตัวอยู่ภายใต้สภาวะเดียวกันภายในตู้สอบเทียบ

ข้อควรระวัง

ในกรณีที่จำเป็นต้องนำส่วนแสดงผลของเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบเข้าไปไว้ภายในตู้สอบเทียบ ไม่ควรเก็บส่วนดังกล่าวไว้ในตู้สอบเทียบนานเกินไปเนื่องจากอาจมีการปนเปื้อนของปริมาณไอน้ำหากมีการวัดที่ความชื้นสูง

ในกรณีที่วัดความชื้นสูง ให้ระวังการกลั่นตัวการเป็นหยดน้ำภายในเครื่องมือที่ทำการสอบเทียบ ดังนั้น ควรปรับค่าความชื้นของตู้สอบเทียบลงมาให้ใกล้เคียงกับสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการก่อนปิดระบบสอบเทียบ



รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเครื่องมือในการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer

9.3 ตั้งค่าของตู้สอบเทียบไว้ที่อุณหภูมิและความชื้นที่ต้องการสอบเทียบเป็นจุดแรก และทิ้งระยะเวลาให้อุณหภูมิและความชื้นในตู้สอบเทียบอยู่ในสภาวะเสถียรไม่น้อยกว่า 30 นาที โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นที่อ่านได้จากหัววัดความชื้นมาตรฐาน ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือตามข้อกำหนดของผู้ผลิตเครื่องมือ

9.4 บันทึกค่าอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากหัววัดความชื้นมาตรฐานและ Electronic Thermo-Hygrometer ไม่น้อยกว่า 5 ครั้ง โดยทิ้งช่วงเวลาในการบันทึกผลแต่ละครั้งไม่น้อยกว่า 1 นาที การบันทึกผลของเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบถูกเปรียบเทียบกับค่าจริงของความชื้น

ข้อแนะนำ

ค่าจริงของความชื้นสามารถหาได้จากการนำค่าแก้ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบมาแก้ค่าที่อ่านได้ หรือสามารถคำนวณได้จากสมการในภาคผนวก ก. โดยค่าที่นำมาคำนวณหาค่าจริงของความชื้นที่วัดได้นั้นต้องผ่านการแก้ค่าจากใบรับรองผลการสอบเทียบก่อน

9.5 ความชื้นที่ทำการสอบเทียบควรอยู่ในช่วงตั้งแต่ 15 % ถึง 95 % และกำหนดจุดในการสอบเทียบไม่ควรน้อยกว่า 3 จุดหรือมากกว่าหากจำเป็นต้องพิจารณาคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของ Electronic Thermo – Hygrometer ที่ถูกสอบเทียบ

9.6 หลังจากทำการสอบเทียบครบทุกจุดสอบเทียบแล้ว ลำดับถัดไปคือการสอบเทียบเพื่อหาค่าของ Short-term Stability ซึ่งได้จาการคำนวณผลต่างที่อ่านค่าได้ของ Electronic Thermo-Hygrometer ที่ถูกสอบเทียบ ในระหว่างการวัดช่วงขาขึ้นกับช่วงการวัดขาลงที่ความชื้นและอุณหภูมิในจุดอ้างอิง ตามตัวอย่างการบันทึกผลการสอบเทียบแสดงในตารางที่ 1

9.7 ค่าของ Short-term Stability จำเป็นต้องทำการวัดทั้งในส่วนที่เป็นอุณหภูมิด้วย เมื่อมีการร้องขอจากลูกค้าให้ทำการสอบเทียบอุณหภูมิในส่วนของ Electronic Thermo-Hygrometer ที่ถูกสอบเทียบ

ข้อแนะนำ

การหาค่า Short-term Stability ของ Electronic Thermo-Hygrometer สามารถหาค่าของแต่ละจุดสอบเทียบ (Hysterysis) ได้เช่นกัน โดยทำการสอบเทียบย้อนกลับจากจุดสอบเทียบที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงไปยังจุดสอบเทียบที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

Calibration Point	Standard Reading		UUC Reading	
	Temperature	Humidity	Temperature	Humidity
	°C	%	°C	%
23 °C, 40 %	23.03	39.90	23.0	41.9
	23.03	40.24	23.0	42.2
	23.03	39.91	23.0	41.9
	23.04	40.33	23.0	42.3
	23.04	40.04	23.1	42.0
Average	23.034	40.084	23.020	42.060
Standard deviation	0.005	0.194	0.045	0.182

Calibration Point	Standard Reading		UUC Reading	
	Temperature	Humidity	Temperature	Humidity
	°C	%	°C	%
23 °C, 50 %	23.04	50.05	23.0	51.8
	23.03	50.13	23.0	51.9
	23.04	49.98	23.1	51.7
	23.04	50.32	23.0	52.1
	23.04	50.10	23.0	51.8
Average	23.038	50.116	23.020	51.860
Standard deviation	0.004	0.127	0.045	0.152
Calibration Point	Standard Reading		UUC Reading	
	Temperature	Humidity	Temperature	Humidity
	°C	%	°C	%
23 °C, 40 %	23.03	40.14	23.0	42.0
	23.04	40.12	23.0	42.0
	23.04	39.92	23.1	41.7
	23.03	40.18	23.1	42.1
	23.04	40.11	23.1	41.9
Average	23.036	40.094	23.06	41.94
Standard deviation	0.005	0.101	0.055	0.152

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างการบันทึกผลการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer

10. การรายงานผลการสอบเทียบ

การรายงานผลการสอบเทียบนั้นจะรายงานจากค่าเฉลี่ยของค่าที่อ่านได้ของหัววัดความชื้นมาตรฐานและเครื่องมือที่สอบเทียบ พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอนในการวัดของแต่ละอุณหภูมิ/ความชื้นในการสอบเทียบดังแสดงในตารางที่ 2

Humidity Accuracy Test @23 °C

Standard Reading (%)	UUC Reading (%)
40.1	42.1

50.2	51.9

The estimated uncertainty of measurement is 1.2 % for relative humidity.

Temperature Accuracy Test

Standard Reading (°C)	UUC Reading (°C)
18.1	18.2
23.1	23.0
28.1	28.0

The estimated uncertainty of measurement is 0.5 °C for temperature.

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างการรายงานผลการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer

ผู้ใช้งานสามารถนำผลของการสอบเทียบไปใช้ได้โดยตรงในรูปของค่าแก้ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าที่อ่านได้จากหัววัดมาตรฐานลบด้วยค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือที่สอบเทียบ หรือนำค่าที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการกำลังสองโดยสมการที่เลือกใช้นั้นขึ้นอยู่กับคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นของหัววัดเพื่อหาค่าแก้ของอุณหภูมิหรือความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงระหว่างจุดสอบเทียบต่อไป

11. การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer ถูกแสดงผลแยกเป็นสองส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนของค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบหัววัดในรูปความชื้นสัมพัทธ์ และในรูปอุณหภูมิอากาศ ซึ่งทั้งสองส่วนจะประกอบไปด้วยค่าความไม่แน่นอนในการวัดเนื่องจากเครื่องมือมาตรฐาน แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ/ความชื้น และจากเครื่องมือที่จะทำการสอบเทียบ ในเอกสารฉบับนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะองค์ประกอบของค่าความไม่แน่นอนของความชื้นสัมพัทธ์เท่านั้น

สำหรับค่าความชื้นสัมพัทธ์นั้น เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematic model) ของค่าแก้ของเครื่องมือที่ต้องการสอบเทียบได้ดังนี้

$$\Delta rh_x = (rh_s + C_{rhs} - rh_x) + \delta rh_{res} + \delta rh_{DS} + \delta rh_{sh} + \delta rh_{CST} + \delta rh_{UFM} \quad (1)$$

โดย
- Δrh_x ผลของค่าแก้ของความชื้นสัมพัทธ์
- rh_s ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน
- C_{rhs} ค่าแก้เนื่องจากการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน
- rh_x ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่อ่านได้จาก Electronic Thermo-Hygrometer
- δrh_{sh} ค่าแก้เนื่องจากความเสถียรของการวัดในช่วงเวลาสั้น ๆ (short-term stability) ของ Electronic Thermo-Hygrometer
- δrh_{DS} ค่าแก้เนื่องจากค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดความชื้นมาตรฐาน
- δrh_{res} ค่าแก้เนื่องจากความละเอียด (Resolution) ของ Electronic Thermo-Hygrometer

δrh_{CST} ค่าแก้เนื่องจากความเสถียรของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น

δrh_{UFM} ค่าแก้เนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น

ตัวอย่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับการสอบเทียบ Electronic Thermo-Hygrometer จากผลการสอบเทียบในตารางที่ 1 ที่ความชื้น 40 % สามารถประเมินได้ดังนี้

1) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน, $u(rh_s)$

จากการอ่านค่าเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน จำนวน 5 ครั้ง นำมาหาค่าเฉลี่ยของความชื้นที่วัดได้ในขณะยังไม่ได้แก้ค่า เท่ากับ 40.084 %rh และมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลการวัดเท่ากับ 0.194 %rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากการอ่านค่าเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน เป็นดังนี้

$$u(rh_s) = \pm\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$
$$= \pm\frac{0.194}{\sqrt{1}}$$
$$= \pm 0.194\ \%rh$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ (normal distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k = 1

2) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของการวัดของ UUC, $u(rh_x)$

จากการอ่านค่าอุณหภูมิจาก UUC จำนวน 5 ครั้ง พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 42.060 %rh และมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลการวัดเท่ากับ 0.182 %rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการอ่านค่าของการวัดของ UUC เป็นดังนี้

$$u(rh_x) = \pm\frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$
$$= \pm\frac{0.182}{\sqrt{1}}$$
$$= \pm 0.182\ \%rh$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ (normal distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k = 1

3) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน, $u(C_{rhs})$

ค่าแก้จากใบรับรองผลการสอบเทียบของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานที่ความสัมพัทธ์ 40 %rh มีค่าเท่ากับ 0.05 %rh และมีค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการสอบเทียบเท่ากับ 0.4 %rh ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (k = 2) ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากหัววัดความชื้นมาตรฐานสามารถประเมินค่าได้ดังนี้

$$u(C_{rhs}) = \pm\frac{0.4}{2}$$
$$= \pm 0.2\ \%rh$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบปกติ (Normal distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k = 1

4) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าเลื่อนของหัววัดความชื้นมาตรฐาน, $u(\delta rh_{DS})$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าเลื่อนของหัววัดความชื้นมาตรฐาน ในกรณีตัวอย่างกำหนดเกณฑ์ค่าเลื่อนของหัววัดความชื้นมาตรฐานไม่เกินกว่า $\pm$0.16 %rh/year โดยประเมินจากประวัติการสอบเทียบและผลการสอบเทียบที่ผ่านมา ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากค่าเลื่อนของหัววัดความชื้นมาตรฐานสามารถประเมินค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \delta rh_{DS} &= \pm 0.16 \%rh / year \\ u(\delta rh_{DS}) &= \pm \frac{0.16}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.09 \%rh \end{aligned}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k = 1

5) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียดในการอ่านค่าของ UUC, $u(\delta rh_{res})$

ในกรณีนี้ ค่าความละเอียดของ UUC เป็น 0.1%rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความละเอียดของ UUC สามารถประเมินค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta rh_{res}) &= \frac{0.05}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.029 \%rh \end{aligned}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k =1

6) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น, $u(\delta rh_{UFM})$

จากการประเมินค่าความแตกต่างของความชื้นแต่ละตำแหน่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นที่ 40 %rh พบว่าค่าความแตกต่างที่มากที่สุดที่ประเมินได้มีค่าเท่ากับ 0.5 %rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นสามารถประเมินได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(\delta rh_{UFM}) &= \pm \frac{0.5}{\sqrt{3}} \\ &= 0.29 \text{ \%rh} \end{aligned}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k =1

7) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสถียรของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น, $u(\delta rh_{CST})$

จากการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของความของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นภายในเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าที่ความชื้น 40 %rh ค่าความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\pm$ 0.5 %rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นสามารถประเมินได้ดังนี้

$$u(\delta rh_{CST}) = \pm\frac{0.5}{\sqrt{3}}$$

$$= 0.29 \text{ \%rh}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k =1

8) ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสถียรของการวัดในช่วงเวลาสั้นๆ ของ UUC (short-term stability), $u(\delta rh_{St})$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสถียรของการวัดในช่วงเวลาสั้นๆ ของ UUC ที่ความชื้นสัมพัทธ์ใดๆ สามารถประเมินได้จากค่าความแตกต่างระหว่างค่าแก้ของความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ในครั้งแรกและครั้งหลัง ตัวอย่างในที่นี้มีค่าเป็น 0.1 % ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความเสถียรของการวัดในช่วงเวลาสั้นๆ ของ UUC สามารถประเมินได้ดังนี้

$$u(\delta rh_{St}) = \pm\frac{0.1}{\sqrt{3}}$$

$$= \pm 0.058 \text{ \%rh}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k =1

ภาคผนวก ก

สมการการคำนวณ

1. การคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity formulation)

$$rh = \left(\frac{e'(t_{dp})}{e'(t_{ambient})} \times 100\% \right) = \left(\frac{e(t_{dp}) f(t_{dp}, P_{dp}) P_{ambient}}{e(t_{ambient}) f(t_{ambient}, P_{ambient}) P_{dp}} \times 100\% \right)$$

rh	- ค่าความชื้นสัมพัทธ์
$e'(t_{dp})$	= $e_w(t_{dp}) \cdot f(t_{dp}, P_{dp}) \cdot P_{ambient}$
$e_w(t_{dp})$	- ค่าความดันไออิ่มตัวโดยคำนวณจากองค์ประกอบของ t_{dp} และ P_{dp} และ $t_{ambient}$
$f(t_{dp}, P_{dp})$	- enhancement factors โดยคำนวณจากองค์ประกอบของการอิ่มตัวที่ t_{dp} และความดัน P_{dp}
$P_{ambient}$	- atmospheric pressure
$e'(t_{ambient})$	= $e_w(t_{ambient}) \cdot f(t_{ambient}, P_{ambient}) \cdot P_{dp}$
$e_w(t_{ambient})$	- ค่าความดันไออิ่มตัวโดยคำนวณจากองค์ประกอบของ $t_{ambient}$ $P_{ambient}$ และ $t_{ambient}$
$f(t_{ambient}, P_{ambient})$	- enhancement factors โดยคำนวณจากองค์ประกอบของการอิ่มตัวที่อุณหภูมิ $t_{ambient}$ และความดัน $P_{ambient}$
P_{dp}	- ค่าความดันอิ่มตัว

2. การคำนวณความดันไอน้ำอิ่มตัว (Saturation water vapor pressure formulation)

2.1 ความดันไอน้ำอิ่มตัวเป็นความดันที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวของน้ำที่สมดุล โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า 0 °C หรือเป็นการอิ่มตัวของน้ำแข็ง และที่สูงกว่า 0 °C หรือเป็นการอิ่มตัวของน้ำ นำเสนอในรูปแบบสมการของ Hyland & Wexler ที่สูงกว่า 0 °C เป็นดังนี้

$$e_w(t) = exp\left(\left[\sum_{i=0}^{6} C_i (t + 273.15)^{i-2} \right] + C_7 \, ln(t + 273.15) \right)$$

C_0= -2.8365744× 10^{3}

C_1= -6.028076559× 10^{3}

C_2= 1.954263612× 10^{1}

C_3= -2.737830188× 10^{-2}

C_4= 1.6261698× 10^{-5}

C_5= 7.0229056× 10^{-10}

C_6= -1.8680009× 10^{-13}

C_7= 2.7150305

t = อุณหภูมิของก๊าซ ($^{\circ}$C)

ที่ต่ำกว่า 0 $^{\circ}$C สมการของ Hyland & Wexler ถูกนำเสนอเป็นดังนี้

$$e_w(t) = exp\left(\left[\sum_{i=0}^{4} C_i (t + 273.15)^{i-1}\right] + C_5 \ln(t + 273.15)\right)$$

C_0= -5.8666426× 10^{3}

C_1= 2.232870244× 10^{1}

C_2= 1.39387003× 10^{-2}

C_3= -3.4262402× 10^{-5}

C_4= 2.7040955× 10^{-8}

C_5= 6.7063522× 10^{-1}

t = อุณหภูมิของก๊าซ ($^{\circ}$C)

2.2 หากนำเสนอในรูปแบบสมการของ Magnus เป็นดังนี้

$$e_W(t) = a_1 exp\left[\frac{a_2 t}{a_3 + t}\right]$$

สัมประสิทธิ์ที่ช่วงการวัดของอุณหภูมิสูงกว่า0 $^{\circ}$C เป็นดังนี้

a_1 = 611.2

a_2 = 17.62

a_3 = 243.12

t = อุณหภูมิของก๊าซ ($^{\circ}$C)

สัมประสิทธิ์ที่ช่วงการวัดของอุณหภูมิต่ำกว่า0 $^{\circ}$C เป็นดังนี้

a_1 = 611.2

a_2 = 22.46

a_3 = 272.62

t = อุณหภูมิของก๊าซ ($^{\circ}$C)

3. ค่าความไม่แน่นอนจากการคำนวณค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว (Uncertainty of vapor pressure calculation)

ค่าความไม่แน่นอนจากการคำนวณค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว โดยใช้สมการของ Wexler ถูกนำเสนอดังนี้

$u(e)$= (0.005×t) % สำหรับค่าในช่วงอุณหภูมิ: $0 \leq t \leq 100$ °C

$u(e)$= (0.01-0.005×t)% สำหรับค่าในช่วงอุณหภูมิ: $-100 \leq t \leq 0.01$ °C

ค่าความไม่แน่นอนจากการคำนวณค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว โดยใช้สมการของ Wexler ถูกนำเสนอดังนี้

$u(e)$= <0.3% สำหรับค่าในช่วงอุณหภูมิ: $-45 \leq t \leq 60$ °C

$u(e)$= <0.5% สำหรับค่าในช่วงอุณหภูมิ: $-65 \leq t \leq 0.01$ °C

4. Enhancement Factor, f

enhancement factor ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงเป็นอิสระต่อกันของความดัน (P) และอุณหภูมิ (t) ดังนี้

$$f(t,P) = exp\left[\alpha\left(1-\frac{e_w(t)}{P}\right)+\beta\left(\frac{P}{e_w(t)}-1\right)\right]$$

โดยที่ $\alpha = \sum_{i=0}^{3} A_i t^i$ และ $\beta = exp\sum_{i=0}^{3} B_i t_i$

t= อุณหภูมิของก๊าซ (°C)

A_i และ B_i เป็นค่าที่ให้ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ของการคำนวณที่ช่วงอุณหภูมิ –50 °C to 100 °C

	Over super cooled water -50 °C < t < 0.01 °C	Over water 0.01 °C < t < 100 °C
A_1	-5.5898101E-02	-1.6302041E-01
A_2	6.7140389E-04	1.807150E-03
A_3	-2.7492721E-06	-6.770306E-06
A_4	3.826895E-09	8.5813609E-09
B_1	-8.1985393E+01	-5.9890467E+01
B_2	5.8230823E-01	3.4378043E-01
B_3	-1.6340527E-03	-7.7326396E-04
B_4	1.6725084E-06	6.3405286E-07

ตาราง 2 สัมประสิทธิ์ของการคำนวณที่ช่วงอุณหภูมิ –100 °C to 0 °C

	Over ice -100 °C < t < 0.01 °C	Over super cooled water -100 °C < t < -50 °C	Over water -50 °C < t < 0 °C
A_1	-6.0190570E-02	-7.4712663E-02	-7.1044201E-02
A_2	7.3984060E-04	9.5972907E-04	8.6786223E-04
A_3	-3.0897838E-06	-4.1935419E-06	-3.5912529E-06
A_4	4.3669918E-09	6.2038841E-09	5.0194210E-09

B_1	-9.4868712E+01	-1.0385289E+02	-8.2308868E+01
B_2	7.2392075E-01	8.5783626E-01	5.6519110E-01
B_3	-2.1963437E-03	-2.8578612E-03	-1.5304505E-03
B_4	2.4668279E-06	3.5499292E-06	1.5395086E-06

ภาคผนวก ข

การหาค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อความชื้นสัมพัทธ์เป็นการประมาณค่าของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ที่หัววัดความชื้นมาตรฐานอ่านค่าได้ เมื่ออุณหภูมิอากาศเปลี่ยนไป โดยใช้ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการสอบเทียบอุณหภูมิของหัววัดความชื้นมาตรฐาน ในกรณีที่ใช้หัววัดความชื้นมาตรฐานเป็น dew-point hygrometer

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) คือ ค่าร้อยละของอัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำที่มีอยู่เทียบกับปริมาณไอน้ำมากสุดที่จะมีอยู่ได้ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน

สูตรการคำนวณความชื้นสัมพัทธ์

$$rh(in\%) = \frac{e_{dp}}{e_{cha}} \times 100\%$$

Temperature effect = ผลต่างของอุณหภูมิอากาศที่อาจส่งผลต่อการอ่านค่าความชื้น

Temperature effect $= rh(in\%)_1 - rh(in\%)_2$

$$= \left(\frac{e_{dp}}{e_{cha}} \times 100\% \right) - \left(\frac{e_{dp}}{e_{cha} + u_{probe_{temp}}} \times 100\% \right)$$

ภาคผนวก ค

ในกรณีของการใช้ dew-point hygrometer เป็นหัววัดความชื้นมาตรฐาน

$$\Delta rh_x = (rh_{std} - rh_{uuc}) + \delta rh_{res} + \delta rh_{sh} + \delta rh_{Cal} + \delta rh_{CST} + \delta rh_{UFM} + \delta rh_{TE} + \delta rh_{td_DS} + \delta rh_{ta_DS}$$

ให้

$$rh_{std} = \left[\frac{611.2 \times e\left(\frac{17.62 \times (t_d + \partial t_d)}{243.12 + (td + \partial t_d)} \right)}{611.2 \times e\left(\frac{17.62 \times (t_a + \partial t_a)}{243.12 + (ta + \partial t_a)} \right)} \right]$$

โดย Δrh_x ผลของค่าแก้ของความชื้นสัมพัทธ์

rh_{std}	ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานหลังจากแก้ค่าแล้ว
t_d	ค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของความชื้นที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานก่อนแก้ค่า
t_a	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิอ้างอิงที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานก่อน
δt_d	ค่าแก้ของอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ
δt_a	ค่าแก้ของอุณหภูมิอ้างอิงที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบ
rh_{uuc}	ค่าเฉลี่ยของความชื้นที่อ่านได้จาก Electronic Thermo-Hygrometer
δrh_{sh}	ค่าแก้เนื่องจาก ความเสถียรของการวัดในช่วงเวลาสั้น ๆ (short term stability) ของ Electronic Thermo-Hygrometer
δrh_{Cal}	ค่าแก้เนื่องเนื่องจากสมการคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งประมาณไว้ที่ 0.3 % ของค่าความชื้นสัมพัทธ์
δrh_{td_DS}	ค่าแก้เนื่องจากค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน
δrh_{ta_DS}	ค่าแก้เนื่องจากค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดอุณหภูมิอ้างอิงของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน
δrh_{res}	ค่าแก้เนื่องจากความละเอียด (Resolution) ของ Electronic Thermo-Hygrometer
δrh_{TE}	ค่าแก้เนื่องจากผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อความชื้นสัมพัทธ์
δrh_{CST}	ค่าแก้เนื่องจากความเสถียรของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น
δrh_{UFM}	ค่าแก้เนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น

1. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการสอบเทียบอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน, $u(\delta t_d)$ ค่าแก้ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานที่ความชื้น 40 %rh มีค่าเท่ากับ 0.03 °C โดยมีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.1 °C ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %(*k=2)* มีค่า Sensitivity Coefficient (Ci) ที่อุณหภูมิ 23 °C และความชื้น 40 %rh เท่ากับ 2.7 %rh/°C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการสอบเทียบอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานมีค่าเท่ากับ

$$u\left(C_{rhs}\right) = \pm\left(\frac{0.1}{2} \times 2.7\right)$$
$$= \pm\, 0.135\ \%rh$$

2. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการสอบเทียบอุณหภูมิของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน, $u(\delta t_a)$ ค่าแก้ที่ได้จากใบรับรองผลการสอบเทียบหัววัดอุณหภูมิอ้างอิงของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานที่ 23 °C มีค่าเท่ากับ 0.05 °C โดยมีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.02 °C ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %(*k=2)* มีค่า Sensitivity Coefficient (Ci) ที่อุณหภูมิ 23 °C และความชื้น 40 %rh เท่ากับ 2.42 %rh/°C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการสอบเทียบอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐานมีค่าเท่ากับ

$$u\left(C_{rhs}\right) = \pm\left(\frac{0.02}{2} \times 2.42\right)$$
$$= \pm\, 0.0242\ \%rh$$

3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน , δrh_{td_DS}

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากค่าเลื่อนของหัววัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาในกรณีตัวอย่างกำหนดเกณฑ์ค่าเลื่อนไว้ไม่เกินกว่า ±0.05 °C/year โดยประเมินจากประวัติการสอบเทียบและผลการสอบเทียบที่ผ่านมา มีค่า Sensitivity Coefficient (Ci) ที่อุณหภูมิ 23 °C และความชื้น 40 %rh เท่ากับ 2.7 %rh/°C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน

$$\delta rh_{td_DS} = \pm 0.05\ ^{o}C$$

$$u\left(\delta rh_{td_DS}\right) = \pm\left(\frac{0.05}{\sqrt{3}} \times 2.7\right)$$

$$= \pm 0.078\ \%rh$$

4. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดอุณหภูมิอ้างอิงของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน , δrh_{ta_DS}

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากค่าเลื่อนของหัววัดอุณหภูมิจุดอ้างอิงของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาในกรณีตัวอย่างกำหนดเกณฑ์ค่าเลื่อนไว้ไม่เกินกว่า ±0.02 °C/year โดยประเมินจากประวัติการสอบเทียบและผลการสอบเทียบที่ผ่านมา มีค่า Sensitivity Coefficient (Ci) ที่อุณหภูมิ 23 °C และความชื้น 40 %rh เท่ากับ 2.42 %rh/°C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องค่าเลื่อน (Drift) ของหัววัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างของเครื่องมือวัดความชื้นมาตรฐาน

$$\delta rh_{ta_DS} = \pm 0.02\ ^{o}\mathrm{C}$$

$$u\left(\delta rh_{ta_DS}\right) = \pm\left(\frac{0.02}{\sqrt{3}} \times 2.42\right)$$

$$= \pm 0.028\ \%\mathrm{rh}$$

5. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากสมการคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Magnus Equation) มีค่าเท่ากับ ±0.3 % ของค่าความชื้นสัมพัทธ์, $u\left(\delta rh_{cal}\right)$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากสมการคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Magnus Equation) มีค่าเท่ากับ ±0.3 % ของค่าความชื้นสัมพัทธ์ โดยคำนวณที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 40.084 % ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากสมการไอน้ำอิ่มตัว สามารถประเมินได้ดังนี้

$$u\left(\delta rh_{cal}\right) = \pm\frac{0.003 \times 40.084}{\sqrt{3}}$$

$$= \pm 0.069\%$$

การหาค่า Sensitivity coefficient ของค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างสามารถหาได้จากหาสมการอนุพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิจุดน้ำค้างของสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ในที่นี้จะใช้สมการของ Magnus ดังนี้

$$rh = \frac{611.2 \times e(\frac{17.62 \times t_d}{243.12 + t_d})}{611.2 \times e(\frac{17.62 \times t_a}{243.12 + t_a})}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial rh}{\partial t_d} = rh \times \left[\frac{4283.774}{(243.12 + t_d)^2} \right]$$

การหาค่า Sensitivity coefficient ของค่าอุณหภูมิอ้างอิงค้างสามารถหาได้จากหาสมการอนุพันธ์ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอ้างอิงของสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ในที่นี้จะใช้สมการของ Magnus จะได้สมการดังนี้

$$\frac{\partial rh}{\partial t_c} = -rh \times \left[\frac{4283.774}{(243.12 + t_c)^2} \right]$$

โดยให้ rh คือค่าความชื้นสัมพัทธ์

t_d คือค่าความอุณหภูมิจุดน้ำค้างซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ-45 °C ถึง +60 °C

t_c คือค่าความอุณหภูมิอ้างอิง

6. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อความชื้นสัมพัทธ์, $u(\delta rh_{TE})$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิอากาศที่มีต่อความชื้นสัมพัทธ์ประเมินได้จากผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นจากค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากภาคผนวก ข ในที่นี้มีค่าเป็น 0.5 %

$$u(\delta rh_{TE}) = \pm \frac{0.5}{\sqrt{3}}$$
$$= \pm 0.29\,\%$$

โดยมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k=1

7. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น, $u(\delta rh_{UFM})$

จากการประเมินค่าความแตกต่างของความชื้นแต่ละตำแหน่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นที่ 40 %rh พบว่าค่าความแตกต่างที่มากที่สุดที่ประเมินได้มีค่าเท่ากับ 0.5 %rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการกระจายตัวของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นสามารถประเมินได้ดังนี้

$$u(\delta rh_{UFM}) = \pm \frac{0.5}{\sqrt{3}}$$
$$= 0.29\ \%\text{rh}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k =1

8. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสถียรของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้น, $u(\delta rh_{CST})$ จากการประเมินค่าการเปลี่ยนแปลงของความของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นภายในเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าที่ความชื้น 40 %rh ค่าความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $\pm$ 0.5 %rh ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของความชื้นภายในตู้สร้างอุณหภูมิ/ความชื้นสามารถประเมินได้ดังนี้

$$u(\delta rh_{CST}) = \pm \frac{0.5}{\sqrt{3}}$$

$$= 0.29 \text{ \%rh}$$

โดยมีความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution) ที่ระดับความเชื่อมั่น k =1

เอกสารอ้างอิง

1. JIS Z 8806 Humidity-Measurement methods, Japanese Industrial Standard-1995
2. JIS B 7920 Hygrometer-Test method, Japanese Industrial Standard-1994
3. A Guide to the Measurement of Humidity, the Institute of Measurement Control
4. ITS-90 Formulations for Vapopr Pressure, Frostpoint Temperature, Dewpoint Temperature, and Enhancement Factors in The Range -100 °C to +100 °C, Third International Symposium on Humidity & Moisture
5. Guide to the expression of uncertainty in measurement – BIPM GUM 1995
6. G-20 Guidelines for Calibration and Checks of Temperature Controlled Enclosures