



รายงานการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา

การตรวจสอบอ่างสอเทียบควบคุมอุณหภูมิ Validation of Liquid Bath Calibrators

โดย

นาย นันทชัย บุตุคุณ

รหัส 6523100003

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา 151-495 สหกิจศึกษา
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
ภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2567

หัวข้อโครงการ : การตรวจสอบอย่างสอบเทียบควบคุมอุณหภูมิ
: Validation of liquid bath calibrators
รายชื่อผู้จัดทำ : นันทชัย บุตคุณ 6523100003
หลักสูตร : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
อาจารย์นิเทศ : ดร.ชาญชัย วิรุณฤทธิชัย

อนุมัติให้โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการปฏิบัติสหกิจศึกษาและการศึกษาเชิงบูรณาการกับ
การทำงาน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
ภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2567

คณะกรรมการสอบโครงการ



.....อาจารย์นิเทศ

(อาจารย์ ดร.ชาญชัย วิรุณฤทธิชัย)



.....ผู้นิเทศ

(นาย ศราวุฒิ ธรรมโม)



.....กรรมการกลาง

(อาจารย์สมบัติ หิรัญวรรณพงษ์)



.....ผู้ช่วยอธิการบดีและผู้อำนวยการสำนักสหกิจศึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มารุจ ลิ้มปะวัฒน์)

จดหมายนำส่งรายงาน

วันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2568

เรื่อง ขอส่งรายงานการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา
เรียน อาจารย์นิเทศ หลักสูตร วิศวกรรมเครื่องกล
ดร.ชาญชัย วิรุณฤทธิชัย

ตามที่ นาย นันทชัย บุตคุณ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ได้ไปปฏิบัติงานสหกิจศึกษาเชิงบูรณาการกับการทำงาน ระหว่างวันที่ 19 พฤษภาคม 2568 ถึง วันที่ 29 สิงหาคม 2568 ในตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิทยาศาสตร์ ณ บริษัทศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์ และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด(มหาชน) และ ได้รับมอบหมายจากผู้นิเทศ นาย ศราวุฒิ ธรรมโม ให้ศึกษาและทำรายงานเรื่อง การตรวจสอบอ่าง ควบคุมอุณหภูมิ

บัดนี้การปฏิบัติสหกิจศึกษาและการศึกษาเชิงบูรณาการกับการทำงานได้สิ้นสุดแล้ว นาย นันทชัย บุตคุณ ผู้จัดทำจึงขอส่งรายงานดังกล่าวมาพร้อมกันนี้จำนวน 1 เล่ม เพื่อขอรับ คำปรึกษาต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ



(นาย นันทชัย บุตคุณ)

ผู้จัดทำนักศึกษาสหกิจศึกษา

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสยาม

ชื่อโครงการ : การตรวจสอบอย่างสอบเทียบควบคุมอุณหภูมิ
หน่วยกิต : 5 หน่วยกิต
ผู้จัดทำ : นันทชัย บุตคุณ 6523100003
อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. ชาญชัย วิรุณฤทธิชัย
ระดับการศึกษา : ปริญญาตรี
หลักสูตร : วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ : วิศวกรรมศาสตร์
ภาคการศึกษา/ ปีการศึกษา : 3/2567

บทคัดย่อ

ในกระบวนการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการวัดเป็นสิ่งสำคัญสูงสุด ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยอย่างควบคุมอุณหภูมิที่มีความเสถียรและสม่ำเสมอสูง อย่างไรก็ตาม การนำอย่างควบคุมอุณหภูมิมาใช้งานนั้น ไม่สามารถอาศัยเพียงข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคจากผู้ผลิตได้ แต่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการประเมินคุณลักษณะสมรรถนะอย่างเป็นระบบภายใต้สภาวะการใช้งานจริง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณลักษณะสมรรถนะเชิงมาตรวิทยาที่สำคัญของอย่างควบคุมอุณหภูมิ AMETEK JOFRA RTC-250 ซึ่งประกอบด้วยความเสถียรเชิงเวลา ความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่ เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล และผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน เพื่อยืนยันความเหมาะสมและสร้างแนวปฏิบัติในการใช้งานเครื่องมือนี้เป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิอ้างอิงในงานสอบเทียบที่มีความแม่นยำสูง

ผลการประเมินสรุปได้ว่าอย่างควบคุมอุณหภูมิดังกล่าวมีสมรรถนะในระดับดีเยี่ยม โดยมีค่าเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิ (สูงสุด $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$) และความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในแนวนอน (สูงสุด $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}$) ซึ่งดีกว่าคุณลักษณะจำเพาะที่ผู้ผลิตระบุไว้อย่างมีนัยสำคัญ สามารถระบุปริมาตรใช้งานที่เหมาะสมที่สุดได้บริเวณใจกลางอ่างที่ระดับความลึก 100 mm และพบว่าความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวนที่ 50 rpm ให้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังได้ข้อมูลเชิงปฏิบัติเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุลจริง (24-35 นาที) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการกำหนดขั้นตอนการทำงานที่น่าเชื่อถือ

คำสำคัญ : การตรวจสอบ/อย่างสอบเทียบ/การควบคุมอุณหภูมิ



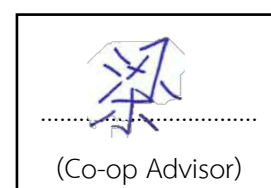
Project Title : Validation of Liquid bath Calibrators
Credit : 5 Credits
By : Mr.Nantachai Butkun 6523100003
Advisor : Dr.Chanchai Wiroonritichai
Degree : Bachelor of Engineering
Major : Mechanical Engineering
Facult : Engineering
Semester / Academic year : 3/2024

Abstract

In the calibration process of temperature measurement instruments, accuracy and reliability are of utmost importance, necessitating the use of a highly stable and uniform temperature-controlled bath. However, the application of such baths cannot rely solely on the manufacturer's technical specifications; a systematic performance characterization under actual operating conditions is essential. This research aims to evaluate the key metrological performance characteristics of the AMETEK JOFRA RTC-250 liquid bath, including its temporal stability, spatial uniformity, time to stability, and the effect of stirrer magnetic speed, in order to confirm its suitability and establish operational guidelines for its use as a reference temperature source in high-precision calibrations.

The evaluation concludes that the liquid bath demonstrates excellent performance. Its temperature stability (max. 0.015 °C) and radial uniformity (max. 0.011 °C) were found to be significantly better than the manufacturer's specifications. The optimal working volume was identified in the center of the bath at a depth of 100 mm, and a stirrer speed of 50 rpm was found to yield the best temperature uniformity. Furthermore, practical data on the actual time to stability (24-35 minutes) was obtained, which is crucial for establishing reliable operational procedures.

Keywords : Validation/Calibration Bath/Temperature Control



สารบัญ

	หน้า
จดหมายนำส่ง	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญภาคผนวก	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ข้อมูลของสถานประกอบการและลักษณะงานที่ได้รับมอบหมาย	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การทบทวนเอกสารงานวิจัย/วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature)	
2.1 อ้างอิงแบบควบคุมอุณหภูมิ (Liquid Bath Calibrators)	4
2.2 การประเมินคุณลักษณะ (Characterization)	5
2.3 เอกสารอ้างอิงมาตรฐานและแนวทางที่เกี่ยวข้อง	6
2.4 เครื่องมือสอบเทียบอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง	8
2.5 การกำหนดเกณฑ์การยอมรับสำหรับห้องปฏิบัติการ	8
2.6 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 รายละเอียดการปฏิบัติงาน	
3.1 ชื่อและที่ตั้งของสถานประกอบการ	11
3.2 ลักษณะของสถานที่ปฏิบัติงาน	12
3.3 รูปแบบการจัดองค์กรและการบริหารงานขององค์กร	13
3.4 ตำแหน่งและลักษณะงานที่ได้รับมอบหมาย	13

สารบัญ (ต่อ)

3.5 ชื่อและตำแหน่งงานของพนักงานที่ปรึกษา	13
3.6 ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน	13
3.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	14
3.8 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	14
3.9 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	15
3.10 วิธีการตรวจสอบ	16
3.11 ขั้นตอนการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์	18
3.12 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ	20
บทที่ 4 ผลการปฏิบัติงาน	
4.1 บทนำ	23
4.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะเชิงสมรรถนะ	23
4.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบและเกณฑ์การยอมรับ	29
4.4 สรุปและข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ	32
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการประเมิน	34
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้งานและปรับปรุงขั้นตอนการปฏิบัติงาน	35
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการเฝ้าระวังสมรรถนะอย่างต่อเนื่อง	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิ	39
ภาคผนวก ข ภาพขั้นตอนปฏิบัติทำงาน	55
ภาคผนวก ค ภาพงานนิเทศงานของอาจารย์ที่ปรึกษา	60
ประวัติผู้จัดทำ	64

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ผังเวลาการทำงาน	14
ตารางที่ 3.2 รูปแบบการบันทึกค่าปรับแก้ระหว่างเทอร์โมมิเตอร์	17
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างรูปแบบการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ 30 °C ระดับความลึก 150 mm	19
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 °C	24
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 90 °C	24
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 140 °C	25
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 200 °C	25
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 250 °C	26
ตารางที่ 4.6 ผลการประเมินเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability)	28
ตารางที่ 4.7 ผลกระทบของความเร็วใบพัดกวนที่อุณหภูมิ 140 °C	28



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของ AMETEK JOFRA RTC-250	5
รูปที่ 3.1 แผนที่ บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน)	11
รูปที่ 3.2 บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน)	12
รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดองค์การและการบริหารงานขององค์กร	13
รูปที่ 3.4 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อหาค่าความต่าง	16
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์	18
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า Maximum of Stability ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ	26
รูปที่ 4.2 ตารางคุณลักษณะจำเพาะของเครื่อง AMETEK JOFRA RTC-250	30

สารบัญภาคผนวก

หน้า

ภาคผนวก ก

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงวิธีการคำนวณหาค่า Stability และ Uniformity	40
ตารางภาคผนวกที่ 2 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 30 °C ระยะจุ่ม 50 mm	42
ตารางภาคผนวกที่ 3 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 30 °C ระยะจุ่ม 100 mm	43
ตารางภาคผนวกที่ 4 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 30 °C ระยะจุ่ม 150 mm	44
ตารางภาคผนวกที่ 5 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะจุ่ม 50 mm	45
ตารางภาคผนวกที่ 6 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะจุ่ม 100 mm	46
ตารางภาคผนวกที่ 7 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะจุ่ม 150 mm	47
ตารางภาคผนวกที่ 8 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะจุ่ม 50 mm	48
ตารางภาคผนวกที่ 9 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะจุ่ม 100 mm	49
ตารางภาคผนวกที่ 10 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะจุ่ม 150 mm	50
ตารางภาคผนวกที่ 11 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะจุ่ม 50 mm	51
ตารางภาคผนวกที่ 12 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะจุ่ม 100 mm	52
ตารางภาคผนวกที่ 13 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะจุ่ม 150 mm	53
ตารางภาคผนวกที่ 14 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะจุ่ม 50 mm	54
ตารางภาคผนวกที่ 15 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะจุ่ม 100 mm	55
ตารางภาคผนวกที่ 16 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะจุ่ม 150 mm	56

สารบัญภาคผนวก (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข

รูปภาคผนวกที่ 1	อ่างควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ AMETEK รุ่น JOFRA RTC-250A	58
รูปภาคผนวกที่ 2	ภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิ	58
รูปภาคผนวกที่ 3	ซิลิโคนออยที่ใช้เป็นตัวกลางในการนำอุณหภูมิ	59
รูปภาคผนวกที่ 4	วัดระยะจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ 15 cm ลงอ่างควบคุมอุณหภูมิ	59
รูปภาคผนวกที่ 5	ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้อ่านอุณหภูมิ	60
รูปภาคผนวกที่ 6	ค่าที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน	60
รูปภาคผนวกที่ 7	ภาพรวมการทดสอบอ่างควบคุมอุณหภูมิ	61
รูปภาคผนวกที่ 8	กราฟแสดงการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State)	61

สารบัญภาคผนวก (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค

รูปภาคผนวกที่ 9 บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์ และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน) 63

รูปภาคผนวกที่ 10 ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ 63



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ข้อมูลของสถานประกอบการและลักษณะงานที่ได้รับมอบหมาย

1.1.1 บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์ และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน) 361 ซอยลาดพร้าว 122 ถนนลาดพร้าว แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานคร 10310

1.1.2 ลักษณะของสถานประกอบการ ให้บริการทางวิทยาศาสตร์ครบวงจรด้านเกษตร อาหาร ยา และสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งบริการหลักเป็น 3 กลุ่ม คือ ธุรกิจบริการตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ธุรกิจบริการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์ และธุรกิจบริการตรวจสอบและรับรองระบบ รวมถึงบริการให้คำปรึกษาและฝึกอบรม เพื่อให้ลูกค้าปฏิบัติตามระบบคุณภาพและมาตรฐานสากล

1.1.3 ลักษณะงานที่ได้รับมอบหมาย ทำการสอบเทียบเครื่องมือตามพารามิเตอร์ต่างๆ และทำเอกสารควบคุมสถานะแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ

1.1.4 ตำแหน่งงาน นายณัฏฐชัย บุตคุณ ได้ปฏิบัติงานในตำแหน่ง ผู้ช่วยนักวิทยาศาสตร์

1.1.5 ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน ประมาณ 4 เดือน

1.1.6 ผู้นิเทศและตำแหน่งงาน นายศราวุฒิ ธรรมโม ตำแหน่ง หัวหน้าแผนกมาตรวิทยาไฟฟ้า และอุณหภูมิ

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในกระบวนการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการวัดเป็นหัวใจสำคัญสูงสุด ซึ่งการจะบรรลุเป้าหมายดังกล่าวได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่มีความเสถียรและสม่ำเสมอสูง เพื่อใช้เป็นสภาวะอ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าระหว่างเครื่องมือมาตรฐานและเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ (Unit Under Calibration, UUC) อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบของเหลว (Liquid Calibration Bath) เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ เนื่องจากความสามารถในการให้ค่าความเสถียรและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดียเยี่ยม เมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดอุณหภูมิประเภทอื่น

อย่างไรก็ตาม การนำอ่างควบคุมอุณหภูมิมาใช้งานในฐานะแหล่งอุณหภูมิอ้างอิงนั้น ไม่สามารถอาศัยเพียงข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคจากผู้ผลิตได้เพียงอย่างเดียว แต่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการประเมินคุณลักษณะสมรรถนะ (Performance Characterization) อย่างเป็นระบบภายใต้สภาวะการใช้งานจริง กระบวนการนี้เป็นข้อกำหนดพื้นฐานของมาตรฐานสำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบ ISO/IEC 17025 ซึ่งมีความจำเป็นในการประเมินคุณภาพของกระบวนการสอบเทียบ

รายงานฉบับนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อตรวจสอบและประเมินคุณลักษณะสมรรถนะที่สำคัญของอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้ของเหลวตัวกลางเป็นน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) เพื่อวิเคราะห์และหาค่าเชิงปริมาณของคุณสมบัติหลัก อันได้แก่ ความเสถียรเชิงเวลา (Stability) ความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่ (Uniformity) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability) และผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Effect of Magnetic Stirrer Speed) ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินนี้จะถูกนำมาใช้ในการตัดสินใจว่าอ่างควบคุมอุณหภูมิดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในฐานะแหล่งกำเนิดอุณหภูมิอ้างอิงหรือไม่

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3.1 เพื่อตรวจสอบสมรรถนะเชิงมาตรวิทยาของอ่างควบคุมอุณหภูมิ AMETEK JOFRA RTC-250 ในฐานะแหล่งกำเนิดอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1.3.2 เพื่อหาค่าความเสถียร (Stability) ของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

1.3.3 เพื่อประเมินความสม่ำเสมอ (Uniformity) ทั้งในแนวแกน (Axial) และแนวรัศมี (Radial) ภายในปริมาตรใช้งานของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

1.3.4 เพื่อศึกษาระยะเวลาที่อ่างควบคุมอุณหภูมิต้องใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability) หลังจากปรับตั้งอุณหภูมิ

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 ขอบเขตด้านช่วงอุณหภูมิทดสอบ ทำการทดสอบอ่างควบคุมอุณหภูมิในช่วง 30°C, 90°C, 140°C, 200°C และ 250°C เพื่อครอบคลุมช่วงการทำงานทั่วไปของงานสอบเทียบอุณหภูมิ

1.4.2 ขอบเขตด้านความสม่ำเสมอ (Uniformity) วัดค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในอ่าง ทั้งในแนวแกน (Axial) และแนวรัศมี (Radial) เพื่อคำนวณค่าความแตกต่างของอุณหภูมิและหาความสม่ำเสมอของปริมาตรใช้งาน

1.4.3 ขอบเขตด้านระยะจุ่ม (Immersion Depth) ในแต่ละอุณหภูมิทดสอบ จะทำการวัดที่ระยะจุ่ม 50 mm, 100 mm และ 150 mm เพื่อศึกษาผลของระดับความลึกต่อค่าความสม่ำเสมอและเสถียรของอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

1.4.4 ขอบเขตด้านเวลาสู่สมดุล (Time to Stability) ศึกษาระยะเวลาที่อ่างควบคุมอุณหภูมิต้องใช้เพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่หลังการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิทดสอบ

1.4.5 ขอบเขตด้านปัจจัยการใช้งาน ทำการทดสอบเปรียบเทียบผลของความเร็วแท่งแม่เหล็กกวน (Effect of Magnetic Stirrer Speed) ต่อสมรรถนะของอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยกำหนดระดับความเร็วในการทดสอบที่ 10 rpm, 50 rpm และ 80 rpm เพื่อศึกษาผลกระทบของการไหลวนภายในอ่างต่อค่าความเสถียร (Stability) และความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Uniformity) และเพื่อหาความเร็วการกวนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกระจายความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสมรรถนะของอ่างสอบเทียบควบคุมอุณหภูมิ ทั้งในด้านความสม่ำเสมอ (Uniformity) และความเสถียรของอุณหภูมิ (Stability) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1.5.2 สามารถระบุบริเวณที่เหมาะสมในการใช้ และกำหนดจุดอ้างอิงที่ให้ผลการสอบเทียบที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

1.5.3 ได้แนวทางในการวิเคราะห์และประเมินค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบตามระบบคุณภาพ ISO/IEC 17025 ได้

1.5.4 ผู้จัดทำโครงการได้รับความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย การออกแบบการทดสอบ และการวิเคราะห์ข้อมูลทางวิศวกรรม ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำงานจริงในสายงานด้านวิศวกรรมสอบเทียบหรือห้องปฏิบัติการมาตรวิทยา

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อ่างสอบเทียบควบคุมอุณหภูมิ (Liquid Bath Calibrators)

อ่างควบคุมอุณหภูมิสำหรับงานสอบเทียบ (Liquid Bath Calibrators) คือระบบที่ได้รับการออกแบบทางวิศวกรรมอย่างแม่นยำเพื่อสร้างและรักษาสภาวะแวดล้อมทางความร้อนที่มี ความเสถียร (Stability) และ ความเป็นหนึ่งเดียวกัน (Uniformity) ในระดับสูง โดยอาศัยของเหลวเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปยังเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบ เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่คงที่และแม่นยำ สำหรับการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดอ้างอิงมาตรฐาน อุปกรณ์นี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดอุณหภูมิหลากหลายประเภท

องค์ประกอบและหลักการทำงานโดยทั่วไปแล้ว อ่างควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ อ่างสำหรับบรรจุของเหลว, ระบบทำความร้อน/ความเย็น, ระบบควบคุมอุณหภูมิ (ซึ่งมักเป็นแบบ PID Controller) และระบบหมุนเวียนหรือกวนของเหลว สำหรับเครื่อง

AMETEK JOFRA RTC-250 ที่ใช้ในโครงการนี้ มีเทคโนโลยี Active Dual-Zone Heating ซึ่งเป็นการควบคุมโซนความร้อนสองส่วนอย่างอิสระ โซนล่าง (Main Zone) จะทำหน้าที่สร้างอุณหภูมิหลักและกระจายความร้อน ส่วนโซนบน (Upper Zone) จะทำหน้าที่ชดเชยการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของเหลวและจากตัวเซ็นเซอร์ที่จุ่มลงไป ซึ่งช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิในแนวดิ่งได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การใช้ตะกร้าใส่เซ็นเซอร์ (Sensor Basket) ร่วมกับ แท่งแม่เหล็กกวน (Stirrer magnet) ยังช่วยสร้างเขตอุณหภูมิที่มีความเป็นหนึ่งเดียวกันสูงสุดทั้งในแนวนอนและแนวรัศมีอีกด้วย

ประเภทของของเหลวตัวกลาง การเลือกของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางมีความสำคัญอย่างยิ่งและขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ เช่น น้ำ (Water) เหมาะสำหรับช่วงอุณหภูมิปกติ ไม่เกิน 95°C น้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) เหมาะสำหรับช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่น Silicone oil Type MW50 สำหรับเครื่อง RTC-250 สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 250°C แอลกอฮอล์ (Alcohol) เหมาะสำหรับช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

ข้อได้เปรียบเทียบกับเครื่องสอบเทียบแบบบล็อกแห้ง (Dry-block Calibrator) โดยทั่วไปแล้ว อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบของเหลวจะให้ความแม่นยำและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่สูงกว่าเครื่องสอบเทียบแบบบล็อกแห้ง เนื่องจากของเหลวมีคุณสมบัติในการนำพาความร้อน (Convection) ได้ดีกว่าการนำความร้อน (Conduction) ผ่านบล็อกโลหะ ทำให้สามารถสอบเทียบเซ็นเซอร์ที่มี

รูปร่างหรือขนาดที่แตกต่างกันได้หลากหลาย โดยไม่จำเป็นต้องมีช่อง (Insert) ที่พอดีกับขนาดของเซ็นเซอร์



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของ AMETEK JOFRA RTC-250

2.2 การประเมินคุณลักษณะ (Characterization)

การประเมินคุณลักษณะ คือกระบวนการตรวจสอบและหาค่าปริมาณของคุณสมบัติทางความร้อนของอ่างควบคุมอุณหภูมิ เพื่อยืนยันว่าเครื่องมือมีสมรรถนะตรงตามข้อกำหนดและเหมาะสมกับงานสอบเทียบที่มีความแม่นยำสูง ซึ่งแตกต่างจากการสอบเทียบ (Calibration) ที่เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่เครื่องมืออ่านได้กับค่ามาตรฐาน พารามิเตอร์หลักที่ต้องทำการประเมินตามแนวทางของ EURAMET cg-13 และ GLA-27 มีดังนี้

2.2.1 ความเสถียรของอุณหภูมิ (Temperature Stability) คือการประเมินความสามารถของอ่างในการรักษาอุณหภูมิ ณ จุดใดจุดหนึ่งให้คงที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่กำหนด โดยเอกสาร GLA-27 นิยามว่า "เป็นการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใด ๆ ในระยะเวลาอย่างน้อย 30 นาทีหลังจากระบบเข้าสู่สมดุล"

2.2.2 ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) คือการประเมินการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในปริมาตรใช้งานของอ่าง ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญ

อย่างยิ่งในการบ่งชี้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่อาจเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ การประเมินจะครอบคลุม 2 มิติ คือ

2.2.2.1 ความเป็นหนึ่งเดียวกันในแนวแกน (Axial Homogeneity) ความแตกต่างของอุณหภูมิในระดับความลึกต่างๆ ภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิเดียวกัน

2.2.2.2 ความเป็นหนึ่งเดียวกันในแนวรัศมี (Radial Homogeneity) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตำแหน่งการวัดต่างๆ ที่ระดับความลึกเดียวกัน

2.2.3 เวลาในการเข้าสู่สภาวะเสถียร (Time to Stability) คือระยะเวลาโดยประมาณที่เครื่องสอบเทียบอุณหภูมิต้องใช้ในการทำให้อุณหภูมิ ณ จุดที่ตั้งค่าไว้มีความคงที่และอยู่ในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

2.2.4 ผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic Stirrer Speed) แท่งแม่เหล็กกวนเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในโหมดการทำงานแบบอ่างของเหลว (Liquid Bath) ทำหน้าที่หลักของมันคือการกวนของเหลวที่เป็นตัวกลาง (น้ำมันซิลิโคน) เพื่อให้เกิดการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งอ่างควบคุมอุณหภูมิ

คุณลักษณะจากข้อมูลจำเพาะของผู้ผลิต เครื่องสอบเทียบอุณหภูมิทั้งสองรุ่นมีเวลาในการเข้าสู่สภาวะเสถียรโดยประมาณอยู่ที่ 15 นาที มีค่าความเสถียรอยู่ที่ ± 0.02 °C เงื่อนไขการวัดค่าความเสถียรนี้ถูกวัดหลังจากที่สัญลักษณ์แสดงความเสถียร (Stability Indicator) ปรากฏขึ้นบนหน้าจอเป็นเวลา 15 นาที และทำการวัดต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Uniformity) 0.015 °C ตลอดทุกช่วงอุณหภูมิ

สัญลักษณ์แสดงความเสถียร ปรากฏบนหน้าจอ เพื่อแจ้งให้ผู้ใช้งานทราบเมื่ออุณหภูมิได้เข้าสู่สภาวะที่คงที่และพร้อมสำหรับการอ่านค่าสอบเทียบแล้วของอ่างควบคุมอุณหภูมิ AMETEK RTC-250 และในบทที่ 4 จะนำผลการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต ซึ่งถือเป็นการทวนสอบ (Verification) และให้ข้อสรุปในเชิงการสอบเทียบเครื่องมือโดยรวม

2.3 เอกสารอ้างอิงมาตรฐานและแนวทางที่เกี่ยวข้อง

ในการประเมินคุณลักษณะของเครื่องสอบเทียบอุณหภูมิ (Temperature Calibrator) ได้มีการอ้างอิงเอกสารมาตรฐานและวิธีปฏิบัติงานที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากลและระดับประเทศ เพื่อให้มั่นใจว่ากระบวนการประเมินมีความถูกต้อง แม่นยำ และเป็นไปในแนวทางเดียวกัน เอกสารที่ใช้อ้างอิงหลักประกอบด้วย

2.3.1 EURAMET cg-13: Guidelines on the Calibration of Temperature block calibrators

เอกสารนี้เป็นแนวทางปฏิบัติหลักระดับสากล ที่ออกโดยสมาคมมาตรวิทยาแห่งชาติของยุโรป (European Association of National Metrology Institutes) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการสอบเทียบและประเมินคุณลักษณะของเครื่อง Temperature Block Calibrator บทบาทในการประเมิน เอกสารฉบับนี้ได้กำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการทางเทคนิคสำหรับประเมินคุณลักษณะที่สำคัญต่างๆ ได้แก่

2.3.1.1 ขั้นตอนการทดสอบ กำหนดให้ต้องรอจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อน (Thermal Equilibrium) ก่อนเริ่มทำการวัด จากนั้นให้ทำการประเมินความเสถียรโดยบันทึกค่าอุณหภูมิต่อเนื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที

2.3.1.2 การประเมิน Uniformity ภาคผนวก ข (Annex B) ของ EURAMET cg-13 ได้เสนอแนวทางการหาค่า Axial Uniformity โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิอย่างน้อย 3 ตำแหน่งในแนวแกน เช่น จุดล่างสุด, ตรงกลาง และจุดบนสุดของบริเวณใช้งาน การหาค่า Radial Uniformity โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ 4 ตำแหน่งในแนวรัศมี

2.3.2 WI-CL-027 (Evaluate of Liquid Bath) และ WI-CL-028 (Evaluate Block Calibrator)

เอกสารทั้งสองฉบับนี้เป็นวิธีปฏิบัติงานภายใน (Work Instruction) ที่อธิบายขั้นตอนการประเมินคุณลักษณะของเครื่องมืออย่างละเอียดและเป็นรูปธรรม โดยอ้างอิงหลักการมาจากเอกสาร EA-10/13 (ซึ่งเป็นฉบับเดิมของ EURAMET cg-13)

บทบาทในการประเมิน เป็นคู่มือที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริงเพื่อหาค่าคุณลักษณะต่างๆ สำหรับนำไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด โดยระบุวิธีการคำนวณไว้อย่างชัดเจน

2.3.2.1 การติดตั้ง กำหนดให้ใช้เทอร์โมมิเตอร์อย่างน้อย 2 ตัว โดยตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวอ้างอิง (Sensor Ref.) ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ ณ ตำแหน่ง R และใช้อีกตัวหนึ่งเป็นตัวทดสอบ (Sensor UUT) เคลื่อนย้ายไปยังตำแหน่งต่างๆ (A, B, C) และระดับความลึกที่แตกต่างกัน (50 mm, 100 mm, 150 mm) เพื่อทำการวัดหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ

2.3.2.2 การคำนวณ กำหนดสูตรการคำนวณที่ชัดเจน

- $\text{Stability} = (\text{ค่าอุณหภูมิสูงสุด} - \text{ค่าอุณหภูมิต่ำสุด}) / 2$
- $\text{Uniformity} = \text{ค่าอุณหภูมิที่เวลาใดๆ (Sensor Ref.)} - \text{ค่าของอุณหภูมิที่เวลาใดๆ (Sensor UUT ที่รวมค่าปรับแก้แล้ว)}$

2.4 เครื่องมือสอบเทียบอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 เทอร์โมมิเตอร์อ้างอิง (Reference Thermometer) ตามคำแนะนำของ EURAMET cg-13, เทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาใช้ตรวจสอบคุณลักษณะ ไม่จำเป็นต้องสอบเทียบเนื่องจากเป็นการวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่ต้องทราบค่าความไว (Sensitivity) ณ อุณหภูมิที่ทำการวัด เทอร์โมมิเตอร์ชนิดที่นำมาใช้อย่างชัดเจนด้วยค่าความไม่แน่นอนที่น้อย โดยความถูกต้องและความไวของเซ็นเซอร์ต้องไม่กระทบกับผลการสอบเทียบ ค่าความไวสามารถทราบได้จากมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง และตรวจสอบโดยการวัดที่ควบคุม และควรตรวจสอบความเสถียรของเทอร์โมมิเตอร์ระหว่างตรวจสอบคุณลักษณะ

2.4.2 แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Temperature Source) บริเวณทำการวัด (Measurement Zone) ต้องมีการระบุบริเวณทำการวัดที่มีค่าความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิ (Homogeneity) ที่ทราบค่าไวอย่างชัดเจน ตัวกลางของเหลว (สำหรับ Liquid Bath) ต้องเป็นของเหลวที่เหมาะสมกับวัสดุของอ่างและช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน เช่น ใช้น้ำมันซิลิโคนสำหรับอุณหภูมิสูง หรือแอลกอฮอล์สำหรับอุณหภูมิต่ำ

2.4.3 อุปกรณ์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อม (Environmental Equipment) ช่วงการวัดต้องสามารถวัดอุณหภูมิและความชื้นได้ครอบคลุมช่วงที่กำหนดในวิธีปฏิบัติงาน (อุณหภูมิ 15 °C ถึง 40 °C โดยมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 5 °C และความชื้น 30 %RH ถึง 80 %RH โดยมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 20 %RH) ข้อมูลที่ต้องบันทึก ต้องบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการขณะทำการทดสอบอย่างควบคุมอุณหภูมิ เพื่อยืนยันว่าสภาวะแวดล้อมมีความคงที่และเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

2.5 การกำหนดเกณฑ์การยอมรับสำหรับห้องปฏิบัติการ (Establishing Laboratory Acceptance Criteria)

ในการประกันคุณภาพสำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 นั้น การทวนสอบสมรรถนะของเครื่องมือโดยเปรียบเทียบกับคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต (Manufacturer's Specifications) ถือเป็นเพียงขั้นตอนเบื้องต้น

ห้องปฏิบัติการที่มีคุณภาพจำเป็นต้องกำหนด "เกณฑ์การยอมรับภายใน (Internal Acceptance Criteria) ของตนเองขึ้นมา ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่สะท้อนถึงขีดความสามารถที่แท้จริงของเครื่องมือภายใต้สภาวะการใช้งานของห้องปฏิบัติการ และมักจะมีขอบเขตที่กว้างกว่าข้อกำหนดของผู้ผลิต หลักการนี้สอดคล้องกับแนวทางของ ILAC-G8: Guidelines on Decision Rules and

Statements of Conformity ซึ่งแนะนำให้ห้องปฏิบัติการมีกฎเกณฑ์ที่ชัดเจนในการตัดสินใจว่าผลการวัดนั้นสอดคล้องกับข้อกำหนดหรือไม่ โดยต้องคำนึงถึงค่าความไม่แน่นอนของการวัดประกอบการตัดสินใจด้วย เกณฑ์การยอมรับภายในนี้จะถูกใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการทวนสอบสมรรถนะตามวาระ (Periodic Verification) เพื่อเฝ้าระวังการเสื่อมสภาพของเครื่องมือในระยะยาว และเพื่อรับประกันว่าสมรรถนะของเครื่องมือยังคงดีเพียงพอที่จะรองรับ ชีตความสามารถในการวัดและการสอบเทียบ (CMC - Calibration and Measurement Capability) ที่ห้องปฏิบัติการได้ประกาศไว้

2.5.1 หลักการเบื้องหลังการกำหนดเกณฑ์ภายในนี้ มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการคือการประกันความสามารถในการให้บริการ (Assurance of Capability) เกณฑ์การยอมรับภายในทำหน้าที่เป็นเครื่องยืนยันว่าสมรรถนะของเครื่องมือวัดนั้นดีเพียงพอที่จะรองรับการให้บริการสอบเทียบตามขอบข่ายความสามารถในการวัดและการสอบเทียบ (CMC - Calibration and Measurement Capability) ที่ห้องปฏิบัติการประกาศไว้

2.5.1.1 การเฝ้าระวังเสถียรภาพของเครื่องมือในระยะยาว (Long-Term Stability Monitoring) เครื่องมือทุกชิ้นย่อมมีการเปลี่ยนแปลงหรือการเลื่อน (Drift) ของสมรรถนะเมื่อเวลาผ่านไป การมีเกณฑ์การยอมรับภายในที่ชัดเจน จะช่วยให้ห้องปฏิบัติการสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติได้ ก่อนที่สมรรถนะของเครื่องมือจะลดต่ำลง จนถึงเกณฑ์ของผู้ผลิต ซึ่งช่วยป้องกันความผิดพลาดในการสอบเทียบและลดความเสี่ยงที่จะต้องเรียกคืนใบรับรองผลการสอบเทียบ

2.5.1.2 โดยทั่วไปแล้ว เกณฑ์การยอมรับภายในจะถูกกำหนดขึ้นโดยใช้ข้อมูลผลการประเมินคุณลักษณะครั้งแรก (Initial Characterization/Verification) ของเครื่องมือใหม่เป็นพื้นฐาน เนื่องจากผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึงสมรรถนะที่ดีที่สุดของเครื่องมือ จากนั้นจึงอาจกำหนดช่วงเผื่อ (Tolerance) เล็กน้อยเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้ในอนาคต เกณฑ์นี้จะถูกนำมาใช้ในการทวนสอบสมรรถนะตามวาระ (Periodic Verification) เพื่อตัดสินใจว่าเครื่องมือดังกล่าวยังคงมีสภาพพร้อมใช้งาน ควรต้องเฝ้าระวังเป็นพิเศษหรือจำเป็นต้องส่งซ่อมบำรุงปรับเทียบใหม่

2.6 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประเมินคุณลักษณะของอ่างควบคุมอุณหภูมิเป็นหัวข้อที่มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงความแม่นยำและลดค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบให้ได้มากที่สุด

2.6.1 การศึกษาผลการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วฯ โดย กรมปศุสัตว์, ประเทศไทย งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการสอบเทียบและประเมินค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วในช่วงอุณหภูมิต่ำ (-30°C ถึง 0°C) ประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับโครงการนี้คือ ในกระบวนการสอบเทียบ ผู้วิจัยได้ใช้ อ่างสอบเทียบอุณหภูมิที่บรรจุน้ำมันซิลิโคนเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ และในการจัดทำงบประมาณความไม่แน่นอน (Uncertainty Budget) ตามตารางที่ 4 และ 5 ของรายงาน ผู้วิจัยได้ทำการประเมินและรวมค่าความไม่แน่นอนที่มาจากอ่างสอบเทียบอุณหภูมิเข้าไปด้วย ซึ่งได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวกันของอ่าง (Non-Uniformity of bath; u_{unif}) และค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เสถียรของอ่าง (Instability of bath; u_{sta}) ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความสำคัญของการประเมินคุณลักษณะของอ่าง และนำผลที่ได้มาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของความไม่แน่นอนรวมของการวัดตามหลักการทางมาตรวิทยา

2.6.2 Characterization of High Temperature Calibration Bath through Stability and Uniformity Tests โดย Tolentino, L. K. S., และคณะ, ประเทศฟิลิปปินส์ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการประเมินคุณลักษณะของอ่างของเหลวอุณหภูมิสูงในช่วง 150°C ถึง 250°C โดยใช้ Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT) เป็นเครื่องมือวัด ผู้วิจัยได้ทำการประเมินค่าความเสถียรและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาได้ข้อค้นพบที่สำคัญซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของโครงการนี้คือ สมรรถนะของอ่างของเหลวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยผู้วิจัยระบุว่า "ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าความเสถียรของอ่างสอบเทียบ ณ แต่ละจุดตั้งค่าอุณหภูมิจะคงที่มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และมีแนวโน้มที่จะ (เบี่ยงเบน) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ 250°C " งานวิจัยนี้ให้เหตุผลว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้ระบบควบคุมต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งนำไปสู่การแกว่งของอุณหภูมิที่มากขึ้น การค้นพบนี้เป็นการยืนยันเชิงประจักษ์จากงานวิจัยภายนอก ซึ่งสนับสนุนแนวทางการวิเคราะห์ผลในโครงการนี้ และเน้นย้ำถึงความจำเป็นในการประเมินคุณลักษณะของอ่างในทุกช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานจริง เพื่อให้ได้ค่าความไม่แน่นอนที่สะท้อนสมรรถนะที่แท้จริงของเครื่องมือ

บทที่ 3

รายละเอียดการปฏิบัติงาน

3.1 ชื่อและที่ตั้งของสถานประกอบการ

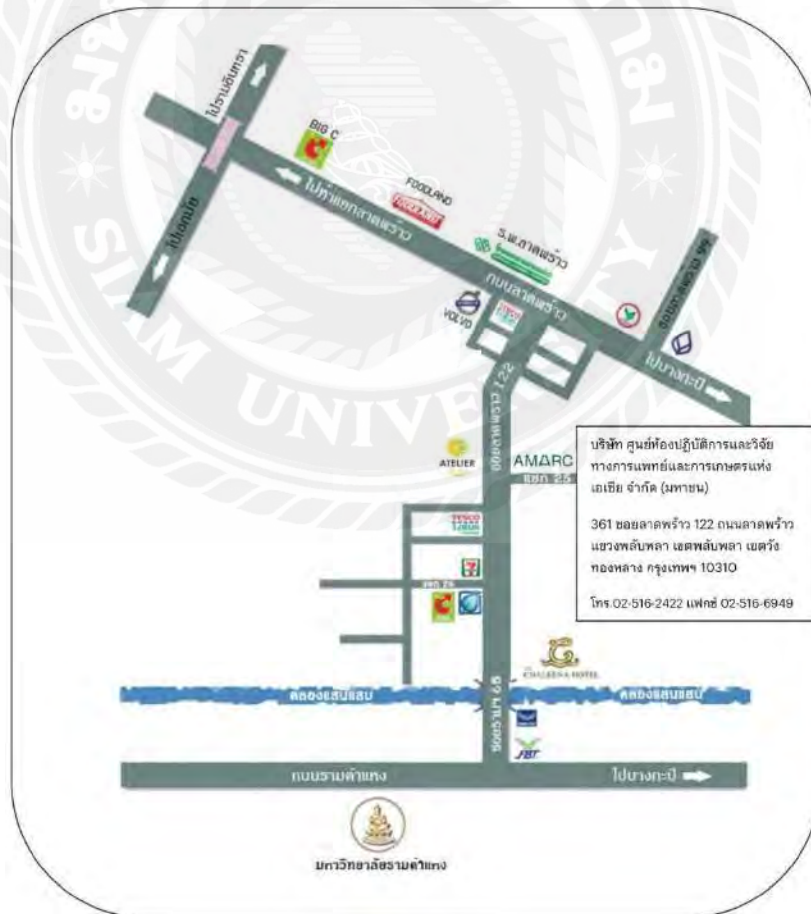
ชื่อ : บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์ และการเกษตรแห่ง
เอเชีย จำกัด (มหาชน)

สถานที่ตั้ง : 361 ซอยลาดพร้าว 122 ถนนลาดพร้าว แขวงพลับพลา เขตวังทองหลาง
กรุงเทพมหานคร

โทรศัพท์ : 02-516-2422

Website : <https://www.amarc.co.th/>

E-mail : contact@amarc.co.th



รูปที่ 3.1 แผนที่ บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน)

3.2 ลักษณะของสถานที่ปฏิบัติงาน

บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน) ธุรกิจการให้บริการทางวิทยาศาสตร์ ด้านเกษตร อาหาร ยา และสิ่งแวดล้อม อย่างครบวงจร ครอบคลุมทั้งการตรวจวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ การสอบเทียบเครื่องมือ การตรวจสอบ รับรอง ตามระบบ คุณภาพและมาตรฐานสากล



รูปที่ 3.2 บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด (มหาชน)

3.7 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

3.7.1 ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาและพนักงานพี่เลี้ยง

ปรึกษาถึงหัวข้อโครงการในเรื่องต่างๆที่ได้ฝึกปฏิบัติและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้

3.7.2 ตั้งชื่อหัวข้อโครงการ

นำชื่อหัวข้อโครงการไปเสนออาจารย์ที่ปรึกษาและพนักงานที่ปรึกษา

3.7.3 รวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลและรายละเอียดต่างๆในการตรวจสอบของอ่างควบคุมอุณหภูมิ
ทั้งเอกสารอ้างอิงมาตรฐานและวิธีการปฏิบัติงานของบริษัท

3.7.4 ลงปฏิบัติงานสถานที่จริง

ทำการตรวจสอบตามเอกสารการตรวจสอบและสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

และทำการถ่ายภาพขณะทำงานเพื่อใช้แนบในโครงการสหกิจศึกษา

3.7.5 นำข้อมูลที่รวบรวมทั้งหมดมาจัดทำเล่มโครงการ

3.8 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 3.1 ผังเวลาการทำงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พฤษภาคม 2568	มิถุนายน 2568	กรกฎาคม 2568	สิงหาคม 2568	กันยายน 2568
1. กำหนดหัวข้อโครงการ	↔				
2. ศึกษาข้อมูล	←	→			
3. รวบรวมข้อมูลของโครงการ		←	→		
4. วิเคราะห์ข้อมูลของโครงการ			←	→	
5. เรียบเรียงข้อมูลและจัดทำโครงการ				←	→
6. สรุปและปรับปรุง					↔

3.9 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

3.9.1 ซอฟต์แวร์ (Software)

3.9.1.1 โปรแกรม Microsoft Excel

3.9.1.2 โปรแกรม Microsoft word

3.9.1.3 โปรแกรม Agilent bench link data logger pro for 34970A

3.9.1.4 โปรแกรม Agilent IO libraries suite

3.9.2 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

3.9.2.1 โน้ตบุ๊ก

3.9.2.2 เครื่องปริ้นท์เอกสาร

3.9.2.3 โทรศัพท์สื่อสารและทำการถ่ายภาพ

3.9.3 เครื่องมือที่ใช้ในการปฏิบัติงาน

3.9.3.1 อ่างควบคุมอุณหภูมิ : (AMETEK รุ่น JOFRA RTC-250A หมายเลขเครื่อง 711795-00300)

3.9.3.2 เทอร์โมมิเตอร์อ้างอิง : Platinum Resistance Thermometer (PRT) (Fluke รุ่น Hart Scientific 5615 หมายเลขเครื่อง 834956)

3.9.3.3 เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ : Thermometer Readout (Fluke รุ่น 1502A หมายเลขเครื่อง A9B398) มีค่าความละเอียด 0.001 °C ซึ่งสามารถวัดค่าความต้านทานได้อย่างละเอียดและแปลงเป็นค่าอุณหภูมิตามสเกล ITS-90

3.9.3.4 เครื่องวัดอุณหภูมิความชื้น : (Digital Thermo hygrometer) ที่สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง 15°C ถึง 40°C มีค่าความละเอียด 0.1°C และสามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ในช่วง 30%RH ถึง 80%RH มีค่าความละเอียด 0.1%RH

3.9.3.5 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Multimeter)

3.9.3.6 อุปกรณ์จับยึดเทอร์โมมิเตอร์ในตำแหน่งที่ต้องการ

3.9.4 สารเคมี

3.9.4.1 ของเหลวตัวกลาง : Silicone oil (Type MW50 ช่วงใช้งาน 30°C ถึง 250°C

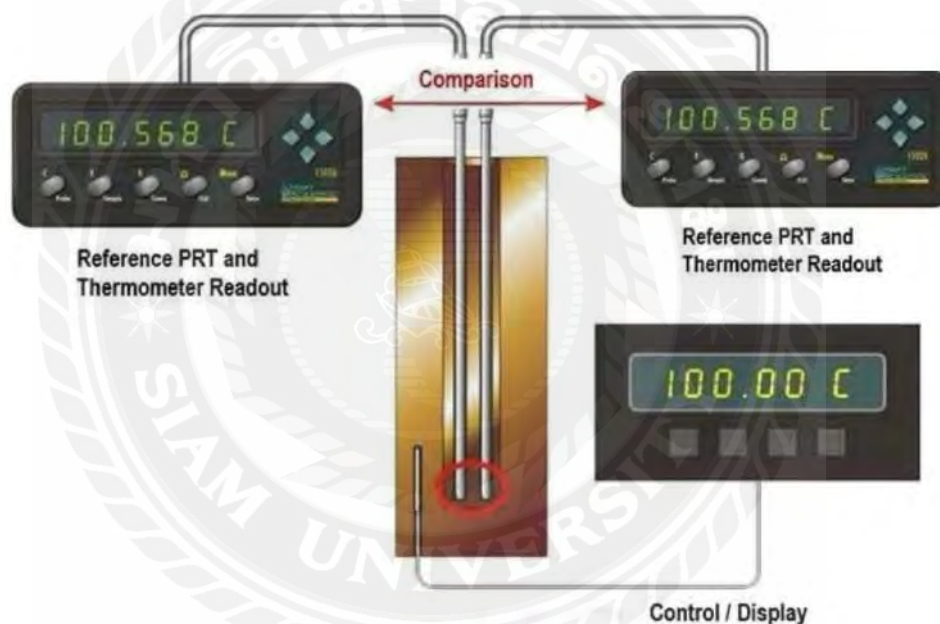
3.9.4.2 95% ethanaol สำหรับทำความสะอาดเครื่องมือ

3.10 วิธีการตรวจสอบ

สภาวะแวดล้อมในการทดสอบทั้งหมดดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 15°C ถึง 40°C การเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 30%RH ถึง 80%RH การเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 20\%\text{RH}$ เพื่อลดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

3.10.1 หาค่าปรับแก้ระหว่าง $\text{Sensor}^{\text{Ref.}}$ และ $\text{Sensor}^{\text{UUT}}$ ที่ใช้ประเมินสมรรถนะอ่างควบคุมอุณหภูมิ

3.10.1.1 ทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ $\text{Sensor}^{\text{Ref.}}$ และ $\text{Sensor}^{\text{UUT}}$ จุ่มลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิลึกอย่างน้อย 15 เท่าของ Diameter และใช้ที่จับยึดเทอร์โมมิเตอร์ โดยมีระยะห่างกันประมาณ 1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อหาค่าความต่าง

3.10.1.2 ตั้งค่าอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 30°C , 90°C , 140°C , 200°C และ 250°C

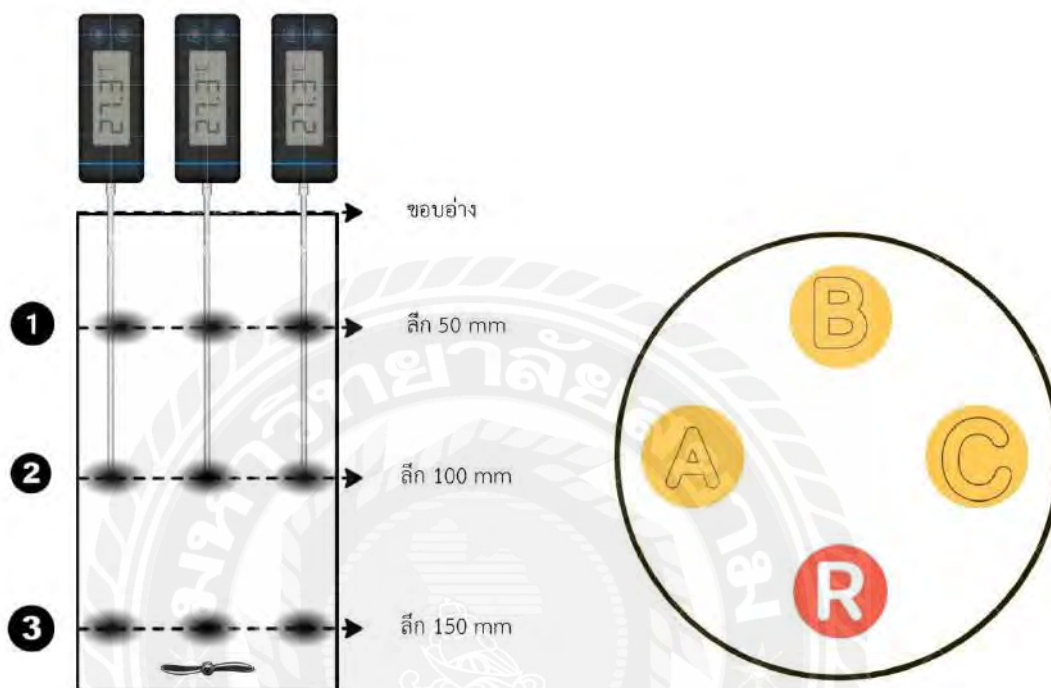
3.10.1.3 รอจนอ่างควบคุมอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสมดุล ประมาณ 30 นาที แล้วจึงเริ่มบันทึกค่า จำนวน 10 ค่า แต่ละครั้งห่างกัน 1 นาที

ตารางที่ 3.2 รูปแบบการบันทึกค่าปรับแก้ระหว่างเทอร์โมมิเตอร์

Different of standard		
No.	Sensor ^{Ref.}	Sensor ^{UUT 1}
X ₁	30.003	29.895
X ₂	30.003	29.894
X ₃	30.003	29.893
X ₄	30.002	29.894
X ₆	30.001	29.893
X ₇	30.001	29.896
X ₈	30.003	29.894
X ₉	30.004	29.894
X ₁₀	30.002	29.895
Average	30.002	29.894
Correction		0.108

3.11 ขั้นตอนการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์

การติดตั้งระบบเป็นไปตามแผนภาพในรูปที่ 3.5 โดยอ้างอิงตำแหน่งการวัดตามที่ใช้งานระบุมาในเบื้องต้น เพื่อประเมินปริมาตรใช้งาน (Working Volume) ที่ต้องการ



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์

3.11.1 ทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ จุ่มลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิตามระดับความลึกดังนี้ วัดระดับความลึกด้านใน 150 มิลลิเมตร แบ่งช่วงการใช้งานตามระยะการจุ่ม (working space) ออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับสูง ระดับกลาง และระดับต่ำ

- ระดับสูง วัดระยะจากระดับของเหลวด้านบนลงมา 50 มิลลิเมตร
- ระดับกลาง วัดระยะจากระดับของเหลวด้านบนลงมา 100 มิลลิเมตร
- ระดับต่ำ วัดระยะจากระดับของเหลวด้านบนลงมา 150 มิลลิเมตร

ตามรูปที่ 3.4 โดยติดตั้งห่างจากขอบอ่างควบคุมอุณหภูมิ 10 มิลลิเมตร

3.11.2 เปิดอ่างควบคุมอุณหภูมิ ทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้เครื่องทำงาน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 30 °C, 90 °C, 140 °C, 200 °C และ 250 °C รออุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จึงเริ่มทำการบันทึกผล บันทึกผลจำนวน 30 ค่า แต่ละ

ครึ่งห่างกัน 60 วินาที(ตามข้อแนะนำของ EURAMET cg-13) และทำที่ระดับกลาง และระดับต่ำ
เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างรูปแบบการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ 30 °C ระดับความลึก 150 mm

No.	Sensor Ref.	Sensor UUT1	Sensor UUT2	Sensor UUT3	Sensor ^{UUT1} + Correction	Sensor ^{UUT2} + Correction	Sensor ^{UUT3} + Correction	Diff UUT1	Diff UUT2	Diff UUT3
X ₁	30.017	30.018	30.016	30.016	30.016	30.016	30.016	0.001	0.002	0.003
X ₂	30.018	30.020	30.015	30.016	30.019	30.015	30.015	0.003	0.001	0.003
X ₃	30.017	30.020	30.014	30.015	30.019	30.014	30.014	0.002	0.003	0.002
X ₄	30.018	30.020	30.021	30.019	30.015	30.021	30.021	0.001	0.002	0.001
X ₅	30.017	30.017	30.015	30.017	30.016	30.015	30.015	0.002	0.001	0.002
X ₆	30.021	30.023	30.017	30.015	30.022	30.017	30.017	0.003	0.002	0.003
X ₇	30.018	30.022	30.016	30.017	30.017	30.016	30.016	0.002	0.003	0.002
X ₈	30.019	30.020	30.016	30.015	30.016	30.016	30.016	0.001	0.002	0.001
X ₉	30.019	30.017	30.014	30.015	30.017	30.014	30.014	0.003	0.001	0.003
X ₁₀	30.018	30.019	30.016	30.014	30.016	30.016	30.016	0.002	0.003	0.002
X ₁₁	30.018	30.021	30.016	30.014	30.016	30.016	30.016	0.001	0.002	0.001
X ₁₂	30.019	30.019	30.014	30.014	30.016	30.014	30.014	0.002	0.001	0.001
X ₁₃	30.017	30.017	30.016	30.015	30.018	30.016	30.016	0.003	0.002	0.002
X ₁₄	30.017	30.021	30.014	30.013	30.015	30.014	30.014	0.002	0.003	0.003
X ₁₅	30.017	30.020	30.013	30.016	30.020	30.013	30.013	0.001	0.002	0.002
X ₁₆	30.016	30.018	30.016	30.015	30.016	30.016	30.016	0.003	0.001	0.001
X ₁₇	30.019	30.020	30.013	30.014	30.019	30.015	30.016	0.002	0.002	0.003
X ₁₈	30.019	30.020	30.019	30.021	30.019	30.014	30.015	0.001	0.003	0.002
X ₁₉	30.015	30.021	30.015	30.015	30.015	30.021	30.014	0.002	0.002	0.001
X ₂₀	30.016	30.017	30.017	30.017	30.016	30.015	30.021	0.003	0.001	0.002
X ₂₁	30.022	30.017	30.017	30.016	30.022	30.017	30.015	0.002	0.003	0.003
X ₂₂	30.017	30.014	30.015	30.016	30.017	30.016	30.017	0.001	0.002	0.002
X ₂₃	30.016	30.014	30.019	30.014	30.016	30.016	30.016	0.003	0.001	0.001
X ₂₄	30.017	30.017	30.019	30.016	30.017	30.014	30.016	0.002	0.001	0.002
X ₂₅	30.016	30.014	30.018	30.016	30.016	30.016	30.014	0.001	0.002	0.003
X ₂₆	30.016	30.016	30.013	30.014	30.016	30.016	30.016	0.002	0.003	0.002
X ₂₇	30.016	30.015	30.016	30.016	30.016	30.014	30.016	0.003	0.002	0.001
X ₂₈	30.018	30.017	30.016	30.014	30.018	30.016	30.014	0.002	0.001	0.003
X ₂₉	30.015	30.016	30.014	30.013	30.015	30.014	30.016	0.003	0.003	0.001
X ₃₀	30.020	30.017	30.016	30.016	30.020	30.013	30.014	0.002	0.002	0.003
Stability	0.001	0.002	0.001	0.003						
Maximum different temperature								0.002	0.003	0.003

3.12 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ

วิธีการหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ จากอ่าวควบคุมอุณหภูมิ ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เสถียรภาพ (Instability) โดยหาจากค่าความเสถียรภาพ (Stability) และค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวกัน (Non-Uniformity) หาจากความเป็นหนึ่งเดียวกัน (Uniformity)

3.12.1 การคำนวณหาค่าเฉลี่ย

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n}{N}$$

3.12.2 การคำนวณหาค่าปรับแก้ของเทอร์โมมิเตอร์

โดยที่

$$Correction = Sensor^{Ref.} - Sensor^{UUT}$$

$Sensor^{Ref}$ = ตำแหน่งอ้างอิง (ตำแหน่ง R)

$Sensor^{UUT}$ = ตำแหน่งใดๆ (ตำแหน่ง A, B, และ C) ซึ่งรวมค่าปรับแก้ของเทอร์โมมิเตอร์แล้ว

3.12.3 การคำนวณหาค่า Stability

คำนวณค่าความเสถียรจากผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) และต่ำสุด (T_{min}) ที่วัดได้ของแต่ละจุด

$$Stability = \frac{(Maximum - Minimum)}{2}$$

3.12.4 การคำนวณหาค่า Uniformity

การประเมินความสม่ำเสมอทำโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงยึดตัวหนึ่งไว้ที่ตำแหน่งอ้างอิง (ตำแหน่งที่ R1, R2 และ R3) เทอร์โมมิเตอร์อีกตัวไปยังตำแหน่งต่างๆ การคำนวณ Uniformity ของอ่าวโดยใช้ผลการวัดที่ให้ค่าความไม่สม่ำเสมอในแนวรัศมี (Radial Homogeneity) และแนวแกน (Axial Homogeneity) แล้วคำนวณ ค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty) ของตัวบ่งชี้ Uniformity

คำนวณจากสมการ

$$u_c = \sqrt{u_{radial}^2 + u_{axial}^2}$$

โดยที่

u_{radial} = ความไม่สม่ำเสมอในแนวรัศมี

u_{axial} = ความไม่สม่ำเสมอในแนวแกน

3.12.4.1 ความสม่ำเสมอในแนวรัศมี (Radial Homogeneity)

- ณ ระดับสูง (วัดจากขอบอ่าง 50 mm) วัดอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งที่ A1, B1 และ C1
- ณ ระดับกลาง (วัดจากขอบอ่าง 100 mm) วัดอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งที่ A2, B2 และ C2
- ณ ระดับต่ำ (วัดจากขอบอ่าง 150 mm) วัดอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งที่ A3, B3 และ C3

คำนวณจากสมการ

$$Radial\ homogeneity = Sensor^{Ref.} - Sensor^{UUT}$$

โดยที่

$Sensor^{Ref}$ = ตำแหน่งอ้างอิง (ตำแหน่ง R)

$Sensor^{UUT}$ = ตำแหน่งใดๆ (ตำแหน่ง A, B, และ C) ซึ่งรวมค่าปรับแก้ของเทอร์โมมิเตอร์แล้ว

3.12.4.2 ความสม่ำเสมอในแนวแกน (Axial Homogeneity)

วัดอุณหภูมิเปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งที่ R, A, B และ C (ตำแหน่งอ้างอิงที่ความลึกต่างกัน) ค่า Axial Uniformity คือผลต่างสูงสุดที่พบในแนวดิ่ง

คำนวณจากสมการ

$$\text{Axial homogeneity} = \text{Sensor}^{\text{Ref.}} - \text{Sensor}^{\text{UUT}}$$

โดยที่

$\text{Sensor}^{\text{Ref}}$ = ตำแหน่งอ้างอิง (ตำแหน่ง R)

$\text{Sensor}^{\text{UUT}}$ = ตำแหน่งใดๆ (ตำแหน่ง A, B, และ C ที่ระดับความลึกต่างๆ) ซึ่งรวมค่าปรับแก้ของเทอร์โมมิเตอร์แล้ว

3.12.5 การประเมินเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability)

3.12.5.1 เริ่มต้นจากอุณหภูมิที่คงที่ (อุณหภูมิห้อง) โดยมีเทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งอ้างอิง

3.12.5.2 เปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (Setpoint) ไปยังจุดทดสอบ และเริ่มจับเวลาที่

3.12.5.3 ฝ้าสังเกตการณ์ค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงอย่างต่อเนื่อง

3.12.5.4 หยุดจับเวลาเมื่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มีความผันผวนอยู่ในช่วงของค่าความเสถียรที่ประเมินได้ในข้อ 3.12.3 ระยะเวลานี้คือ Time to Stability ที่แท้จริง

3.12.6 การประเมินผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Effect of Magnetic Stirrer Speed)

3.12.6.1 เลือกจุดอุณหภูมิทดสอบ 1 จุด (ทดสอบที่ 140 °C ซึ่งเป็นจุดกลางของช่วงอุณหภูมิ)

3.12.6.2 ปรับความเร็วใบพัดกวนไปที่ ค่าต่ำสุด (10) รอจนระบบสมดุล แล้วทำการประเมินค่า Stability และ Uniformity

3.12.6.3 ปรับความเร็วใบพัดกวนไปที่ ค่าปานกลาง (50) และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

3.12.6.4 ปรับความเร็วใบพัดกวนไปที่ ค่าสูงสุด (80) และทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

3.12.6.5 เปรียบเทียบผลที่ได้เพื่อหาความเร็วที่ให้ค่า Stability และ Uniformity ดีที่สุด (ค่าความแตกต่างน้อยที่สุด)

บทที่ 4

ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 บทนำ

ผลการทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงสมรรถนะของอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Liquid Bath Calibrators) รุ่น AMETEK JOFRA RTC-250 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทวนสอบสมรรถนะของเครื่องมือเปรียบเทียบกับคุณลักษณะจำเพาะที่ประกาศโดยผู้ผลิต และเพื่อสร้างเกณฑ์การยอมรับและแนวทางการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่มีความแม่นยำสูง การประเมินครอบคลุมคุณลักษณะเชิงมาตรวิทยาที่สำคัญ 4 ประการ ได้แก่ ความเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิ (Temperature Stability) ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) ทั้งในแนวแกน (Axial Homogeneity) และแนวรัศมี (Radial Homogeneity) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability) และผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Effect of Magnetic Stirrer Speed) ต่อสมรรถนะโดยรวมของอ่างควบคุมอุณหภูมิ กระบวนการประเมินและวิเคราะห์ผลได้อ้างอิงตามหลักการและแนวปฏิบัติที่ดีที่สุดตามที่ระบุในเอกสารแนะนำระดับสากล เช่น EURAMET cg-13 ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการสอบเทียบและการประเมินคุณลักษณะของเครื่องสอบเทียบอุณหภูมิแบบบล็อกร้างและแบบอ่างของเหลว เพื่อให้มั่นใจว่าผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement Uncertainty) สำหรับงานสอบเทียบต่อไป

4.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะเชิงสมรรถนะ

ผลการทดสอบความเสถียรที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 °C ถึง 250 °C จากตารางที่ 4.1 ถึง 4.5 และแสดงวิธีการคำนวณค่าใน ภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 °C

Test temperature 30°C

Axial Inhomogeneity				Instability	
ระยะจุ่ม	A	B	C	ระยะจุ่ม	Maximum of stability
1 (50 mm.)	0.004	0.003	0.006	1 (50 mm.)	0.004
2 (100 mm.)	0.005	0.005	0.004	2 (100 mm.)	0.004
3 (150 mm.)	0.003	0.005	0.006	3 (150 mm.)	0.003
Maximum Axial Inhomogeneity	0.005	0.005	0.006	Maximum of stability	0.004

Radial Inhomogeneity		Temperature uniformity	
ระยะจุ่ม	Maximum Radial Inhomogeneity	0.008	
3 (150 mm.)	0.006		

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 90 °C

Test temperature 90°C

Axial Inhomogeneity				Instability	
ระยะจุ่ม	A	B	C	ระยะจุ่ม	Maximum of stability
1 (50 mm.)	0.003	0.006	0.005	1 (50 mm.)	0.005
2 (100 mm.)	0.003	0.003	0.003	2 (100 mm.)	0.003
3 (150 mm.)	0.004	0.004	0.004	3 (150 mm.)	0.004
Maximum Axial Inhomogeneity	0.004	0.006	0.005	Maximum of stability	0.005

Radial Inhomogeneity		Temperature uniformity	
ระยะจุ่ม	Maximum Radial Inhomogeneity	0.007	
3 (150 mm.)	0.004		

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 140 °C

Test temperature 140°C

Axial Inhomogeneity				Instability	
ระยะจุ่ม	A	B	C	ระยะจุ่ม	Maximum of stability
1 (50 mm.)	0.008	0.009	0.009	1 (50 mm.)	0.009
2 (100 mm.)	0.007	0.011	0.007	2 (100 mm.)	0.006
3 (150 mm.)	0.007	0.011	0.011	3 (150 mm.)	0.007
Maximum Axial Inhomogeneity	0.008	0.011	0.011	Maximum of stability	0.009

Radial Inhomogeneity		Temperature uniformity	
ระยะจุ่ม	Maximum Radial Inhomogeneity	0.016	
3 (150 mm.)	0.011		

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 200 °C

Test temperature 200°C

Axial Inhomogeneity				Instability	
ระยะจุ่ม	A	B	C	ระยะจุ่ม	Maximum of stability
1 (50 mm.)	0.008	0.009	0.009	1 (50 mm.)	0.009
2 (100 mm.)	0.007	0.011	0.011	2 (100 mm.)	0.007
3 (150 mm.)	0.007	0.011	0.011	3 (150 mm.)	0.008
Maximum Axial Inhomogeneity	0.008	0.011	0.011	Maximum of stability	0.009

Radial Inhomogeneity		Temperature uniformity	
ระยะจุ่ม	Maximum Radial Inhomogeneity	0.014	
3 (150 mm.)	0.009		

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 250 °C

Test temperature 250°C

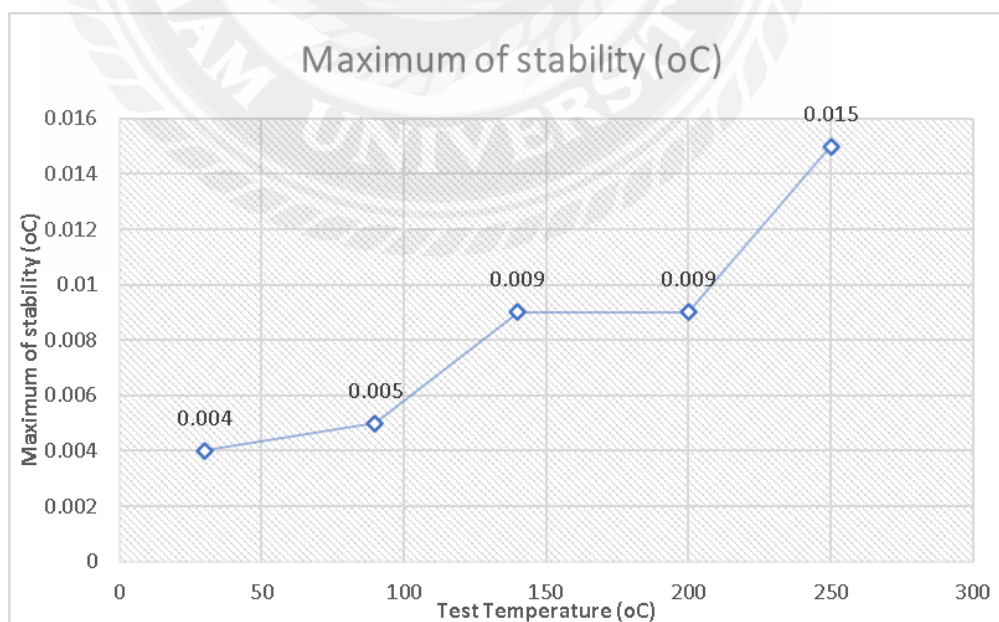
Axial Inhomogeneity				Instability	
ระยะจุ่ม	A	B	C	ระยะจุ่ม	Maximum of stability
1 (50 mm.)	0.005	0.004	0.009	1 (50 mm.)	0.015
2 (100 mm.)	0.007	0.006	0.008	2 (100 mm.)	0.008
3 (150 mm.)	0.009	0.006	0.010	3 (150 mm.)	0.011
Maximum Axial Inhomogeneity	0.009	0.006	0.010	Maximum of stability	0.015

Radial Inhomogeneity		Maximum Radial Inhomogeneity
ระยะจุ่ม		
3 (150 mm.)		0.010

Temperature uniformity	
0.014	

4.2.1 ความเสถียรภาพของอุณหภูมิ (Temperature Stability)

เสถียรภาพเชิงอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงความสามารถของอ่างควบคุมอุณหภูมิในการรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ ณ จุดที่กำหนดตลอดช่วงระยะเวลาหนึ่ง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า Maximum of Stability ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

จากผลการทดลอง พบว่าค่าความเปี่ยงเบนของอุณหภูมิ (ค่าความเสถียร) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิจุดทดสอบสูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าเสถียรภาพของระบบมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิสูง ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน เมื่ออุณหภูมิของอ่างสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมมาก ความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมจะเพิ่มขึ้น ตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) และกฎการแผ่รังสีความร้อนของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann Law) อัตราการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะแปรผันโดยตรงกับ ΔT ที่สูงขึ้นนี้ ดังนั้น ที่อุณหภูมิ 250 °C ระบบจึงสูญเสียความร้อนในอัตราที่สูงกว่าที่อุณหภูมิ 30 °C อย่างมีนัยสำคัญ เพื่อชดเชยการสูญเสียความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ วงจรควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative) ของเครื่องมือจำเป็นต้องทำงานอย่างหนักขึ้น โดยมีการเปิด-ปิดฮีตเตอร์ด้วยความถี่และความเข้มที่สูงขึ้น การควบคุมที่รุนแรงขึ้นนี้อาจนำไปสู่การแกว่งของอุณหภูมิ (Overshoots And Undershoots) รอบจุดตั้งค่าที่มากขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ค่าความเสถียรที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น (สมรรถนะด้อยลง) แม้ว่าเครื่องรุ่น RTC-250 จะมีเทคโนโลยีการให้ความร้อนแบบสองโซน (Active Dual-Zone Heating) เพื่อช่วยลดผลกระทบนี้ แต่หลักการทางฟิสิกส์พื้นฐานยังคงมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของระบบ

4.2.2 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity)

ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิบ่งชี้ถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในปริมาตรใช้งานของอ่างควบคุมอุณหภูมิ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง การประเมินนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนด "ปริมาตรใช้งานที่แท้จริง" (True Working Volume) ซึ่งเป็นบริเวณที่อุณหภูมิมีความแตกต่างกันน้อยที่สุดและเหมาะสมสำหรับงานสอบเทียบที่ต้องการความแม่นยำสูง ผลการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดทั้งในแนวแกน (Axial) และแนวรัศมี (Radial)

ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าบริเวณใจกลางของอ่างในแนวลิกระดับปานกลาง (100 mm) ไม่ใกล้กับระดับผิวของเหลวที่เกิดการสูญเสียความร้อน และไม่ใกล้กับก้นอ่างที่อาจเป็นตำแหน่งของตัวกวน (Magnetic Stirrer) เป็นบริเวณที่มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีที่สุด

4.2.3 เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability)

เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลเป็นพารามิเตอร์เชิงปฏิบัติที่สำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพและการวางแผนการทำงานในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 แสดงระยะเวลาที่ระบบใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างจุดตั้งค่าต่างๆ จนกระทั่งอุณหภูมิมีความเสถียรตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ 4.6 ผลการประเมินเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	เวลาที่ใช้ (นาท)
จากอุณหภูมิห้อง ถึง 30 °C	24
จาก 30 °C ถึง 90 °C	26
จาก 90 °C ถึง 140 °C	30
จาก 140 °C ถึง 200 °C	32
จาก 200 °C ถึง 250 °C	35

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่ต้องการเพื่อให้ระบบมีความเสถียรนั้นเพิ่มขึ้นตามช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ประเด็นที่น่าสนใจและมีความสำคัญอย่างยิ่งคือการเปรียบเทียบผลลัพธ์นี้กับคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต ซึ่งมักจะระบุค่า "Heating Time" (เวลาที่ใช้ในการทำความร้อน) แยกต่างหากจาก "Time to Stability" (เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล) จากเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ RTC-250 ระบุ "Heating Time" จาก 100 °C ถึง 250 °C ใช้เวลา 9 นาที และระบุ "Time to Stability (Typical)" ไว้ที่ 15 นาที อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองเชิงประจักษ์ของเราแสดงค่าที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (24-35 นาที)

4.2.4 ผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic Stirrer Speed)

การกวนของเหลวในอ่างเป็นกลไกสำคัญในการสร้างการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ การทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเร็วใบพัดกวนที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Magnetic Stirrer Speed) ที่ให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุด ผลการทดสอบที่อุณหภูมิ 140 °C ณ ความเร็วใบพัดกวน 10, 50 และ 80 rpm แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลกระทบของความเร็วใบพัดกวนที่อุณหภูมิ 140 °C

Stirrer Speed (rpm)	Max of Stability (°C)	Max of Uniformity (°C)
10	0.006	0.010
50	0.006	0.007
80	0.006	0.008

ผลการทดสอบเผยให้เห็นข้อเท็จจริงที่น่าสนใจสองประการคือ เสถียรภาพ (Stability) ค่าความเสถียรคงที่ที่ 0.006°C โดยไม่ขึ้นกับความเร็วใบพัดกวนในช่วงที่ทดสอบ แสดงให้เห็นว่าวงจรควบคุมอุณหภูมิของเครื่องมือสามารถรักษาเสถียรภาพ ณ จุดวัดได้ดี โดยไม่ได้รับผลกระทบจากการไหลเวียนของของเหลวในภาพรวม ความสม่ำเสมอ (Uniformity) ค่าความสม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ค่าที่ดีที่สุด (ต่ำที่สุด) คือ 0.007°C ที่ความเร็ว 50 rpm พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางพลศาสตร์ของไหลและการถ่ายเทความร้อน

ที่ความเร็ว 10 rpm การกวนที่ช้าเกินไปทำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับที่ไม่เพียงพอที่จะเอาชนะเกรเดียนต์อุณหภูมิที่เกิดจากการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) และการสูญเสียความร้อนที่ผนังและผิวของเหลว ส่งผลให้การผสมของเหลวไม่สมบูรณ์และมีความสม่ำเสมอต่ำที่สุด (ค่าความแตกต่างสูงสุด 0.010°C)

ที่ความเร็ว 50 rpm ความเร็วระดับนี้สร้างสมดุลที่เหมาะสมที่สุด การพาความร้อนแบบบังคับมีอิทธิพลเหนือกว่า ทำให้เกิดการผสมและกระจายความร้อนทั่วทั้งปริมาตรใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกรเดียนต์อุณหภูมิลดลงและมีความสม่ำเสมอดีที่สุด (0.007°C)

ที่ความเร็ว 80 rpm ความสม่ำเสมอเริ่มลดลงเล็กน้อย (0.008°C) บ่งชี้ว่ามีปรากฏการณ์ทางกายภาพอื่นเข้ามามีบทบาท สันนิษฐานว่าการกวนที่เร็วเกินไปในของเหลวที่มีความหนืด (เช่น น้ำมันซิลิโคน) อาจทำให้เกิดความร้อนจากการกระจายความหนืด (Viscous Dissipation) หรือความร้อนจากแรงเสียดทาน ซึ่งเป็นการสร้างแหล่งความร้อนเฉพาะจุดใกล้กับใบพัด และเพิ่มเกรเดียนต์อุณหภูมิโดยรวมเล็กน้อย ผลการทดลองนี้จึงให้ข้อสรุปที่ชัดเจนว่าความเร็ว 50 rpm เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ต่ำที่สุด

4.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบและเกณฑ์การยอมรับ

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองในเชิงเปรียบเทียบกับมาตรฐานภายนอก ซึ่งคือคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต และการนำเสนอหลักการเชิงมาตรวิทยาในการกำหนดเกณฑ์การยอมรับภายในสำหรับห้องปฏิบัติการ

4.3.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต การทวนสอบสมรรถนะของเครื่องมือเทียบกับข้อกำหนดของผู้ผลิตเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการประกันคุณภาพของห้องปฏิบัติการ ได้รวบรวมและเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าที่ระบุในเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การเปรียบเทียบผลการทดลองกับคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต (Manufacturer's Specifications) มีความชัดเจนยิ่งขึ้น สามารถดูรายละเอียดคุณลักษณะของเครื่อง AMETEK JOFRA RTC-250 ได้จากรูปที่ 4.1



Specifications

Functional Specifications

Temperature Range

RTC-158

@ ambient temp. 0°C/32°F -37 to 155°C/35 to 311°F

@ ambient temp. 23°C/73°F -22 to 155°C/-8 to 311°F

@ ambient temp. 40°C/104°F -9 to 155°C/16 to 311°F

RTC-250

@ ambient temp. 0°C/32°F 5 to 250°C/41 to 482°F

@ ambient temp. 23°C/73°F 28 to 250°C/82 to 482°F

@ ambient temp. 40°C/104°F 45 to 250°C/113 to 482°F

Patented Heating Technology Patent No. EP2074374/US8342742

Accuracy with External STS Ref. Sensor (models B and C)

RTC-158 ±0.04°C/±0.07°F

RTC-250 ±0.07°C/±0.13°F

(12-month period relative to reference standard. Specifications by use of the external JOFRA 575-200 reference sensor.)

Accuracy with Internal Ref. Sensor (models A, B, and C)

RTC-158 ±0.18°C/±0.32°F

RTC-250 ±0.28°C/±0.50°F

In Insert Calibrated with Insert.

RTC-158 ±0.3°C/±0.54°F

RTC-250 ±0.5°C/±0.90°F

In Bath Calibrated with Insert.

Stability

RTC-158 ±0.01°C/±0.018°F

RTC-250 ±0.02°C/±0.036°F

Measured after the stability indicator has been on for 15 minutes. Measuring time: 30 minutes.

Resolution (user selectable)

All Temperatures 1° or 0.1° or 0.01° or 0.001°

Temperature Unit in Display

User Selectable: °C, °F, or K

Radial Homogeneity (difference between holes)

RTC-158 @ -22°C/-8°F, Block 0.03°C/0.05°F

RTC-158 @ 155°C/311°F, Block 0.05°C/0.09°F

RTC-158 @ range, Bath 0.015°C/0.03°F

RTC-250 @ range, Block 0.05°C/0.09°F

RTC-250 @ range, Bath 0.015°C/0.03°F

Heating Time

RTC-158

-22 to 23°C/-8 to 73°F 9 minutes

23 to 100°C/73 to 212°F 23 minutes

100 to 155°C/212 to 311°F 28 minutes

RTC-250

28 to 100°C/82 to 212°F 3 minutes

50 to 100°C/122 to 212°F 2 minutes

100 to 250°C/212 to 482°F 9 minutes

Cooling Time

RTC-158

155 to 100°C/311 to 212°F 9 minutes

100 to 23°C/212 to 73°F 24 minutes

23 to 0°C/73 to 32°F 15 minutes

0 to -15°C/32 to 5°F 21 minutes

RTC-250

250 to 100°C/482 to 212°F 27 minutes

100 to 50°C/212 to 122°F 27 minutes

50 to 28°C/122 to 82°F 28 minutes

Time to Stability (approx.)

RTC-158 15 minutes

RTC-250 15 minutes

Immersion Depth

RTC-158/250 incl. insulation plug 180 mm/7.1 in

RTC-158/250 bath version 150 mm/5.9 in

Input Specifications

All input specifications apply to the dry block of the calibrator running at the respective temperature (stable plus an additional 20 minute period). All input specifications are valid for the RTC-158 and RTC-250.

RTD Reference Input (models B and C)

Type 4-wire RTD with true ohm measurements⁽¹⁾

F.S. (Full Scale) 400 ohm

Accuracy (12 months) ±(0.0012% rdg. + 0.0005% F.S.)

RTD Type	Temperature		12 Months	
	°C	°F	°C	°F
Pt100 Reference	-22	-8	±0.008	±0.015
	0	32	±0.008	±0.015
	28	82	±0.009	±0.016
	155	311	±0.011	±0.020
	250	482	±0.012	±0.022

⁽¹⁾ True ohm measurement is an effective method to eliminate errors from induced thermoelectrical voltage.

DLC Sensor Input (models B and C)

TC diff	Temperature		12 Months	
	°C	°F	°C	°F
DLC 155	-22	-8	±0.014	±0.025
	0	32	±0.010	±0.018
	28	82	±0.010	±0.018
	155	311	±0.008	±0.015
	250	482	±0.008	±0.015

At 0.00°C/0.00°F DLC reading.



รูปที่ 4.2 ตารางคุณลักษณะจำเพาะของเครื่อง AMETEK JOFRA RTC-250
(ที่มา: AMETEK, 2023)

4.3.2 ด้านความเสถียรภาพ (Stability) คุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิตระบุค่าไว้ที่ ± 0.02 °C ในขณะที่ผลการทดสอบให้ค่าที่สูงที่สุดคือ 0.015 °C ซึ่งดีกว่าค่าที่ผู้ผลิตระบุค่าไว้

4.3.3 ด้านความสม่ำเสมอแนวรัศมี (Radial Homogeneity) ผู้ผลิตระบุค่าสูงสุดไว้ที่ ± 0.015 °C สำหรับผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่เหนือกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุด 0.011 °C หรือดีกว่าค่าที่ผู้ผลิตระบุค่าไว้ ผลลัพธ์ที่โดดเด่นทั้งสองประการนี้บ่งชี้ว่าเครื่องมือที่นำมาทดสอบมีคุณภาพสูงและได้รับการบำรุงรักษาอย่างดี

4.3.4 สำหรับพารามิเตอร์ เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability) พบความแตกต่างที่น่าสนใจ โดยผู้ผลิตระบุค่าโดยทั่วไป (Typical) ไว้ที่ 15 นาที แต่ผลการทดลองของเราแสดงให้เห็นว่าต้องใช้เวลาจริงในช่วง 24 ถึง 35 นาที ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิ ความแตกต่างนี้ไม่ได้หมายถึงความล้มเหลวของเครื่องมือ แต่เป็นผลมาจากการที่ค่าจากการทดลองสะท้อนสภาวะการใช้งานจริงภายใต้ภาระทางความร้อน (Thermal Load) จากอุปกรณ์ที่ถูกสอบเทียบ ซึ่งแตกต่างจากค่า

ในสภาวะอุดมคติของผู้ผลิต ดังนั้นผลลัพธ์นี้จึงควรถือเป็นประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานจริงยิ่งขึ้น ซึ่งให้ข้อมูลที่มีค่าสำหรับการกำหนดขั้นตอนการปฏิบัติงานที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ

4.3.3 การกำหนดเกณฑ์การยอมรับสำหรับห้องปฏิบัติการ (Establishing Laboratory Acceptance Criteria)

การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องมือกับคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิตเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการทวนสอบเครื่องมือใหม่ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สอดคล้องกับระบบคุณภาพตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 ห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องกำหนดเกณฑ์การยอมรับภายใน (Internal Acceptance Criteria) ของตนเองขึ้นมา เกณฑ์ดังกล่าวไม่ได้เป็นเพียงการคัดลอกค่าจากผู้ผลิต แต่เป็นการกำหนดขีดจำกัดการทำงานที่ผ่านการวิเคราะห์และทดสอบ

จากหลักการข้างต้น ห้องปฏิบัติการจึงได้กำหนดเกณฑ์การยอมรับภายในสำหรับความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) กำหนดไว้ต้องไม่เกิน 0.020 °C และความเสถียรของอุณหภูมิ (Temperature Stability) กำหนดไว้ต้องไม่เกิน 0.020 °C เช่นเดียวกัน

การให้เหตุผลประกอบเกณฑ์ ≤ 0.020 °C ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับคุณลักษณะจำเพาะของผู้ผลิต ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันว่าเครื่องมือจะทำงานได้ในระดับสมรรถนะสูงสุดสำหรับการสอบเทียบทั่วไป ผลการทดลองที่ได้ค่าเพียง 0.008°C และ 0.007°C ณ อุณหภูมิ 30°C และ 90°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ห้องปฏิบัติการได้ประเมินแล้วว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้และยังคงเพียงพอต่อการให้บริการสอบเทียบที่ต้องการความแม่นยำสูงในช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 250°C โดยไม่กระทบต่องบประมาณความไม่แน่นอน (Uncertainty Budget) โดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ

เกณฑ์ที่กำหนดขึ้นนี้จะถูกใช้เป็นการทวนสอบสมรรถนะตามวาระ เพื่อเฝ้าระวังการเสื่อมสภาพของเครื่องมือในระยะยาว และช่วยในการตัดสินใจวางแผนการบำรุงรักษาหรือส่งเครื่องมือสอบเทียบก่อนที่สมรรถนะจะลดต่ำลงจนถึงระดับที่ไม่สามารถยอมรับได้

4.4 สรุปและข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

ส่วนนี้เป็นการสังเคราะห์ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดเพื่อสรุปสมรรถนะโดยรวมของเครื่องมือ และให้ข้อเสนอแนะที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงในห้องปฏิบัติการ

4.4.1 สรุปสมรรถนะโดยรวม จากการประเมินคุณลักษณะเชิงสมรรถนะอย่างละเอียดของอ่างควบคุมอุณหภูมิ AMETEK JOFRA RTC-250 สามารถสรุปได้ว่าเครื่องมือที่นำมาทดสอบมีสมรรถนะในระดับดีเยี่ยม โดยมีค่าเสถียรภาพเชิงอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ที่ดีกว่าคุณลักษณะจำเพาะที่ผู้ผลิตประกาศไว้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งยืนยันถึงคุณภาพของเครื่องมือและการออกแบบทางวิศวกรรมที่ดี

ผลการทดสอบเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลพบว่ามีค่าสูงกว่าที่ระบุไว้ในเอกสารข้อมูลผลิตภัณฑ์ แต่ค่าที่ได้จากการทดลองนี้ถือเป็นตัวแทนของสภาวะการใช้งานจริงภายใต้ภาระทางความร้อนได้ดีกว่า และเป็นข้อมูลสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการวางแผนและดำเนินการสอบเทียบที่น่าเชื่อถือ นอกจากนี้ การศึกษาผลกระทบของความเร็วใบพัดกวนได้ระบุสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่ความเร็ว 50 rpm ซึ่งให้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีที่สุด และนำไปสู่ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบที่ต่ำที่สุด

4.4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดลองและวิจารณ์ผลทั้งหมด สามารถให้ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติเพื่อนำไปปรับปรุงหรือจัดทำเป็นขั้นตอนการปฏิบัติงานมาตรฐาน (WI) สำหรับการใช้งานอ่างควบคุมอุณหภูมินี้ ดังนี้

4.4.2.1 การตั้งค่าความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Magnetic Stirrer Speed) กำหนดให้ตั้งค่าความเร็วใบพัดกวนไว้ที่ 50 rpm เป็นค่ามาตรฐานสำหรับการสอบเทียบที่ต้องการความแม่นยำสูงทุกครั้ง เพื่อให้ได้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีที่สุด

4.4.2.2 การกำหนดเวลารอให้ระบบเสถียร (Time to Stability) ให้ใช้ระยะเวลารอคอยขั้นต่ำตามข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 4.6) แทนการอ้างอิงจากค่า "Heating Time" ของผู้ผลิต ตัวอย่างเช่น "หลังจากอุณหภูมิที่หน้าจอแสดงผลถึงจุดตั้งค่าแล้ว ให้รอเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 35 นาที เพื่อให้ระบบทั้งหมดเข้าสู่สภาวะสมดุลก่อนเริ่มทำการวัดและบันทึกผล

4.4.2.3 กำหนดการทวนสอบ (Intermediate Checks) ด้วยสมรรถนะที่ยอดเยี่ยม และมีเสถียรภาพสูง การกำหนดรอบการตรวจสอบตามมาตรฐานรายปีถือว่ามีความเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ควรมีการทวนสอบสมรรถนะภายในเป็นระยะ (เช่น ทุก 6 เดือน) ณ จุดอนุมัติอ้างอิง เพื่อเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงหรือการเลื่อน (Drift) ของเครื่องมือ

4.4.2.4 การจัดทำงบประมาณความไม่แน่นอน (Uncertainty Budget) ใ้รับรองผลการสอบเทียบทุกฉบับที่ออกโดยใช้เครื่องมือนี้ ควรนำค่าความเสถียรและความสม่ำเสมอที่ได้จากการประเมินคุณลักษณะในรายงานนี้ ไปใช้เป็นองค์ประกอบในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง แม่นยำ และสามารถสอบกลับได้ตามหลักการทางมาตรวิทยา



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการประเมิน

สรุปผลการประเมินคุณลักษณะจากการประเมินคุณลักษณะเชิงมาตริยาของอ่างควบคุมอุณหภูมิ AMETEK JOFRA RTC-250 อย่างเป็นระบบ สามารถสรุปผลการทดลองที่สำคัญในแต่ละด้านได้ดังนี้

5.1.1 เสถียรภาพเชิงอุณหภูมิ (Temperature Stability) เครื่องมือแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพในระดับดีเยี่ยม โดยมีค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้เพียง $0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งดีกว่าคุณลักษณะจำเพาะที่ผู้ผลิตระบุไว้ $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลการทดสอบยืนยันแนวโน้มที่ว่าเสถียรภาพจะลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางอุณหพลศาสตร์ว่าด้วยการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้น

5.1.2 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) สมรรถนะด้านความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในเชิงพื้นที่นั้นโดดเด่นอย่างยิ่ง โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดในแนวรัศมีที่วัดได้คือ $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งดีกว่าข้อกำหนดของผู้ผลิต $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ การทดสอบสามารถระบุ "ปริมาตรใช้งานที่แท้จริง" (True Working Volume) ได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นบริเวณใจกลางของอ่างที่ระดับความลึกปานกลาง (ประมาณ 100 mm) ที่มีเกรเดียนต์อุณหภูมิต่ำที่สุดและเหมาะสมสำหรับงานสอบเทียบที่ต้องการความแม่นยำสูงสุด

5.1.3 เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุล (Time to Stability) ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลอย่างแท้จริงอยู่ระหว่าง 24 ถึง 35 นาที ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิ ค่านี้นับสูงกว่าค่า "Typical" ที่ผู้ผลิตระบุไว้ 15 นาที อย่างมีนัยสำคัญ การค้นพบนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางปฏิบัติ เนื่องจากเป็นการให้ข้อมูลที่สะท้อนสภาวะการใช้งานจริงภายใต้ภาระทางความร้อน ซึ่งจำเป็นต่อการกำหนดระยะเวลาพักคอยที่ถูกต้องในขั้นตอนการปฏิบัติงาน

5.1.4 ผลกระทบจากความเร็วของแท่งแม่เหล็กกวน (Effect of Magnetic Stirrer Speed) การทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความเร็วใบพัดกวนให้ข้อสรุปที่ชัดเจนว่า ความเร็ว 50 rpm เป็นค่าที่ให้สมดุลที่ดีที่สุด โดยสามารถสร้างความสม่ำเสมอของอุณหภูมิได้ดีที่สุด (ค่าความแตกต่าง

สูงสุด 0.007 °C) ในขณะที่ค่าความเสถียรของอุณหภูมิไม่ได้รับผลกระทบและยังคงที่อยู่ 0.006 °C ตลอดทุกช่วงความเร็วที่ทดสอบ

โดยสรุป อ่างควบคุมอุณหภูมิ AMETEK JOFRA RTC-250 ที่นำมาทดสอบนี้มีสมรรถนะเชิงมาตรวิทยาในระดับที่ยอดเยี่ยม ยืนยันได้ถึงคุณภาพของเครื่องมือ และให้ข้อมูลเชิงลึกที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานในห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ต้องการความไม่แน่นอนของการวัดในระดับต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้งานและปรับปรุงขั้นตอนการปฏิบัติงาน

จากผลการประเมินและวิเคราะห์ทั้งหมด สามารถสังเคราะห์เป็นข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำ และประสิทธิภาพของการสอบเทียบโดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมินี้ดังต่อไปนี้

กำหนดค่ามาตรฐานของความเร็วใบพัดกวน ควรระบุในขั้นตอนการปฏิบัติงานมาตรฐาน (WI) ให้ตั้งค่าความเร็วใบพัดกวน (Magnetic Stirrer Speed) ไว้ที่ 50 rpm เป็นค่ามาตรฐานสำหรับการสอบเทียบทุกครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าจะได้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ดีที่สุด ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการลดค่าความไม่แน่นอนของการวัด

แนะนำระดับความลึกในการจุ่ม (Immersion Depth) พบว่าอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากที่สุดบริเวณกลางอ่างควบคุมอุณหภูมิ (ความลึก 100 mm) เพื่อลดผลกระทบจากการไล่ระดับอุณหภูมิ และควรปฏิบัติตามกฎทั่วไปคือให้มีความลึกในการจุ่มอย่างน้อย 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดเพื่อลดผลกระทบจากการนำความร้อน (Heat Conduction)

การสอบเทียบพร้อมกันหลายตัว (Batch Calibration) แม้ว่าผลกระทบจากการบรรจุจะมีน้อย แต่เพื่อรักษาค่าความไม่แน่นอนให้ต่ำที่สุด ควรหลีกเลี่ยงการสอบเทียบหัววัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่มากพร้อมกับหัววัดขนาดเล็ก และควรจัดวางหัววัดให้มีการกระจายตัวอย่างสมมาตรเพื่อให้การไหลเวียนของของเหลวเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

ปรับปรุงระยะเวลาการคอยให้ระบบเสถียร ต้องมีการกำหนดระยะเวลาการคอยขั้นต่ำ (Minimum Soak Time) ใน WI (Work Instructions) โดยอ้างอิงจากผลการทดลองเชิงประจักษ์ (ตารางที่ 4.6) แทนการใช้ค่า "Heating Time" หรือ "Time to Stability (Typical)" จากคู่มือผู้ผลิต

เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการบันทึกผลการวัดก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางอุณหภูมิศาสตร์อย่างแท้จริง

การนำข้อเสนอแนะเหล่านี้ไปปรับใช้ จะช่วยยกระดับคุณภาพและความน่าเชื่อถือของผลการสอบเทียบที่ได้จากห้องปฏิบัติการให้สอดคล้องตามมาตรฐานสากล และเป็นการใช้ประโยชน์สูงสุดจากสมรรถนะที่แท้จริงของเครื่องมือ

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการเฝ้าระวังสมรรถนะอย่างต่อเนื่อง

5.3.1 การทวนสอบระหว่างรอบการสอบเทียบ (Intermediate Checks) ควรมีการทวนสอบคุณลักษณะที่สำคัญ เช่น ความเสถียร ณ จุดอุณหภูมิใช้งานหลัก อย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง หรือเมื่อมีข้อบ่งชี้ว่าเครื่องมืออาจทำงานผิดปกติ

5.3.2 การติดตามการเลื่อนค่า (Drift Monitoring) ควรมีการบันทึกค่าที่อ่านได้จากหัววัดอ้างอิงภายใน (Internal Reference Sensor) ของเครื่อง เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากหัววัดมาตรฐานภายนอก (External Standard) เป็นประจำ การทำเช่นนี้จะช่วยให้สามารถติดตามแนวโน้มการเลื่อนค่าของหัววัดภายในและวางแผนการสอบเทียบเครื่องมือได้อย่างเหมาะสม

บรรณานุกรม

- เอกสิทธิ์ ดุ่มสิทธิ์, นฤเบศ เนินทอง, และ นริศ สำเร็จผล. (2564). การศึกษาผลการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบจุ่มแช่ทั้งหมดที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (เลขทะเบียนวิชาการ 64(2)-0404-090). กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 64-1-new.pdf
- AMARC. (2565). วิธีปฏิบัติงาน เรื่อง *Evaluate of Liquid Bath* (เอกสารหมายเลข WI-CL-027, แก้ไขครั้งที่ 05).
- AMARC. (2565). วิธีปฏิบัติงาน เรื่อง *Evaluate Block Calibrator* (เอกสารหมายเลข WI-CL-028, แก้ไขครั้งที่ 05).
- AMETEK. (2566). *Reference temperature calibrator RTC-158 & RTC-250*.
https://www.ametekcalibration.com//media/ametekcalibration/download_links/temperature/rtc/reference-temperature-calibrator-rtc-158-250-datasheet-us.pdf?la=en&revision=f9b53fc6-2ca7-45d6-ae0b-cfd642749c39
- European Association of National Metrology Institutes. (2558). *Calibration of Temperature Block Calibrators* (EURAMET cg-13 Version 3.0).
https://www.euramet.org/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg-13__v3.0.pdf
- Tolentino, L. K. S., De Castro, J. D. G., & Billones, R. J. D. (2562). Characterization of high temperature calibration bath through stability and uniformity tests with data acquisition using standard platinum resistance thermometer and precision multimeter. In *Proceedings of the 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072877>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุทกภัย



ภาคผนวก ก

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงวิธีการคำนวณหาค่า Stability และ Uniformity

No.	Sensor Ref.	Sensor UUT1	Correction UUT1	Sensor ^{UUT1} + Correction	Diff UUT1
X ₁	30.003	29.895	0.108	30.003	0.000
X ₂	30.003	29.894	0.108	30.002	0.001
X ₃	30.003	29.893	0.108	30.001	0.001
X ₄	30.002	29.894	0.108	30.002	0.002
X ₅	30.001	29.893	0.108	30.001	0.000
X ₆	30.001	29.896	0.108	30.004	0.000
X ₇	30.004	29.894	0.108	30.002	0.003
X ₈	30.002	29.894	0.108	30.0022	0.001
X ₉	30.002	29.895	0.108	30.003	0.002
X ₁₀	30.003	29.892	0.108	30.000	0.001
X ₁₁	30.003	29.895	0.108	30.003	0.002
X ₁₂	30.002	29.893	0.108	30.001	0.000
X ₁₃	30.002	29.894	0.108	30.002	0.002
X ₁₄	30.004	29.893	0.108	30.001	0.000
X ₁₅	30.002	29.894	0.108	30.002	0.001
X ₁₆	30.002	29.896	0.108	30.004	0.002
X ₁₇	30.002	29.894	0.108	30.002	0.002
X ₁₈	30.002	29.890	0.108	30.002	0.000
X ₁₉	30.002	29.893	0.108	29.998	0.004
X ₂₀	30.002	29.892	0.108	30.001	0.001
X ₂₁	30.002	29.894	0.108	30.002	0.002
X ₂₂	30.001	29.893	0.108	30.001	0.000
X ₂₃	30.002	29.893	0.108	30.001	0.000
X ₂₄	30.000	29.893	0.108	30.001	0.001
X ₂₅	30.001	29.895	0.108	30.003	0.001
X ₂₆	30.002	29.892	0.108	30.000	0.002
X ₂₇	30.001	29.894	0.108	29.999	0.002
X ₂₈	30.002	29.892	0.108	30.002	0.002
X ₂₉	30.001	29.892	0.108	30.000	0.000
X ₃₀	30.001	29.895	0.108	30.000	0.001
Stability	0.002	0.003			
Maximum different Temperature					0.004

การหาค่า Stability ได้จากการคำนวณค่าที่แตกต่างกัน (ค่าอุณหภูมิสูง - ค่าอุณหภูมิต่ำ) โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจาก ตารางภาคผนวกที่ 1 No. X₁₄ และ X₂₄ ของ Sensor^{Ref.}

$$\begin{aligned}\text{Stability} &= (30.004 - 30.000)/2 \\ &= 0.002 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

การหาค่าปรับแก้ของเทอร์โมมิเตอร์ ได้จากการคำนวณค่าที่แตกต่างกันระหว่าง Sensor^{Ref.} และ Sensor^{UUT} โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจาก ตารางที่ 3.2

$$\begin{aligned}\text{Correction} &= \text{Sensor}^{\text{Ref.}} - \text{Sensor}^{\text{UUT1}} \\ &= 30.002 - 29.894 \\ &= 0.108 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

การหาค่า Uniformity ได้จากการคำนวณค่าที่แตกต่างกันในช่วงเวลาใดๆ โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจาก ตารางภาคผนวกที่ 1 No. X₁₉

$$\begin{aligned}\text{Uniformity} &= \text{Sensor}^{\text{Ref.}} - \text{Sensor}^{\text{UUT1}} (\text{รวมค่าปรับแก้แล้ว}) \\ &= 30.002 - 29.998 \\ &= 0.004 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

โดยค่า Uniformity จากตารางภาคผนวกที่ 1 จะรายงานค่าที่แตกต่างกันมากที่สุด Maximum different Temperature

ตารางภาคผนวกที่ 2 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 30 °C ระยะจุ่ม 50 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different
No.	R	A			R	B			R	C		
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+	
X1	30.003	29.895	30.003	0.000	30.003	29.829	30.002	0.001	30.003	29.943	30.003	0.000
X2	30.003	29.894	30.002	0.001	30.003	29.831	30.004	0.001	30.003	29.942	30.002	0.001
X3	30.003	29.893	30.001	0.002	30.003	29.829	30.002	0.001	30.003	29.942	30.002	0.001
X4	30.002	29.894	30.002	0.000	30.002	29.831	30.004	0.002	30.002	29.941	30.001	0.001
X5	30.001	29.893	30.001	0.000	30.001	29.829	30.002	0.001	30.001	29.940	30.000	0.001
X6	30.001	29.896	30.004	0.003	30.001	29.826	29.999	0.002	30.001	29.945	30.005	0.004
X7	30.003	29.894	30.002	0.001	30.003	29.829	30.002	0.001	30.003	29.939	29.999	0.004
X8	30.004	29.894	30.002	0.002	30.004	29.829	30.002	0.002	30.004	29.945	30.005	0.001
X9	30.002	29.895	30.003	0.001	30.002	29.829	30.002	0.000	30.002	29.942	30.002	0.000
X10	30.002	29.892	30.000	0.002	30.002	29.831	30.004	0.002	30.002	29.941	30.001	0.001
X11	30.003	29.895	30.003	0.000	30.003	29.832	30.005	0.002	30.003	29.939	29.999	0.004
X12	30.003	29.893	30.001	0.002	30.003	29.827	30.000	0.003	30.003	29.938	29.998	0.005
X13	30.002	29.894	30.002	0.000	30.002	29.829	30.002	0.000	30.002	29.940	30.000	0.002
X14	30.002	29.893	30.001	0.001	30.002	29.830	30.003	0.001	30.002	29.941	30.001	0.001
X15	30.004	29.894	30.002	0.002	30.004	29.831	30.004	0.000	30.004	29.938	29.998	0.006
X16	30.002	29.896	30.004	0.002	30.002	29.829	30.002	0.000	30.002	29.942	30.002	0.000
X17	30.002	29.894	30.002	0.000	30.002	29.830	30.003	0.001	30.002	29.940	30.000	0.002
X18	30.002	29.890	29.998	0.004	30.002	29.831	30.004	0.002	30.002	29.942	30.002	0.000
X19	30.002	29.893	30.001	0.001	30.002	29.830	30.003	0.001	30.002	29.941	30.001	0.001
X20	30.002	29.892	30.000	0.002	30.002	29.831	30.004	0.002	30.002	29.939	29.999	0.003
X21	30.002	29.894	30.002	0.000	30.002	29.831	30.004	0.002	30.002	29.941	30.001	0.001
X22	30.001	29.893	30.001	0.000	30.001	29.831	30.004	0.003	30.001	29.939	29.999	0.002
X23	30.002	29.893	30.001	0.001	30.002	29.828	30.001	0.001	30.002	29.942	30.002	0.000
X24	30.000	29.893	30.001	0.001	30.000	29.829	30.002	0.002	30.000	29.942	30.002	0.002
X25	30.001	29.895	30.003	0.002	30.001	29.828	30.001	0.000	30.001	29.941	30.001	0.000
X26	30.002	29.892	30.000	0.002	30.002	29.827	30.000	0.002	30.002	29.941	30.001	0.001
X27	30.001	29.891	29.999	0.002	30.001	29.830	30.003	0.002	30.001	29.942	30.002	0.001
X28	30.002	29.894	30.002	0.000	30.002	29.827	30.000	0.002	30.002	29.942	30.002	0.000
X29	30.001	29.892	30.000	0.001	30.001	29.830	30.003	0.002	30.001	29.939	29.999	0.002
X30	30.001	29.892	30.000	0.001	30.001	29.828	30.001	0.000	30.001	29.943	30.003	0.002
Stability	0.002	0.003			0.002	0.003			0.002	0.004		
Maximum different temperature				0.004				0.003				0.006

ตารางภาคผนวกที่ 3 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 30 °C ระยะจุ่ม 100 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			
X1	30.024	29.929	30.022	0.002	30.024	29.846	30.023	0.001	30.024	29.958	30.022	0.002	
X2	30.023	29.929	30.022	0.001	30.023	29.847	30.024	0.001	30.023	29.956	30.020	0.003	
X3	30.025	29.929	30.022	0.003	30.025	29.846	30.023	0.002	30.025	29.958	30.022	0.003	
X4	30.023	29.930	30.023	0.000	30.023	29.846	30.023	0.000	30.023	29.959	30.023	0.000	
X5	30.023	29.931	30.024	0.001	30.023	29.847	30.024	0.001	30.023	29.960	30.024	0.001	
X6	30.022	29.930	30.023	0.001	30.022	29.846	30.023	0.001	30.022	29.959	30.023	0.001	
X7	30.023	29.932	30.025	0.002	30.023	29.844	30.021	0.002	30.023	29.957	30.021	0.002	
X8	30.023	29.930	30.023	0.000	30.023	29.848	30.025	0.002	30.023	29.959	30.023	0.000	
X9	30.023	29.931	30.024	0.001	30.023	29.846	30.023	0.000	30.023	29.963	30.027	0.004	
X10	30.022	29.929	30.022	0.000	30.022	29.844	30.021	0.001	30.022	29.959	30.023	0.001	
X11	30.022	29.930	30.023	0.001	30.022	29.846	30.023	0.001	30.022	29.958	30.022	0.000	
X12	30.023	29.932	30.025	0.002	30.023	29.845	30.022	0.001	30.023	29.958	30.022	0.001	
X13	30.022	29.931	30.024	0.002	30.022	29.843	30.020	0.002	30.022	29.960	30.024	0.002	
X14	30.023	29.928	30.021	0.002	30.023	29.844	30.021	0.002	30.023	29.960	30.024	0.001	
X15	30.025	29.929	30.022	0.003	30.025	29.848	30.025	0.000	30.025	29.961	30.025	0.000	
X16	30.025	29.929	30.022	0.003	30.025	29.849	30.026	0.001	30.025	29.961	30.025	0.000	
X17	30.020	29.932	30.025	0.005	30.020	29.848	30.025	0.005	30.020	29.960	30.024	0.004	
X18	30.024	29.929	30.022	0.002	30.024	29.846	30.023	0.001	30.024	29.959	30.023	0.001	
X19	30.022	29.929	30.022	0.000	30.022	29.848	30.025	0.003	30.022	29.960	30.024	0.002	
X20	30.023	29.929	30.022	0.001	30.023	29.848	30.025	0.002	30.023	29.960	30.024	0.001	
X21	30.024	29.931	30.024	0.000	30.024	29.847	30.024	0.000	30.024	29.958	30.022	0.002	
X22	30.022	29.928	30.021	0.001	30.022	29.846	30.023	0.001	30.022	29.960	30.024	0.002	
X23	30.023	29.930	30.023	0.000	30.023	29.847	30.024	0.001	30.023	29.960	30.024	0.001	
X24	30.025	29.929	30.022	0.003	30.025	29.846	30.023	0.002	30.025	29.960	30.024	0.001	
X25	30.022	29.931	30.024	0.002	30.022	29.846	30.023	0.001	30.022	29.960	30.024	0.002	
X26	30.023	29.930	30.023	0.000	30.023	29.847	30.024	0.001	30.023	29.961	30.025	0.002	
X27	30.024	29.932	30.025	0.001	30.024	29.846	30.023	0.001	30.024	29.962	30.026	0.002	
X28	30.024	29.933	30.026	0.002	30.024	29.845	30.022	0.002	30.024	29.960	30.024	0.000	
X29	30.024	29.930	30.023	0.001	30.024	29.848	30.025	0.001	30.024	29.960	30.024	0.000	
X30	30.024	29.931	30.024	0.000	30.024	29.846	30.023	0.001	30.024	29.961	30.025	0.001	
Stability	0.002	0.002			0.002	0.003			0.002	0.004			
Maximum different temperature				0.005					0.005				

ตารางภาคผนวกที่ 4 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 30 °C ระยะจุ่ม 150 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different
No.	R	A	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	R	B	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	R	C	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}
			+				+				+	
X1	30.024	29.939	30.024	0.000	30.024	29.849	30.023	0.001	30.024	29.962	30.023	0.001
X2	30.024	29.938	30.023	0.001	30.024	29.850	30.024	0.000	30.024	29.961	30.022	0.002
X3	30.022	29.939	30.024	0.002	30.022	29.850	30.024	0.002	30.022	29.961	30.022	0.000
X4	30.027	29.939	30.024	0.003	30.027	29.851	30.025	0.002	30.027	29.960	30.021	0.006
X5	30.024	29.939	30.024	0.000	30.024	29.850	30.024	0.000	30.024	29.964	30.025	0.001
X6	30.024	29.940	30.025	0.001	30.024	29.847	30.021	0.003	30.024	29.965	30.026	0.002
X7	30.025	29.939	30.024	0.001	30.025	29.851	30.025	0.000	30.025	29.965	30.026	0.001
X8	30.024	29.939	30.024	0.000	30.024	29.850	30.024	0.000	30.024	29.964	30.025	0.001
X9	30.025	29.939	30.024	0.001	30.025	29.850	30.024	0.001	30.025	29.963	30.024	0.001
X10	30.025	29.939	30.024	0.001	30.025	29.851	30.025	0.000	30.025	29.964	30.025	0.000
X11	30.025	29.940	30.025	0.000	30.025	29.849	30.023	0.002	30.025	29.964	30.025	0.000
X12	30.025	29.938	30.023	0.002	30.025	29.849	30.023	0.002	30.025	29.966	30.027	0.002
X13	30.024	29.938	30.023	0.001	30.024	29.849	30.023	0.001	30.024	29.961	30.022	0.002
X14	30.024	29.939	30.024	0.000	30.024	29.848	30.022	0.002	30.024	29.963	30.024	0.000
X15	30.023	29.938	30.023	0.000	30.023	29.849	30.023	0.000	30.023	29.964	30.025	0.002
X16	30.026	29.939	30.024	0.002	30.026	29.847	30.021	0.005	30.026	29.964	30.025	0.001
X17	30.022	29.939	30.024	0.002	30.022	29.851	30.025	0.003	30.022	29.962	30.023	0.001
X18	30.024	29.939	30.024	0.000	30.024	29.848	30.022	0.002	30.024	29.963	30.024	0.000
X19	30.026	29.938	30.023	0.003	30.026	29.851	30.025	0.001	30.026	29.963	30.024	0.002
X20	30.025	29.939	30.024	0.001	30.025	29.848	30.022	0.003	30.025	29.964	30.025	0.000
X21	30.023	29.938	30.023	0.000	30.023	29.848	30.022	0.001	30.023	29.962	30.023	0.000
X22	30.024	29.941	30.026	0.002	30.024	29.851	30.025	0.001	30.024	29.964	30.025	0.001
X23	30.024	29.939	30.024	0.000	30.024	29.850	30.024	0.000	30.024	29.965	30.026	0.002
X24	30.025	29.938	30.023	0.002	30.025	29.849	30.023	0.002	30.025	29.963	30.024	0.001
X25	30.022	29.940	30.025	0.003	30.022	29.848	30.022	0.000	30.022	29.961	30.022	0.000
X26	30.022	29.938	30.023	0.001	30.022	29.848	30.022	0.000	30.022	29.963	30.024	0.002
X27	30.025	29.939	30.024	0.001	30.025	29.849	30.023	0.002	30.025	29.963	30.024	0.001
X28	30.025	29.941	30.026	0.001	30.025	29.850	30.024	0.001	30.025	29.962	30.023	0.002
X29	30.025	29.940	30.025	0.000	30.025	29.847	30.021	0.004	30.025	29.965	30.026	0.001
X30	30.026	29.940	30.025	0.001	30.026	29.851	30.025	0.001	30.026	29.960	30.021	0.005
Stability	0.003	0.002			0.003	0.002			0.003	0.003		
Maximum different temperature				0.003				0.005				0.006

ตารางภาคผนวกที่ 5 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะจุ่ม 50 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			
X1	89.972	89.856	89.971	0.001	89.972	89.796	89.971	0.001	89.972	89.910	89.970	0.002	
X2	89.972	89.857	89.972	0.000	89.972	89.798	89.973	0.001	89.972	89.915	89.975	0.003	
X3	89.973	89.858	89.973	0.000	89.973	89.797	89.972	0.001	89.973	89.911	89.971	0.002	
X4	89.972	89.856	89.971	0.001	89.972	89.797	89.972	0.000	89.972	89.913	89.973	0.001	
X5	89.973	89.857	89.972	0.001	89.973	89.798	89.973	0.000	89.973	89.912	89.972	0.001	
X6	89.972	89.858	89.973	0.001	89.972	89.797	89.972	0.000	89.972	89.911	89.971	0.001	
X7	89.972	89.856	89.971	0.001	89.972	89.797	89.972	0.000	89.972	89.910	89.970	0.002	
X8	89.971	89.857	89.972	0.001	89.971	89.797	89.972	0.001	89.971	89.911	89.971	0.000	
X9	89.972	89.854	89.969	0.003	89.972	89.797	89.972	0.000	89.972	89.909	89.969	0.003	
X10	89.971	89.857	89.972	0.001	89.971	89.795	89.970	0.001	89.971	89.913	89.973	0.002	
X11	89.971	89.856	89.971	0.000	89.971	89.796	89.971	0.000	89.971	89.914	89.974	0.003	
X12	89.970	89.856	89.971	0.001	89.970	89.797	89.972	0.002	89.970	89.910	89.970	0.000	
X13	89.971	89.857	89.972	0.001	89.971	89.796	89.971	0.000	89.971	89.912	89.972	0.001	
X14	89.971	89.855	89.970	0.001	89.971	89.795	89.970	0.001	89.971	89.912	89.972	0.001	
X15	89.971	89.855	89.970	0.001	89.971	89.798	89.973	0.002	89.971	89.910	89.970	0.001	
X16	89.970	89.856	89.971	0.001	89.970	89.796	89.971	0.001	89.970	89.908	89.968	0.002	
X17	89.970	89.854	89.969	0.001	89.970	89.795	89.970	0.000	89.970	89.912	89.972	0.002	
X18	89.970	89.853	89.968	0.002	89.970	89.796	89.971	0.001	89.970	89.908	89.968	0.002	
X19	89.971	89.854	89.969	0.002	89.971	89.796	89.971	0.000	89.971	89.911	89.971	0.000	
X20	89.973	89.857	89.972	0.001	89.973	89.799	89.974	0.001	89.973	89.909	89.969	0.004	
X21	89.976	89.858	89.973	0.003	89.976	89.804	89.979	0.003	89.976	89.911	89.971	0.005	
X22	89.971	89.857	89.972	0.001	89.971	89.802	89.977	0.006	89.971	89.912	89.972	0.001	
X23	89.971	89.856	89.971	0.000	89.971	89.801	89.976	0.005	89.971	89.912	89.972	0.001	
X24	89.974	89.857	89.972	0.002	89.974	89.801	89.976	0.002	89.974	89.914	89.974	0.000	
X25	89.974	89.858	89.973	0.001	89.974	89.802	89.977	0.003	89.974	89.912	89.972	0.002	
X26	89.974	89.858	89.973	0.001	89.974	89.801	89.976	0.002	89.974	89.913	89.973	0.001	
X27	89.972	89.858	89.973	0.001	89.972	89.802	89.977	0.005	89.972	89.914	89.974	0.002	
X28	89.975	89.859	89.974	0.001	89.975	89.801	89.976	0.001	89.975	89.912	89.972	0.003	
X29	89.973	89.859	89.974	0.001	89.973	89.803	89.978	0.005	89.973	89.913	89.973	0.000	
X30	89.974	89.859	89.974	0.000	89.974	89.803	89.978	0.004	89.974	89.913	89.973	0.001	
Stability	0.003	0.003			0.003	0.005			0.003	0.004			
Maximum different temperature				0.003					0.006				0.005

ตารางภาคผนวกที่ 6 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะจุ่ม 100 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{uut}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{uut}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{uut}	Different	
No.	R	A	+		R	B	+		R	C	+		
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{uut}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{uut}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{uut}			
X1	89.981	89.891	89.981	0.000	89.981	89.791	89.979	0.002	89.981	89.914	89.981	0.000	
X2	89.981	89.891	89.981	0.000	89.981	89.794	89.982	0.001	89.981	89.918	89.985	0.004	
X3	89.981	89.892	89.982	0.001	89.981	89.793	89.981	0.000	89.981	89.917	89.984	0.003	
X4	89.980	89.891	89.981	0.001	89.980	89.794	89.982	0.002	89.980	89.914	89.981	0.001	
X5	89.978	89.890	89.980	0.002	89.978	89.794	89.982	0.004	89.978	89.911	89.978	0.000	
X6	89.979	89.890	89.980	0.001	89.979	89.791	89.979	0.000	89.979	89.912	89.979	0.000	
X7	89.981	89.889	89.979	0.002	89.981	89.791	89.979	0.002	89.981	89.913	89.980	0.001	
X8	89.978	89.890	89.980	0.002	89.978	89.791	89.979	0.001	89.978	89.913	89.980	0.002	
X9	89.979	89.888	89.978	0.001	89.979	89.791	89.979	0.000	89.979	89.912	89.979	0.000	
X10	89.978	89.887	89.977	0.001	89.978	89.791	89.979	0.001	89.978	89.910	89.977	0.001	
X11	89.979	89.890	89.980	0.001	89.979	89.791	89.979	0.000	89.979	89.912	89.979	0.000	
X12	89.977	89.889	89.979	0.002	89.977	89.790	89.978	0.001	89.977	89.914	89.981	0.004	
X13	89.980	89.890	89.980	0.000	89.980	89.790	89.978	0.002	89.980	89.911	89.978	0.002	
X14	89.980	89.890	89.980	0.000	89.980	89.791	89.979	0.001	89.980	89.915	89.982	0.002	
X15	89.979	89.889	89.979	0.000	89.979	89.791	89.979	0.000	89.979	89.913	89.980	0.001	
X16	89.979	89.889	89.979	0.000	89.979	89.793	89.981	0.002	89.979	89.911	89.978	0.001	
X17	89.980	89.891	89.981	0.001	89.980	89.792	89.980	0.000	89.980	89.915	89.982	0.002	
X18	89.979	89.889	89.979	0.000	89.979	89.792	89.980	0.001	89.979	89.913	89.980	0.001	
X19	89.979	89.891	89.981	0.002	89.979	89.791	89.979	0.000	89.979	89.911	89.978	0.001	
X20	89.982	89.888	89.978	0.004	89.982	89.791	89.979	0.003	89.982	89.912	89.979	0.003	
X21	89.978	89.889	89.979	0.001	89.978	89.792	89.980	0.002	89.978	89.915	89.982	0.004	
X22	89.980	89.889	89.979	0.001	89.980	89.790	89.978	0.002	89.980	89.914	89.981	0.001	
X23	89.979	89.890	89.980	0.001	89.979	89.793	89.981	0.002	89.979	89.912	89.979	0.000	
X24	89.982	89.890	89.980	0.002	89.982	89.794	89.982	0.000	89.982	89.914	89.981	0.001	
X25	89.981	89.890	89.980	0.001	89.981	89.792	89.980	0.001	89.981	89.912	89.979	0.002	
X26	89.979	89.890	89.980	0.001	89.979	89.792	89.980	0.001	89.979	89.912	89.979	0.000	
X27	89.979	89.891	89.981	0.002	89.979	89.791	89.979	0.000	89.979	89.916	89.983	0.004	
X28	89.979	89.890	89.980	0.001	89.979	89.790	89.978	0.001	89.979	89.913	89.980	0.001	
X29	89.980	89.890	89.980	0.000	89.980	89.790	89.978	0.002	89.980	89.915	89.982	0.002	
X30	89.979	89.890	89.980	0.001	89.979	89.790	89.978	0.001	89.979	89.914	89.981	0.002	
Stability	0.002	0.002			0.002	0.002			0.002	0.004			
Maximum different temperature				0.004					0.004				0.004

ตารางภาคผนวกที่ 7 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 90 °C ระยะจุ่ม 150 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			+	Sensor ^{ref}			Sensor ^{UUT}	+			Sensor ^{ref}
X1	90.004	89.914	90.007	0.003	90.004	89.816	90.003	0.001	90.004	89.937	90.004	0.000	
X2	90.004	89.910	90.003	0.001	90.004	89.816	90.003	0.001	90.004	89.939	90.006	0.002	
X3	90.004	89.910	90.003	0.001	90.004	89.816	90.003	0.001	90.004	89.938	90.005	0.001	
X4	90.003	89.910	90.003	0.000	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.937	90.004	0.001	
X5	90.005	89.912	90.005	0.000	90.005	89.818	90.005	0.000	90.005	89.939	90.006	0.001	
X6	90.004	89.910	90.003	0.001	90.004	89.817	90.004	0.000	90.004	89.937	90.004	0.000	
X7	90.004	89.912	90.005	0.001	90.004	89.816	90.003	0.001	90.004	89.936	90.003	0.001	
X8	90.004	89.910	90.003	0.001	90.004	89.818	90.005	0.001	90.004	89.936	90.003	0.001	
X9	90.005	89.912	90.005	0.000	90.005	89.818	90.005	0.000	90.005	89.936	90.003	0.002	
X10	90.004	89.909	90.002	0.002	90.004	89.816	90.003	0.001	90.004	89.936	90.003	0.001	
X11	90.005	89.912	90.005	0.000	90.005	89.815	90.002	0.003	90.005	89.938	90.005	0.000	
X12	90.005	89.911	90.004	0.001	90.005	89.815	90.002	0.003	90.005	89.937	90.004	0.001	
X13	90.003	89.910	90.003	0.000	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.936	90.003	0.000	
X14	90.003	89.910	90.003	0.000	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.936	90.003	0.000	
X15	90.003	89.910	90.003	0.000	90.003	89.814	90.001	0.002	90.003	89.936	90.003	0.000	
X16	90.003	89.910	90.003	0.000	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.937	90.004	0.001	
X17	90.002	89.911	90.004	0.002	90.002	89.815	90.002	0.000	90.002	89.935	90.002	0.000	
X18	90.005	89.911	90.004	0.001	90.005	89.816	90.003	0.002	90.005	89.936	90.003	0.002	
X19	90.003	89.911	90.004	0.001	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.937	90.004	0.001	
X20	90.002	89.908	90.001	0.001	90.002	89.814	90.001	0.001	90.002	89.937	90.004	0.002	
X21	90.003	89.910	90.003	0.000	90.003	89.814	90.001	0.002	90.003	89.934	90.001	0.002	
X22	90.002	89.911	90.004	0.002	90.002	89.814	90.001	0.001	90.002	89.935	90.002	0.000	
X23	90.005	89.910	90.003	0.002	90.005	89.815	90.002	0.003	90.005	89.937	90.004	0.001	
X24	90.002	89.910	90.003	0.001	90.002	89.815	90.002	0.000	90.002	89.936	90.003	0.001	
X25	90.002	89.910	90.003	0.001	90.002	89.816	90.003	0.001	90.002	89.938	90.005	0.003	
X26	90.005	89.912	90.005	0.000	90.005	89.815	90.002	0.003	90.005	89.938	90.005	0.000	
X27	90.003	89.913	90.006	0.003	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.936	90.003	0.000	
X28	90.003	89.911	90.004	0.001	90.003	89.816	90.003	0.000	90.003	89.938	90.005	0.002	
X29	90.002	89.912	90.005	0.003	90.002	89.814	90.001	0.001	90.002	89.935	90.002	0.000	
X30	90.004	89.910	90.003	0.001	90.004	89.815	90.002	0.002	90.004	89.936	90.003	0.001	
Stability	0.002	0.003			0.002	0.002			0.002	0.002			
Maximum different temperature				0.003					0.003				0.003

ตารางภาคผนวกที่ 8 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะจุ่ม 50 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT} +	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT} +	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT} +	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			
X1	139.749	139.644	139.750	0.001	139.749	139.496	139.743	0.006	139.749	139.661	139.745	0.004	
X2	139.749	139.641	139.747	0.002	139.749	139.502	139.749	0.000	139.749	139.667	139.751	0.002	
X3	139.751	139.641	139.747	0.004	139.751	139.505	139.752	0.001	139.751	139.667	139.751	0.000	
X4	139.749	139.644	139.750	0.001	139.749	139.505	139.752	0.003	139.749	139.661	139.745	0.004	
X5	139.749	139.641	139.747	0.002	139.749	139.502	139.749	0.000	139.749	139.664	139.748	0.001	
X6	139.749	139.650	139.756	0.007	139.749	139.499	139.746	0.003	139.749	139.661	139.745	0.004	
X7	139.749	139.641	139.747	0.002	139.749	139.502	139.749	0.000	139.749	139.670	139.754	0.005	
X8	139.751	139.647	139.753	0.002	139.751	139.505	139.752	0.001	139.751	139.667	139.751	0.000	
X9	139.751	139.638	139.744	0.007	139.751	139.505	139.752	0.001	139.751	139.664	139.748	0.003	
X10	139.746	139.641	139.747	0.001	139.746	139.499	139.746	0.000	139.746	139.664	139.748	0.002	
X11	139.749	139.641	139.747	0.002	139.749	139.505	139.752	0.003	139.749	139.667	139.751	0.002	
X12	139.751	139.638	139.744	0.007	139.751	139.502	139.749	0.002	139.751	139.664	139.748	0.003	
X13	139.746	139.644	139.750	0.004	139.746	139.496	139.743	0.003	139.746	139.656	139.740	0.006	
X14	139.746	139.638	139.744	0.002	139.746	139.496	139.743	0.003	139.746	139.664	139.748	0.002	
X15	139.749	139.638	139.744	0.005	139.749	139.499	139.746	0.003	139.749	139.661	139.745	0.004	
X16	139.740	139.641	139.747	0.007	139.740	139.502	139.749	0.009	139.740	139.661	139.745	0.005	
X17	139.746	139.641	139.747	0.001	139.746	139.493	139.740	0.006	139.746	139.664	139.748	0.002	
X18	139.746	139.638	139.744	0.002	139.746	139.502	139.749	0.003	139.746	139.661	139.745	0.001	
X19	139.743	139.635	139.741	0.002	139.743	139.502	139.749	0.006	139.743	139.661	139.745	0.002	
X20	139.746	139.635	139.741	0.005	139.746	139.496	139.743	0.003	139.746	139.653	139.737	0.009	
X21	139.743	139.635	139.741	0.002	139.743	139.499	139.746	0.003	139.743	139.656	139.740	0.003	
X22	139.749	139.635	139.741	0.008	139.749	139.496	139.743	0.006	139.749	139.659	139.743	0.006	
X23	139.743	139.635	139.741	0.002	139.743	139.499	139.746	0.003	139.743	139.664	139.748	0.005	
X24	139.745	139.635	139.741	0.004	139.745	139.499	139.746	0.001	139.745	139.659	139.743	0.002	
X25	139.749	139.644	139.750	0.001	139.749	139.496	139.743	0.006	139.749	139.661	139.745	0.004	
X26	139.746	139.638	139.744	0.002	139.746	139.496	139.743	0.003	139.746	139.656	139.740	0.006	
X27	139.746	139.641	139.747	0.001	139.746	139.496	139.743	0.003	139.746	139.659	139.743	0.003	
X28	139.746	139.638	139.744	0.002	139.746	139.496	139.743	0.003	139.746	139.664	139.748	0.002	
X29	139.743	139.632	139.738	0.005	139.743	139.496	139.743	0.000	139.743	139.656	139.740	0.003	
X30	139.740	139.638	139.744	0.004	139.740	139.493	139.740	0.000	139.740	139.653	139.737	0.003	
Stability	0.005	0.009			0.005	0.006			0.005	0.008			
Maximum different temperature				0.008					0.009				0.009

ตารางภาคผนวกที่ 9 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะจุ่ม 100 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT} +	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT} +	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT} +	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			
X1	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.598	139.687	0.005	
X2	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.589	139.678	0.004	
X3	139.685	139.577	139.686	0.001	139.685	139.423	139.674	0.011	139.685	139.598	139.687	0.002	
X4	139.682	139.569	139.678	0.004	139.682	139.432	139.683	0.001	139.682	139.598	139.687	0.005	
X5	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.432	139.683	0.001	139.682	139.592	139.681	0.001	
X6	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.435	139.686	0.004	139.682	139.592	139.681	0.001	
X7	139.685	139.572	139.681	0.004	139.685	139.432	139.683	0.002	139.685	139.589	139.678	0.007	
X8	139.682	139.574	139.683	0.001	139.682	139.435	139.686	0.004	139.682	139.589	139.678	0.004	
X9	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.429	139.680	0.005	139.685	139.598	139.687	0.002	
X10	139.676	139.572	139.681	0.005	139.676	139.432	139.683	0.007	139.676	139.589	139.678	0.002	
X11	139.682	139.569	139.678	0.004	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.595	139.684	0.002	
X12	139.679	139.572	139.681	0.002	139.679	139.429	139.680	0.001	139.679	139.592	139.681	0.002	
X13	139.679	139.572	139.681	0.002	139.679	139.429	139.680	0.001	139.679	139.595	139.684	0.005	
X14	139.679	139.574	139.683	0.004	139.679	139.432	139.683	0.004	139.679	139.592	139.681	0.002	
X15	139.682	139.574	139.683	0.001	139.682	139.432	139.683	0.001	139.682	139.589	139.678	0.004	
X16	139.679	139.569	139.678	0.001	139.679	139.426	139.677	0.002	139.679	139.595	139.684	0.005	
X17	139.682	139.569	139.678	0.004	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.586	139.675	0.007	
X18	139.679	139.569	139.678	0.001	139.679	139.429	139.680	0.001	139.679	139.595	139.684	0.005	
X19	139.679	139.569	139.678	0.001	139.679	139.432	139.683	0.004	139.679	139.592	139.681	0.002	
X20	139.685	139.569	139.678	0.007	139.685	139.435	139.686	0.001	139.685	139.592	139.681	0.004	
X21	139.679	139.574	139.683	0.004	139.679	139.435	139.686	0.007	139.679	139.592	139.681	0.002	
X22	139.679	139.572	139.681	0.002	139.679	139.432	139.683	0.004	139.679	139.592	139.681	0.002	
X23	139.682	139.574	139.683	0.001	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.595	139.684	0.002	
X24	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.429	139.680	0.005	139.685	139.598	139.687	0.002	
X25	139.682	139.577	139.686	0.004	139.682	139.426	139.677	0.005	139.682	139.598	139.687	0.005	
X26	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.432	139.683	0.002	139.685	139.592	139.681	0.004	
X27	139.685	139.577	139.686	0.001	139.685	139.435	139.686	0.001	139.685	139.592	139.681	0.004	
X28	139.682	139.577	139.686	0.004	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.592	139.681	0.001	
X29	139.676	139.574	139.683	0.007	139.676	139.426	139.677	0.001	139.676	139.589	139.678	0.002	
X30	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.435	139.686	0.001	139.685	139.592	139.681	0.004	
Stability	0.005	0.004			0.005	0.006			0.005	0.006			
Maximum different temperature				0.007					0.011				0.007

ตารางภาคผนวกที่ 10 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 140 °C ระยะจุ่ม 150 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		
X1	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.598	139.687	0.005	
X2	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.589	139.678	0.004	
X3	139.685	139.577	139.686	0.001	139.685	139.423	139.674	0.011	139.685	139.598	139.687	0.002	
X4	139.682	139.569	139.678	0.004	139.682	139.432	139.683	0.001	139.682	139.598	139.687	0.005	
X5	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.432	139.683	0.001	139.682	139.592	139.681	0.001	
X6	139.682	139.572	139.681	0.001	139.682	139.435	139.686	0.004	139.682	139.592	139.681	0.001	
X7	139.685	139.572	139.681	0.004	139.685	139.432	139.683	0.002	139.685	139.589	139.678	0.007	
X8	139.682	139.574	139.683	0.001	139.682	139.435	139.686	0.004	139.682	139.589	139.678	0.004	
X9	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.429	139.680	0.005	139.685	139.598	139.687	0.002	
X10	139.676	139.572	139.681	0.005	139.676	139.432	139.683	0.007	139.676	139.589	139.678	0.002	
X11	139.682	139.569	139.678	0.004	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.595	139.684	0.002	
X12	139.679	139.572	139.681	0.002	139.679	139.429	139.680	0.001	139.679	139.592	139.681	0.002	
X13	139.679	139.572	139.681	0.002	139.679	139.429	139.680	0.001	139.679	139.595	139.684	0.005	
X14	139.679	139.574	139.683	0.004	139.679	139.432	139.683	0.004	139.679	139.592	139.681	0.002	
X15	139.682	139.574	139.683	0.001	139.682	139.432	139.683	0.001	139.682	139.589	139.678	0.004	
X16	139.679	139.569	139.678	0.001	139.679	139.426	139.677	0.002	139.679	139.595	139.684	0.005	
X17	139.682	139.569	139.678	0.004	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.586	139.675	0.007	
X18	139.679	139.569	139.678	0.001	139.679	139.429	139.680	0.001	139.679	139.595	139.684	0.005	
X19	139.679	139.569	139.678	0.001	139.679	139.432	139.683	0.004	139.679	139.592	139.681	0.002	
X20	139.685	139.569	139.678	0.007	139.685	139.435	139.686	0.001	139.685	139.592	139.681	0.004	
X21	139.679	139.574	139.683	0.004	139.679	139.435	139.686	0.007	139.679	139.601	139.690	0.011	
X22	139.679	139.572	139.681	0.002	139.679	139.432	139.683	0.004	139.679	139.592	139.681	0.002	
X23	139.682	139.574	139.683	0.001	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.595	139.684	0.002	
X24	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.429	139.680	0.005	139.685	139.598	139.687	0.002	
X25	139.682	139.577	139.686	0.004	139.682	139.426	139.677	0.005	139.682	139.598	139.687	0.005	
X26	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.432	139.683	0.002	139.685	139.592	139.681	0.004	
X27	139.685	139.577	139.686	0.001	139.685	139.435	139.686	0.001	139.685	139.592	139.681	0.004	
X28	139.682	139.577	139.686	0.004	139.682	139.429	139.680	0.002	139.682	139.592	139.681	0.001	
X29	139.676	139.574	139.683	0.007	139.676	139.426	139.677	0.001	139.676	139.589	139.678	0.002	
X30	139.685	139.574	139.683	0.002	139.685	139.435	139.686	0.001	139.685	139.592	139.681	0.004	
Stability	0.005	0.004			0.005	0.006			0.005	0.007			
Maximum different temperature				0.007					0.011				0.011

ตารางภาคผนวกที่ 11 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะจุ่ม 50 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different
No.	R	A			R	B			R	C		
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+	
X1	199.682	199.572	199.681	0.001	199.682	199.429	199.680	0.002	199.682	199.598	199.687	0.005
X2	199.682	199.572	199.681	0.001	199.682	199.429	199.680	0.002	199.682	199.589	199.678	0.004
X3	199.685	199.577	199.686	0.001	199.685	199.423	199.674	0.011	199.685	199.598	199.687	0.002
X4	199.682	199.569	199.678	0.004	199.682	199.432	199.683	0.001	199.682	199.598	199.687	0.005
X5	199.682	199.572	199.681	0.001	199.682	199.432	199.683	0.001	199.682	199.592	199.681	0.001
X6	199.682	199.572	199.681	0.001	199.682	199.435	199.686	0.004	199.682	199.592	199.681	0.001
X7	199.685	199.572	199.681	0.004	199.685	199.432	199.683	0.002	199.685	199.589	199.678	0.007
X8	199.682	199.574	199.683	0.001	199.682	199.435	199.686	0.004	199.682	199.589	199.678	0.004
X9	199.685	199.574	199.683	0.002	199.685	199.429	199.680	0.005	199.685	199.598	199.687	0.002
X10	199.676	199.572	199.681	0.005	199.676	199.432	199.683	0.007	199.676	199.589	199.678	0.002
X11	199.682	199.569	199.678	0.004	199.682	199.429	199.680	0.002	199.682	199.595	199.684	0.002
X12	199.679	199.572	199.681	0.002	199.679	199.429	199.680	0.001	199.679	199.592	199.681	0.002
X13	199.679	199.572	199.681	0.002	199.679	199.429	199.680	0.001	199.679	199.595	199.684	0.005
X14	199.679	199.574	199.683	0.004	199.679	199.432	199.683	0.004	199.679	199.592	199.681	0.002
X15	199.682	199.574	199.683	0.001	199.682	199.432	199.683	0.001	199.682	199.589	199.678	0.004
X16	199.679	199.569	199.678	0.001	199.679	199.426	199.677	0.002	199.679	199.595	199.684	0.005
X17	199.682	199.569	199.678	0.004	199.682	199.429	199.680	0.002	199.682	199.586	199.675	0.007
X18	199.679	199.569	199.678	0.001	199.679	199.429	199.680	0.001	199.679	199.595	199.684	0.005
X19	199.679	199.569	199.678	0.001	199.679	199.432	199.683	0.004	199.679	199.592	199.681	0.002
X20	199.685	199.569	199.678	0.007	199.685	199.435	199.686	0.001	199.685	199.592	199.681	0.004
X21	199.679	199.574	199.683	0.004	199.679	199.435	199.686	0.007	199.679	199.601	199.690	0.011
X22	199.679	199.572	199.681	0.002	199.679	199.432	199.683	0.004	199.679	199.592	199.681	0.002
X23	199.682	199.574	199.683	0.001	199.682	199.429	199.680	0.002	199.682	199.595	199.684	0.002
X24	199.685	199.574	199.683	0.002	199.685	199.429	199.680	0.005	199.685	199.598	199.687	0.002
X25	199.682	199.577	199.686	0.004	199.682	199.426	199.677	0.005	199.682	199.598	199.687	0.005
X26	199.685	199.574	199.683	0.002	199.685	199.432	199.683	0.002	199.685	199.592	199.681	0.004
X27	199.685	199.577	199.686	0.001	199.685	199.435	199.686	0.001	199.685	199.592	199.681	0.004
X28	199.682	199.577	199.686	0.004	199.682	199.429	199.680	0.002	199.682	199.592	199.681	0.001
X29	199.676	199.574	199.683	0.007	199.676	199.426	199.677	0.001	199.676	199.589	199.678	0.002
X30	199.685	199.574	199.683	0.002	199.685	199.435	199.686	0.001	199.685	199.592	199.681	0.004
Stability	0.005	0.004			0.005	0.006			0.005	0.007		
Maximum different temperature				0.007				0.011				0.011

ตารางภาคผนวกที่ 12 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะจุ่ม 100 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{uur}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{uur}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{uur}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{uur}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{uur}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{uur}	+		
X1	199.749	199.644	199.750	0.001	199.749	199.496	199.743	0.006	199.749	199.661	199.745	0.004	
X2	199.749	199.641	199.747	0.002	199.749	199.502	199.749	0.000	199.749	199.667	199.751	0.002	
X3	199.751	199.641	199.747	0.004	199.751	199.505	199.752	0.001	199.751	199.667	199.751	0.000	
X4	199.749	199.644	199.750	0.001	199.749	199.505	199.752	0.003	199.749	199.661	199.745	0.004	
X5	199.749	199.641	199.747	0.002	199.749	199.502	199.749	0.000	199.749	199.664	199.748	0.001	
X6	199.749	199.650	199.756	0.007	199.749	199.499	199.746	0.003	199.749	199.661	199.745	0.004	
X7	199.749	199.641	199.747	0.002	199.749	199.502	199.749	0.000	199.749	199.670	199.754	0.005	
X8	199.751	199.647	199.753	0.002	199.751	199.505	199.752	0.001	199.751	199.667	199.751	0.000	
X9	199.751	199.638	199.744	0.007	199.751	199.505	199.752	0.001	199.751	199.664	199.748	0.003	
X10	199.746	199.641	199.747	0.001	199.746	199.499	199.746	0.000	199.746	199.664	199.748	0.002	
X11	199.749	199.641	199.747	0.002	199.749	199.505	199.752	0.003	199.749	199.667	199.751	0.002	
X12	199.751	199.638	199.744	0.007	199.751	199.502	199.749	0.002	199.751	199.664	199.748	0.003	
X13	199.746	199.644	199.750	0.004	199.746	199.496	199.743	0.003	199.746	199.656	199.740	0.006	
X14	199.746	199.638	199.744	0.002	199.746	199.496	199.743	0.003	199.746	199.664	199.748	0.002	
X15	199.749	199.638	199.744	0.005	199.749	199.499	199.746	0.003	199.749	199.661	199.745	0.004	
X16	199.740	199.641	199.747	0.007	199.740	199.502	199.749	0.009	199.740	199.661	199.745	0.005	
X17	199.746	199.641	199.747	0.001	199.746	199.493	199.740	0.006	199.746	199.664	199.748	0.002	
X18	199.746	199.638	199.744	0.002	199.746	199.502	199.749	0.003	199.746	199.661	199.745	0.001	
X19	199.743	199.635	199.741	0.002	199.743	199.502	199.749	0.006	199.743	199.661	199.745	0.002	
X20	199.746	199.635	199.741	0.005	199.746	199.496	199.743	0.003	199.746	199.653	199.737	0.009	
X21	199.743	199.635	199.741	0.002	199.743	199.499	199.746	0.003	199.743	199.656	199.740	0.003	
X22	199.749	199.635	199.741	0.008	199.749	199.496	199.743	0.006	199.749	199.659	199.743	0.006	
X23	199.743	199.635	199.741	0.002	199.743	199.499	199.746	0.003	199.743	199.664	199.748	0.005	
X24	199.749	199.635	199.741	0.008	199.749	199.499	199.746	0.003	199.749	199.659	199.743	0.006	
X25	199.749	199.644	199.750	0.001	199.749	199.496	199.743	0.006	199.749	199.661	199.745	0.004	
X26	199.746	199.638	199.744	0.002	199.746	199.496	199.743	0.003	199.746	199.656	199.740	0.006	
X27	199.746	199.641	199.747	0.001	199.746	199.496	199.743	0.003	199.746	199.659	199.743	0.003	
X28	199.746	199.638	199.744	0.002	199.746	199.496	199.743	0.003	199.746	199.664	199.748	0.002	
X29	199.743	199.632	199.738	0.005	199.743	199.496	199.743	0.000	199.743	199.656	199.740	0.003	
X30	199.740	199.638	199.744	0.004	199.740	199.493	199.740	0.000	199.740	199.653	199.737	0.003	
Stability	0.005	0.009			0.005	0.006			0.005	0.008			
Maximum different temperature				0.008					0.009				0.009

ตารางภาคผนวกที่ 13 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะจุ่ม 150 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{uut}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{uut}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{uut}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{uut}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{uut}	+		Sensor ^{ref}	Sensor ^{uut}	+		
X1	199.705	199.592	199.701	0.004	199.705	199.458	199.710	0.005	199.705	199.615	199.700	0.005	
X2	199.702	199.595	199.704	0.002	199.702	199.450	199.702	0.000	199.702	199.615	199.700	0.002	
X3	199.702	199.595	199.704	0.002	199.702	199.455	199.707	0.005	199.702	199.615	199.700	0.002	
X4	199.702	199.592	199.701	0.001	199.702	199.447	199.699	0.003	199.702	199.624	199.709	0.007	
X5	199.702	199.592	199.701	0.001	199.702	199.450	199.702	0.000	199.702	199.618	199.703	0.001	
X6	199.711	199.598	199.707	0.004	199.711	199.450	199.702	0.009	199.711	199.618	199.703	0.008	
X7	199.705	199.595	199.704	0.001	199.705	199.447	199.699	0.006	199.705	199.618	199.703	0.002	
X8	199.702	199.589	199.698	0.004	199.702	199.452	199.704	0.002	199.702	199.615	199.700	0.002	
X9	199.696	199.589	199.698	0.002	199.696	199.447	199.699	0.003	199.696	199.615	199.700	0.004	
X10	199.696	199.589	199.698	0.002	199.696	199.447	199.699	0.003	199.696	199.615	199.700	0.004	
X11	199.699	199.595	199.704	0.005	199.699	199.447	199.699	0.000	199.699	199.612	199.697	0.002	
X12	199.699	199.592	199.701	0.002	199.699	199.452	199.704	0.005	199.699	199.615	199.700	0.001	
X13	199.699	199.595	199.704	0.005	199.699	199.450	199.702	0.003	199.699	199.612	199.697	0.002	
X14	199.699	199.592	199.701	0.002	199.699	199.441	199.693	0.006	199.699	199.615	199.700	0.001	
X15	199.699	199.592	199.701	0.002	199.699	199.450	199.702	0.003	199.699	199.612	199.697	0.002	
X16	199.699	199.595	199.704	0.005	199.699	199.452	199.704	0.005	199.699	199.612	199.697	0.002	
X17	199.696	199.592	199.701	0.005	199.696	199.444	199.696	0.000	199.696	199.609	199.694	0.002	
X18	199.699	199.589	199.698	0.001	199.699	199.452	199.704	0.005	199.699	199.615	199.700	0.001	
X19	199.696	199.589	199.698	0.002	199.696	199.450	199.702	0.006	199.696	199.609	199.694	0.002	
X20	199.696	199.583	199.692	0.004	199.696	199.444	199.696	0.000	199.696	199.609	199.694	0.002	
X21	199.699	199.589	199.698	0.001	199.699	199.447	199.699	0.000	199.699	199.612	199.697	0.002	
X22	199.696	199.586	199.695	0.001	199.696	199.444	199.696	0.000	199.696	199.612	199.697	0.001	
X23	199.699	199.592	199.701	0.002	199.699	199.450	199.702	0.003	199.699	199.615	199.700	0.001	
X24	199.699	199.592	199.701	0.002	199.699	199.450	199.702	0.003	199.699	199.615	199.700	0.001	
X25	199.702	199.592	199.701	0.001	199.702	199.450	199.702	0.000	199.702	199.612	199.697	0.005	
X26	199.699	199.586	199.695	0.004	199.699	199.447	199.699	0.000	199.699	199.615	199.700	0.001	
X27	199.696	199.589	199.698	0.002	199.696	199.444	199.696	0.000	199.696	199.612	199.697	0.001	
X28	199.699	199.589	199.698	0.001	199.699	199.447	199.699	0.000	199.699	199.615	199.700	0.001	
X29	199.696	199.589	199.698	0.002	199.696	199.452	199.704	0.008	199.696	199.618	199.703	0.007	
X30	199.696	199.589	199.698	0.002	199.696	199.441	199.693	0.003	199.696	199.618	199.703	0.007	
Stability	0.008	0.008			0.008	0.008			0.008	0.007			
Maximum different temperature				0.005					0.009				0.008

ตารางภาคผนวกที่ 14 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะจุ่ม 50 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different	
No.	R	A	+ Correction		R	B	+ Correction		R	C	+ Correction		
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			
X1	249.281	249.198	249.285	0.004	249.281	249.284	249.284	0.003	249.255	249.200	249.261	0.006	
X2	249.285	249.196	249.283	0.002	249.285	249.284	249.284	0.001	249.256	249.202	249.263	0.007	
X3	249.285	249.199	249.286	0.001	249.285	249.285	249.285	0.000	249.255	249.203	249.264	0.009	
X4	249.286	249.198	249.285	0.001	249.286	249.284	249.284	0.002	249.260	249.205	249.266	0.006	
X5	249.283	249.199	249.286	0.003	249.283	249.284	249.284	0.001	249.263	249.206	249.267	0.004	
X6	249.283	249.195	249.282	0.001	249.283	249.283	249.283	0.000	249.261	249.204	249.265	0.004	
X7	249.282	249.196	249.283	0.001	249.282	249.285	249.285	0.003	249.261	249.203	249.264	0.003	
X8	249.285	249.195	249.282	0.003	249.285	249.285	249.285	0.000	249.262	249.204	249.265	0.003	
X9	249.283	249.197	249.284	0.001	249.283	249.286	249.286	0.003	249.264	249.209	249.270	0.006	
X10	249.284	249.199	249.286	0.002	249.284	249.284	249.284	0.000	249.262	249.210	249.271	0.009	
X11	249.284	249.195	249.282	0.002	249.284	249.280	249.280	0.004	249.275	249.213	249.274	0.001	
X12	249.281	249.195	249.282	0.001	249.281	249.281	249.281	0.000	249.268	249.212	249.273	0.005	
X13	249.280	249.194	249.281	0.001	249.280	249.280	249.280	0.000	249.267	249.214	249.275	0.008	
X14	249.281	249.198	249.285	0.004	249.281	249.281	249.281	0.000	249.270	249.217	249.278	0.008	
X15	249.283	249.194	249.281	0.002	249.283	249.282	249.282	0.001	249.271	249.218	249.279	0.008	
X16	249.283	249.196	249.283	0.000	249.283	249.282	249.282	0.001	249.273	249.218	249.279	0.006	
X17	249.284	249.195	249.282	0.002	249.284	249.282	249.282	0.002	249.276	249.222	249.283	0.007	
X18	249.280	249.198	249.285	0.005	249.280	249.281	249.281	0.001	249.276	249.223	249.284	0.008	
X19	249.280	249.196	249.283	0.003	249.280	249.282	249.282	0.002	249.278	249.225	249.286	0.008	
X20	249.282	249.193	249.280	0.002	249.282	249.281	249.281	0.001	249.282	249.225	249.286	0.004	
X21	249.282	249.191	249.278	0.004	249.282	249.281	249.281	0.001	249.283	249.226	249.287	0.004	
X22	249.282	249.192	249.279	0.003	249.282	249.282	249.282	0.000	249.283	249.226	249.287	0.004	
X23	249.284	249.193	249.280	0.004	249.284	249.283	249.283	0.001	249.281	249.224	249.285	0.004	
X24	249.285	249.196	249.283	0.002	249.285	249.283	249.283	0.002	249.284	249.227	249.288	0.004	
X25	249.283	249.195	249.282	0.001	249.283	249.282	249.282	0.001	249.282	249.226	249.287	0.005	
X26	249.285	249.196	249.283	0.002	249.285	249.282	249.282	0.003	249.284	249.229	249.290	0.006	
X27	249.284	249.195	249.282	0.002	249.284	249.281	249.281	0.003	249.283	249.229	249.290	0.007	
X28	249.281	249.195	249.282	0.001	249.281	249.281	249.281	0.000	249.282	249.229	249.290	0.008	
X29	249.281	249.193	249.280	0.001	249.281	249.279	249.279	0.002	249.284	249.230	249.291	0.007	
X30	249.283	249.193	249.280	0.003	249.283	249.284	249.284	0.001	249.285	249.229	249.290	0.005	
Stability	0.003	0.004			0.003	0.004			0.015	0.015			
Maximum different temperature				0.005					0.004				0.009

ตารางภาคผนวกที่ 15 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะจุ่ม 100 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT}	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT}	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+ Correction		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+ Correction		Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}	+ Correction		
X1	249.300	249.218	249.299	0.001	249.300	249.282	249.298	0.002	249.208	249.131	249.213	0.005	
X2	249.297	249.218	249.299	0.002	249.297	249.282	249.298	0.001	249.210	249.131	249.213	0.003	
X3	249.298	249.216	249.297	0.001	249.298	249.283	249.299	0.001	249.211	249.134	249.216	0.005	
X4	249.297	249.220	249.301	0.004	249.297	249.284	249.300	0.003	249.214	249.133	249.215	0.001	
X5	249.299	249.219	249.300	0.001	249.299	249.283	249.299	0.000	249.214	249.134	249.216	0.002	
X6	249.299	249.218	249.299	0.000	249.299	249.282	249.298	0.001	249.216	249.135	249.217	0.001	
X7	249.299	249.218	249.299	0.000	249.299	249.283	249.299	0.000	249.218	249.136	249.218	0.000	
X8	249.300	249.218	249.299	0.001	249.300	249.283	249.299	0.001	249.218	249.138	249.220	0.002	
X9	249.300	249.219	249.300	0.000	249.300	249.283	249.299	0.001	249.220	249.137	249.219	0.001	
X10	249.298	249.215	249.296	0.002	249.298	249.282	249.298	0.000	249.220	249.138	249.220	0.000	
X11	249.296	249.218	249.299	0.003	249.296	249.280	249.296	0.000	249.221	249.138	249.220	0.001	
X12	249.297	249.218	249.299	0.002	249.297	249.281	249.297	0.000	249.218	249.139	249.221	0.003	
X13	249.295	249.219	249.300	0.005	249.295	249.280	249.296	0.001	249.221	249.137	249.219	0.002	
X14	249.295	249.215	249.296	0.001	249.295	249.282	249.298	0.003	249.220	249.141	249.223	0.003	
X15	249.298	249.217	249.298	0.000	249.298	249.283	249.299	0.001	249.219	249.142	249.224	0.005	
X16	249.298	249.219	249.300	0.002	249.298	249.283	249.299	0.001	249.220	249.138	249.220	0.000	
X17	249.299	249.219	249.300	0.001	249.299	249.284	249.300	0.001	249.218	249.138	249.220	0.002	
X18	249.296	249.217	249.298	0.002	249.296	249.280	249.296	0.000	249.219	249.144	249.226	0.007	
X19	249.295	249.216	249.297	0.002	249.295	249.280	249.296	0.001	249.222	249.145	249.227	0.005	
X20	249.299	249.211	249.292	0.007	249.299	249.277	249.293	0.006	249.214	249.139	249.221	0.007	
X21	249.293	249.210	249.291	0.002	249.293	249.278	249.294	0.001	249.221	249.139	249.221	0.000	
X22	249.295	249.209	249.290	0.005	249.295	249.276	249.292	0.003	249.222	249.138	249.220	0.002	
X23	249.291	249.208	249.289	0.002	249.291	249.274	249.290	0.001	249.223	249.140	249.222	0.001	
X24	249.287	249.208	249.289	0.002	249.287	249.272	249.288	0.001	249.216	249.141	249.223	0.007	
X25	249.285	249.206	249.287	0.002	249.285	249.271	249.287	0.002	249.217	249.139	249.221	0.004	
X26	249.286	249.206	249.287	0.001	249.286	249.268	249.284	0.002	249.217	249.141	249.223	0.006	
X27	249.285	249.208	249.289	0.004	249.285	249.269	249.285	0.000	249.216	249.142	249.224	0.008	
X28	249.284	249.204	249.285	0.001	249.284	249.268	249.284	0.000	249.216	249.142	249.224	0.008	
X29	249.286	249.203	249.284	0.002	249.286	249.269	249.285	0.001	249.215	249.139	249.221	0.006	
X30	249.284	249.205	249.286	0.002	249.284	249.269	249.285	0.001	249.221	249.143	249.225	0.004	
Stability	0.008	0.008			0.008	0.008			0.008	0.007			
Maximum different temperature				0.007					0.006				0.008

ตารางภาคผนวกที่ 16 ค่า Stability และ Uniformity ที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะจุ่ม 150 mm

Code No.	No.1	No.2	Sensor ^{UUT} + Correction	Different	No.1	No.3	Sensor ^{UUT} + Correction	Different	No.1	No.4	Sensor ^{UUT} + Correction	Different	
No.	R	A			R	B			R	C			
	Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			Sensor ^{ref}	Sensor ^{UUT}			
X1	249.093	249.015	249.091	0.002	249.093	249.079	249.090	0.003	249.133	249.050	249.130	0.003	
X2	249.095	249.019	249.095	0.000	249.095	249.081	249.092	0.003	249.131	249.053	249.133	0.002	
X3	249.094	249.019	249.095	0.001	249.094	249.082	249.093	0.001	249.133	249.048	249.128	0.005	
X4	249.097	249.015	249.091	0.006	249.097	249.084	249.095	0.002	249.133	249.052	249.132	0.001	
X5	249.098	249.020	249.096	0.002	249.098	249.086	249.097	0.001	249.133	249.051	249.131	0.002	
X6	249.099	249.028	249.104	0.005	249.099	249.088	249.099	0.000	249.133	249.058	249.138	0.005	
X7	249.099	249.023	249.099	0.000	249.099	249.089	249.100	0.001	249.132	249.056	249.136	0.004	
X8	249.098	249.026	249.102	0.004	249.098	249.091	249.102	0.004	249.131	249.051	249.131	0.000	
X9	249.101	249.028	249.104	0.003	249.101	249.095	249.106	0.005	249.131	249.047	249.127	0.004	
X10	249.105	249.029	249.105	0.000	249.105	249.095	249.106	0.001	249.128	249.051	249.131	0.003	
X11	249.101	249.022	249.098	0.003	249.101	249.092	249.103	0.002	249.130	249.060	249.140	0.010	
X12	249.105	249.036	249.112	0.007	249.105	249.090	249.101	0.004	249.131	249.054	249.134	0.003	
X13	249.108	249.030	249.106	0.002	249.108	249.092	249.103	0.005	249.128	249.052	249.132	0.004	
X14	249.099	249.032	249.108	0.009	249.099	249.092	249.103	0.004	249.131	249.061	249.141	0.010	
X15	249.104	249.033	249.109	0.005	249.104	249.092	249.103	0.001	249.135	249.056	249.136	0.001	
X16	249.105	249.027	249.103	0.002	249.105	249.092	249.103	0.002	249.132	249.061	249.141	0.009	
X17	249.099	249.026	249.102	0.003	249.099	249.092	249.103	0.004	249.131	249.049	249.129	0.002	
X18	249.102	249.033	249.109	0.007	249.102	249.090	249.101	0.001	249.135	249.059	249.139	0.004	
X19	249.106	249.033	249.109	0.003	249.106	249.090	249.101	0.005	249.135	249.057	249.137	0.002	
X20	249.106	249.028	249.104	0.002	249.106	249.092	249.103	0.003	249.133	249.051	249.131	0.002	
X21	249.106	249.032	249.108	0.002	249.106	249.093	249.104	0.002	249.132	249.049	249.129	0.003	
X22	249.106	249.033	249.109	0.003	249.106	249.092	249.103	0.003	249.131	249.057	249.137	0.006	
X23	249.107	249.035	249.111	0.004	249.107	249.093	249.104	0.003	249.132	249.055	249.135	0.003	
X24	249.105	249.033	249.109	0.004	249.105	249.093	249.104	0.001	249.136	249.057	249.137	0.001	
X25	249.105	249.027	249.103	0.002	249.105	249.089	249.100	0.005	249.139	249.064	249.144	0.005	
X26	249.105	249.036	249.112	0.007	249.105	249.090	249.101	0.004	249.143	249.062	249.142	0.001	
X27	249.106	249.028	249.104	0.002	249.106	249.091	249.102	0.004	249.141	249.067	249.147	0.006	
X28	249.104	249.029	249.105	0.001	249.104	249.087	249.098	0.006	249.139	249.063	249.143	0.004	
X29	249.101	249.024	249.100	0.001	249.101	249.089	249.100	0.001	249.142	249.062	249.142	0.000	
X30	249.101	249.024	249.100	0.001	249.101	249.086	249.097	0.004	249.142	249.064	249.144	0.002	
Stability	0.008	0.011			0.008	0.008			0.008	0.010			
Maximum different temperature				0.009					0.006				0.010



ภาคผนวก ข

ภาพขั้นตอนการปฏิบัติงาน



รูปภาคผนวกที่ 1 อ่างควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ AMETEK รุ่น JOFRA RTC-250A



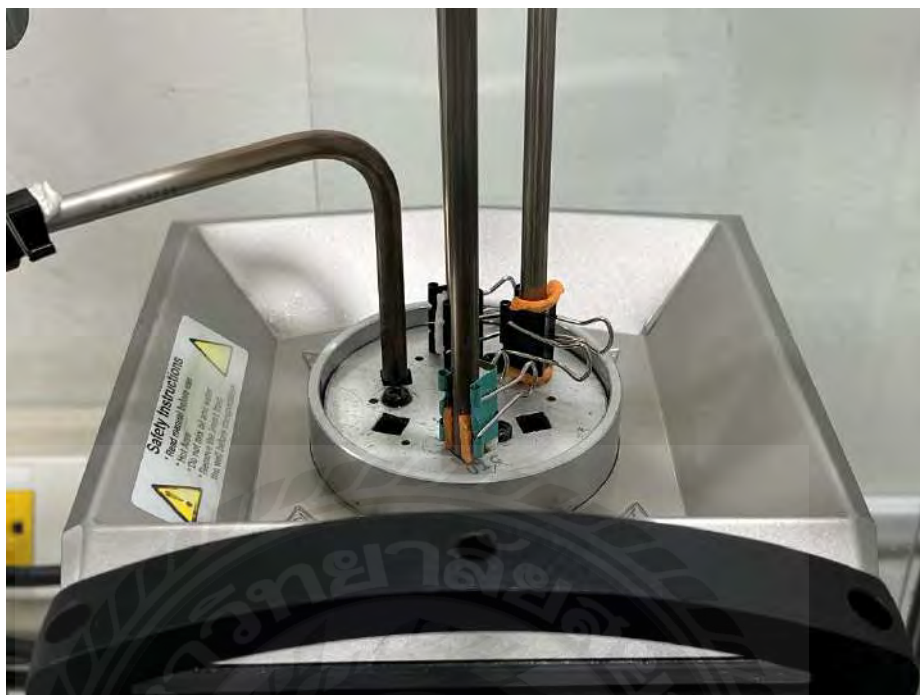
รูปภาคผนวกที่ 2 ภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิ



รูปภาคผนวกที่ 3 ชิลิโคนอยล์ที่ใช้เป็นตัวกลางในการนำอนุหุมิ



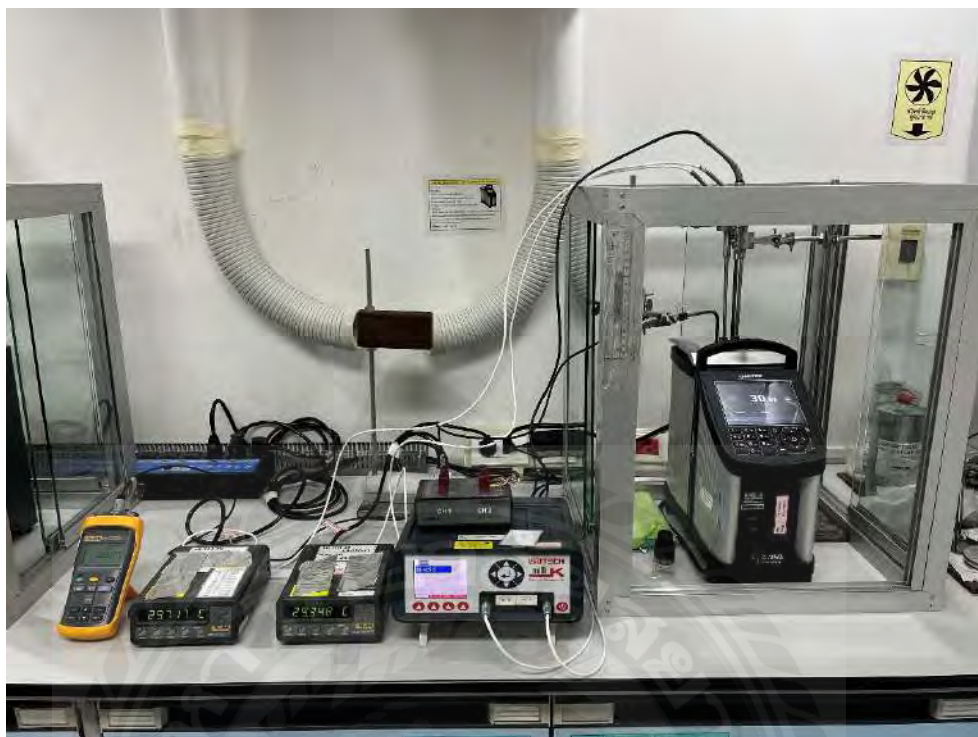
รูปภาคผนวกที่ 4 วัดระยะจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ 15 cm ลงอ่างควบคุมอุณหภูมิ



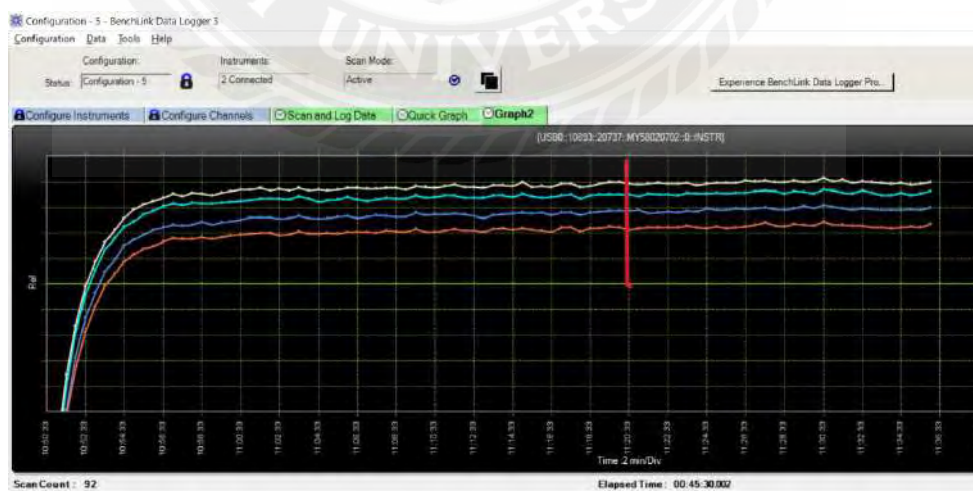
รูปภาคผนวกที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้อ่านอุณหภูมิ



รูปภาคผนวกที่ 6 ค่าที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน



รูปภาคผนวกที่ 7 ภาพรวมการทดสอบอย่างรอบเทียบควบคุมอุณหภูมิ



รูปภาคผนวกที่ 8 กราฟแสดงการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State)



ภาคผนวก ค

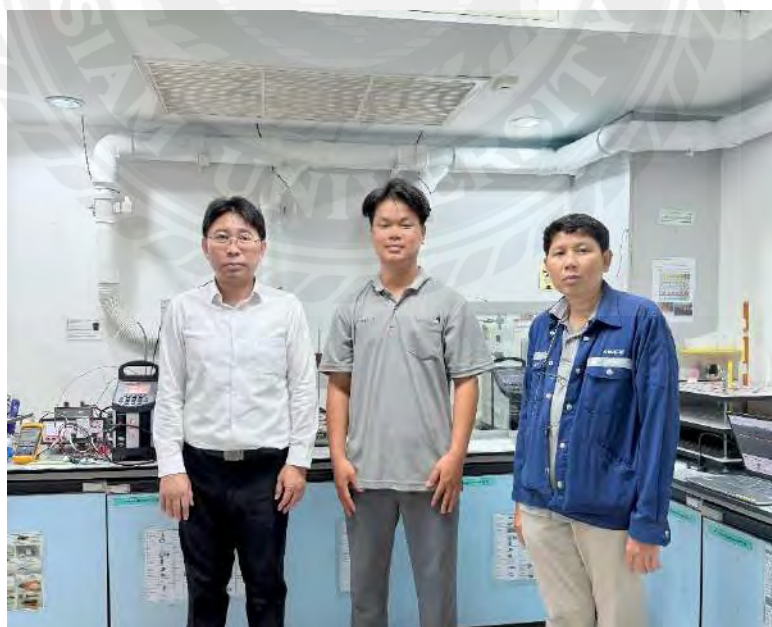
ภาพงานนิเทศงานของอาจารย์ที่ปรึกษา

ภาคผนวก ค

ภาพงานนิเทศงานของอาจารย์ที่ปรึกษา



รูปภาคผนวกที่ 9 บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์ และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด
(มหาชน)



รูปภาคผนวกที่ 10 ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ

ประวัติผู้จัดทำ



ชื่อ-นามสกุล	นายนันทชัย บุตคุณ
รหัสนักศึกษา	6523100003
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ที่อยู่	3 ม.4 ต.โคกสว่าง อ.ปลาปาก จ.นครพนม 48160
อีเมล	Nantachai.but@siam.edu
เบอร์	061-268-1631
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนต้น : โรงเรียนปลาปากวิทยา มัธยมศึกษาตอนปลาย : โรงเรียนนครพนมวิทยาคม หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) : วิทยาลัยเทคโนโลยียานยนต์ ปริญญาตรี : มหาวิทยาลัยสยาม



https://drive.google.com/drive/folders/1--NyH0_B9Ms62ME-nxrZLTGVSKIGOSgC?usp=drive_link

รายงานการปฏิบัติงานสหกิจศึกษา

การตรวจสอบอย่างรอบเทียบควบคุมอุณหภูมิ
Validation of Liquid Bath Calibrators

โดย

นาย นันทชัย บุตคุณ รหัส 6523100003

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา 151-495 สหกิจศึกษา

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

ภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2567