ระบบสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

นายอรรถพล ยิ้มสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-897-7

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 ? พ.ย. 2546

AN AUTOMATIC TEMPERATURE CALIBRATION SYSTEM

Mr. Attapon Yimsakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 1999

ISBN 974-333-897-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ
โดย	นายอรรถพล ยิ้มสกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.กฤษดา วิศวธีรานนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

_____ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____ ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เตชนครินทร์)

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์กฤษดา วิศวธีรานนท์)

_____ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

_____ กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อรรถพล ยิ้มสกุล : ระบบสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ
(An Automatic Temperature Calibration System)
อ. ที่ปรึกษา : รศ.กฤษดา วิศวธีรานนท์, 74 หน้า. ISBN 971-333-897-7

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการพัฒนาระบบสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ ระบบนี้มีคอมพิวเตอร์ควบคุมแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ อ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง เครื่องวัดอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ คอมพิวเตอร์จะอ่านค่าการวัดเป็นข้อมูลตามขั้นตอนการสอบเทียบมาตรฐานและคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจนถึงการออกใบรับรอง ระบบการสอบเทียบอัตโนมัตินี้สามารถทำงานได้ทั้งแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบและกึ่งอัตโนมัติ สามารถสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้พร้อมกันถึง 7 ชุดการสอบเทียบอุณหภูมิทำได้ถูกต้องตามมาตรฐาน เพิ่มความน่าเชื่อถือให้แก่ระบบ ลดเวลาการสอบเทียบและลดแรงงานที่ใช้ในการสอบเทียบลงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ATTAPON YIMSAKUL: AN AUTOMATIC TEMPERATURE CALIBRATION SYSTEM.
THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. KRISADA VISAVATEERANON.
74 pp. ISBN 971-333-897-7

This thesis presents the development of an automatic temperature calibration system using computer as the main controller of the system. Computer will automatically set the temperature at heat source and readout the temperature from the reference thermometer and the unit under test, then calculate the uncertainty of the calibration and printout calibration's certificate. The system can operate in fully automatic and semi automatic modes by following the standard calibration procedure. This system increases the accuracy of the calibration and substantially reduces time and labor in the calibration process.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.กฤษดา วิศวธีรานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่างๆ รวมถึงความเอาใจใส่ดูแลเป็นอย่างดี และบุคลากรของสถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) ซึ่งเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบของพระคุณบิดามารดาของข้าพเจ้า และพี่ๆ รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน รวมถึงกำลังใจที่ให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญภาพ ..... ฌ
สารบัญตาราง ..... ญ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 แนวเหตุผล 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ระบบสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 4
2.1 มาตรฐานและระบบสอบกลับมาตรฐานของเครื่องวัดอุณหภูมิ 4
2.1.1 การสอบกลับมาตรฐานของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 5
2.2 การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิกับมาตรฐาน 8
2.2.1 เงื่อนไขของการสอบเทียบ 8
2.2.2 วิธีการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ 8
2.2.3 มาตรฐานของอุณหภูมิ 10
2.2.4 ใบรับรองการสอบเทียบ (Calibration Certificate) 12
2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด 12
2.3.1 ความไม่แน่นอนส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง 13
2.3.2 ความไม่แน่นอนส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบ 14
2.3.3 ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการใช้คณิตศาสตร์ในการประมาณ 14
2.3.4 วิธีในการคำนวณความไม่แน่นอน 14
2.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ 20
2.4.1 ขั้นตอนการสอบเทียบของระบบอัตโนมัติ 20
2.4.2 การหาสภาวะเสถียรของอุณหภูมิและการตั้งค่า 22

บทที่ 3 การออกแบบ 24
3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์ 26
3.1.1 การ์ดเชื่อมต่อ 27
3.1.2 มัลติเพล็กเซอร์ 30
3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์ 31
3.2.1 ส่วนหลักที่ใช้ในการควบคุมการสอบเทียบ.....31
3.2.2 ส่วนที่ใช้ในการแสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ 33
3.2.3 ส่วนของการกำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อของเครื่องมือในการสอบเทียบ.....34
3.2.4 ส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ.....35
3.2.5 ส่วนกระบวนการในการสอบเทียบ.....36
3.2.6 ส่วนของการคำนวณผลการสอบเทียบ.....38
3.2.7 ส่วนของการหาภาวะเสถียรของอุณหภูมิ.....39
3.2.8 ส่วนของฐานข้อมูลและการจัดพิมพ์ใบรับรอง.....40
บทที่ 4 ผลการทดลอง 43
4.1 การทดลองการทำงาน 43
4.1.1 การทดสอบการหาภาวะเสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ.....44
4.2 การทดสอบระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ.....48
4.2.1 การทดสอบระบบแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ 50
4.2.2 การทดสอบระบบแบบกึ่งอัตโนมัติ.....58
4.3 สรุปผลการทดสอบ 62
บทที่ 5 สรุปและคำแนะนำ 66
5.1 สรุป.....66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....67
รายการอ้างอิง 69
ภาคผนวก 70
ประวัติผู้เขียน 74

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบสอบกลับ (Traceability) สำหรับประเทศ 6
รูปที่ 2.2 ระดับในการสอบกลับของห้องปฏิบัติการที่ใช้เป็นมาตรฐานในอังกฤษ 7
รูปที่ 2.3 ระบบสอบกลับของเครื่องมือวัดที่สอบเทียบของศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัด
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย –ญี่ปุ่น) 7
รูปที่ 2.4 แบบหลักการของปริมาณอุณหภูมิในการสอบเทียบ 9
รูปที่ 2.5 ชนิดของเครื่องมือวัดที่จำแนกจากความผิดพลาดและความแม่นยำ..... 13
รูปที่ 2.6 การกระจายแบบแจกแจงความถี่เป็นแบบปรกติ 15
รูปที่ 2.7 การวาดกราฟแจกแจงความถี่ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิจากการวัด n ครั้งเป็นจำนวน j กลุ่ม.....16
รูปที่ 2.8 การกระจายแบบแจกแจงความถี่เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า 18
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ 19
รูปที่ 3.1 โครงสร้างการเชื่อมต่อที่เป็นแบบ BUS 24
รูปที่ 3.2 โครงสร้างการเชื่อมต่อที่เป็นแบบสวิตช์ 25
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ 26
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของข้อมูล 1 เฟรมในการส่งแบบอะซิงโครนัส 29
รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของส่วนของการ์ดเชื่อมต่อ 30
รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของส่วนของมัลติเพล็กเซอร์ 31
รูปที่ 3.7 โฟลวชาร์ตของกระบวนการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่อ่านค่าได้แน่นอน.....37
รูปที่ 3.8 โฟลวชาร์ตของกระบวนการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่อ่านค่าจากการประมาณสเกล.....38
รูปที่ 3.9 โฟลวชาร์ตของการหาภาวะเสถียรของอุณหภูมิ.....40
รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติ.....43
รูปที่ 4.2 การ์ดเชื่อมต่อและมัลติเพล็กเซอร์.....43
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....44
รูปที่ 4.4 ความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ตั้งจากเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.....44
รูปที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิหลังจากการตั้งเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100.13 องศาเซลเซียส.....45
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอ้างอิงและทดสอบโดยไม่ได้แก้ไขค่าอุณหภูมิ.....45
รูปที่ 4.7 การแจกแจงความถี่ของอุณหภูมิที่มีการแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 100 องศาเซลเซียส.....46
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 50 องศาเซลเซียส.....46
รูปที่ 4.9 การแจกแจงความถี่ของอุณหภูมิที่มีการแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 50 องศาเซลเซียส.....47

รูปที่ 4.10 การแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 150 องศาเซลเซียส.....47
รูปที่ 4.11 การแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 200 องศาเซลเซียส.....48
รูปที่ 4.12 การติดตั้งระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติที่ทำการสอบเทียบ 2 ระบบพร้อมกัน.....48
รูปที่ 4.13 การกำหนดการเชื่อมต่อของเครื่องมือ.....50
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง.....50
รูปที่ 4.15 การกำหนดชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิ.....51
รูปที่ 4.16 การกำหนดพารามิเตอร์ในการสอบเทียบ.....51
รูปที่ 4.17 หน้าการควบคุมหลักของระบบ.....52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการสอบเทียบโดยหลักการต่างๆ 10
ตารางที่ 2.2 จุดอุณหภูมิมาตรฐานที่ภาวะสมดุลต่างๆ 11
ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งแอดเดรสและหน้าที่การใช้งานของคอมพิวเตอร์ IBM 27
ตารางที่ 3.2 การถอดรหัสตำแหน่งแอดเดรสของอุปกรณ์บนการ์ดเชื่อมต่อ 28
ตารางที่ 3.3 ค่าอัตราการหารความถี่ที่อัตราบอดต่างๆ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 29
ตารางที่ 4.1 แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนทั้งหมดในการทดสอบ.....49
ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ RTD ครั้งที่ 1 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง) 53
ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง).....53
ตารางที่ 4.4 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ RTD ครั้งที่ 2 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง) 53
ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 2 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง).....54
ตารางที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ RTD ครั้งที่ 1 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่าน) 54
ตารางที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่าน).....54
ตารางที่ 4.8 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ RTD ครั้งที่ 2 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่าน) 55
ตารางที่ 4.9 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 2 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่าน).....55
ตารางที่ 4.10 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ RTD ครั้งที่ 1 (สอบเทียบโดยคน) 55
ตารางที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1 (สอบเทียบโดยคน).....56
ตารางที่ 4.12 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิดเทอร์โมคัปเปิลครั้งที่ 1 (อัตโนมัติ).....56
ตารางที่ 4.13 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1 (อัตโนมัติ).....57
ตารางที่ 4.14 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิดเทอร์โมคัปเปิลครั้งที่ 2 (อัตโนมัติ).....57
ตารางที่ 4.15 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 2 (อัตโนมัติ).....57
ตารางที่ 4.16 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิดเทอร์โมคัปเปิลครั้งที่ 1 (สอบเทียบโดยคน).....58
ตารางที่ 4.17 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1(สอบเทียบโดยคน).....58
ตารางที่ 4.18 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1 (ระบบอัตโนมัติ) 59
ตารางที่ 4.19 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 2 (ระบบอัตโนมัติ).....59
ตารางที่ 4.20 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT (สอบเทียบโดยคน).....60
ตารางที่ 4.21 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT (สอบเทียบโดยคน).....60
ตารางที่ 4.22 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ Digital Thermometer ครั้งที่ 1 (สอบเทียบโดยคน).....61
ตารางที่ 4.23 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT ครั้งที่ 1 (ระบบอัตโนมัติครั้งที่ 1).....61

ตารางที่ 4.24 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ Digital Thermometer (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่ 1).....61
ตารางที่ 4.25 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง SPRT (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่ 2).....62
ตารางที่ 4.26 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ Digital Thermometer (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่ 1).....62
ตารางที่ 4.27 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD.....63
ตารางที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD.....63
ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล.....63
ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Dial Thermometer ...64
ตารางที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Digital Thermometer.....64
ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบเวลาในการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอน.....65

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 แนวเหตุผล

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมได้เจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้กระบวนการในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความซ้ำซ้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้น การตรวจสอบคุณภาพของระบบอุตสาหกรรมก็จำเป็นต้องตรวจสอบในหลายๆส่วนของการผลิต เช่น วัสดุที่ใช้ในการผลิต สถานที่ในการผลิต และ กระบวนการในการผลิต กระบวนการในการผลิตจะต้องมีการจำกัดเงื่อนไขสภาวะแวดล้อมของการผลิตเพื่อที่ผลิตภัณฑ์จะได้มีคุณภาพตรงกับที่ได้กำหนดไว้ การควบคุมมาตรฐานการผลิตหรือการรับประกันคุณภาพสินค้าได้มีการกำหนดเป็นระบบมาตรฐานสากลของสินค้าขึ้นมาซึ่งก็คือ ISO 9000 ซึ่งเป็นระบบคุณภาพที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในหลายประเทศ สำหรับประเทศไทยก็มีการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมส่งออกไปขายยังต่างประเทศเป็นจำนวนมากในแต่ละปี เพื่อให้สินค้าไทยเป็นที่ยอมรับในต่างประเทศจำเป็นอย่างยิ่งที่สินค้าที่ส่งออกจะต้องได้มาตรฐานตามที่ต่างประเทศกำหนดไว้ ดังนั้นผู้ประกอบการหรือผู้ผลิตสินค้าของไทย จะต้องมีความรู้ความเข้าใจและปฏิบัติตามมาตรฐานสากล ซึ่งปัญหาอย่างหนึ่งก็คือมาตรฐานของเครื่องมือวัดที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นข้อกำหนดอย่างหนึ่งของมาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบมาตรฐานของเครื่องตรวจ เครื่องวัด เครื่องทดสอบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

การสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด [8] หรือ Calibration หมายถึงการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือวัดกับเครื่องอ้างอิง หรือเครื่องมือวัดมาตรฐานที่รู้ค่าความถูกต้อง เพื่อหาความสัมพันธ์หรือเพื่อปรับแต่งให้เครื่องวัดที่ได้รับการสอบเทียบมาตรฐานทำงานอย่างถูกต้อง และรายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัด ทำให้ผู้ใช้งานมั่นใจได้ว่า เครื่องมือวัดที่ใช้งานมีการทำงานถูกต้องและเชื่อถือได้ เหตุผลของการสอบเทียบเครื่องมือวัดก็เนื่องมาจากธรรมชาติของเครื่องมือวัดทุกชนิดล้วนต้องมีการเสื่อมสภาพไปตามการเวลาไม่ว่าเราจะใช้งานหรือไม่ก็ตาม เครื่องมือวัดส่วนใหญ่เมื่อแรกใช้งานผลการวัดจะถูกต้อง แต่เมื่อเวลาผ่านไป เครื่องมือวัดก็จะเริ่มอ่านค่าคลาดเคลื่อนสืบเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพทางองค์ประกอบของเครื่องมือวัดนั่นเอง ในกระบวนการของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ จะต้องทำการวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ในย่านของเครื่องวัดอุณหภูมินั้นๆ เพื่อความถูกต้องแม่นยำจะต้องทำการวัดซ้ำหลายๆครั้งเท่าที่จะทำได้ นำผลที่วัดได้มาคำนวณค่าความผิดพลาดในแต่ละจุด และยังต้องนำค่าทั้งหมดที่ได้จากการวัดมาคำนวณหาค่าความถูกต้อง และค่าความไม่แน่นอน เพื่อเป็นข้อมูลในการออกใบรับรอง จะเห็นได้ว่าเป็นงานที่น่าเบื่อ และจะต้องใช้เวลานานในการสอบเทียบเนื่องจากการวัดอุณหภูมิหลายๆ จุดจะต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถ้าย่านในการวัดอุณหภูมิกว้างขึ้นก็จะใช้เวลาในการสอบเทียบเพิ่มขึ้นด้วย

การใช้งานซอฟต์แวร์สอบเทียบเครื่องมือวัดเป็นการช่วยลดขั้นตอนในการทำงาน [11] เช่น ขณะปรับแต่ง และบันทึกผลลงแฟ้มข้อมูล นอกเหนือจากจะทำให้ง่ายแล้ว ประเด็นหลักที่ซอฟต์แวร์เหล่านี้เข้ามาช่วยปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการแบบเก่าที่ใช้มนุษย์ คือทำให้งานได้ผลลัพธ์ที่คงเส้นคงวาเหมือนเดิมทุกครั้ง เพราะคอมพิวเตอร์จะควบคุมลำดับขั้นตอนต่างๆ ของการสอบเทียบให้เหมือนเดิมทุกครั้งโดยไม่กระโดดข้ามขั้นตอน

ใดๆ ตามอำเภอใจเหมือนมนุษย์ และซอฟต์แวร์จะบันทึกผลการสอบเทียบโดยรับข้อมูลโดยตรงจากเครื่องมือวัดที่ถูกสอบเทียบ เราจึงได้ข้อมูลในคอมพิวเตอร์โดยไม่ต้องป้อนเข้าในคอมพิวเตอร์ ใบรายงานการสอบเทียบจึงปราศจากความผิดพลาดที่เกิดจากการพิมพ์ผิดของผู้ปฏิบัติการได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาระบบและกระบวนการในการวัดและสอบเทียบอุณหภูมิ
2. เพื่อออกแบบระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. รวบรวมข้อมูลของระบบสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิและมาตรฐานของอุณหภูมิที่ใช้งานในปัจจุบัน
2. ศึกษาขั้นตอนและวิธีการในการวัดและสอบเทียบอุณหภูมิ
3. ศึกษาโปรแกรมซึ่งใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบสอบเทียบ
4. ออกแบบระบบในส่วนที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ
5. เขียนโปรแกรมที่ใช้ในการอ่านค่าและคำนวณค่าของอุณหภูมิ
6. เขียนโปรแกรมในส่วนที่ใช้ในการควบคุมระบบสอบเทียบอุณหภูมิและจัดการข้อมูลที่สอบเทียบ
7. ทดสอบระบบและทำการแก้ไขในส่วนที่ผิดพลาด
8. ทดลองใช้งานในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิจริง
9. สรุปและประเมินผลความสามารถและความน่าเชื่อถือของระบบสอบเทียบอุณหภูมิที่ได้ทำการออกแบบ

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติและแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยมีส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบเป็นส่วนหลักซึ่งจะต้องสามารถใช้จัดการข้อมูลในการสอบเทียบและออกใบรับรองได้

2. สรุปความสามารถและความน่าเชื่อถือของระบบสอบเทียบอุณหภูมิที่ได้ทำการออกแบบ โดยจะต้องใช้งาน ในระบบสอบเทียบจริงได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบสอบเทียบที่ได้ออกแบบนี้สามารถไปใช้งานจริงซึ่งจะช่วยในการสอบเทียบอุณหภูมิให้มีความสะดวก แม่นยำ และรวดเร็วขึ้น

2. สามารถพัฒนาระบบสอบเทียบอุณหภูมิให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

3. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบสอบเทียบแบบอื่นๆ

4. เพิ่มความน่าเชื่อถือของห้องปฏิบัติการระบบสอบเทียบให้มากยิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ระบบสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ

2.1 มาตรฐานและระบบสอบกลับมาตรฐานของเครื่องวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิก็คือการวัดศักย์ดาของการถ่ายเทความร้อน [9] โดยที่ความร้อนก็คือพลังงานที่เกี่ยวข้องกับพลังงานจลน์ของอะตอมและโมเลกุล ส่วนอุณหภูมิก็คือระดับความหนาแน่นของพลังงาน (พลังงานต่อมวล) อุณหภูมิต่ำสุดที่เป็นไปได้ก็คือ ศูนย์สัมบูรณ์ โดยกำหนดเป็นจุดเริ่มต้นของสเกลอุณหภูมิในทางทฤษฎี โดยวัดอยู่ในหน่วยของเคลวิน (Kelvin) โดยสเกลของอุณหภูมิจะเป็นเชิงเส้น และได้มีการกำหนดจุดที่สองก็คือ จุดสามสถานะของน้ำ มีการกำหนดค่าเป็น 273.16 K จุดสามสถานะของสารก็คือ จุดที่สถานะของสารทั้ง 3 จุดอยู่ในภาวะสมดุล เช่น จุดสามสถานะของน้ำก็คือจุดที่ น้ำแข็ง น้ำ และไอน้ำอยู่ในภาวะสมดุล เกิดขึ้นจากการกำหนดสภาวะเริ่มต้นที่น้ำอยู่ในรูป ของแข็ง และ ของเหลว จากนั้นที่ว่างที่อยู่เหนือน้ำก็จะถ่ายเทออกมา จนกระทั่งไอน้ำเข้าแทนที่ในสภาวะสุญญากาศ ขณะนั้นจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 273.16 K หรือ 0.01 C ถ้าความดันกลับลงสู่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ ก็จะลดลงเหลือ 273.15 K หรือ 0 C ซึ่งไม่เป็นเงื่อนไขที่ภาวะสมดุลระหว่าง ของเหลวและก๊าซ

ในกระบวนการผลิต กระบวนการวัดอุณหภูมิสามารถเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ การให้ความสำคัญด้วยการศึกษาทำความเข้าใจหลักการและโครงสร้างของเครื่องมือวัด ตลอดจนวิธีการบำรุงรักษาจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

การวัด [8] คือ การกระทำเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีปริมาณสม่ำเสมอ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะต้องเป็นสิ่งที่เชื่อถือได้ ในการใช้เครื่องมือวัดหาค่าออกมานั้นไม่จำเป็นว่าทุกครั้งเราจะได้ข้อมูลที่เหมือนกัน การจะทำให้ข้อมูลจากการวัดนั้นเชื่อถือได้จะต้องทำการวัดด้วยกระบวนการที่ถูกต้อง จึงจะได้ข้อมูลที่แน่นอนและเที่ยงตรง นั่นคือ จะต้องเข้าใจจุดประสงค์ของการวัดให้ถูกต้อง พร้อมกับการใช้เครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้และเหมาะสมกับการวัดนั้นทำการวัดให้ถูกต้อง เราก็จะได้ข้อมูลที่เชื่อถือได้ ด้วยเหตุนี้การกำหนดคุณภาพของเครื่องมือวัดจึงปรากฏอยู่ในงานสำคัญทุกๆงานเช่น

1. มีการกำหนดคุณภาพของเครื่องมือวัดและเครื่องมือทดสอบคุณภาพสินค้าในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแทบทุกชนิด และทุกประเทศ

2. มีการกำหนดให้มีการควบคุมเครื่องตรวจ เครื่องวัดและเครื่องทดสอบ ที่ใช้ในกิจกรรมการผลิตและบริการอย่างเข้มงวดในข้อ 4.11 ซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจการวัดและทดสอบ ของมาตรฐาน ISO 9000 ซึ่งเป็นข้อใหญ่ข้อหนึ่งใน 20 ข้อของมาตรฐาน ISO 9000 โดยกล่าวไว้ว่า

- ผู้ส่งมอบจะต้องประเมินวิธีการวัดที่ใช้ ความแม่นยำที่ต้องการและการเลือกใช้เครื่องตรวจ เครื่องวัดและเครื่องทดสอบที่เหมาะสม มีขีดความสามารถทั้งความแม่นยำ และความละเอียดตามความต้องการ

- จะต้องบ่งบอกถึงการสอบเทียบ เครื่องตรวจ เครื่องวัด และเครื่องทดสอบที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ตามช่วงเวลาที่กำหนด หรือก่อนใช้งาน โดยเทียบกับเครื่องมือที่ได้รับการรับรอง และทราบค่า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสัมพันธ์กับมาตรฐานที่ยอมรับระดับประเทศ ถ้าไม่มีจะต้องจัดทำพื้นฐานที่ใช้ในการสอบเทียบเป็นเอกสารด้วย

- ระบุกระบวนการที่ใช้สอบเทียบเครื่องตรวจ เครื่องวัด และเครื่องทดสอบ รวมถึงรายละเอียดของเครื่องมือ ระบุถึงแต่ละเครื่องที่ใช้งาน ความถี่ของการตรวจ วิธีในการตรวจ วิธีการตรวจรับ และกระบวนการในการปฏิบัติ เมื่อผลการตรวจเป็นที่น่าพอใจ

- จำแนกเครื่องตรวจ เครื่องวัด และเครื่องทดสอบ ด้วยตัวบ่งชี้ที่เหมาะสม หรือบันทึกประวัติในการสอบเทียบ เพื่อแสดงสถานะในการสอบเทียบ

- ดูแลประวัติการสอบเทียบ เครื่องตรวจ เครื่องวัด และเครื่องทดสอบ

- ประเมินความถูกต้องและผลการตรวจ รวมถึงผลการทดสอบครั้งก่อนๆ โดยเก็บไว้เป็นหลักฐาน เมื่อพบว่าเครื่องมือไม่อยู่ในเกณฑ์ที่สอบเทียบไว้

- สภาพแวดล้อมจะต้องมั่นใจได้ว่า เหมาะสมกับการสอบเทียบ การตรวจ การวัดและการทดสอบที่ปฏิบัติอยู่

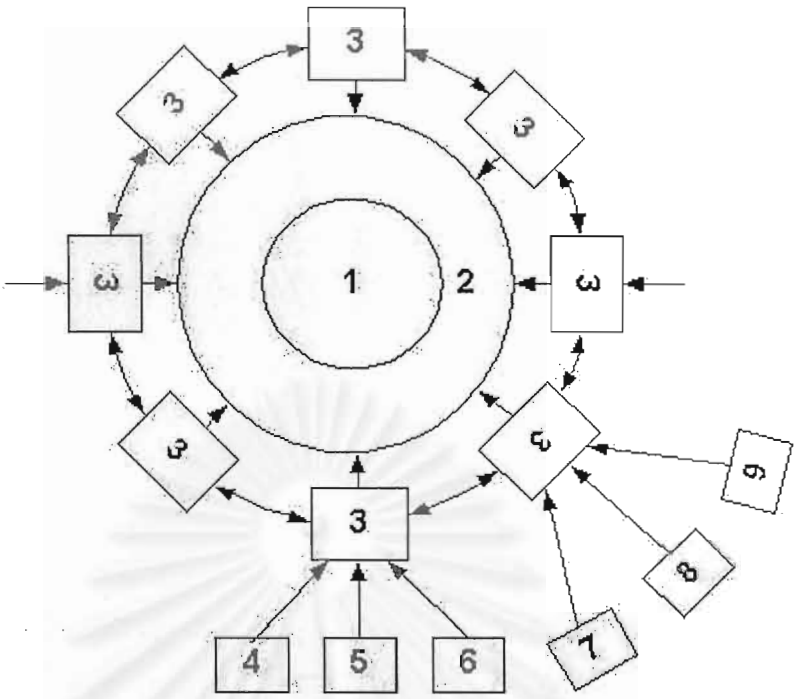
- จะต้องมั่นใจได้ว่า การเคลื่อนย้าย การจัดเก็บ เครื่องตรวจ เครื่องวัดและเครื่องทดสอบ ยังคงไว้ซึ่งความแม่นยำ และความเหมาะสมในการใช้งาน

- ป้องกันปัจจัยที่ใช้ในการ ตรวจวัดและทดสอบ รวมถึงอุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ประกอบในการทดสอบจากการปรับใดๆ ที่จะทำให้การสอบเทียบเป็นโมฆะ

2.1.1 การสอบกลับมาตรฐานของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิจะต้องทำกับตัววัดอุณหภูมิมาตรฐาน [8] หรือกับอุณหภูมิคงที่มาตรฐาน และนำค่าแตกต่างมาชดเชยผลที่วัดได้ให้ถูกต้อง โดยที่ตัววัดอุณหภูมิมาตรฐาน จะต้องได้รับการสอบเทียบกับมาตรฐานที่เที่ยงตรงรู้คุณสมบัติความถูกต้อง และวันที่ที่ได้รับการสอบเทียบอย่างชัดเจน เช่น ในสหรัฐอเมริกาความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดต่างๆ จะถูกสอบเทียบระหว่างบริษัทต่างๆ หรือภายในบริษัท โดยสอบเทียบกับมาตรฐานที่มีอยู่ ก่อนจะส่งให้ลูกค้า เครื่องมือมาตรฐานต่างๆ ที่ใช้สอบเทียบนี้ก็จะถูกสอบเทียบเป็นระยะๆ ด้วยมาตรฐานต้นแบบที่สถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติ (NIST: National Institute of Standards and Technology) ซึ่งระบบนี้เรียกว่า ระบบสอบกลับถึง NIST การสอบกลับมาตรฐานได้ถูกนิยามว่าคือ ระบบที่สามารถสอบกลับความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดต่างๆ ได้ว่ามีเส้นทางการสอบเทียบความเที่ยงตรงถูกต้องไปยังมาตรฐานระดับประเทศ

การสร้างระบบสอบกลับ (Traceability System) คือ การสร้างระบบที่ตั้งบนเงื่อนไขพื้นฐานที่จะถ่ายทอดค่าต่างๆ ซึ่งจำเป็นและเป็นที่ต้องการของสังคมอย่างสูงให้แก่สังคม โดยมีความสิ้นเปลืองทางเศรษฐกิจน้อยที่สุด และด้วยค่าวัดที่มีความแม่นยำ ซึ่งมีการควบคุมให้เป็นอันหนึ่งอันเดียวกันอย่างเที่ยงตรง ในการนี้การดูแลมาตรฐาน และการเทียบค่าตามเวลาที่เหมาะสมจึงจำเป็นอย่างยิ่ง โดยระบบสอบกลับสำหรับประเทศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

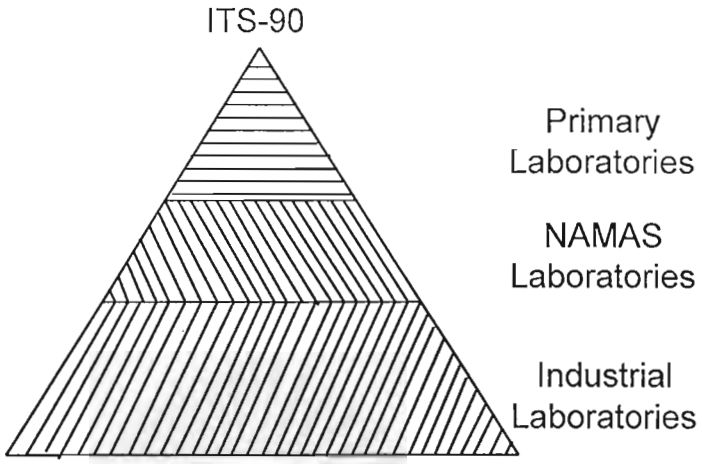


รูปที่ 2.1 ระบบสอบกลับ (Traceability) สำหรับประเทศ

โดยที่ 1 คือ หน่วยงานมาตรฐานระดับชาติ 2 คือ หน่วยงานสงเสริมมาตรฐาน
3 คือ ห้องปฏิบัติการมาตรฐาน 4,5,6,7,8,9 คือ หน่วยงานที่ใช้งาน

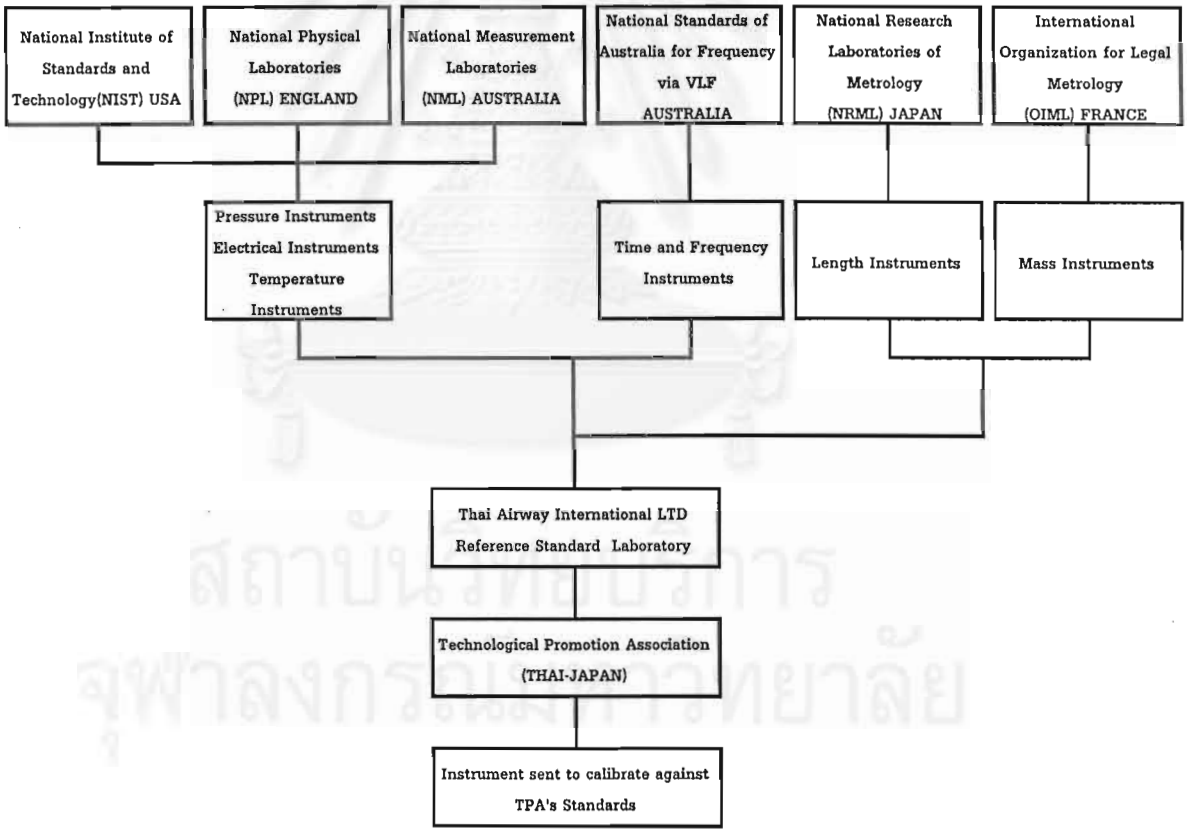
ตามรูปที่ 2.1 จะมีหน่วยงานมาตรฐานเป็นแกนกลางรับผิดชอบเกี่ยวกับการติดตั้ง รักษาและถ่ายทอดมาตรฐานระดับประเทศ รอบแกนกลางจะเป็นหน่วยถ่ายทอดมาตรฐานระดับกลาง ซึ่งจะถ่ายทอดมาตรฐานให้กับห้องมาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งจะถ่ายทอดมาตรฐานนี้ไปยังที่ใช้งานอีกทอดหนึ่ง ห้องมาตรฐานนั้นนอกจากจะติดต่อใกล้ชิดกับที่ใช้งาน แล้วยังต้องประสานงานกันระหว่างห้องมาตรฐานด้วยกันเองอีกด้วย

สำหรับในประเทศอังกฤษที่เป็นส่วนใหญ่ของอุตสาหกรรมจะอ้างอิงถึง ITS-90 โดยมีห้องปฏิบัติการในการสอบเทียบปฐมภูมิซึ่งจะมีการอ้างอิงถึง ITS-90 จริง โดยห้องปฏิบัติการจะมี Fixed Point Cell และเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานที่มีคุณภาพสูงสุด ซึ่งสามารถทำการสอบเทียบมาตรฐานที่ใช้ในระดับถัดๆ ไป ซึ่งโดยปรกติก็คือ ห้องปฏิบัติการ NAMAS โดยให้บริการแก่ระดับถัดไปและการวัดอุณหภูมิในอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถแสดงระดับของห้องปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 2.2 [21]



รูปที่ 2.2 ระดับในการสอบกลับของห้องปฏิบัติการที่ใช้เป็นมาตรฐานในอังกฤษ

ตามรูปที่ 2.2 พีระมิดส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิในอุตสาหกรรมที่ต่ำกว่า จะต้องสามารถสอบกลับไปยัง ห้องปฏิบัติการปฐมภูมิได้ ซึ่งการสอบกลับก็เป็นเงื่อนไขในการวัดที่ตรงกันหรือ เทียบเคียงกัน



รูปที่2.3 การสอบกลับเครื่องมือวัดมาตรฐานของสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น)

2.2 การสอบเทียบเครื่องมือวัดกับมาตรฐาน

การควบคุมอุณหภูมิในการผลิตของกระบวนการทางอุตสาหกรรมเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิต เพราะฉะนั้นการจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่เป็นที่ยอมรับ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ โดยในการวัดอุณหภูมิซึ่งส่วนใหญ่จะคิดว่าอุณหภูมิเป็นตัวเลขโดดๆ แต่จริงๆแล้วอุณหภูมิเป็นโครงสร้างทางสถิติ ซึ่งความถูกต้องของข้อมูลที่ทำการวัดจะขึ้นอยู่กับ มวลของความร้อน ระยะเวลาที่ทำการวัด สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและกระบวนการในการวัด

2.2.1 เงื่อนไขของการสอบเทียบ

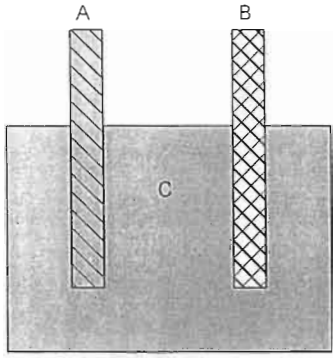
1. การสอบเทียบจะต้องมีการปฏิบัติอย่างสม่ำเสมอ
2. ผู้ปฏิบัติจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับการสอบเทียบ
3. รู้ถึงค่าความแม่นยำและวัตถุประสงค์ในการใช้เครื่องมือ
4. ต้องมีเครื่องมือที่มีมาตรฐานดีพอ (ดีกว่า 4- 10 เท่าของเครื่องมือที่ทดสอบ)
5. เครื่องมือที่เป็นมาตรฐานต้องมีการสอบกลับที่เป็นที่ยอมรับกันระหว่างประเทศ
6. ห้องปฏิบัติการในการสอบเทียบจะต้องได้มาตรฐานและเหมาะสมกับระดับงาน

2.2.2 วิธีการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ

หลักการในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ [11] สามารถแบ่งได้เป็น 2 หลักใหญ่ๆ จากการกำหนดของ ITS 90 ก็คือ

1. หลักการ Fixed point
2. หลักการเปรียบเทียบ (Comparison Method)

โดยพื้นฐานของหลักการทั้งสองจะทำที่ปริมาณการสอบเทียบที่แสดงว่ามีอุณหภูมิเท่ากัน (Zeroth Law) แบบ Fixed Point ปริมาณที่ใช้เป็นจุดอุณหภูมิเท่ากันเป็นค่าอุณหภูมิคงที่โดย ITS-90 เป็นผู้กำหนด ส่วนแบบเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้เป็นจุดอุณหภูมิเท่ากันเป็นการวัดอุณหภูมิ โดยการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยความหมายของ Zeroth Law สามารถอธิบายได้ดังนี้ จากรูปถ้าชิ้นส่วนของ A และ B วางแยกกันในภาวะสมดุลของ C แล้วจะได้ว่า A และ B อยู่ในภาวะสมดุลของซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่นการสอบเทียบ โดยหลักการเปรียบเทียบ ของเครื่องวัดอุณหภูมิ B เทียบกับ เครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐาน A ในอ่างของเหลว C ดังนั้นทั้งหมดจะต้องอยู่ในภาวะสมดุลของซึ่งกันและกันเพื่อที่จะหาคำตอบที่ดีได้



รูปที่ 2.4 แบบหลักการของปริมาณอุณหภูมิในการสอบเทียบ

1. หลักการ Fixed point

เป็นการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิโดยการวัดอุณหภูมิแล้วอ่านค่าเทียบกันอุณหภูมิจุดสามสถานะและจุดเปลี่ยนสถานะ เช่น จุดเดือด จุดแข็งตัว ของสารบริสุทธิ์ชนิดต่างๆ เช่น ทอง เงิน น้ำ เป็นต้น วิธีนี้มักใช้กับการสอบเทียบตัววัดอุณหภูมิ (Thermometer) ที่ใช้เป็นตัวถ่ายทอดค่ามาตรฐาน มากกว่าจะใช้กับเครื่องทั่วๆไป เพราะมีความยุ่งยากในการปฏิบัติ แต่ให้ความถูกต้องแม่นยำสูง

2. หลักการเปรียบเทียบ (Comparison Method)

วิธีนี้จะใช้อ่างที่ให้อุณหภูมิคงที่ (Thermostatic bath) เช่นอ่างน้ำ อ่างน้ำมัน กับตัววัดอุณหภูมิมาตรฐาน (standard thermometer) ตัววัดอุณหภูมิที่สอบเทียบกับตัววัดอุณหภูมิมาตรฐานจะถูกจุ่มอยู่ในตำแหน่งของอ่างคงที่ในเวลาเดียวกัน โดยจะใช้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากตัววัดอุณหภูมิมาตรฐานเป็นตัวอ้างอิง วิธีนี้นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบมาตรฐานโดยตัววัดอุณหภูมิมาตรฐานที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายจะมีด้วยกัน 4 แบบคือ

2.1 Standard Platinum Resistant Thermometer

2.2 Standard Glass Tube Thermometer

2.3 Standard Thermocouple

2.4 Standard Electric Bulbs

โดยการเลือกใช้งานตัววัดอุณหภูมิมาตรฐานจะขึ้นอยู่กับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้และช่วงของอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบซึ่งสามารถแสดงข้อดีและข้อเสียของการสอบเทียบโดยหลักการต่างๆ ได้ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการสอบเทียบโดยหลักการต่างๆ

หลักการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การสอบเทียบโดยการเทียบเคียงเมื่อทำการวัดอุณหภูมิจริงที่ตำแหน่งการใช้	1. การสอบเทียบสามารถทำได้ภายใต้เงื่อนไขของการวัดอุณหภูมิ 2. ไม่จำเป็นที่ต้องทำการเคลื่อนย้ายเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ 3. ไม่ใช้ค่าใช้จ่ายสูง	1. ส่วนของมาตรฐานจะกำหนดตายตัวทำให้ไม่สามารถหาเงื่อนไขที่เสถียรได้โดยง่าย
การสอบเทียบโดยการเทียบเคียงโดยใช้การเทียบเคียงหน่วย	1. สามารถเลือกส่วนของมาตรฐานได้ตามค่าความแม่นยำที่ต้องการ 2. สามารถสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิหลายเครื่องได้ในเวลาเดียวกัน 3. เลือกอุณหภูมิตามที่มีได้ 4. มีเงื่อนไขการสอบเทียบที่ดี	1. ต้องการส่วนเทียบเคียบที่เหมาะสม 2. จะต้องทำการตรวจสอบส่วนเทียบเคียงในการปฏิบัติ เช่น การกระจายของอุณหภูมิ 3. ค่าความแม่นยำจะถูกจำกัดโดยส่วนของการเทียบเคียง 4. งานมีค่าใช้จ่ายสูง
การสอบเทียบโดยการเทียบเคียงโดยใช้จุดตายตัว	1. การสอบเทียบสามารถทำได้ที่จุดความแม่นยำสูงสุดของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ถูกสอบเทียบ 2. สามารถหาอุณหภูมิที่เสถียรได้ 3. ไม่จำเป็นต้องใช้ส่วนของมาตรฐานตลอดเวลา	1. ไม่สามารถเลือกอุณหภูมิตามที่มีได้ 2. ต้องมีการเตรียมสารที่จุดตายตัว 3. ส่วนของมาตรฐานจะถูกจำกัด 4. การสอบเทียบจะมีค่าใช้จ่ายสูง

2.2.3 มาตรฐานของอุณหภูมิ

มาตรฐานของอุณหภูมิที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงจะได้มาจากการตกลงของ คณะกรรมการมาตรฐานการวัดระหว่างประเทศทางด้านอุณหภูมิ (CCT) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของคณะกรรมการมาตรฐานการวัดระหว่างประเทศ (CIPM) ได้ตกลงให้มีการประชุมมาตรฐานการวัดอุณหภูมิประมาณ 20 ปีต่อครั้ง โดยเริ่มต้นปีแรก ค.ศ. 1927 ที่เรียกว่า International Temperature Scale of 1927:ITS27 ซึ่งได้กำหนด จุดอ้างอิงขึ้นมา 6 จุดดังนี้

1. จุดเดือดของออกซิเจน
2. จุดเยือกแข็งของน้ำ
3. จุดเดือดของน้ำ
4. จุดเดือดของกำมะถัน
5. จุดเยือกแข็งของเงิน
6. จุดเยือกแข็งของทองคำ

ส่วนในปัจจุบันได้มีการใช้มาตรฐานของ ITS90 ซึ่งใจความส่วนใหญ่ยังอ้างอิงมาจาก ITS68 ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานการสอบเทียบโดยมีใจความส่วนหนึ่งดังนี้

1. กำหนดจุด Fixed Point ของสารต่างๆที่สามารถคงอยู่ในภาวะสมดุล เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการสอบเทียบอุณหภูมิจำนวน 11 จุดดังตาราง [13] 2.2

ตาราง 2.2 จุดอุณหภูมิมาตรฐานที่ภาวะสมดุลต่างๆ

สภาพที่ภาวะสมดุล	จุดกำหนดอุณหภูมิมาตราฐานในเชิงปฏิบัติ	
	$T_{68}(^{o}K)$	$T_{68}(^{o}C)$
ภาวะสมดุลที่สถานะการเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซของไฮโดรเจน	13.18	-259.34
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะการเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซของไฮโดรเจนที่ความดัน 33,330.6 N/m^2 (27/56 ของความดันบรรยากาศ	17.042	-256.108
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของเหลวเป็นก๊าซของไฮโดรเจน (จุดเดือดของไฮโดรเจน)	20.28	-252.87
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของเหลวเป็นก๊าซของนีออน (จุดเดือดของนีออน)	27.102	-246.048
ภาวะสมดุลที่สถานะการเป็นของแข็ง, ของเหลว และก๊าซของออกซิเจน	54.361	-218.789
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของเหลวเป็นก๊าซของออกซิเจน (จุดเดือดของออกซิเจน)	90.188	-182.926
ภาวะสมดุลที่สถานะการเป็นของแข็ง, ของเหลว และก๊าซของน้ำ	273.16	0.01
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของเหลวเป็นก๊าซของน้ำ (จุดเดือดของน้ำ)	373.15	100
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของแข็งเป็นของเหลวของสังกะสี (จุดเยือกแข็งของสังกะสี)	692.73	419.58
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของแข็งเป็นของเหลวของเงิน (จุดเยือกแข็งของเงิน)	1235.08	961.93
ภาวะสมดุลระหว่างสถานะของแข็งเป็นของเหลวของทอง (จุดเยือกแข็งของทอง)	1337.58	1064.43

2. ได้กำหนดวิธีการถ่ายทอดมาตรฐาน (Traceability) ด้วยการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดต่างๆ มาเปรียบเทียบกับค่า Fixed Point ซึ่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิเหล่านี้จะเรียกว่า Secondary Standard เพื่อนำไปใช้ในการสอบเทียบอุปกรณ์วัดและแสดงค่าอุณหภูมิอื่นๆ โดยได้กำหนดตัววัดอุณหภูมิที่ใช้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในย่านต่างๆดังนี้

1. Platinum Resistance Thermometer ใช้ในย่านอุณหภูมิ -260 °C ถึง 960.78°C
2. Liquid in Glass Thermometer ใช้ในย่านอุณหภูมิ -183 °C ถึง 400°C
3. Thermocouple Type E and T ใช้ในย่านอุณหภูมิ -183 °C ถึง 425°C
4. Radiation Pyrometer ใช้ในย่านอุณหภูมิ 960.78 °C ถึง 1064.18°C

2.2.4 ใบรับรองการสอบเทียบ (Calibration Certificate)

ใบรับรองการสอบเทียบจะประกอบไปด้วยข้อมูลที่แสดงผลของการสอบเทียบเพื่อเป็นการรับรองคุณภาพและแสดงคุณสมบัติของเครื่องมือที่นำมาทดสอบ [10] โดยมีการกำหนดมาตราฐานจาก European Accreditation Organization of Laboratories (Eal) ว่าสำหรับใบรับรองการสอบเทียบควรจะมีข้อมูลเหล่านี้ในใบรับรอง คือ

- คำว่า ใบรับรอง (Certificate)
- ชื่อและที่ตั้งของห้องปฏิบัติการที่ทำการสอบเทียบ
- วันที่หรือระยะเวลาที่ทำการสอบเทียบและวันที่ที่ออกใบรับรอง
- ระบุชื่อลูกค้า
- ระบุชื่อเครื่องมือวัดที่ทำการสอบเทียบ
- ภาวะขณะสอบเทียบ (เช่น ภาวะแวดล้อมขณะสอบเทียบ)
- ระบุกระบวนการ หรือ วิธีการสอบเทียบ
- ผลการวัด ตามการตรวจพบ ผลการสอบเทียบ
- ความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ
- ชื่อและลายเซ็นของบุคคลที่ทำการสอบเทียบ และชื่อ ลายเซ็นของหัวหน้าผู้ดูแล
- มาตรฐานทั้งด้านขาเข้าและขาออก

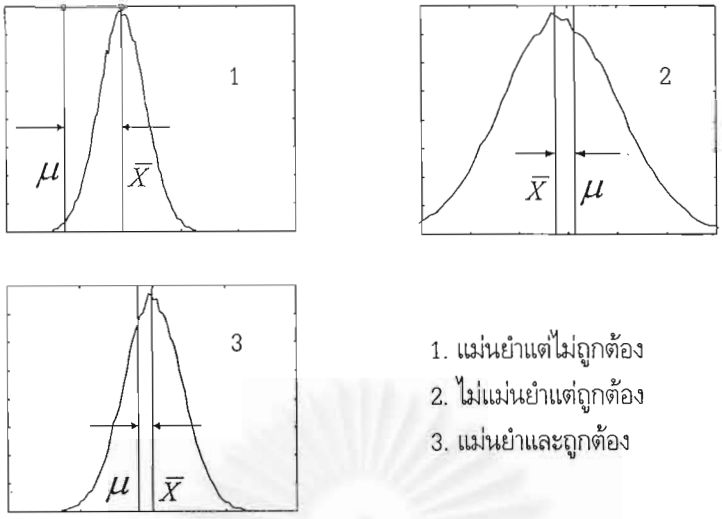
2.3 การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ความไม่แน่นอนในการวัด ก็คือ พารามิเตอร์ที่แสดงถึงการกระจายของค่าที่วัดได้เป็นการกำหนดพิสัย ค่าที่วัดได้ก็จะอยู่ในพิสัยนี้ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าที่แสดงการกระจายของความคลาดเคลื่อนของผลการวัดอันเนื่องมาจากความผิดพลาดสุ่มและ ความคลาดเคลื่อนระบบ โดยที่การกระจายจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขของระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดโดยค่าความผิดพลาด และความแม่นยำในการวัดสามารถนิยามได้ดังนี้

ค่าความผิดพลาด ก็คือผลต่างของค่าที่ได้จากการวัดกับค่าจริงของสิ่งที่ถูกวัด ซึ่งค่าความผิดพลาดที่ได้ก็ยังเป็นเพียงค่าที่ได้จากการประมาณเท่านั้น เพราะในความเป็นจริงไม่มีค่าใดที่เป็นจริง

ค่าความแม่นยำ คือ ตัวเลขที่แสดงให้เห็นถึงความใกล้เคียงระหว่างค่าที่วัดได้ กับค่าจริง ซึ่งแสดงถึงขีดความสามารถของเครื่องมือวัดว่ามีความแม่นยำเพียงใด

สำหรับเครื่องมือวัดทั่วๆ สามารถจำแนกจากความผิดพลาดและความแม่นยำได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ชนิดของเครื่องมือวัดที่จำแนกจากความผิดพลาดและความแม่นยำ

จากรูปที่ 2.5 μ คือ ค่าของอุณหภูมิจริง และ $\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจำนวนหลายๆ ครั้ง โดยกราฟทั้ง 3 รูปแสดงชนิดของเครื่องมือวัดที่จำแนกจากความผิดพลาดและความแม่นยำได้ 3 แบบ แบบที่ 1 เป็นเครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำแต่ไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าผลต่างระหว่าง μ และ $\bar{X}$ มีค่าสูงแต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดหลายครั้งมีค่าน้อย แบบที่2 เป็นเครื่องมือวัดที่ไม่แม่นยำแต่ถูกต้องเนื่องจากค่าผลต่างระหว่าง μ และ $\bar{X}$ มีค่าน้อยแต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดหลายครั้งมีค่าสูง และแบบที่ 3 เป็นเครื่องมือวัดที่แม่นยำและถูกต้องเนื่องจากค่าผลต่างระหว่าง μ และ $\bar{X}$ มีค่าน้อยแต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการวัดหลายครั้งมีค่าน้อยด้วย การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นการหาค่าความไม่แน่นอนรวม ของค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม (Random Error) และความคลาดเคลื่อนระบบ (Systematic Error) โดยสามารถระบุแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนระบบในการสอบเทียบอุณหภูมิได้ดังนี้

2.3.1 ความไม่แน่นอนส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง

ส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงมีความไม่แน่นอนมาจากหลายสาเหตุดังนี้

1. ค่าความไม่แน่นอนที่มาจากการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง ซึ่งระบุในรายงานผลการสอบเทียบของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงนั้น

2. ค่าความไม่แน่นอนที่ระบุของเครื่องวัดที่ทดสอบ และอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบในการวัด เช่น ความต้านทานมาตรฐาน, ค่าความต้านทาน Bridge เป็นต้น

3. ค่าความไม่แน่นอนจากสาเหตุอื่นๆ ได้แก่

- ค่าเลื่อนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ
- ค่า Resolution ของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ
- ความไม่คงที่ของอุณหภูมิภายในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

- ความไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) หรือมี temperature gradiant ของอุณหภูมิในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ในการสอบเทียบ
- ระยะจุ่ม (immersion depth) ของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง หากใช้แตกต่างจากระยะจุ่มที่รายงานไว้ในผลการสอบเทียบของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง
- เมื่อใช้ PRT (Platinum Resistant Thermometer) เป็นมาตรฐานอ้างอิงแล้วใช้กระแสไฟฟ้าในวงจรการวัดความต้านทานต่างจากการสอบเทียบ PRT อ้างอิงนั้น
- สภาวะการสอบเทียบมาตรฐานอ้างอิงต่างไปจากรายงานผลการสอบเทียบเช่น สอบเทียบในอากาศ หรือ stirred liquid
- อุณหภูมิของจุดอ้างอิง

2.3.2 ความไม่แน่นอนส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบ

ส่วนของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบจะมีความไม่แน่นอนจากหลายสาเหตุดังนี้

1. ความไม่แน่นอนที่เกิดจาก compensating lead
2. ความไม่แน่นอนที่เกิดจาก reference junction
3. ความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่อง scanner หรือ selection switch
4. ความไม่แน่นอนที่เกิดจากระยะจุ่ม (immersion depth) ที่แตกต่างจากที่กำหนดไว้ของ partial immersion liquid in glass thermometer

2.3.3 ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการใช้คณิตศาสตร์ในการประมาณ

ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการใช้คณิตศาสตร์ในการประมาณ เช่น การหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า หรืออุณหภูมิระหว่างค่าที่ระบุใน ตารางอ้างอิงของเทอร์โมคัปเปิล หรือ RTD หรือการทำ curve fitting กรณีที่เป็นเส้นโค้งที่ไม่เป็นเชิงเส้น

2.3.4 วิธีการในการคำนวณค่าความไม่แน่นอน

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความคลาดเคลื่อนสุ่มสามารถประเมินได้จากวิธีทางสถิติ [5] โดยการคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวกลาง ส่วนการประเมินค่าความไม่แน่นอนระบบ จะพิจารณาจากสาเหตุที่แท้จริงทั้งหมดที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนระบบ ซึ่งเมื่อรวมค่าทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้วจะได้เป็นค่าความไม่แน่นอนรวมที่คงที่ (Fixed uncertainty) ของการสอบเทียบนั้นๆ เมื่อให้ Y เป็นปริมาณผลลัพธ์ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุต $X_i (i = 1,2,...,n)$ [23]โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_n) \qquad (2.1)$$

โดยที่ปริมาณทางอินพุตก็คือค่าต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความไม่แน่นอน เช่น

- ค่าที่ได้จากกระบวนการวัด
- ค่าที่ได้จากรายงานของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง
- ปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการวัด

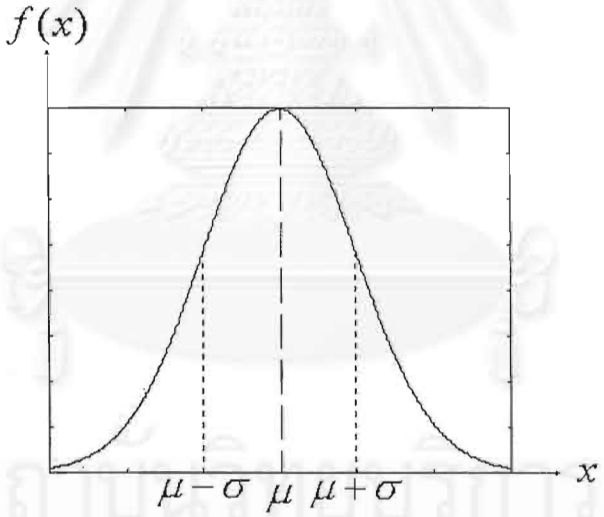
เนื่องจากว่าค่าจริงปริมาณทางอินพุทไม่สามารถทราบได้อย่างแน่นอนจึงได้ใช้ค่าประมาณ x_i ดังนั้นปริมาณของผลลัพธ์จึงเป็นค่าประมาณเช่นกัน y เราจะได้ว่า

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_n) \tag{2.2}$$

โดยการประเมินค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าประมาณผลลัพธ์ y จะเรียกว่า combined uncertainty $u_c(y)$ [23] ซึ่งได้จากค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าประมาณทางอินพุต ซึ่งเรียกว่า standard uncertainty $u(x_i)$ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปภายหลัง

ค่าความไม่แน่นอนสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดได้แก่

1. ค่าความไม่แน่นอนชนิด A โดยปรกติจะใช้สำหรับการหาค่าที่เกิดจากการทำซ้ำหรือการสุ่มจากกระบวนการวัด โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยปรกติจะมีการกระจายแบบแจกแจงความถี่เป็นแบบปกติ (Normal Distribution) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การกระจายแบบแจกแจงความถี่เป็นแบบปรกติ

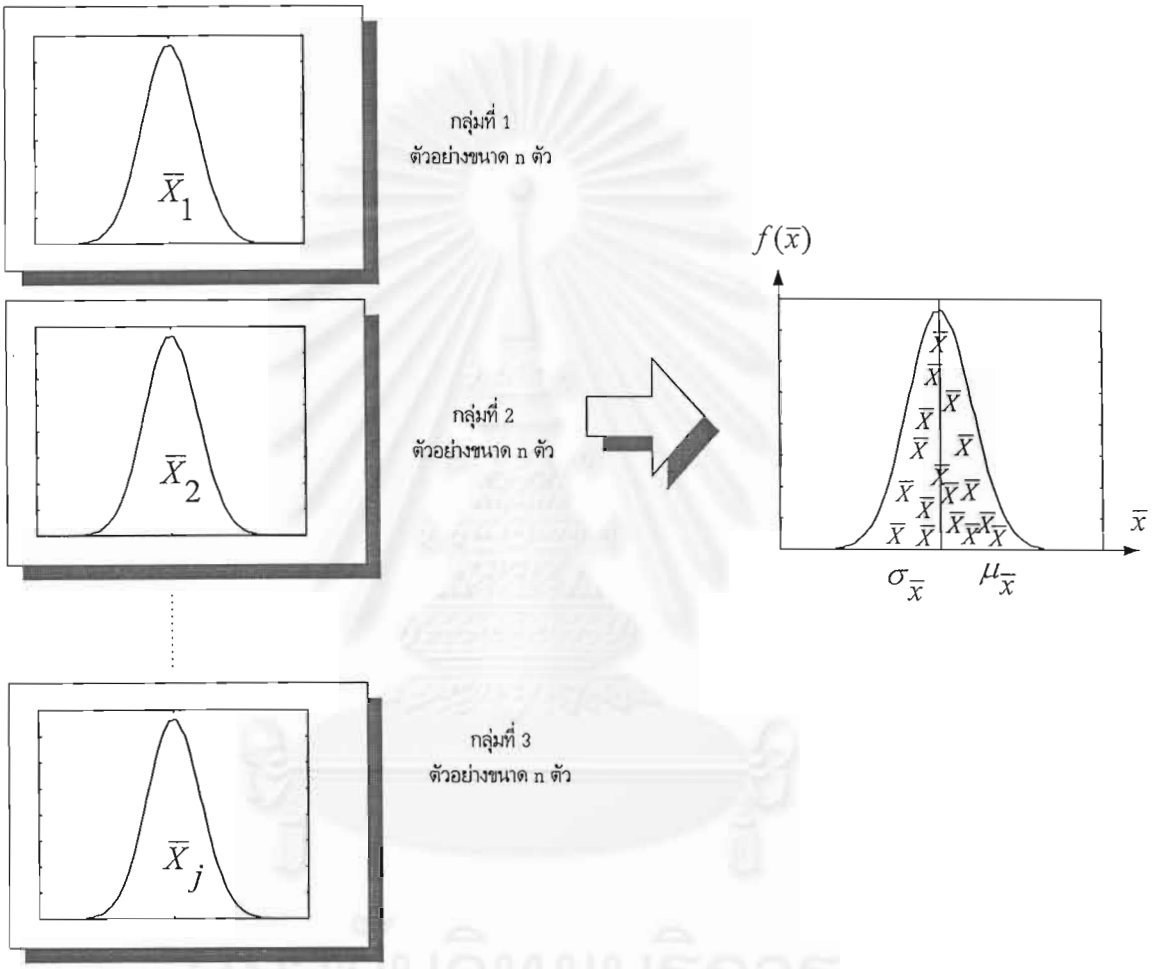
จากรูปที่ 2.6 เป็นการกระจายของจำนวนประชากรอุณหภูมิ ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น μ และค่าความแปรปรวนเป็น σ^2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น σ สิ่งที่ใช้แทนค่าความไม่แน่นอนชนิด A ก็คือ ค่าเบี่ยงเบนมาครฐานซึ่งไม่ทราบค่าแต่จะประมาณจากการสุ่มค่าจากตัวอย่างอุณหภูมิ n ตัวมาทั้งหมด j กลุ่ม แต่ละกลุ่มจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\bar{x}$ [2] สามารถหาได้จากสมการได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2.3}$$

โดยที่ค่า x_i คือ ค่าอุณหภูมิที่สุ่มได้ครั้งที่ i

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิจากการสุ่ม n ครั้ง

ที่ค่า $\bar{x}$ แต่ละค่าจะมีค่าความถี่ของ $\bar{x}$ เท่ากับ f_i และค่าความถี่สัมพัทธ์ $f(\bar{x})$ มีค่าเท่ากับ $\frac{f_i}{j}$ เมื่อนำค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแต่ละกลุ่มมาวาดกราฟการแจกแจงความถี่ จะได้กราฟแจกแจงความถี่ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิแต่ละกลุ่มแสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การวาดกราฟแจกแจงความถี่ของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิจากการวัด n ครั้งเป็นจำนวน j กลุ่ม

ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิกลุ่มตัวอย่างจากการวัดสุ่ม n ครั้ง เป็นจำนวน j กลุ่มสามารถหาได้จากสมการ [2]

$$\mu_{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{c} f_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{c} f_i} \qquad (2.4)$$

โดยที่ค่า f_i คือ ค่าของความถี่ของค่าเฉลี่ยครั้งที่ i

$\bar{x}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยครั้งที่ i

c คือ จำนวนครั้งของความถี่ f_i ที่เกิดขึ้น

และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่างในการวัด n ครั้งเป็นจำนวน j กลุ่ม สามารถหาได้จากสมการ [2]

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{c} f_i(\bar{x}_i - \mu_{\bar{x}})^2}{\sum_{i=1}^{c} f_i}} \tag{2.5}$$

ในการวัดจริงไม่สามารถวัดได้หลายกลุ่ม แต่สามารถวัดได้เพียงกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งเท่านั้น จึงประมาณค่าของ $\sigma_{\bar{x}}$ ด้วยสมการ [2]

$$S_j(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{2.6}$$

ดังนั้นสามารถประมาณค่าของ σ จากการสุ่มวัดเพียงกลุ่มเดียวได้จากสมการ [2]

$$S(\bar{x}) = \frac{S_j(\bar{x})}{\sqrt{n}} \tag{2.7}$$

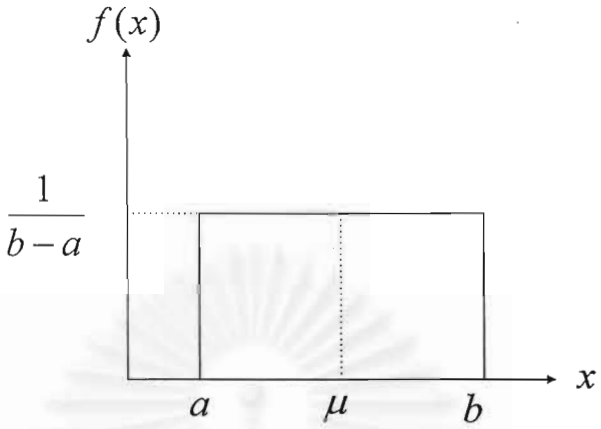
ค่าของ $S(\bar{x})$ เป็นค่าประมาณของ σ เราจะใช้แทนค่าความไม่แน่นอนชนิด A จากแหล่งความไม่แน่นอนแต่ละแหล่งได้แก่เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง และเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบจากสมการ [2]

$$u(x_i) = S(\bar{x}) \tag{2.8}$$

2. ค่าความไม่แน่นอนชนิด B โดยปรกติจะเป็นค่าความไม่แน่นอนของระบบ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นผลของความผิดพลาดของการวัดคงที่ทุกครั้งที่ทำการทดสอบ โดยไม่สามารถทำให้ลดลงโดยการทำซ้ำได้ โดยการหาค่าความไม่แน่นอนชนิด B ส่วนใหญ่จะอ้างอิงมาจากแหล่งข้อมูลเพิ่มเติมซึ่งจะทราบในลักษณะของ

- การแจกแจงของการวัดในครั้งก่อน
- ข้อกำหนดจำเพาะของผู้ผลิตหรือจากเอกสารอ้างอิง
- Resolution ของเครื่องมือวัด หรือ จากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Tolerance limit)
- ข้อมูลในใบรับรองการสอบเทียบ

วิธีการหาค่าความไม่แน่นอนชนิด B จากแหล่งข้อมูลแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันเช่น กรณีที่ทราบการกระจายที่แน่นอนจากผู้ผลิตโดยความไม่นอนมีการกระจายเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า [3] ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การกระจายแบบแจกแจงความถี่เป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B ก็จะสามารถหาได้จากสมการ [6]

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{3}} \tag{2.9}$$

โดยที่ [3] $s = b - u = u - a$ คือ ค่า Semi-range ซึ่งค่าการกระจายจะอยู่ระหว่าง a ถึง b

กรณีที่การประเมินจากค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ก็จะมีการกระจายเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งค่าความไม่แน่นอนชนิด B สามารถประเมินได้เช่นเดียวกันกับกรณีทราบการกระจายแน่นอนจากผู้ผลิต หรือกรณีที่ประเมินจากค่า Resolution ของเครื่องมือวัดแบบดิจิทัล สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนชนิด B ได้จากสมการ

$$u(x_i) = \frac{q}{2\sqrt{3}} \tag{2.10}$$

โดยที่ค่า q คือค่า Resolution ของเครื่องมือวัด

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมได้จากการรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน แต่ละตัวไม่ว่าจะเกิดจากการประเมินชนิด A หรือการประเมินชนิด B โดยวิธีการรวมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เรียกว่ากฎการกระจายความไม่แน่นอน และวิธีรากที่สองของผลบวกยกกำลังสอง โดยค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมสามารถหาได้จากสมการ [23]

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} c_i^2 u^2(x_i)} \tag{2.11}$$

โดยที่ c_i คือค่า Sensitivity Coefficient ซึ่งจะค่าเท่ากับ $\frac{\partial f}{\partial x_i}$

สำหรับกรณีที่ค่า c_i =1 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมก็จะเป็น

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u^2(x_i)} \qquad (2.12)$$

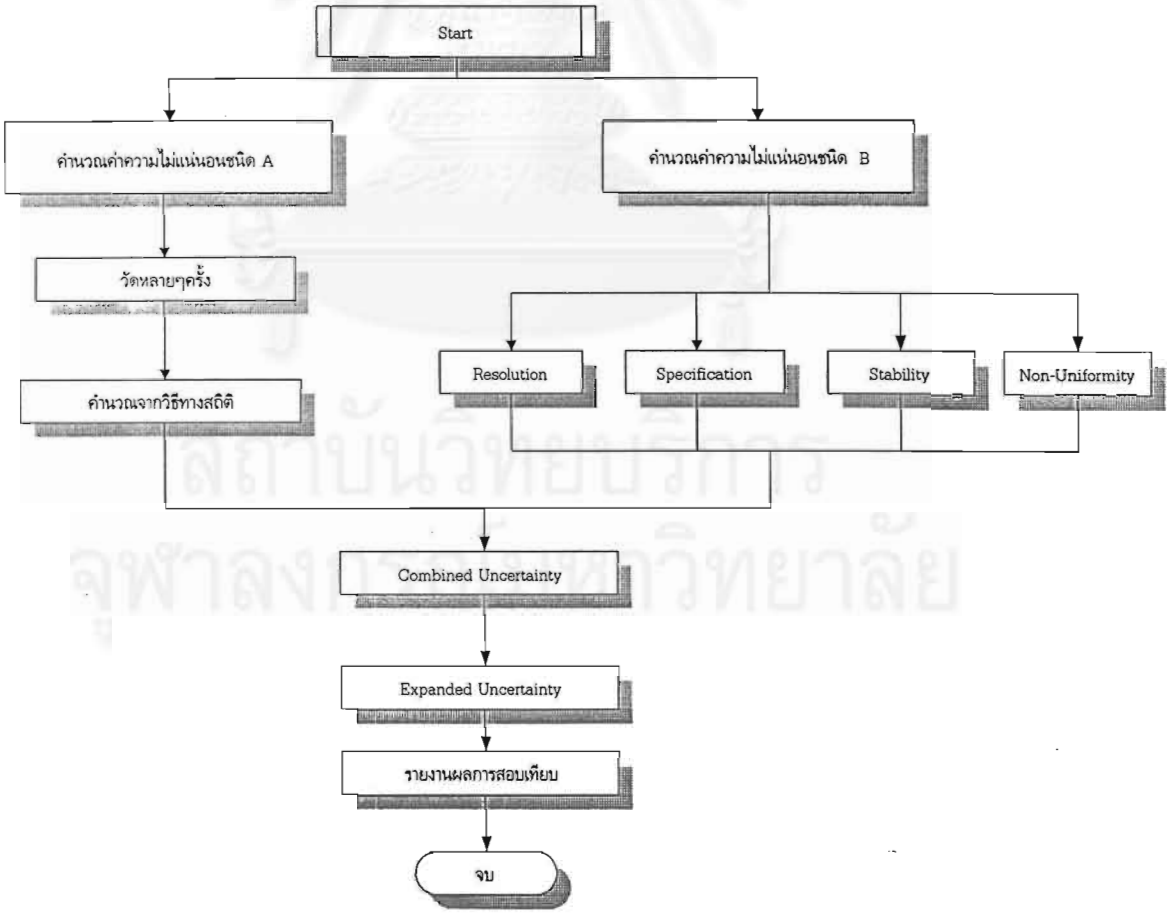
ซึ่งก็จะตรงกับวิธีรากที่สองของผลบวกยกกำลังสอง แต่ในบางกรณีการรายงานค่าความไม่แน่นอนอาจแสดงอยู่ในรูปของค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [23]

$$U = ku_c(y) \qquad (2.13)$$

โดยที่ค่า k คือค่า Coverage Factor ซึ่งสามารถประเมินได้จากการกระจายของข้อมูลและระดับความเชื่อมั่นตามที่ใช้แต่โดยปรกติถ้าทำการวัดซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง และค่าความไม่แน่นอนชนิด A เป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการ [5]

$$\frac{TypeA}{u_c(y)} < 0.5 \qquad (2.14)$$

จะใช้ระดับค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ซึ่งจะทำให้ได้ค่า k มีค่าเท่ากับ 2 ถ้าไม่เป็นไปตามเงื่อนไขให้ประเมินใหม่ตาม [8] ปรกติในใบรับรองจะแสดงค่าความไม่แน่นอนรวมหรือค่าความไม่แน่นอนขยายเท่านั้น ขั้นตอนของการประเมินค่าความไม่แน่นอนสามารถแสดงได้ [5] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ

2.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการสอบเทียบ ซึ่งเป็นที่แพร่หลายมากในต่างประเทศ เนื่องมาจากอัตราการจ้างค่าแรงค่อนข้างสูง และไม่คุ้มสำหรับการทำงานที่เป็นรูปแบบแน่นอน จึงได้มีการพัฒนาการสอบเทียบให้เป็นแบบอัตโนมัติ ทำให้มีอัตราการใช้แรงงานที่มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ที่ช่วยพัฒนาห้องปฏิบัติการระบบสอบเทียบให้ทำงานง่ายยิ่งขึ้น ส่วนประกอบหลักของระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ ก็คือ ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสอบเทียบ โดยซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการสอบเทียบเครื่องมือวัดนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. ซอฟต์แวร์ที่ควบคุมเครื่องสอบเทียบ และ เครื่องมือวัด (Instrument Control Program) หน้าที่ของซอฟต์แวร์ที่ควบคุมเครื่องสอบเทียบ และ เครื่องมือวัด ก็คือควบคุมขั้นตอนการสอบเทียบตามลำดับขั้นที่มีมาตรฐานหรือ ตามที่ผู้ผลิตเครื่องมือวัดนั้นๆ กำหนดไว้ โดยควบคุมสั่งการทั้งตัวเครื่องปรับเทียบและเครื่องมือวัด เพื่อให้ผลที่น่าเชื่อถือได้และได้ผลลัพธ์ที่ทำซ้ำได้
2. ซอฟต์แวร์ที่ใช้จัดการข้อมูลของห้องปฏิบัติการ (Laboratory Management Program) ซอฟต์แวร์ประเภทนี้จะช่วยในการบริหารเครื่องมือเครื่องวัดที่ทำการรับเข้ามาหรือจ่ายออกไป และออกใบรับรองผลการสอบเทียบ, ป้ายติดเครื่องวัด และอื่นๆ และยังทำการเก็บฐานข้อมูลของเครื่องที่ได้รับการสอบเทียบ เพื่อใช้ในการบ่งบอกผลของการสอบเทียบในการกำหนดความช้าเร็วในการสอบเทียบครั้งใหม่

ซอฟต์แวร์สำหรับระบบสอบเทียบที่ดีจะต้องมีรูปแบบการทำงานหลากหลาย มากมาย เนื่องจากเราไม่สามารถทราบได้ว่าเครื่องวัดอุณหภูมิที่ส่งมาสอบเทียบเป็นแบบใด และเป็นของบริษัทผู้ผลิตใด, สามารถแก้ไขหรือเพิ่มเติมในส่วนของคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบสอบเทียบอัตโนมัติ เนื่องจากจะได้ไม่เจาะจงส่วนประกอบว่าต้องเป็นของบริษัทผู้ผลิตรายใดรายหนึ่ง, สามารถถ่ายเทฐานข้อมูลของระบบสอบเทียบได้หลายแบบ เนื่องมาไม่มีมาตรฐานการจัดเก็บข้อมูลของห้องปฏิบัติการสอบเทียบและบางห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นส่วนใหญ่ยังเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรมจำพวกเวิร์กชีต

2.4.1 ขั้นตอนการสอบเทียบของระบบแบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนการสอบเทียบของระบบแบบอัตโนมัติ จะอ้างอิงจากขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิจริงของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิสถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี เป็นขั้นตอนที่กำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละชนิด โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการสอบเทียบมีดังนี้

1. ขอบข่ายการสอบเทียบ ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ ความไม่แน่นอนต่ำที่สุด และความแม่นยำของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ
2. เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ ได้แก่ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ และเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง
3. สภาวะแวดล้อมที่ควบคุมสำหรับการสอบเทียบ ได้แก่ อุณหภูมิห้องและ ค่าความชื้นสัมพัทธ์
4. เอกสารอ้างอิงสำหรับประกอบการสอบเทียบ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ข้อควรปฏิบัติก่อนทำการเสอบเทียบ

- ศึกษาวิธีการใช้งานของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบตามคู่มือให้ละเอียดก่อนทำการสอบเทียบ
- ตรวจสอบสภาพของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบว่าพร้อมทำการสอบเทียบหรือไม่ ถ้าพบสิ่งผิดปรกติให้ส่งคืน
- ตรวจสอบจุดทดสอบ ว่าต้องสอบเทียบอุณหภูมิที่จุดใดบ้าง

6. การเตรียมอุปกรณ์

- อุ่นเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิก่อนทำการสอบเทียบประมาณ 30 นาที
- เตรียมแท่นยึดหรือเลือก insertion tube สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบและเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง

7. ขั้นตอนการสอบเทียบ

ขั้นตอนการสอเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิในที่นี้จะยกตัวอย่างขั้นตอนการสอบเทียบของเครื่องวัดอุณหภูมิ 2 ชนิดได้แก่

7.1 เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Dial Thermometer

- เมื่ออุ่นเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิแล้วทำการเลือกเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงให้สามารถวัดอุณหภูมิครอบคลุมจุดทดสอบที่จะทำการสอบเทียบได้
- จุ่มเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ และเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงลงในเครื่องกำเนิดอุณหภูมิโดยให้อยู่ในตำแหน่งใกล้กันที่สุด
- ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ โดยอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบให้ตรงกับจุดที่ทำการสอบเทียบ
- เมื่อเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบอ่านค่าตรงกับจุดที่ทำการสอบเทียบ และอยู่ในภาวะสมดุลให้ทำการอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและทำการบันทึกผล
- อ่านค่าซ้ำอีก 4 ครั้งโดยแต่ละครั้งให้ทำการยกเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบขึ้นประมาณ 1 นิ้วทำการจุ่มที่ตำแหน่งเดิม รอสักครู่และทำการอ่านค่าโดยการอ่านแต่ละครั้งต้องอ่านจากเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบและเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงในเวลาเดียวกัน หรือใกล้เคียงกันที่สุด และก่อนอ่านค่าควรเคาะเบาๆ ที่เครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบเพื่อลด Hysteresis แล้วบันทึกผล
- ทำซ้ำจนครบทุกค่าอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ
- ตรวจสอบว่าอยู่ในข้อกำหนดหรือไม่ ถ้าอยู่นอกข้อกำหนดและลูกค้าต้องการให้ปรับเทียบ ต้องปรับตามข้อปฏิบัติ

7.2 เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD

- ต่อ RTD และเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงเข้ากับเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิมาตรฐานและ จุ่มเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ และเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงลงในเครื่องกำเนิดอุณหภูมิโดยให้อยู่ในตำแหน่งใกล้กันที่สุด

- ทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ โดยอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง ให้ตรงกับจุดที่ทำการสอบเทียบ
- เมื่อเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงอ่านค่าตรงกับจุดที่ทำการสอบเทียบ และอยู่ในสภาวะสมดุลให้ทำการอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบและทำการบันทึกผล
- ทำการอ่านค่าซ้ำอีก 4 ครั้งโดยแต่ละครั้งให้ทำการยกเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบขึ้นประมาณ 1 นิ้วทำการจุ่มที่ตำแหน่งเดิม รอสักครู่และทำการอ่านค่าโดยการอ่านแต่ละครั้งต้องอ่านจากเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบและเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงในเวลาเดียวกัน หรือใกล้เคียงกันที่สุด ทำการบันทึกผล
- ทำซ้ำจนครบทุกค่าอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ

8. การรายงานผล

- คำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละจุดทดสอบเพื่อนำไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำ
- คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในทุกๆส่วนของการสอบเทียบ และนำมารวมเป็นความไม่แน่นอนของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบ
- นำผลที่ได้พิมพ์ลงในใบรับรอง

2.4.2 การหาสภาวะเสถียรของอุณหภูมิและการตั้งค่าอุณหภูมิ

ระบบสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติจะต้องมีหลักการในการตั้งค่าอุณหภูมิให้กับเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและต้องมีการตรวจสอบหาเสถียรภาพของอุณหภูมิ เนื่องจากเป็นส่วนที่สำคัญในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ การหาสภาวะเสถียรจะทำการคำนวณค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิทุกๆครั้งที่ทำการอ่านค่าอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงขึ้นมา โดยจะทำการเลื่อนข้อมูลไปเรื่อยๆและทำการบันทึกข้อมูลไว้จำนวน 10 ค่ามาทำการคำนวณค่าความแปรปรวนโดยแสดงได้ดังสมการ

$$V(t_n) = \frac{1}{(10)} \sum_{k=1}^{10} \left(t(n-k-1) - \left[\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} t(n-i-1) \right] \right)^2 \qquad (2.13)$$

โดยที่ t_n คือค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง ณ เวลา n ใดๆ

เมื่อเปรียบเทียบ $V(t_n)$ กับค่าความแปรปรวนที่ยอมรับได้ เมื่อค่า $V(t_n)$ มีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนที่ยอมรับได้จะทำการหน่วงเวลาไว้ระยะหนึ่ง โดยในช่วงที่หน่วงเวลาค่า โดยที่ $V(t_n)$ จะต้องยังน้อยกว่าค่าความแปรปรวนที่ยอมรับได้อยู่ ถ้าช่วงใดช่วงหนึ่งค่า $V(t_n)$ มากกว่าค่าความแปรปรวนที่ยอมรับได้จะต้องเริ่มทำการหน่วงค่าเวลาใหม่ จนกระทั่งสามารถหน่วงเวลาจนครบแล้ว ณ จุดนี้จะถือว่าค่าของอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะเสถียรแล้ว

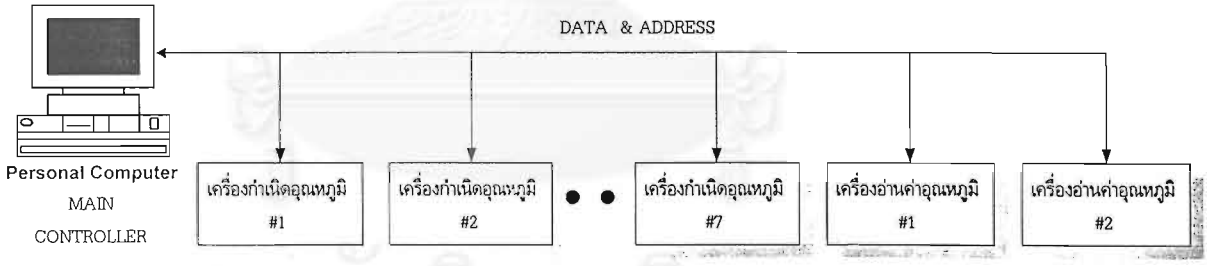
เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะเสถียรทำการอ่านค่าอุณหภูมิเข้ามาโดยจะการอ่านค่าอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับว่าใช้เครื่องวัดอุณหภูมิตัวใดเป็นตัวอ้างอิงโดยพิจารณาว่าเป็นการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดใด เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิ ณ จุดทดสอบถ้าค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ก็จะอ่านค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิที่เหลือ ถ้าอยู่นอกขอบเขตก็แก้ไขค่าอุณหภูมิและตั้งค่าเครื่องกำเนิดอุณหภูมิใหม่และรอจนกระทั่งค่าที่ได้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้จึงบันทึกผลการสอบเทียบ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ณ จุดทดสอบเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิที่ต้องการให้มีค่าเท่าอุณหภูมิทดสอบมีค่าเท่ากับ 100.23 องศาเซลเซียส ค่าขอบเขตที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส ค่าความแตกต่างเท่ากับ 100 -100.23 = -0.23 องศาเซลเซียส ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิใหม่โดยมีค่าเท่ากับ 100+(-0.23) = 99.77 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิที่นำมารวมจะเป็นค่าที่ตั้งตัวกำเนิดอุณหภูมิไว้ก่อนหน้านั้นจากตัวอย่างเป็นการแก้ไขอุณหภูมิครั้งแรก ค่าอุณหภูมิที่ตั้งที่เครื่องกำเนิดอุณหภูมิจึงมีค่าเท่ากับค่าอุณหภูมิ ณ จุดทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การออกแบบระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

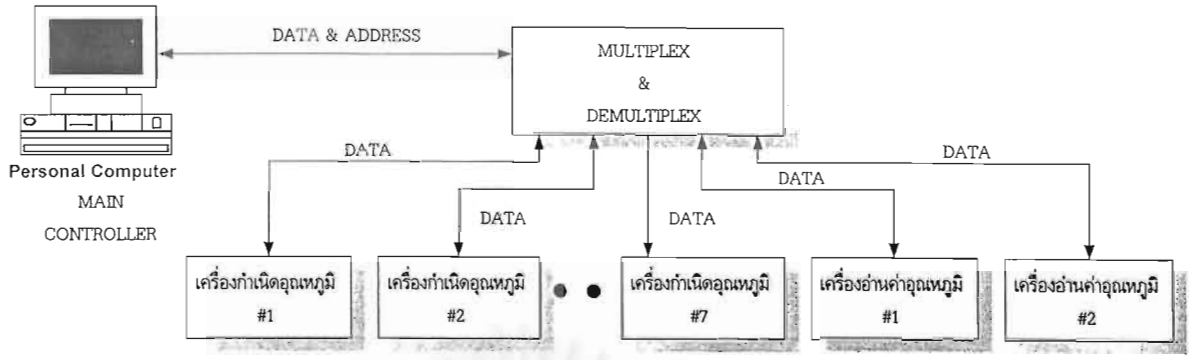
ระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ เป็นระบบสอบเทียบที่ใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยการทำงานของมนุษย์ โดยจะทำหน้าที่ตั้งแต่การควบคุมกระบวนการของการสอบเทียบอุณหภูมิ ไปจนถึงขั้นออกใบรับรองการสอบเทียบ และการจัดการฐานข้อมูลของการสอบเทียบ ระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติต้องควบคุมระบบสอบเทียบได้หลายๆ ระบบพร้อมกัน โดยเครื่องมือวัดที่ใช้ประกอบการสอบเทียบอุณหภูมิของแต่ละระบบประกอบด้วย เครื่องกำเนิดอุณหภูมิ และเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ ทำให้คอมพิวเตอร์ต้องสามารถควบคุมอุปกรณ์ได้หลายๆ ชนิดพร้อมกัน เครื่องมือวัดโดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้จะมีมาตรฐานการเชื่อมต่อเป็น IEEE-488 (GPIB), RS-485, RS-422 และ RS-232 รูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1. โครงสร้างการเชื่อมต่อที่เป็นแบบ BUS เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถติดต่อกับเครื่องมือวัดได้โดยตรงโดยที่เครื่องมือวัดที่ติดต่อมีด้วยกันหลายตัว การติดต่อแบบนี้ข้อมูลที่วิ่งอยู่บน BUS ประกอบไปด้วยตำแหน่ง (Address) ของเครื่องมือวัดที่ต้องการจะติดต่อด้วย และข้อมูลที่ใช้ติดต่อ (Data) เครื่องมือวัดจะตรวจสอบตำแหน่งก่อน ถ้าข้อมูลส่วนที่ระบุตำแหน่งตรงกับตำแหน่งของตัวเองแล้ว ถึงจะตรวจสอบข้อมูลที่ใช้ติดต่อกันภายหลัง การเชื่อมต่อรูปแบบนี้ เหมาะสำหรับระบบที่มีเครื่องมือวัดหลายๆ ตัว และต้องการจะติดต่อด้วยอัตราความเร็วสูง มีการโต้ตอบกันบ่อยครั้ง มาตรฐานที่เป็นการเชื่อมต่อรูปแบบนี้ได้แก่ IEEE-488 และ RS-485 แสดงรูปการเชื่อมต่อได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการเชื่อมต่อที่เป็นแบบ BUS

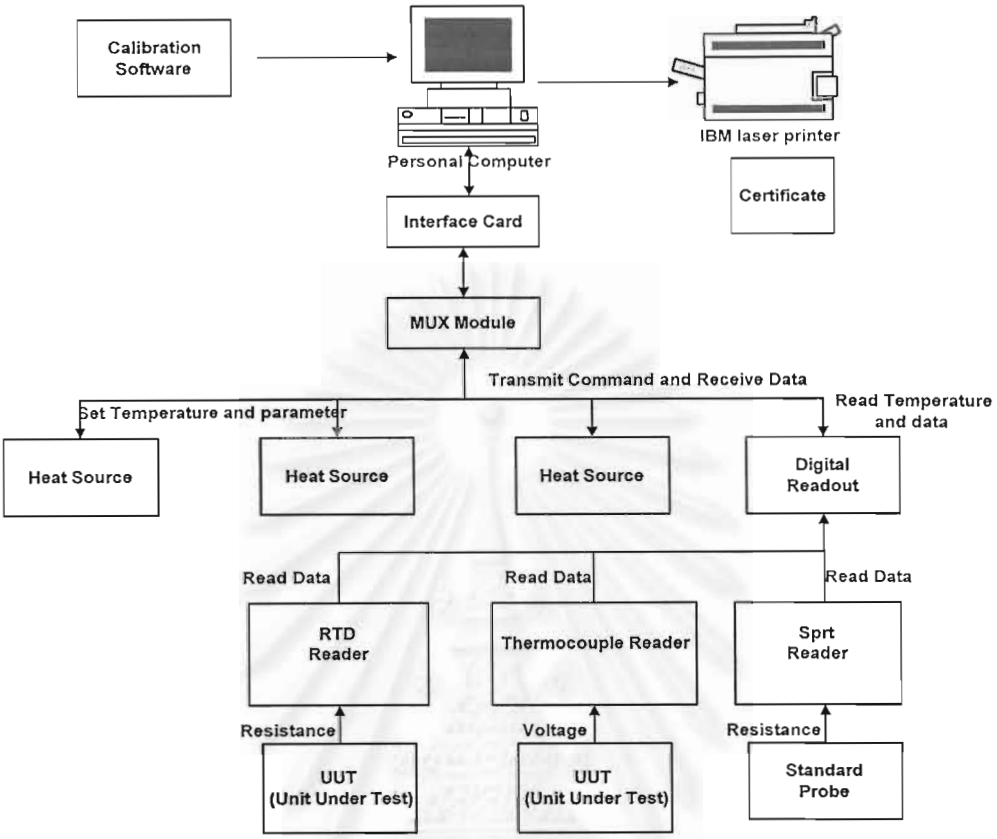
2. โครงสร้างการเชื่อมต่อที่เป็นแบบสวิตช์ การเชื่อมต่อแบบนี้พื้นฐานก็คือ เป็นการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด แต่สามารถพัฒนาให้ติดต่อกับจุดอื่นๆ เพิ่มขึ้นได้ โดยจะต้องเพิ่มส่วนของอุปกรณ์สวิตช์ขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่สลับการติดต่อไปยังจุดอื่นๆ เมื่อตัวควบคุมหลักต้องการจะติดต่อกับอุปกรณ์ตัวใด จะส่งข้อมูลบอกตำแหน่งอุปกรณ์ไปยังตัวสวิตช์เพื่อเลือกอุปกรณ์ที่จะติดต่อด้วยก่อน หลังจากนั้นจะติดต่อกับอุปกรณ์นั้นๆ ตามปรกติ การเชื่อมต่อรูปแบบนี้เหมาะสำหรับระบบที่มีเครื่องมือวัดไม่มากนัก และจะส่งข้อมูลโต้ตอบกันเมื่อตัวควบคุมหลักส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์นั้นๆ ก่อนทุกครั้ง มาตรฐานที่เป็นการเชื่อมต่อรูปแบบนี้ได้แก่ RS-422 และ RS-232 แสดงรูปการเชื่อมต่อได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างการเชื่อมต่อที่เป็นแบบสวิตช์

เนื่องจากระบบที่ออกแบบใช้สำหรับการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้า ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ และเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิที่มีอยู่ มีส่วนประกอบที่ใช้ติดต่อคอมพิวเตอร์เป็นแบบมาตรฐาน RS-232 เท่านั้น จึงได้เลือกรูปแบบในการเชื่อมต่อเป็นแบบสวิตช์ดังรูปที่ 3.2 ปรกติคอมพิวเตอร์จะมีพอร์ตอนุกรมที่เป็นมาตรฐาน RS-232 อยู่ 2 พอร์ต และจำเป็นต้องสงวนไว้สำหรับอุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ เมาส์, โมเด็ม หรืออุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ประกอบกับหัวเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์มีจำนวนมาก (8 หัว) จึงออกแบบระบบให้มีมัลติเพล็กเซอร์ (สวิตช์) อยู่ภายนอกคอมพิวเตอร์และมีการ์ดเชื่อมต่ออยู่ภายในคอมพิวเตอร์สำหรับการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และมัลติเพล็กเซอร์ ระบบที่ออกแบบสามารถควบคุมการสอบเทียบอุณหภูมิได้พร้อมกันถึงสูงสุด 7 ระบบ และมีการควบคุมการทำงานแต่ละระบบเป็นอิสระต่อกัน คือ เมื่อระบบใดระบบหนึ่งทำการสอบเทียบเสร็จแล้ว สามารถทำการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิตัวต่อไปได้ โดยไม่ต้องรอให้ระบบที่เหลือสอบเทียบเสร็จ และยังสามารถสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้ทั้งชนิดที่อ่านค่าได้โดยเครื่องอ่านค่าดิจิทัล หรือ ชนิดที่อ่านด้วยสายตา การทำงานของระบบก็คือจะต้องทำการกำหนดการเชื่อมต่อของเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบเสียก่อน โดยจะต้องกำหนดพอร์ตที่ใช้ในการเชื่อมต่อของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ กำหนดพอร์ตที่ใช้ในการเชื่อมต่อเครื่องอานค่าอุณหภูมิ, ค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบ เมื่อเริ่มทำการสอบเทียบระบบจะทำการสั่งงานเครื่องกำเนิดอุณหภูมิให้กำเนิดอุณหภูมิตามจุดที่ทดสอบโดยจะมีโปรแกรมในการแก้ไขค่าอุณหภูมิเพื่อช่วยให้ได้ค่าอุณหภูมิตรงกับอุณหภูมิตามจุดที่ทดสอบ การแก้ไขค่าอุณหภูมิจะกระทำโดยการสั่งงานเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิเพื่อพิจารณาถึงเสถียรภาพของอุณหภูมิ และจุดที่อุณหภูมิอยู่ในภาวะเสถียร ในการสลับพอร์ตที่ใช้ติดต่อจะกำหนดจากโปรแกรมสั่งงานลงมายังอุปกรณ์เชื่อมต่อแบบขนาน เพื่อเลือกพอร์ตที่ต้องการจะติดต่อ เนื่องจากสามารถทำงานได้ทั้งรูปแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ หรือกึ่งอัตโนมัติ ส่วนประกอบของระบบสอบเทียบอุณหภูมิ คือ ซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมระบบการสอบเทียบ, การ์ดเชื่อมต่อซึ่งติดตั้งอยู่บนคอมพิวเตอร์, มัลติเพล็กเซอร์ที่ใช้ติดต่อแบบมาตราฐาน RS-232, เครื่องกำเนิดอุณหภูมิที่สามารถควบคุมได้ผ่านพอร์ตอนุกรม และเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิแบบดิจิทัลที่สามารถอ่านค่าผ่านพอร์ทอนุกรมได้ โดยรวมโมดูลที่ใช้ในการอ่านค่าเครื่องวัด

อุณหภูมิแบบ SPRT, เทอร์โมคัปเปิล และ RTD หรือ Thermister การเชื่อมต่อของระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

ระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติที่ออกแบบจะต้องสามารถต่อพ่วงกับอุปกรณ์ได้ 8 ชิ้นทั้งแหล่งกำเนิดความร้อน และเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิแบบดิจิทัล โดยจะทำการติดต่อเป็นแบบมาตรฐาน RS-232 ซึ่งเป็นมาตรฐานการติดต่อแบบอนุกรมที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ระดับแรงดันสัญญาณของ RS-232 จะไม่เท่ากับ TTL คือ ข้อมูล 1 จะแทนด้วยระดับแรงดัน -3 ถึ ง -25 โวลต์ และ ข้อมูล 0 จะแทนด้วยระดับแรงดัน 3 ถึง 25 โวลต์ ทำให้สามารถใช้งานกับสายเคเบิ้ลได้ถึงระดับความยาว 5 ฟุต แต่เนื่องจากคอมพิวเตอร์ทั่วๆไปมีพอร์ตอนุกรมเพียง 2 พอร์ต เพื่อแก้ปัญหานี้จึงออกแบบส่วนประกอบที่ใช้ในการเชื่อมต่อจะประกอบไปด้วย การ์ดเชื่อมต่อ และ มัลติเพล็กเซอร์ ซึ่งจะต้องใช้งานร่วมกัน หลักการทำงานก็คือการ์ดเชื่อมต่อจะทำหน้าที่จัดเรียงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ มาตรฐาน UART สามารถกำหนดความยาวข้อมูล ความยาวบิตสิ้นสุด และการตรวจสอบความผิดพลาดได้ มีพอร์ตขนานสำหรับการเลือกตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ต้องการจะติดต่อด้วย คอมพิวเตอร์จะส่งตำแหน่งของอุปกรณ์ผ่านทางพอร์ตขนานไปยังมัลติเพล็กเซอร์เพื่อสวิตช์ไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการจะติดต่อด้วย หลังจากนั้นถึงจะส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์นั้นๆ รายละเอียดของการ์ดเชื่อมต่อ และมัลติเพล็กเซอร์สามารถแสดงได้ดังนี้

3.1.1 การ์ดเชื่อมต่อ

การ์ดเชื่อมต่อจะออกแบบโดยอิงมาตรฐาน IBM PC AT ประกอบไปด้วยบัสข้อมูล D0-D7, บัสแอดเดรส A0-A19, IOR, IOW, MEMR, MEMW และสัญญาณควบคุมอื่นๆ รวมถึง DMA (Direct Memory Access) และ การขัดจังหวะ (Interrupt) ซึ่งการ์ดเชื่อมต่อจะทำงานที่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา 8.547 MHz การ์ดเชื่อมต่อจะประกอบไปด้วย

1. ส่วนถอดรหัสแอดเดรส
2. ส่วนควบคุมอัตราการส่งข้อมูล
3. ส่วนการรับส่งข้อมูลแบบ UART
4. ส่วนการเลือกช่องสัญญาณ

การ์ดเชื่อมต่อที่ออกแบบจะมีแอดเดรสอยู่ที่ตำแหน่ง 310H-31DH สามารถเลือกใช้งานการขัดจังหวะ (Interrupt) ได้จากจัมเปอร์ 3 ตำแหน่งคือ IRQ10 - IRQ12 ตำแหน่งแอดเดรสของ IBM PC AT สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ตำแหน่งแอดเดรสและหน้าที่การใช้งานของคอมพิวเตอร์ IBM

ตำแหน่งแอดเดรส (Hex Range)	การใช้งาน
000-00F	DMA Chip 8237A-5
020-021	Interrupt 259A
040-043	Timer 8253-5
060-063	PPI 8255A-5
080-083	DMA Page Registers
0Ax*	NMI Mask Registers
0Cx	Reserved
0Ex	Reserved
100-1FF	Not Usable
200-20F	Game Control
210-217	Expansion Unit
220-24F	Reserved
278-27F	Reserved
2F0-2F7	Reserved
2F8-2FF	Asynchronous Communication (Secondary)
300-31F	Prototype Card
320-32F	Fixed Disk

ตาราง 3.1 (ต่อ) ตำแหน่งแอดเดรสและหน้าที่การใช้งานของคอมพิวเตอร์ IBM

378-37F	Printer
380-38C	SDLC Communications
380-389	Binary Synchronous Communications (Secondary)
3A0-3A9	Binary Synchronous Communications (Primary)
3B0-3BF	IBM Monochrome Display/Printer
3C0-3CF	Reserved
3D0-3DF	Color/Graphics
3E0-3F7	Reserved
3F0-3F7	Diskette
3F8-3FF	Asynchronous Communication (Primary)

ตำแหน่งแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัวบนการ์ดเชื่อมต่อสามารถแสดงได้ดังนี้

1. 8253 อยู่ที่ตำแหน่งแอดเดรส 310H-313H
2. 8255 อยู่ที่ตำแหน่งแอดเดรส 314H-317H
3. 8251 อยู่ที่ตำแหน่งแอดเดรส 31CH-31DH

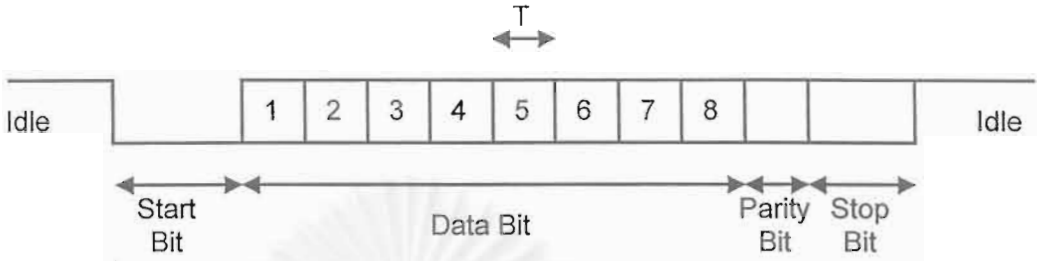
จะเห็นได้ว่าตำแหน่งแอดเดรสของอุปกรณ์ภายนอกจะมีค่าไม่เกิน 3FFH ทำให้การออกแบบส่วนของการถอดรหัสตำแหน่งแอดเดรสใช้ Address Bus A0-A9 สามารถแสดงตำแหน่งของอุปกรณ์แบบเลขฐานสองได้ดังตาราง

ตาราง 3.2 การถอดรหัสตำแหน่งแอดเดรสของอุปกรณ์บนการ์ดเชื่อมต่อ

A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Address (HEX)
1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	310
1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	313
1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	314
1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	317
1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	31C
1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	31D

จากตารางจึงเลือกตำแหน่งแอดเดรส A5, A3, A2 เป็นอินพุตของวงจรรวมถอดรหัส 74138 โดยมีส่วนของสัญญาณ AEN มาต่อด้วยเนื่องจากให้แน่ใจได้ว่าเป็นการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เนื่องจากสัญญาณ AEN จะเป็น 1 เมื่อมีการทำ DMA และจะติดต่อกับหน่วยความจำเท่านั้น

ส่วนการรับส่งข้อมูลแบบ UART จะใช้วงจรรวม 8251A โดยจะออกแบบให้มีการใช้งานในแบบอะซิงโครนัส สามารถเลือกอัตราการรับส่งข้อมูลได้ตั้งแต่ 300 – 19.2 KBuad ส่งข้อมูลได้ครั้งละ 5-8 บิตต่อเฟรม และมีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลแบบพาริตี โดยจะมีส่วนการจัดเรียงข้อมูล 1 เฟรมดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของข้อมูล 1 เฟรมในการส่งแบบอะซิงโครนัส

ส่วนที่จะกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูลจะกำหนดมาจากวงจรรวม 8253 โดยจะทำการหารความถี่สัญญาณนาฬิกาที่อยู่บน slot ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.547 MHz แล้วป้อนให้กับวงจรรวม 8251A เพื่อกำหนดอัตราการส่งและรับข้อมูลโดยจะใช้อัตราส่งและรับเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหารและอัตราการส่งข้อมูลสามารถแสดงได้ดังตาราง 3.3

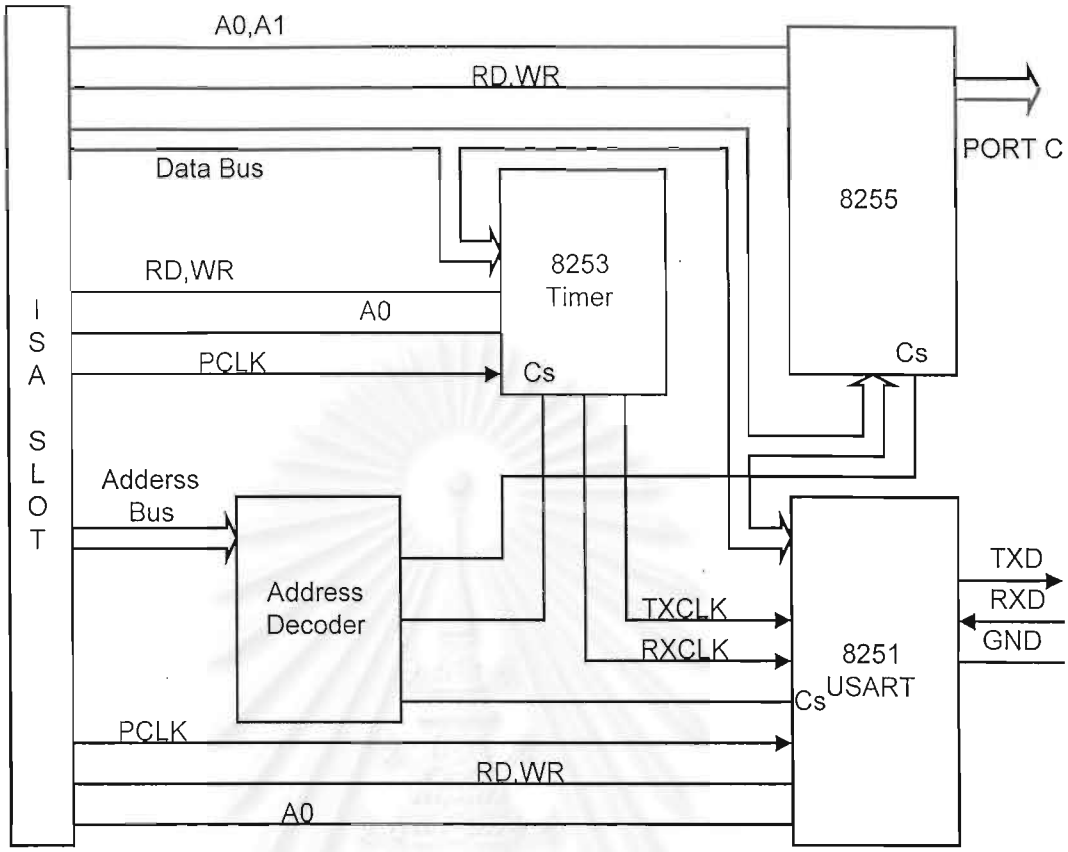
ตาราง 3.3 ค่าอัตราการหารความถี่ที่อัตราการรับส่งข้อมูลต่างๆ และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

อัตรารับส่งข้อมูล (bps)	ค่าการหาร	อัตรารับส่งข้อมูลที่ได้ (bps)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด x100 (%)
300	448	298	0.66
1200	112	1192	0.66
2400	56	2385	0.62
4800	28	4770	0.62
9600	14	9539	0.63
19200	7	19078	0.63

ส่วนประกอบของการ์ดเชื่อมต่อมีดังนี้

1. วงจรรวม 8255 สำหรับการขยายพอร์ตขนาน
2. วงจรรวม 8251 สำหรับการติดต่อแบบอนุกรมที่เป็นแบบอะซิงโครนัส
3. วงจรรวม 8253 สำหรับการกำหนดอัตราการรับส่งข้อมูล
4. ส่วนถอดรหัสตำแหน่ง (Address) สำหรับระบุตำแหน่งของวงจรรวมแต่ละตัว

การเชื่อมต่อของอุปกรณ์และรายละเอียดของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.5

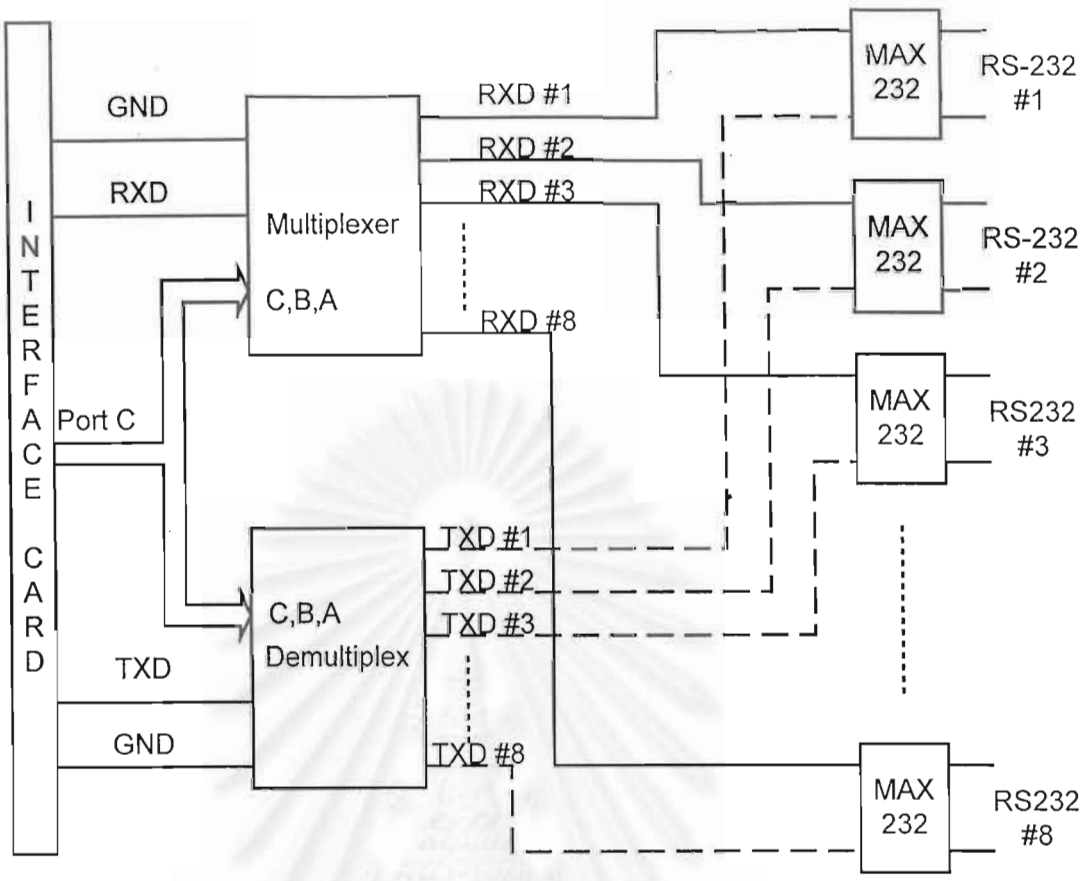


รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของส่วนของการ์ดเชื่อมต่อ

3.1.2 มัลติเพล็กเซอร์

มัลติเพล็กเซอร์เป็นส่วนที่ใช้ในการเลือกอุปกรณ์ที่จะทำการติดต่อด้วย โดยจะแบ่งเป็นส่วนในการรับข้อมูลและส่วนในการส่งข้อมูล ซึ่งจะทำการเลือกช่องที่จะทำการติดต่อจากพอร์ต C ของ 8255 และส่วนในการเชื่อมต่อแบบมาตรฐาน RS-232 จะใช้ MAX 232 ในการแปลงแรงดันจากมาตรฐาน TTL ให้อยู่ในแบบมาตรฐานของ RS-232

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมของส่วนของมัลติเพล็กเซอร์

3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ใช้สำหรับระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ใช้ควบคุมกระบวนการสอบเทียบ และ ส่วนที่ใช้ในการประมวลผลและออกใบรับรอง โดยภาษาที่ใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์จะเป็นภาษาซี คอมไพเลอร์ที่ใช้คือ C++ Builder 4 ซึ่งเหมาะสำหรับการเขียนโปรแกรมแบบวิชวลที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดส์ มีอุปกรณ์ในการออกแบบหลากหลาย และมีไลบารีในการเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์อื่นๆได้สะดวก มีความรวดเร็วที่ทัดเทียมหรือกว่าซอฟต์แวร์ชนิดอื่นๆ โดยซอฟท์แวร์สำหรับระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติที่ได้ออกแบบจะแบ่งส่วนต่างๆออกเป็นส่วนย่อยๆ ทำให้การแก้ไขหรือพัฒนาซอฟต์แวร์ทำได้สะดวกและรวดเร็ว ส่วนประกอบต่างๆสามารถจำแนกได้ดังนี้

3.2.1 ส่วนหลักที่ใช้ในการควบคุมการสอบเทียบ

ซอฟต์แวร์ในส่วนนี้จะทำหน้าที่ควบคุมการสอบเทียบทั้ง 3 ระบบ พร้อมๆกัน โดยกระบวนการในการสอบเทียบจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องมือและเงื่อนไขที่ใช้ในการสอบเทียบ โดยเริ่มแรกจะทำการเรียกโมดูลสำหรับค่าเริ่มต้น และรอรับค่าของรูปแบบที่ใช้ในการสอบเทียบ, เงื่อนไขในการสอบเทียบ, รูปแบบของการเชื่อมต่อกับพอร์ทอนุกรม และตัวแปรที่ใช้ในการแสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ จากนั้นจะ

รอคำสั่งให้เริ่มการสอบเทียบ โดยจะส่งคำสั่งเพื่อให้เครื่องกำเนิดอุณหภูมิตั้งค่าอุณหภูมิที่จุดที่ต้องการจุดแรก และเรียกใช้งานส่วนของการควบคุมเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่ตั้งไว้ และแสดงผลที่หน้าจอหลักและกราฟโดยเรียกใช้ส่วนของการแสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิตลอดช่วงของการสอบเทียบ เมื่ออุณหภูมิตรงกับจุดที่ต้องการที่ตั้งไว้ก็จะทำการอ่านค่าของอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบเพื่อทำการบันทึกไว้ และตั้งค่าอุณหภูมิไปยังจุดที่ต้องการต่อไป ทำกระบวนการซ้ำไปจนกระทั่งครบจุดอุณหภูมิที่ต้องการทุกจุด และนำผลที่ได้ไปทำการคำนวณโดยเรียกส่วนของการคำนวณผลการสอบเทียบ เมื่อได้ผลที่ต้องการก็เก็บไว้เป็นฐานข้อมูล โดยเรียกใช้ส่วนของฐานข้อมูลและรายงาน และทำการออกไปรับรองต่อไป การทำงานของโมดูลหลักสามารถแสดงได้ตามรหัสเทียม (pseudo code) ดังต่อไปนี้

```
Module Main
        Call Module Load Default
        If (Config) Then
                Call Module Setting Calibration Configuration
        If (parameter) Then
                Call Module Setting Calibration Parameter
        If (Port) Then
                Call Module Setting Serial Port
        If (Graph) Then
                Call Module Setting Graph Parameter
        For (Current Setpoint <= End of Setpoint)
                Call Set Temperature of Heat Source
                While ( abs(Temp. Setpoint - Temp. Readout) > Tolelance)
                Call Module Read Temp.
                Call Module Show Graph
                end
                Then Keep Temp. of Standard and UUT.
        end
        Call Module Result Calculation
        Call Module Database and Print Certificate
End Module
```

3.2.2 ส่วนที่ใช้ในการแสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ

กราฟที่แสดงอุณหภูมิจะประกอบไปด้วยอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง และอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบ เพื่อแสดงอุณหภูมิที่ภาวะลู่เข้า, ภาวะคงตัว, ค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิ และค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิโดยการแสดงผลจะใช้ประกอบกับส่วนของการออกใบรับรอง เพื่อบ่งบอกถึงคุณสมบัติของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำมาทดสอบ โดยส่วนของการแสดงกราฟจะต้องรับค่าเงื่อนไขในการแสดงผลจากผู้ใช้ ได้แก่ค่า ช่วงเวลาในการแสดงผล (Time Range) และช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการแสดงผล เพื่อใช้แสดงพิกัดในแนวแกนตั้งและแกนนอน และหาตำแหน่งค่าอุณหภูมิที่จะวาดกราฟ โดยกราฟที่ใช้แสดงผลจะมีขนาด 520 x 320 พิกเซล จุดเริ่มต้นจะอยู่ที่มุมบนซ้ายของกราฟ และสามารถคำนวณหาตำแหน่งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนจาก

$$datapltx = \frac{x - (x\max - x\min) * factor * 520}{(x\max - x\min)} \tag{3.1}$$

$$dataplty = \frac{y - (y\max - y\min) * factor * 320}{(y\max - y\min)} \tag{3.2}$$

โดยที่ค่า *datapltx* คือ ตำแหน่งพิกเซลในแนวแกนนอน

dataplty คือ ตำแหน่งพิกเซลในแกนแกนตั้ง

$x\min$ คือ ค่าตำแหน่งต่ำสุดแกนนอนที่วาดกราฟได้

$x\max$ คือ ค่าตำแหน่งต่ำสุดแกนนอนที่วาดกราฟได้

$y\min$ คือ ค่าตำแหน่งต่ำสุดแกนนอนที่วาดกราฟได้

$y\max$ คือ ค่าตำแหน่งต่ำสุดแกนนอนที่วาดกราฟได้

factor คือ ตัวระบุว่ากราฟอยู่ในหน้าที่เท่าใด

ส่วนของการแสดงกราฟยังสามารถบันทึกข้อมูลในรูปแบบของกราฟฟิก หรือรูปแบบของตัวเลข เพื่อใช้ในการตรวจสอบข้อมูลภายหลัง, ประกอบใบรับรอง และนำไปคำนวณหาคุณสมบัติอื่นๆของเครื่องวัดอุณหภูมิในทางสถิติการทำงานของโมดูลแสดงกราฟจะเป็นไปตามรหัสเทียมดังต่อไปนี้

```
Module Show Graph
        Call Module Setting Graph Configuration
        Call Module Grid and Label
        If (Call Module Plotgraph) Then
        Calculate datapltx and dataplty
                If (datapltx=start) Then
                Move Cursor to Start X-axis
                Else
```

```
                    If (datapltx < RangeX & dataplty < RangeY) Then
                    Draw Lint to Coordinate (datapltx,dataplty)
                    End
                End
            End
End Module
```

3.2.3 ส่วนของการกำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อของเครื่องมือในการสอบเทียบ

ซอฟต์แวร์ในส่วนนี้จะใช้ในการเก็บรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบ เนื่องจากในการอ่านค่าอุณหภูมิจำเป็นที่จะต้องทราบถึงชนิดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิเช่นเป็นแบบ RTD (Resistance Temperature Detector), Thermocouple หรือ SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer) เป็นต้น เพื่อทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการอ่านค่าให้เหมาะสม และต้องทราบรูปแบบของการแสดงค่าอุณหภูมิ และความสามารถในการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านค่าเพื่อกำหนดกระบวนการในการสอบเทียบว่าเป็นแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบหรือเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ ส่วนสุดท้ายก็คือต้องทราบถึงรูปแบบการเชื่อมต่อของระบบสอบเทียบว่าแหล่งกำเนิดอุณหภูมิเป็นชนิดใดและต่ออยู่กับมัลติเพลกเซอร์ที่ช่องใด และเครื่องวัดอุณหภูมิเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิโดยผ่านโมดูลอะไรและใช้งานที่ช่องใด เพื่อจะได้ทราบตำแหน่งของการติดต่อ รหัสเทียมที่ใช้สำหรับการกำหนดรูปแบบการเชื่อมต่อของข้อมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

```
Module Setting Calibration Configuration
For System1:System3
        Select Type of Thermometer
                Case(1) RTD
                Case(2) Thermocouple and TYPE
                Case(3) PRT
                Case(4) Glass Tube
        Select Type of Reading
                Case(Reading by Digital Read out) Use Fully Automatic
        Else
                Case(Visual Reading) Use Semi-Automatic
Select Channel of Heat Source
        Case(1) - Case(8)
Select Channel of Digital
        Case(1) - Case(8)
```

End

Keep Calibration Configuration

End Module

3.2.4 ส่วนควบคุมเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ

การควบคุมเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิสามารถทำได้โดยการส่งคำสั่งในรูปแบบของมาตรฐาน RS-232 เนื่องจากทั้งเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิมีโมดูลสำเร็จที่ใช้ในการติดต่ออยู่แล้ว แต่เราจำเป็นจะต้องทราบคำสั่งและรูปแบบของการติดต่อ และคำสั่งของเครื่องมือแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันไป จึงได้สร้างโมดูลย่อยในการสั่งงานที่เป็นแบบสั่งงานทางเดียว และการสั่งงานแบบรอรับผลตอบสนอง ส่วนของคำสั่งได้จัดอยู่ในรูปของฟังก์ชั่นโดยเมื่อทำการเรียกใช้จะทำการคัดลอกคำสั่งลงในบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการส่ง และรอรับผลตอบสนองเก็บไว้ในส่วนของบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการรับ รหัสเทียมที่ใช้สำหรับควบคุมส่วนของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังนี้

Module Control Heat Source and Digital Read out

Call Command to Heat Source

Read Channel and Baud Rate of Heat Source

Call Module Select Port

Call Module Setting Port

If Command does not has Response

Look up Command and Put to Sending Buffer

Call Transmit Module

Elseif Command has response

Look up Command and Put to Sending Buffer

Call Receive Module

Return Data

Call Command to Digital Read out

Read Channel and Baud Rate of Digital Read out

Call Module Select Port

Call Module Setting Port

If Command does not has Response

Look up Command and Put to Sending Buffer

Call Transmit Module

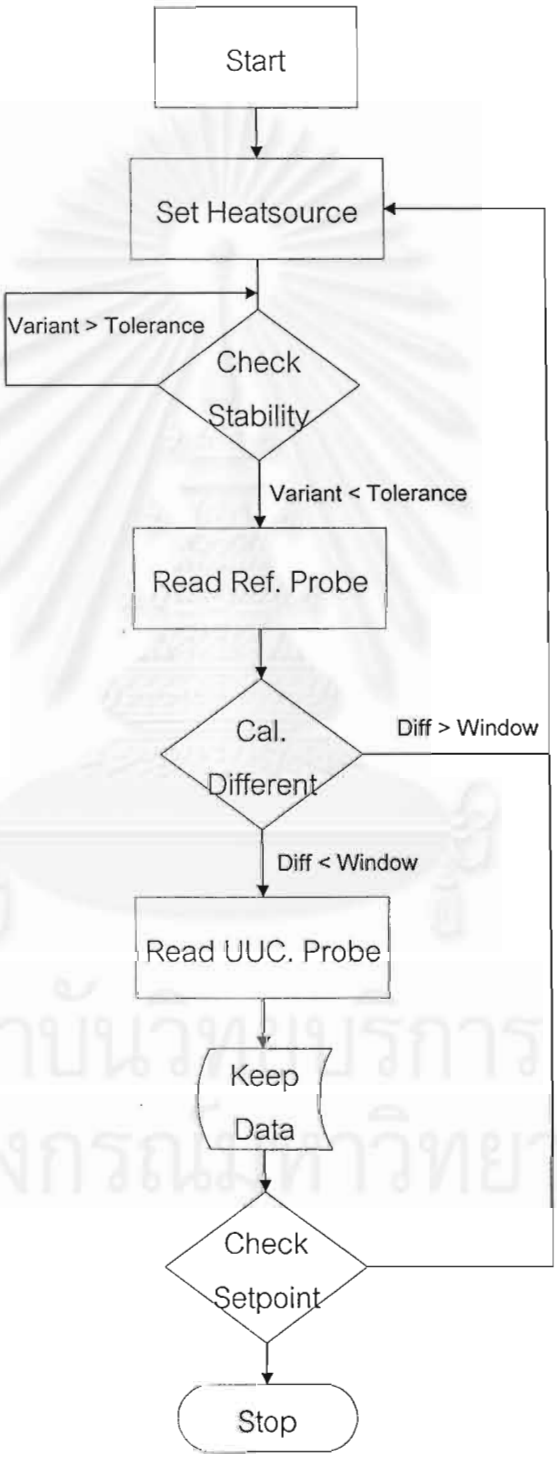
```
        Elseif Command has response
        Look up Command and Put to Sending Buffer
        Call Receive Module
        Return Data
End Module
```

3.2.5 ส่วนกระบวนการในการสอบเทียบ

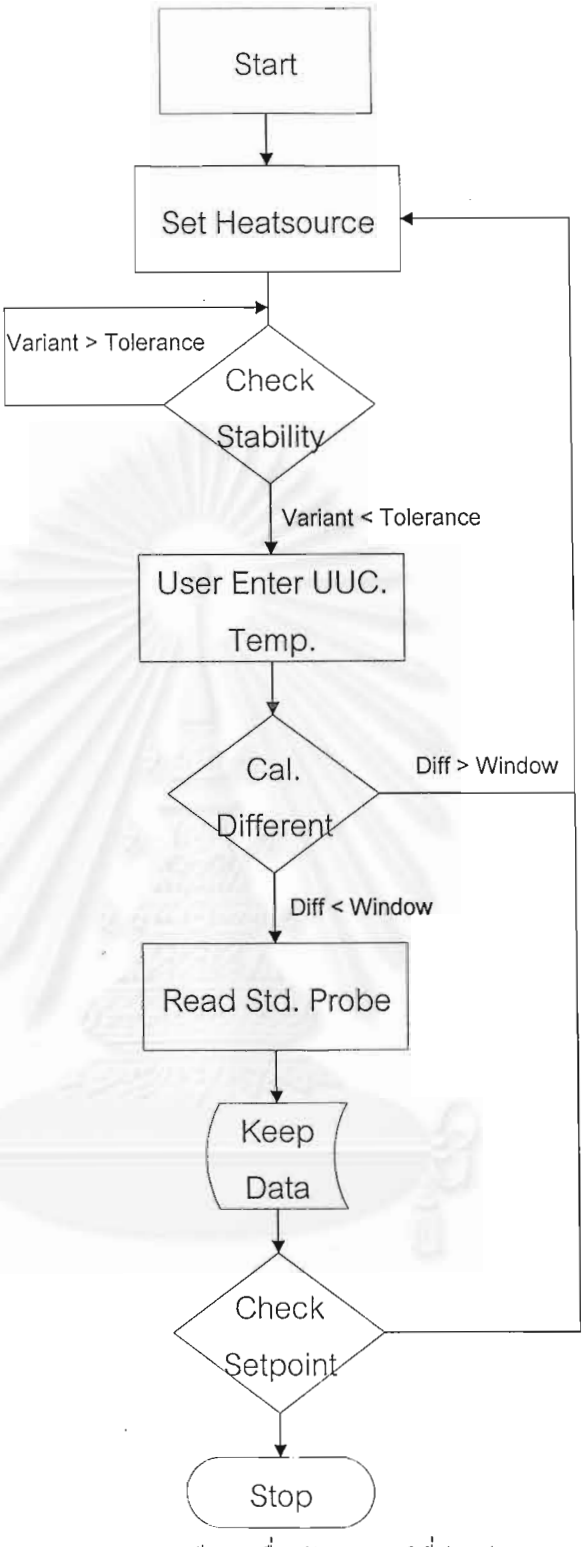
กระบวนการสอบเทียบเป็นส่วนที่สำคัญในการสอบเทียบเนื่องจากต้องอ้างอิงจากมาตรฐานและต้องมีรูปแบบกระบวนการที่แน่นอน โดยกระบวนการที่ใช้ในการสอบเทียบจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบ เช่นการกำหนดค่าอุณหภูมิคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (Tolerance) ค่าเวลาในการรออุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงตัว (Duration Time) ค่ากรอบ (Window) อุณหภูมิที่จะใช้กระบวนการควบคุมอุณหภูมิ ก่อนที่จะทำการอ่านค่าของอุณหภูมิโดยรูปแบบการอ่านค่าจะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิ รหัสเทียมในส่วนควบคุมกระบวนการสอบเทียบสามารถแสดงได้ดังนี้

```
Module Calibration Process
Reading Setpoint
Call Setting temperature module
While (Setpoint temperature - Reading temperature) > Window
        Call reading temperature module
end
While (Setpoint temperature - Reading temperature)< Window
        Call Control Temperature Module
        Call reading temperature module
If (Setpoint temperature - Reading temperature) < Tolerance Then
exit loop
end
        Count down Duration time
        If (duration time = 0) Then
        Call reading temperature module
        If (Setpoint temperature - Reading temperature) < Tolerance Then
        Keep Temperature
End Module
```

โมดูลที่ควบคุมกระบวนการสอบเทียบสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้แน่นอน และการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่อ่านค่าจากการประมาณสเกล ซึ่งแบบที่อ่านค่าอุณหภูมิได้แน่นอนจะปรับค่าอุณหภูมิให้อุณหภูมิที่อ่านจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงตรงกับจุดทดสอบ ส่วนแบบที่อ่านค่าจากการประมาณสเกลจะปรับค่าอุณหภูมิให้อุณหภูมิที่อ่านจากเครื่องวัดค่าอุณหภูมิที่สอบเทียบตรงกับจุดทดสอบ สามารถแสดงกระบวนการสอบเทียบทั้ง 2 แบบได้ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 โฟลวชาร์ตของกระบวนการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่อ่านค่าได้แน่นอน



รูปที่ 3.8 โฟลวชาร์ตของกระบวนการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่อ่านค่าจากการประมาณสเกล

3.2.6 ส่วนของการคำนวณผลการสอบเทียบ

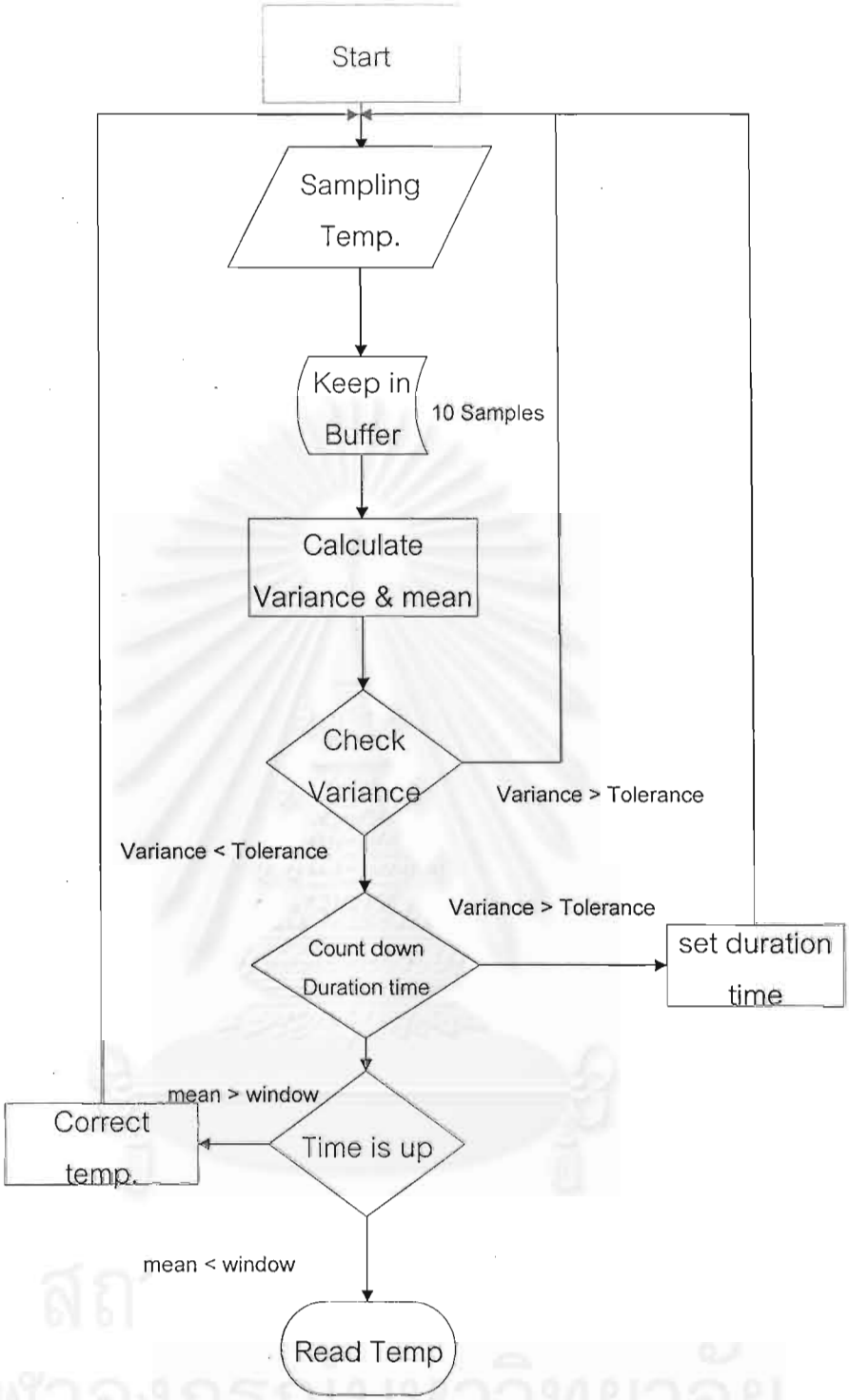
การคำนวณผลการสอบเทียบจะกระทำหลังจากได้ทำกระบวนการสอบเทียบเสร็จสิ้นแล้ว โดยจะนำค่าที่ได้จากกระบวนการสอบเทียบมาทำการคำนวณหาค่าต่างๆ เพื่อในที่สุดจะสามารถหาค่าความไม่แน่นอนชนิด B ออกมาได้โดยจะต้องเปิดตารางเพื่อหาระดับความเชื่อมั่นที่ใช้ในการคำนวณ หลังจากนั้นจะรอรับค่า

พารามิเตอร์อื่นๆ เพื่อทำการคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากส่วนอื่นๆ ก่อนจะนำมาคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนรวมของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบ รวมถึงหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบที่จุดสอบเทียบต่างๆ รวมถึงค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อใช้ประกอบในใบรับรอง รหัสเทียมในส่วนของการคำนวณผลการสอบเทียบสามารถแสดงได้ดังนี้

Calculation Module
Reading Calibration Result
For (First Setpoint: Last Setpoint)
Calculation Mean Value
Calculation Standard Deviation
Calculation Uncertainty Type A
Get parameter of Uncertainty
Calculation Uncertainty Type B
Calculation Expanded and Combined Uncertainty
End Module

3.2.7 ส่วนของการหาภาวะเสถียรของอุณหภูมิ

การหาภาวะเสถียรของอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ พิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่สุ่มได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง โดยจะทำการสุ่มอุณหภูมิมาเรื่อยๆ นำค่าอุณหภูมิ 10 ค่าสุดท้ายมาคำนวณค่าความแปรปรวนเมื่อค่าความแปรปรวนอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ จะถือว่าอุณหภูมิออยู่ในภาวะเสถียร ถ้าอยู่นอกขอบเขตก็จะสุ่มค่าขึ้นมาเรื่อยๆ เมื่อเข้าสู่ภาวะเสถียรจะหน่วงเวลาไว้ระยะหนึ่งตามแต่ชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิ เพื่อให้เข้าสู่ภาวะเสถียรโดยสมบูรณ์ นำค่าเฉลี่ยที่ภาวะสมดุลมาพิจารณาเทียบกับจุดอุณหภูมิทดสอบเพื่อทำการแก้ไขค่าอุณหภูมิ ค่าที่ใช้แก้อุณหภูมิก็คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ภาวะสมดุลกับค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ จะแก้ค่าอุณหภูมิจนกระทั่งค่าผลต่างอยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ โดยกระบวนการในการหาภาวะเสถียรของอุณหภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 โฟลวชาร์ตของการหาภาวะเสถียรของอุณหภูมิ

3.2.8 ส่วนของฐานข้อมูลและการจัดพิมพ์ใบรับรอง

ฐานข้อมูลในการสอบเทียบเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากสามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำมาทดสอบ รวมถึงประเมินความแม่นยำและความแน่นอนของเครื่องวัดอุณหภูมิที่นำมาทดสอบได้ และยังใช้ในการคาดหวังการสอบเทียบของเครื่องวัดอุณหภูมิครั้งต่อไป โดยฐานข้อมูลจะแยกเป็นส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1. ฐานข้อมูลสำหรับรายละเอียดของลูกค้า
2. ฐานข้อมูลสำหรับเครื่องมือวัดที่ส่งมาสอบเทียบและผลการสอบเทียบ
3. ฐานข้อมูลสำหรับอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ

ฐานข้อมูลทั้งสามส่วนจะต้องมีการเชื่อมถึงกันเมื่อต้องการที่จะออกใบรับรองให้กับลูกค้าสำหรับฐานข้อมูลที่จะนำมาแสดงในใบรับรองจะประกอบได้ดังนี้

1. ชนิดของเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ
2. บริษัทผู้ผลิตเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ
3. รุ่นหรือ model ของเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ
4. Serial Number ของเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ
5. ค่า Resolution และ ค่า Accuracy ของเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ
6. รายละเอียดของอุปกรณ์มาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบได้แก่
   - เครื่องกำเนิดอุณหภูมิ
   - Probe วัดอุณหภูมิอ้างอิง, หรือ เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง
   - เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ
   - อื่นๆ
7. ผลที่ได้จากการสอบเทียบจะเก็บเฉพาะค่าความลึกที่ใช้ ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและของ UUT เท่านั้นส่วนค่าอื่นๆ จะคำนวณใหม่
8. ค่าความไม่แน่นอนที่ได้รวม และระดับความเชื่อมั่นที่ใช้ ในการสอบเทียบ
9. วัน/เดือน/ปี ที่ทำการสอบเทียบ
10. วัน/เดือน/ปี ที่คาดว่าจะต้องนำเครื่องมือมาทำการสอบเทียบครั้งต่อไป
11. หลักการในการสอบเทียบและมาตรฐานที่ใช้
12. เงื่อนไขที่ใช้ในการสอบเทียบได้แก่
    - ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นของห้องที่ทำการสอบเทียบ
    - ค่า Tolerance และ ค่า Duration Time ที่ใช้ในการสอบเทียบ
    - ชื่อบุคคลที่ควบคุมการสอบเทียบ
    - อื่นๆ
13. รายละเอียดอื่นๆ เพิ่มเติม

รหัสเทียมในส่วนของฐานข้อมูลสามารถแสดงได้ดังนี้

```
Database Module
        Enter the specification of Instrument
        Enter the specification of Customer
        Crate index for instrument
If (Keep Data of Customer)
```

Recording Data into the customer database

If (Keep Data of Instrument)

Recording Data into the Instrument database

If (Printing Certificate)

Load Data from Calibration Procedure database

Load Result of Calibration

Select Procedure of Calibration

Select Export Data

Case(1) Excell

Case(2) Text file

End Module

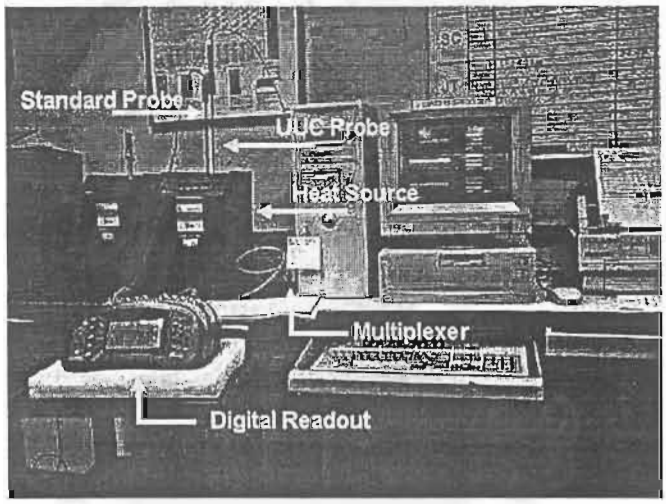
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

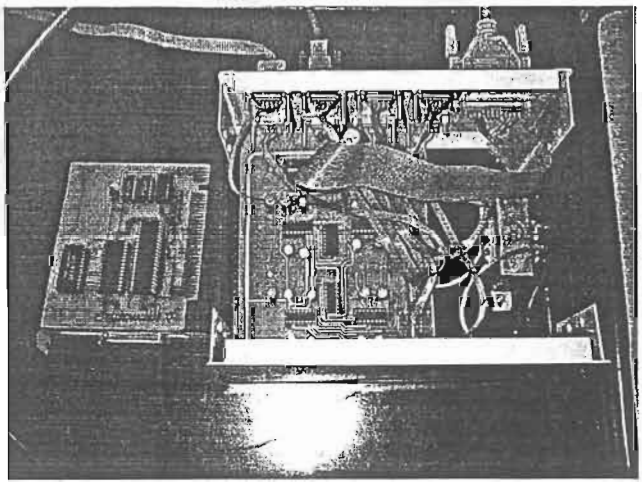
ผลการทดลอง

4.1 การทดลองการทำงาน

การทดสอบส่วนต่างๆ ในระบบสอบเทียบจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ และส่วนที่เป็นโปรแกรมควบคุมกระบวนการสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ กระบวนการในการทดสอบจะทำภายใต้มาตรฐานที่กำหนดของศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัด สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น) ทำการทดสอบโดยสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิหลายๆ แบบ ทั้งแบบที่ใช้คนในการสอบเทียบและแบบที่ใช้ระบบที่ได้ออกแบบในการสอบเทียบ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิเป็นชนิด Dry-Well ยี่ห้อ Hart Scientific [18] เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ Black Stack ยี่ห้อ Hart Scientific [19] ในการสอบเทียบนี้ระบบที่ได้ออกแบบตามจุดทดสอบที่ได้ต้องการของลูกค้า และมีการทำซ้ำ 5 ครั้ง นำผลที่ได้มาคำนวณค่าความไม่แน่นอนและประเมินผลความน่าเชื่อถือได้ของระบบโดยรูปของการติดตั้งระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และการ์ดเชื่อมต่อกับมัลติเพล็กเซอร์แสดงดังรูปที่ 4.2



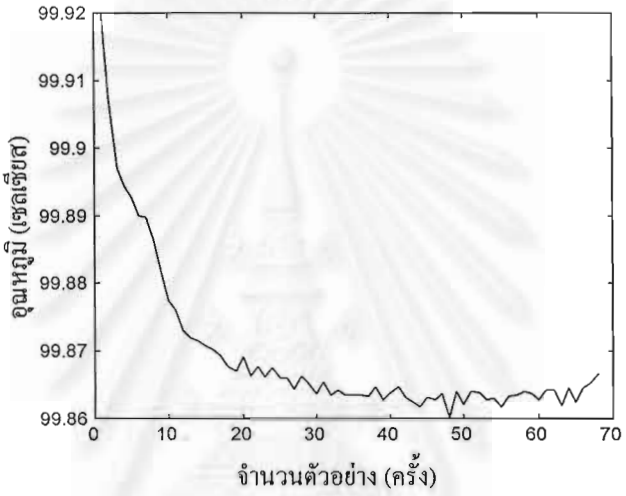
รูปที่ 4.1 การติดตั้งระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4.2 การ์ดเชื่อมต่อและมัลติเพล็กเซอร์

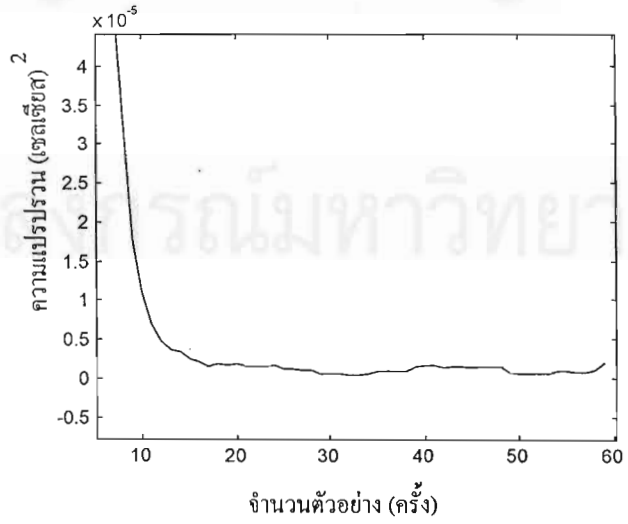
4.1.1 การทดสอบการหาภาวะเสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

การหาภาวะเสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ จะหาจากการอ่านค่าเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและคำนวณค่าความแปรปรวนทุกๆครั้งที่สุ่มค่าอุณหภูมิ ที่จุดอุณหภูมิที่แตกต่างกันเครื่องกำเนิดอุณหภูมิก็จะมีค่าความแปรปรวนที่ไม่เท่ากัน การทดลองนี้จะวัดความแปรปรวนของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ ที่แต่ละจุดอุณหภูมิ เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ สำหรับชุดของค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าความแปรปรวนจะมีด้วยกัน 10 ชุดและปรับค่าข้อมูลทุกๆ ครั้ง ที่มีการสุ่มค่าอุณหภูมิ จุดที่ทดสอบคือ 100 องศาเซลเซียส ตั้งค่าของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสโดยไม่ได้แก้ไขค่าอุณหภูมิ และได้รูปการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังรูปที่ 4.3



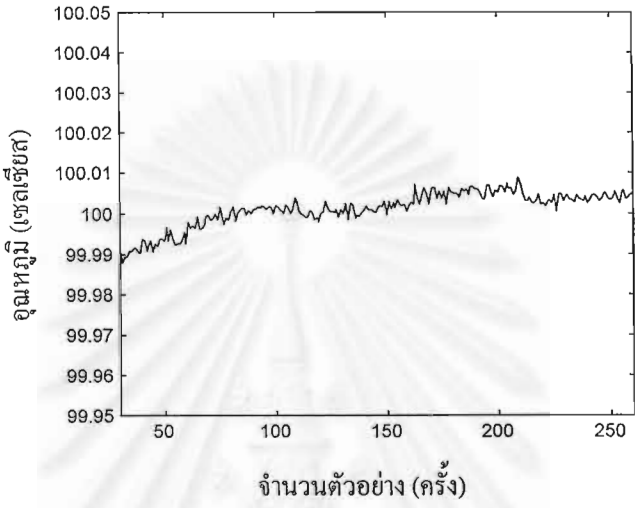
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

และนำค่าอุณหภูมิที่ได้มาคำนวณหาค่าของความแปรปรวนของอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังรูป



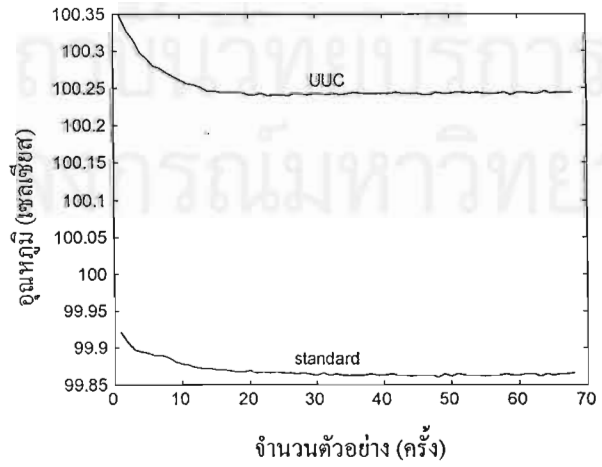
รูปที่ 4.4 ความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ตั้งจากเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.4 จะได้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอยู่ที่ 99.8693 องศาเซลเซียส โดยกรอบของอุณหภูมิที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ภาวะเสถียรจะมีค่าความแปรปรวนประมาณ $3.06x10^{-6}$ พิจารณาจากผลค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและค่าอุณหภูมิที่ตั้งมีขนาดมากกว่ากรอบอุณหภูมิที่ตั้งไว้ จึงทำการแก้ไขค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิและตั้งค่าใหม่ มีค่าเท่ากับ 100.13 องศาเซลเซียสได้ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังรูปที่ 4.5

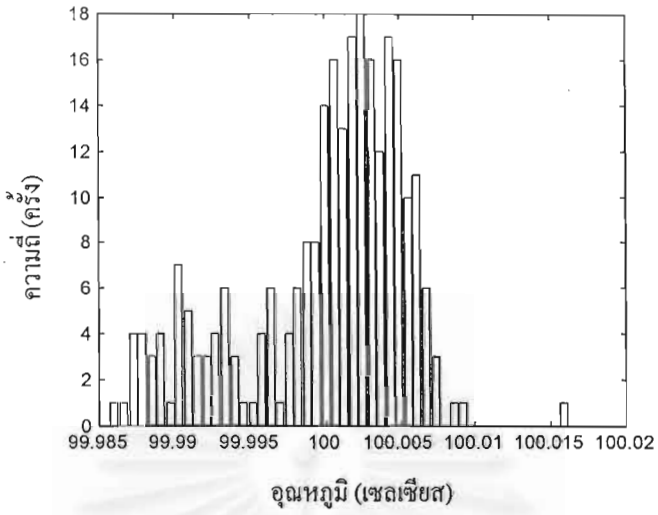


รูปที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิหลังจากทำการตั้งเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ 100.13 องศาเซลเซียส

จากรูปค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 100.0001 องศาเซลเซียสและมีค่าความแปรปรวนที่ภาวะเสถียรประมาณ $2x10^{-5}$ องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ภายในกรอบอุณหภูมิที่ตั้งไว้ จึงอ่านค่าของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบ ผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิที่อ่านจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบโดยยังไม่ได้แก้ไขค่าอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ส่วนการแจกแจงอุณหภูมิเป็นดังรูปที่ 4.7

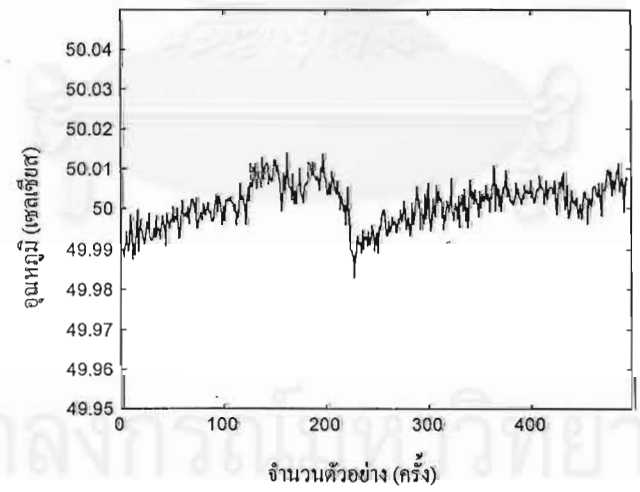


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอ้างอิงและทดสอบโดยไม่ได้แก้ไขค่าอุณหภูมิ



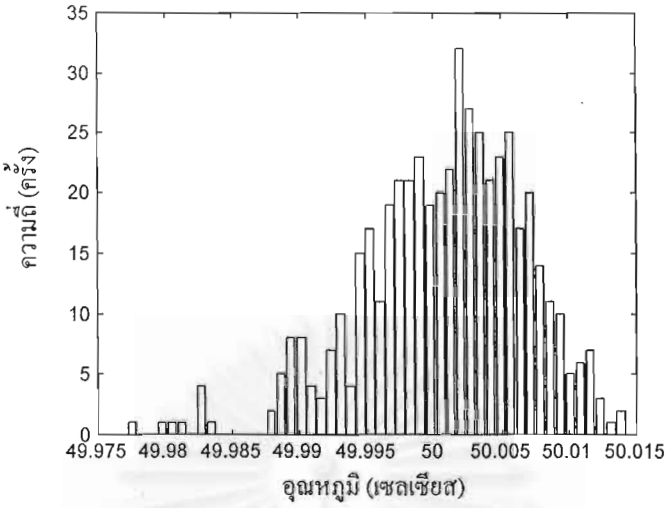
รูปที่ 4.7 การแจกแจงความถี่ของอุณหภูมิที่มีการแก้ไขค่าอุณหภูมิแล้วที่จุดทดสอบ 100 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.7 จำนวนตัวอย่างในการสุ่มเท่ากับ 260 ตัวอย่าง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ $2.98x10^{-5}$ องศาเซลเซียส เมื่ออ่านค่าอุณหภูมิของเครื่องทดสอบที่ภาวะสมดุล แล้วจึงตั้งค่าอุณหภูมิที่จุดถัดไปคือ 50 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



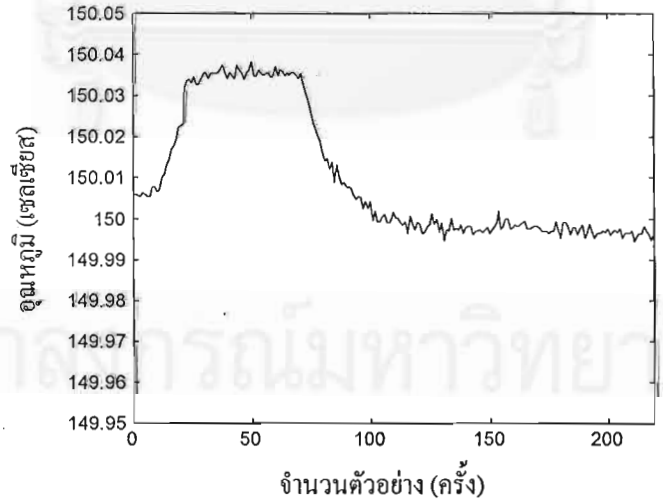
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 50 องศาเซลเซียส

และค่าการแจกแจงอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

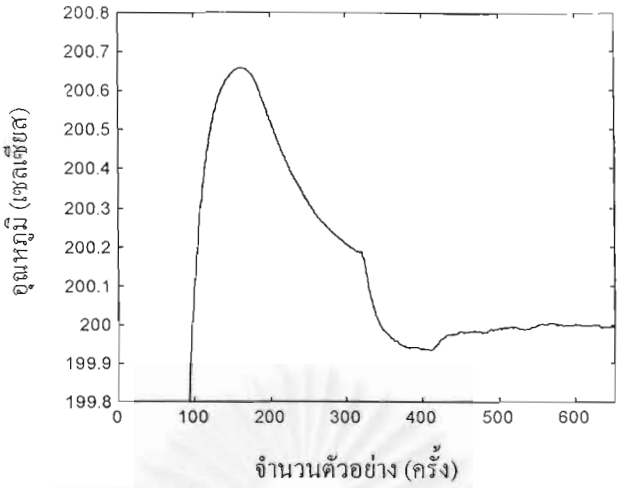


รูปที่ 4.9 การแจกแจงความถี่ของอุณหภูมิที่มีการแก้ไขค่าอุณหภูมิแล้วที่จุดทดสอบ 50 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.9 จำนวนตัวอย่างในการสุ่มเท่ากับ 490 ตัวอย่าง ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 50.0013 องศาเซลเซียส และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ $2.97x10^{-5}$ องศาเซลเซียส จากผลการทดลองจะนำมาใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิต่อไป เวลาที่ใช้ในการแก้ไขค่าอุณหภูมิให้มีค่าอุณหภูมิตรงกับจุดทดสอบจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ, ค่าเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิ สามารถแสดงเวลาในการแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 150 ดังรูปที่ 4.10 และที่จุดทดสอบ 200 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.11



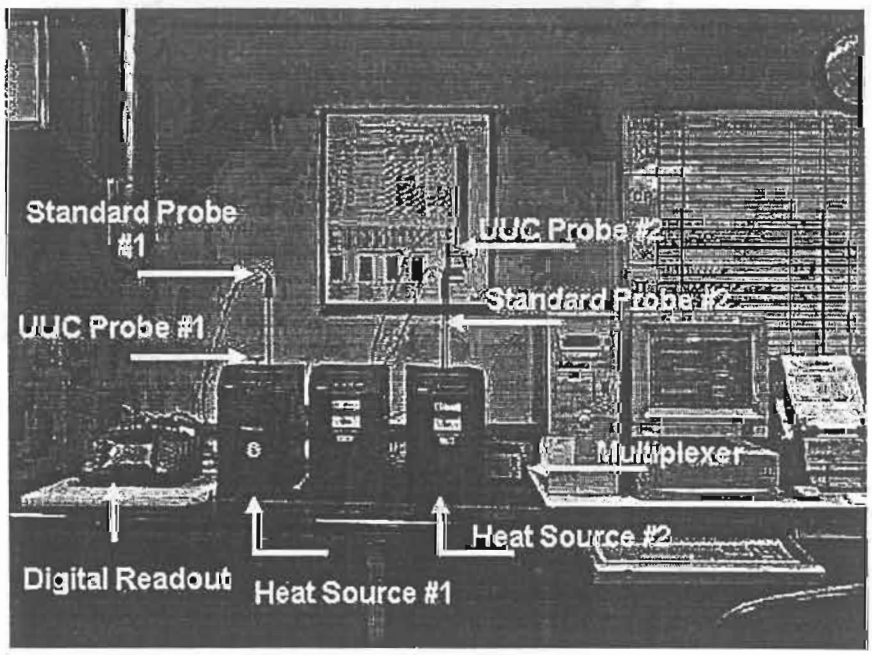
รูปที่ 4.10 การแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 การแก้ไขค่าอุณหภูมิที่จุดทดสอบ 200 องศาเซลเซียส

4.2 การทดสอบระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ

ระบบสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอัตโนมัติที่ใช้ทดสอบ จะสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ RTD (Resistance Temperature Detector), เทอร์โมคัปเปิล, เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Dial Thermometer และเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Digital Thermometer โดยสอบเทียบทั้งแบบหลายๆ ตัวพร้อมกันและแบบที่สอบเทียบทีละตัว โดยรูปที่ 4.12 เป็นการติดตั้งที่ใช้สำหรับสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ 2 ตัวพร้อมกันโดยทั้ง 2 ระบบจะใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงเป็น SPRT และมีเครื่องกำเนิดอุณหภูมิแยกอิสระจากกัน แต่ใช้เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิตัวเดียวกัน



รูปที่ 4.12 การติดตั้งระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติที่ทำการสอบเทียบ 2 ระบบพร้อมกัน

การทดสอบระบบจะทดสอบทั้งแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ และแบบกึ่งอัตโนมัติ ระบบอัตโนมัติจะทำการสอบเทียบ 2 ครั้ง เปรียบเทียบกับการสอบเทียบโดยคน ซึ่งจะใช้อุปกรณ์ในการสอบเทียบชุดเดียวกัน มีสภาพแวดล้อมในการสอบเทียบเหมือนกัน แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนทั้งหมดที่มีในการสอบเทียบสามารถแสดงได้ดังตาราง

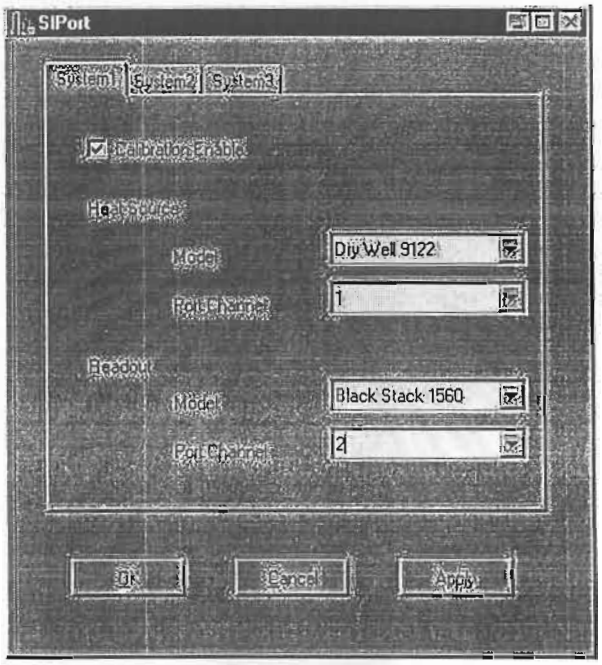
ตารางที่ 4.1 แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนทั้งหมดในการทดสอบ

แหล่งที่มาความไม่แน่นอน	ค่า (+/-°C)	การกระจาย	ตัวหาร	c_i	u_i (+/-°C)
ใบรับรองเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง	0.011	Normal	2	1	0.0005
การเลื่อนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง	0	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0
ความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง	0.075	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.043
เครื่องแสดงผลเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (SPRT Module)	0.005	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.0028
ความไม่เป็นหนึ่งเดียวของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ	0.45	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.259
ความไม่เสถียรของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ	0.05	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.028
เครื่องแสดงผลเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบที่เป็น RTD (SPRT Module)	0.005	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.0028
ค่า Resolution ของ Digital Thermometer	0.05	Rectangular	$\sqrt{3}$		0.028
ค่า Resolution ของ Dial Thermometer	0.5	Rectangular	$\sqrt{3}$		0.28
เครื่องแสดงผลเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบที่เป็นเทอร์โมคัปเปิล (TC Module)	0.1	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.0577

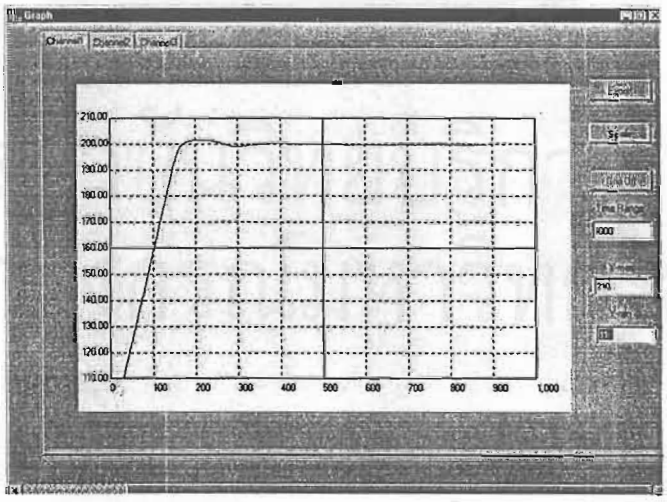
ค่าความไม่แน่นอนที่เหลือจะมากจากการทำซ้ำ ทั้งของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง และของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบ ค่าความไม่แน่นอนที่มาจากการทำซ้ำในแต่ละครั้งจะมีค่าไม่เท่ากัน ผลของความไม่แน่นอนทั้งหมดจะนำมารวมกันตามสมการ ในบทที่2 เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความไม่แน่นนอนขยาย สำหรับใช้แสดงในใบรับรองการสอบเทียบ

4.2.1 การทดสอบระบบแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ

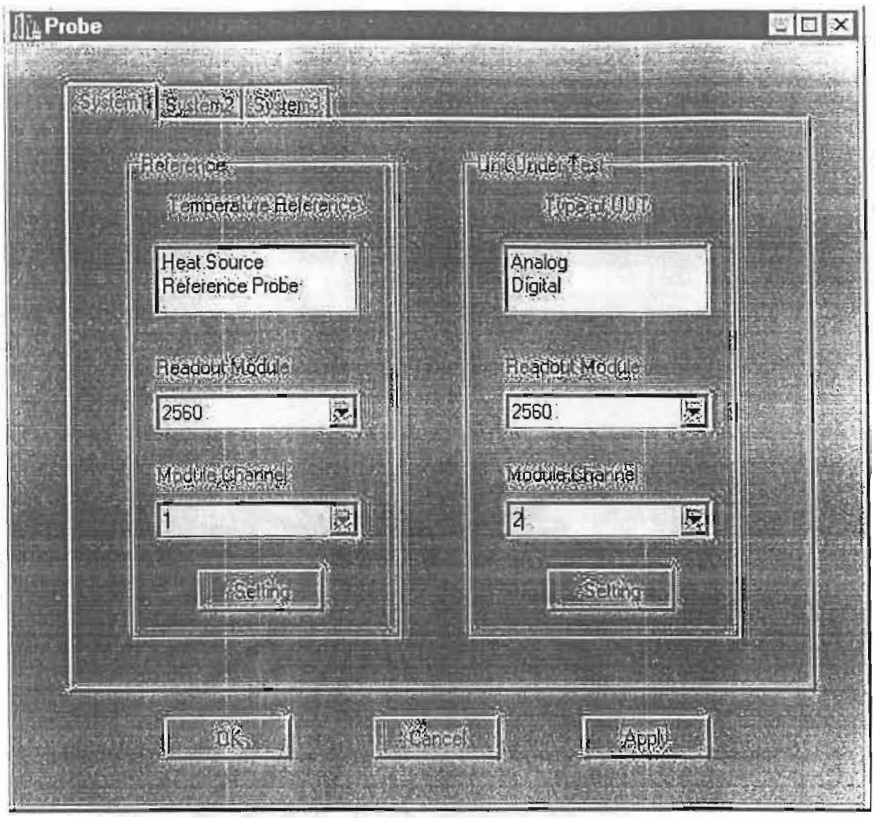
การทดสอบแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบจะสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่เป็นแบบ RTD และเทอร์โมคัปเปิล ทดสอบทั้งหมด 4 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีจุดอุณหภูมิทดสอบ 5 จุด แต่ละจุดมีการทำซ้ำ 5 ครั้ง ก่อนอื่นจะต้องกำหนดพารามิเตอร์ในการสอบเทียบ เช่น การกำหนดการเชื่อมต่อของเครื่องมือ, การกำหนดชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิ การกำหนดพารามิเตอร์ในการสอบเทียบ ตัวอย่างของซอฟต์แวร์สำหรับการสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 – 4.17



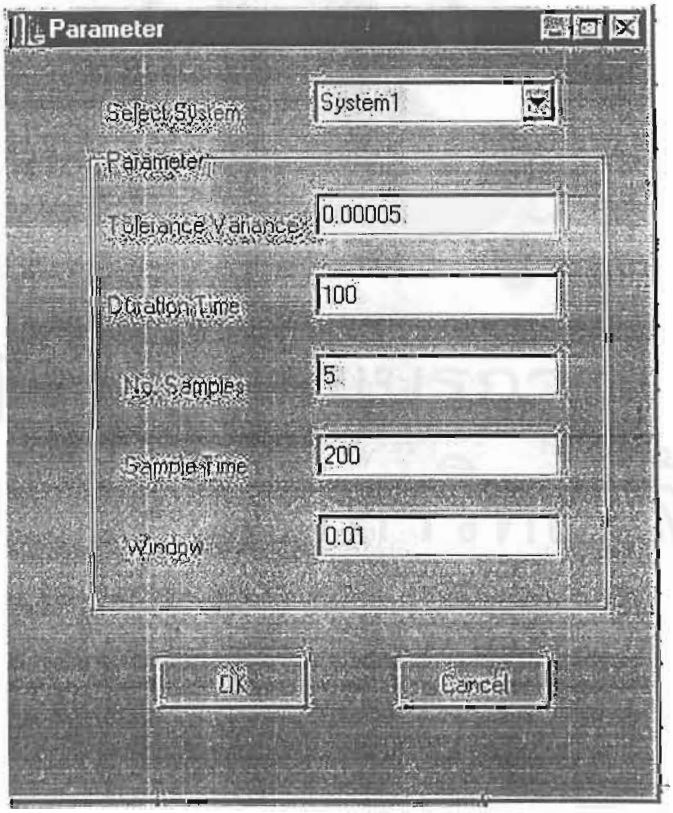
รูปที่ 4.13 การกำหนดการเชื่อมต่อของเครื่องมือ



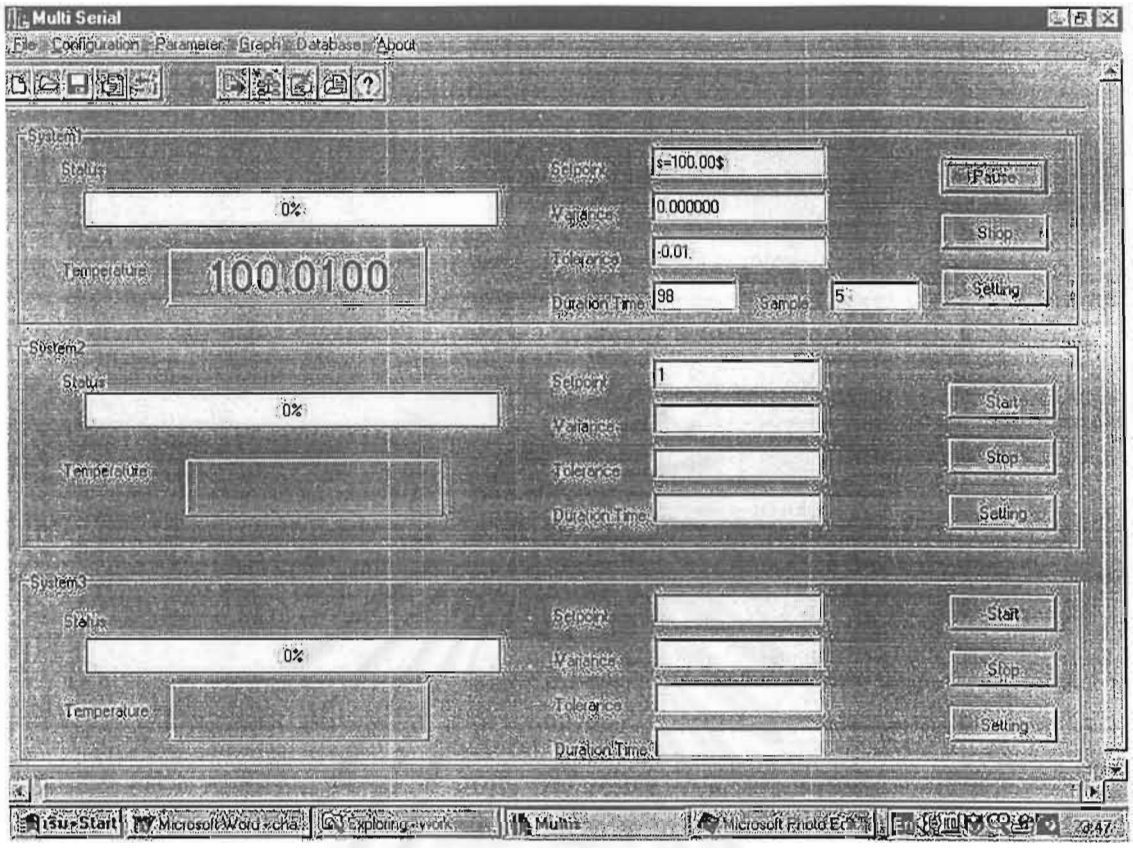
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง



รูปที่ 4.15 การกำหนดชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.16 การกำหนดพารามิเตอร์ในการสอบเทียบ



รูปที่ 4.17 หน้าการควบคุมหลักของระบบ

1. การสอบเทียบแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบที่ได้ทำไปนี้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงแบบ SPRT เครื่องกำเนิดอุณหภูมิเป็น Dry-Well Calibrator เครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบ (UUT) เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD จะสอบเทียบเป็นจำนวนทั้งหมด 3 แบบ คือการสอบเทียบโดยใช้คนทำหน้าที่สอบเทียบ, การสอบเทียบโดยใช้ระบบอัตโนมัติที่มีการหน่วงเวลาเป็นเวลา 20 นาที ในการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละครั้ง และการสอบเทียบโดยใช้ระบบอัตโนมัติที่มีการขยับเครื่องวัดอุณหภูมิทุกๆ ครั้งที่อ่านค่าอุณหภูมิ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบมีดังนี้คือ ค่าความแปรปรวนที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพเท่ากับ 0.00005 องศาเซลเซียส ค่าเวลาในการหน่วงเวลาช่วงภาวะเสถียรเท่ากับ 100 ครั้ง (10 นาที) ค่าเวลาในการหน่วงเวลาของการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละครั้งเท่ากับ 200 ครั้ง(20 นาที) ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส การสอบเทียบจะทำที่ 4 จุดอุณหภูมทดสอบ คือ 50,100,200 และ 300 องศาเซลเซียส ผลจากการสอบเทียบได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำ แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 – 4.11

ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด RTD ครั้งที่1 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
50	50.0339	50.0365	50.0355	50.0355	50.0370	50.0357	±0.0005
100	100.0899	100.0886	100.0870	100.0881	100.0818	100.0871	±0.0014
200	200.1885	200.2089	200.2081	200.2010	200.1997	200.2012	±0.0037
300	300.3615	300.3654	300.3682	300.3516	300.3581	300.3610	±0.0029

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่1 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
50	49.9913	50.0006	49.9977	50.0018	50.0060	49.9995	±0.0024
100	99.9994	99.9998	99.9950	99.9957	99.9947	99.9969	±0.0011
200	199.9843	200.0033	200.0058	199.9957	199.9935	199.9965	±0.0038
300	299.9950	299.9950	299.9970	299.9890	299.9940	299.9940	±0.0013

ตารางที่ 4.4 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด RTD ครั้งที่2 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
50	50.0290	50.0313	50.0355	50.0381	50.0404	50.0349	±0.0021
100	100.0853	100.0811	100.0854	100.0860	100.0901	100.0856	±0.0014
200	200.2250	200.2179	200.2171	200.2190	200.2252	200.2208	±0.0018
300	300.3570	300.3511	300.3668	300.3657	300.3789	300.3639	±0.0047

ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่2 (หน่วงเวลาแต่ละครั้ง)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (°C)	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย (°C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-°C)
	1	2	3	4	5		
50	49.9956	49.9950	49.9989	50.0043	50.0067	50.0001	±0.0023
100	99.9926	100.0024	100.0019	100.0071	100.0048	100.0018	±0.0025
200	200.0143	200.0008	200.0008	200.0028	200.0071	200.0052	±0.0026
300	299.9946	299.9850	300.0050	300.0050	300.0140	300.0007	±0.0050

ตารางที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด RTD ครั้งที่1 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่านค่า)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (°C)	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย (°C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-°C)
	1	2	3	4	5		
50	50.0238	50.0292	50.0336	50.0268	50.0123	50.0251	±0.0036
100	100.0796	100.0810	100.0805	100.0877	100.0854	100.0828	±0.0016
200	200.2241	200.2217	200.1885	200.2290	200.2179	200.2162	±0.0072
300	300.3685	300.3598	300.3685	300.3735	300.3612	300.3663	±0.0025

ตารางที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่1 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่านค่า)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (°C)	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย (°C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-°C)
	1	2	3	4	5		
50	49.9914	50.0004	50.0027	50.0066	50.0060	50.0014	±0.0027
100	99.9954	99.9978	99.9932	99.9987	100.0005	99.9971	±0.0013
200	200.0054	200.0099	200.0072	200.0133	200.0118	200.0095	±0.0014
300	300.0030	300.0120	300.0160	300.0140	299.9950	300.0080	±0.0039

ตารางที่ 4.8 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด RTD ครั้งที่2 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่านค่า)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(^{o}C)	1	2	3	4	5	(^{o}C)	(+/-^{o}C)
50	50.0339	50.0365	50.0355	50.0355	50.0370	50.0357	±0.0005
100	100.0776	100.0812	100.0795	100.0808	100.0764	100.0791	±0.0009
200	200.2250	200.2086	200.2164	200.2356	200.2185	200.2208	±0.0045
300	300.3589	300.3603	300.3592	300.3558	300.3660	300.3600	±0.0017

ตารางที่ 4.9 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่2 (ขยับ UUC ทุกครั้งที่อ่านค่า)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (degree)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(^{o}C)	1	2	3	4	5	(^{o}C)	(+/-^{o}C)
50	49.9987	50.0044	50.0061	50.0006	50.0076	50.0035	±0.0017
100	99.9954	99.9973	99.9986	100.0014	99.9984	99.9982	±0.0009
200	200.0142	200.0189	200.0153	199.9984	199.9976	200.0089	±0.0045
300	300.0010	300.0020	299.9990	299.9990	299.9970	299.9996	±0.0008

ตารางที่ 4.10 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด RTD (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(^{o}C)	1	2	3	4	5	(^{o}C)	(+/-^{o}C)
50	50.0268	50.0215	50.0186	50.0236	50.0267	50.0234	±0.0016
100	100.0812	100.0834	100.0710	100.0847	100.0885	100.0818	±0.0029
200	200.2254	200.2310	200.2248	200.2210	200.2287	200.2262	±0.0017
300	300.3633	300.3568	300.3646	300.3699	300.3688	300.3647	±0.0023

ตารางที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.0026	50.0013	50.0059	50.0068	50.0025	50.0038	±0.0011
100	100.0064	100.0028	100.0036	100.0051	100.0032	100.0042	±0.0005
200	200.0062	200.0088	200.0051	200.0065	200.0011	200.0055	±0.0013
300	300.0089	300.0094	300.0031	300.0075	300.0066	300.0071	±0.0011

2. การสอบเทียบแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบที่ได้ทำไปนี้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงแบบ SPRT เครื่องกำเนิดอุณหภูมิเป็น Dry-Well Calibrator เครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบ (UUT) เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล ทำการสอบเทียบ 2 แบบ คือการสอบเทียบโดยใช้คนทำหน้าที่สอบเทียบ, การสอบเทียบโดยใช้ระบบอัตโนมัติ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบมีดังนี้คือ ค่าความแปรปรวนที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพเท่ากับ 0.00005 องศาเซลเซียส ค่าเวลาในการหน่วงเวลาช่วงภาวะเสถียรเท่ากับ 100 ครั้ง (10 นาที) ค่าเวลาในการหน่วงเวลาของการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละครั้งเท่ากับ 200 ครั้ง(20 นาที) ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส การสอบเทียบจะทำที่ 4 จุดอุณหภูมิทดสอบ คือ 50,100,200 และ 300 องศาเซลเซียส ผลจากการสอบเทียบได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำ แสดงได้ดังตารางที่ 4.12 – 4.17

ตารางที่ 4.12 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด Thermocouple ครั้งที่1 (อัตโนมัติ)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.064	50.082	50.092	50.088	50.106	50.0864	±0.0069
100	100.535	100.545	100.543	100.559	100.546	100.5456	±0.0039
200	201.052	201.074	201.072	201.052	201.080	201.0660	±0.0059
300	301.941	301.973	301.979	301.969	301.976	301.9676	±0.0069

ตารางที่ 4.13 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่1 (อัตโนมัติ)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	49.9940	50.0068	50.0126	49.9992	50.0041	50.0033	±0.0032
100	99.9989	99.9995	99.9941	100.0099	99.9944	99.9994	±0.0029
200	199.9901	199.9931	199.9928	199.9958	199.9941	199.9932	±0.0009
300	300.0040	300.0040	300.0030	300.0010	299.9990	300.0022	±0.0009

ตารางที่ 4.14 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด Thermocouple ครั้งที่2 (อัตโนมัติ)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.113	50.102	50.101	50.104	50.097	50.1034	±0.0027
100	100.568	100.562	100.569	100.577	100.557	100.5666	±0.0034
200	201.069	201.090	201.111	201.095	201.097	201.0924	±0.0068
300	301.963	301.980	301.991	302.006	302.004	301.9888	±0.0080

ตารางที่ 4.15 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่2 (อัตโนมัติ)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.0033	49.9949	50.0051	49.9967	50.0035	50.0007	±0.0020
100	100.0093	100.0058	100.0070	100.0031	100.0054	100.0061	±0.0010
200	199.9943	199.9927	200.0049	199.9952	200.0048	199.9984	±0.0027
300	300.0090	299.9980	299.9970	299.9950	300.0030	300.0024	±0.0025

ตารางที่ 4.16 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด Thermocouple ครั้งที่1 (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.105	50.112	50.102	50.113	50.102	50.1068	±0.0024
100	100.566	100.552	100.564	100.557	100.570	100.5618	±0.0032
200	201.106	201.096	201.093	201.102	201.109	201.1012	±0.0030
300	301.998	302.003	302.014	302.005	302.020	302.0080	±0.0040

ตารางที่ 4.17 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT ครั้งที่1 (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	49.9958	50.0079	50.0012	49.9996	50.0004	50.0010	±0.0020
100	100.0054	100.0069	100.0032	100.0041	100.0030	100.0045	±0.0007
200	200.0052	200.0036	199.9917	199.9997	200.0062	200.0013	±0.0026
300	300.006	300.001	300.005	299.993	300.004	300.0018	±0.0024

4.2.2 การทดสอบระบบแบบกึ่งอัตโนมัติ

การทดสอบระบบแบบกึ่งอัตโนมัติ จะสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่เป็นแบบอ่านค่าโดยใช้การมอง เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Dial Thermometer หรือเครื่องวัดอุณหภูมิที่เป็นแบบดิจิตอลแต่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ ตามหลักการสอบเทียบถ้าเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบอ่านค่าโดยใช้การมองเทียบกับสเกล จะทำการอ่านค่าของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบให้ตรงกับค่าจุดอุณหภูมิที่จุดทดสอบ หลังจากนั้นถึงอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง แต่ถ้าสามารถอ่านค่าของเครื่องวัดอุณหภูมิออกเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้จะใช้ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงเป็นตัวเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิ ณ จุดทดสอบ การทดลองจึงแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. สอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Dial Thermometer ที่จุดทดสอบ 150,-170 และ 200 องศาเซลเซียส ค่าสเกลของเครื่องวัดอุณหภูมิเท่ากับ 1 องศาเซลเซียส การตั้งค่าอุณหภูมิจะทำการอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทำการทดสอบให้มีค่าตรงกับอุณหภูมิที่จุดทดสอบ และเมื่อเข้าสู่ภาวะเสถียรถึงอ่านค่าอุณหภูมิ

ของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบ และเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง ทำการบันทึกผล การตั้งค่าอุณหภูมิของระบบอัตโนมัติจะพิจารณาเสถียรภาพของอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง เมื่อเข้าสู่ภาวะเสถียรถึงรอค่าอุณหภูมิของตัวทดสอบจากการป้อนของผู้ปฏิบัติการ แล้วจึงแก้ไขค่าอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบอยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับ ถึงบันทึกผล การสอบเทียบใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงเป็น SPRT ทำการทดลองโดยใช้ระบบกึ่งอัตโนมัติ 2 ครั้ง และสอบเทียบโดยคนหนึ่งครั้ง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบมีดังนี้คือ ค่าความแปรปรวนที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพเท่ากับ 0.00005 องศาเซลเซียส ค่าเวลาในการหน่วงเวลาช่วงสภาวะเสถียรเท่ากับ 100 ครั้ง(10 นาที) ค่าเวลาในการหน่วงเวลาของการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละครั้งเท่ากับ 200 ครั้ง(20 นาที) ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส ผลจากการสอบเทียบได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำ แสดงได้ดังตารางที่ 4.18 – 4.20

ตารางที่ 4.18 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่1)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
150	148.9975	148.9973	148.9953	148.9970	148.9945	148.9963	±0.0005
170	168.9118	168.9112	168.9136	168.8990	168.9097	168.9091	±0.0026
200	199.0108	199.0251	199.0247	199.0227	199.0298	199.0226	±0.0032

ตารางที่ 4.19 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่2)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
150	148.9962	148.9954	148.9986	148.9972	148.9961	148.9865	±0.0004
170	168.9198	168.9146	168.9161	168.9148	168.9099	168.9150	±0.0016
200	199.0298	199.0287	199.0245	199.0273	199.0256	199.0272	±0.0009

ตารางที่ 4.20 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิของ UUT. (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
150	149.4471	149.4415	149.4453	149.4395	149.4431	149.4430	±0.0014
170	169.5982	169.5961	169.6004	169.5956	169.5892	169.5956	±0.0019
200	199.3256	199.3171	199.3310	199.3273	199.3282	199.3258	±0.0024

2. สอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Digital Thermometer ที่จุดทดสอบ 50, 90, 100 และ 150 องศาเซลเซียส โดยมีโพรบเป็นเทอร์โมคัปเปิล มีทศนิยมในการแสดงผลหนึ่งหลัก การตั้งค่าอุณหภูมิจะทำการอ่านค่าจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงให้มีค่าตรงกับอุณหภูมิที่จุดทดสอบ และเมื่อเข้าสู่ภาวะเสถียรก็อ่านค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิภูมิอ้างอิง บันทึกผล การตั้งค่าอุณหภูมิของระบบอัตโนมัติจะพิจารณาเสถียรภาพของอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง เมื่อเข้าสู่ภาวะเสถียรถึงรอค่าอุณหภูมิของตัวทดสอบจากการป้อนของผู้ปฏิบัติการ และจึงแก้ไขค่าอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบอยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับ ถึงบันทึกผล การสอบเทียบใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงเป็น SPRT ทดลองโดยใช้ระบบกึ่งอัตโนมัติ 2 ครั้งและสอบเทียบโดยมนุษย์หนึ่งครั้ง โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบมีดังนี้ ค่าความแปรปรวนที่ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพเท่ากับ 0.00005 องศาเซลเซียส ค่าเวลาในการหน่วงเวลาช่วงภาวะเสถียรเท่ากับ 100 ครั้ง (10 นาที) ค่าเวลาในการหน่วงเวลาของการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละครั้งเท่ากับ 200 ครั้ง (20 นาที) ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.02 องศาเซลเซียส ผลจากการสอบเทียบได้แก่ ค่าอุณหภูมิ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำ ผลการสอบเทียบแสดงดังตารางที่ 4.21 – 4.26

ตารางที่ 4.21 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (^{o}C)					ค่าเฉลี่ย (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอน (+/-^{o}C)
	1	2	3	4	5		
50	50.0026	49.9976	50.0024	50.0003	50.0006	50.0007	±0.0009
90	90.0041	90.0098	90.0014	90.0016	90.0020	90.0038	±0.0016
100	99.9908	99.9981	99.9914	100.0012	99.9976	90.9958	±0.0020
150	150.0026	149.9940	150.0027	149.9910	149.9998	149.9980	±0.0024

ตารางที่ 4.22 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด Digital Thermometer (สอบเทียบโดยคน)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	49.9	49.9	49.9	49.8	49.8	49.86	±0.0245
90	90.2	90.2	90.2	90.2	90.2	90.2	±0
100	100.3	100.3	100.3	100.3	100.3	100.3	±0
150	150.7	150.6	150.6	150.7	150.7	150.66	±0.0245

ตารางที่ 4.23 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่1)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.0108	49.9967	50.0027	49.9998	49.9996	50.0019	±0.0024
90	90.0042	90.0060	90.0006	89.9996	90.0025	90.0026	±0.0012
100	99.9874	99.9928	99.9874	100.0033	100.0019	99.9946	±0.0034
150	150.0100	149.9913	150.0076	149.9869	150.0037	149.9999	±0.0046

ตารางที่ 4.24 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด Digital Thermometer (ระบบอัตโนมัติครั้งที่1)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	49.9	49.9	49.9	49.8	49.8	49.86	±0.0245
90	90.2	90.2	90.2	90.2	90.2	90.2	±0
100	100.3	100.3	100.3	100.3	100.3	100.3	±0
150	150.7	150.7	150.7	150.7	150.7	150.7	±0

ตารางที่ 4.25 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงชนิด SPRT (ระบบอัตโนมัติ ครั้งที่2)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	50.0032	50.0050	50.0068	50.0014	50.0032	50.0039	±0.0009
90	89.9964	89.9982	89.9924	90.0015	90.0023	89.9982	±0.0018
100	99.9956	99.9923	99.9963	99.9982	100.0031	99.9971	±0.0018
150	149.9926	150.0082	150.0018	150.0078	149.9934	150.0008	±0.0034

ตารางที่ 4.26 ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบชนิด Digital Thermometer (ระบบอัตโนมัติครั้งที่2)

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าอุณหภูมิของ UUT. (°C)					ค่าเฉลี่ย	ค่าความไม่แน่นอน
(°C)	1	2	3	4	5	(°C)	(+/-°C)
50	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	49.9	±0
90	90.2	90.2	90.2	90.2	90.3	90.22	±0.02
100	100.3	100.3	100.2	100.3	100.3	100.28	±0.02
150	150.7	150.7	150.7	150.7	150.7	150.7	±0

4.3 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปผลของความไม่แน่นอนของการสอบเทียบทั้งแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบและกึ่งอัตโนมัติ โดยเปรียบเทียบค่าของความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบของการสอบเทียบโดยคน และการสอบเทียบด้วยระบบอัตโนมัติ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบทั้ง 2 แบบเหมือนกันและทำการทดสอบที่สภาพแวดล้อมเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำโดยสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิทั้ง 4 ชนิด คือ RTD, เทอร์โมคัปเปิล, เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Dial Thermometer และเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Digital Thermometer แสดงดังตารางที่ 4.27 – 4.31

ตารางที่ 4.27 เปรียบเทียบความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าความไม่แน่นอนของ UUT. (+/-°C)				
	ขยับ UUC.		หน่วงเวลา		สอบเทียบโดยคน
(°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1
50	±0.0036	±0.0005	±0.0005	±0.0021	±0.0016
100	±0.0016	±0.0009	±0.0014	±0.0014	±0.0029
200	±0.0072	±0.0045	±0.0037	±0.0018	±0.0017
300	±0.0025	±0.0017	±0.0029	±0.0047	±0.0023

ตารางที่ 4.28 เปรียบเทียบความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (+/-°C)				
	ขยับ UUC.		หน่วงเวลา		สอบเทียบโดยคน
(°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1
50	±0.0027	±0.0017	±0.0024	±0.0023	±0.0011
100	±0.0013	±0.0009	±0.0011	±0.0025	±0.0005
200	±0.0014	±0.0045	±0.0038	±0.0026	±0.0013
300	±0.0039	±0.0008	±0.0013	±0.0050	±0.0011

ตารางที่ 4.29 เปรียบเทียบความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ	ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (+/-°C)			ค่าความไม่แน่นอนของ UUT. (+/-°C)		
	อัตโนมัติ		สอบเทียบโดยคน	อัตโนมัติ		สอบเทียบโดยคน
(°C)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1
50	±0.0032	±0.0020	±0.0020	±0.0069	±0.0027	±0.0024
100	±0.0029	±0.0010	±0.0007	±0.0039	±0.0034	±0.0032
200	±0.0009	±0.0027	±0.0026	±0.0059	±0.0068	±0.0030
300	±0.0009	±0.0025	±0.0024	±0.0069	±0.0080	±0.0040

ตารางที่ 4.30 เปรียบเทียบความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Dial Thermometer

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (ค่าอุณหภูมิของ UUT.) (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (+/-^{o}C)		
	อัตโนมัติ		สอบเทียบโดยคน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1
150	±0.0005	±0.0004	±0.0014
170	±0.0026	±0.0016	±0.0019
200	±0.0032	±0.0009	±0.0024

ตารางที่ 4.31 เปรียบเทียบความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Digital Thermometer

ค่าอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ (^{o}C)	ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง (+/-^{o}C)			ค่าความไม่แน่นอนของ UUT. (+/-^{o}C)		
	อัตโนมัติ		สอบเทียบโดยคน	อัตโนมัติ		สอบเทียบโดยคน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1
50	±0.0024	±0.0009	±0.0009	±0.0245	±0	±0.0245
90	±0.0012	±0.0018	±0.0016	±0	±0.02	±0
100	±0.0034	±0.0018	±0.0020	±0	±0.02	±0
150	±0.0046	±0.0034	±0.0024	±0	±0	±0.0245

จากตารางการเปรียบเทียบความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทำซ้ำโดยสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิทั้ง 4 ชนิด แสดงให้เห็นว่าการสอบเทียบด้วยระบบอัตโนมัติให้ผลการสอบเทียบใกล้เคียงกับการสอบเทียบจากคนมาก (ทศนิยมตำแหน่งที่ 3) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติสามารถนำมาใช้งานแทนการสอบเทียบโดยคนได้

เพื่อสรุปความเหมาะสมในการใช้งานระบบอัตโนมัติกับเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละชนิด แสดงการเปรียบเทียบการใช้เวลาสอบเทียบของระบบอัตโนมัติและการสอบเทียบโดยใช้คน ค่าความไม่แน่นอนรวมที่ได้จากการทำซ้ำจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงและเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบ จึงจับเวลาการสอบเทียบเปรียบเทียบกัน จุดทดสอบที่ใช้คือ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิน้อยกว่านี้ คือ 50 และ 100 องศาเซลเซียส เวลาการสอบเทียบของระบบอัตโนมัติและคนแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องมาจากเวลาที่แตกต่างกันมาจากใช้ในการแก้ไขค่าอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำเครื่องกำเนิดอุณหภูมิมีเสถียรภาพสูงสามารถตั้งค่าอุณหภูมิตามจุดทดสอบได้รวดเร็วใกล้เคียงคน ค่าเวลาหน่วงในการหาภาวะเสถียรเท่ากับ 5 นาที เวลาหน่วงของการอ่านค่าอุณหภูมิ

แต่ละครั้งเท่ากับ 20 นาที เริ่มจับเวลาตั้งแต่ตั้งค่าอุณหภูมิรออุณหภูมิเข้าสู่ภาวะเสถียร จนกระทั่งอ่านค่าอุณหภูมิครบทั้ง 5 ครั้ง ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบเวลาในการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอน

ชนิดของเครื่องวัดอุณหภูมิ	เวลาในการสอบเทียบของระบบอัตโนมัติ (นาที)	เวลาในการสอบเทียบของคน (นาที)	ค่าความไม่แน่นอนของระบบอัตโนมัติ (+/-°C)	ค่าความไม่แน่นอนของคน (+/-°C)
RTD	130	110	0.0032	0.0021
เทอร์โมคัปเปิล	130	110	0.0060	0.0040
Dial Thermometer	145	115	0.0032	0.0024
Digital Thermometer	140	110	0.0046	0.0246

ผลการเปรียบเทียบจากตารางจะเห็นได้ว่าเวลาในการสอบเทียบของระบบอัตโนมัติมีค่ามากกว่าเวลาในการสอบเทียบของคน เกิดจากเวลาช่วงเข้าสู่ภาวะเสถียรที่จุดทดสอบมีค่าแตกต่างกัน คนจะแก้ไขค่าอุณหภูมิได้รวดเร็วกว่า เวลาในการสอบเทียบ Dial Thermometer นานที่สุดเนื่องจากการอ่านค่าอุณหภูมิไม่สามารถอ่านออกมาเป็นตัวเลขได้ทันที ต้องประมาณจากสเกลและก่อนอ่านค่าต้องเคาะเบาๆ เพื่อลดผลของ Hysteresis เวลาการสอบเทียบของระบบอัตโนมัติแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ เช่น การสอบเทียบ RTD หรือ เทอร์โมคัปเปิล จะเร็วกว่าการสอบเทียบ Dial Thermometer และ Digital Thermometer ที่เป็นการสอบเทียบแบบกึ่งอัตโนมัติประมาณ 10 นาที เนื่องจากคอมพิวเตอร์สามารถอ่านค่าอุณหภูมิจากเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิได้ทันที ไม่ต้องรอการป้อนค่าจากคน จากตารางจะเห็นว่าส่วนใหญ่ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากระบบอัตโนมัติจะมีค่ามากกว่าการสอบเทียบโดยคน เพราะการสอบเทียบโดยคนจะเลือกอ่านค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิทดสอบมากกว่าการสอบเทียบโดยระบบอัตโนมัติ แต่สามารถแก้ไขโดยการตั้งค่ากรอบของการอ่านค่าอุณหภูมิของระบบอัตโนมัติให้น้อยลงเพื่อให้การอ่านค่าอุณหภูมิใกล้เคียงขึ้น แต่จะมีผลทำให้ใช้เวลาในการสอบเทียบนานขึ้น ดังนั้นจึงควรจะตั้งค่ากรอบของการอ่านค่าอุณหภูมิของระบบอัตโนมัติให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้และอุณหภูมิของจุดทดสอบ สำหรับการสอบเทียบ Digital Thermometer ระบบอัตโนมัติมีค่าความไม่แน่นอนน้อยกว่า เนื่องจาก Digital Thermometer สามารถแสดงทศนิยมได้เพียงหลักเดียว ทำให้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเล็กน้อย เครื่องวัดอุณหภูมิดิจิตอลแบบ Digital thermometer ไม่สามารถแสดงรายละเอียดได้ทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น แต่โดยรวมแล้วค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบแบบอัตโนมัติมีค่าสูงกว่าการสอบเทียบโดยคน เพราะฉะนั้นจึงไม่ควรใช้สอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่ต้องการค่าความไม่แน่นอนน้อยๆ และมีความถูกต้องแม่นยำสูงมาก

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การสอบเทียบอุณหภูมิในปัจจุบันเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งที่จะทำให้กระบวนการควบคุมอุณหภูมิในการผลิต เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป เพื่อจะพัฒนาระบบอุตสาหกรรมให้ทัดเทียมกับนานาประเทศ ส่วนใหญ่โรงงานอุตสาหกรรมทั่วๆ ไป ยังไม่มีห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิเป็นของตัวเอง และห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่มีในประเทศไทยเทียบกับจำนวนอุตสาหกรรมในประเทศแล้วยังเป็นอัตราส่วนที่น้อยอยู่ ทำให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบแต่ละแห่งไม่สามารถให้บริการสอบเทียบแก่อุตสาหกรรมได้เพียงพอ ถึงแม้ว่าแรงงานที่ใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมินั้นเทียบกับจำนวนเครื่องวัดอุณหภูมิที่สอบเทียบจะมีมาก การพัฒนาคุณภาพของห้องปฏิบัติการจึงต้องการที่จะใช้แรงงานให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และสามารถรองรับการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้เพิ่มขึ้นด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาระบบสอบเทียบอุณหภูมิ โดยการใช้งานคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องควบคุมกระบวนการสอบเทียบให้เป็นแบบอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แรงงาน, ลดเวลาในการสอบเทียบ, ลดเวลาและความผิดพลาดในการคัดลอกเอกสาร และยังสามารถออกใบรับรองการสอบเทียบได้ทันทีหลังจากทำการสอบเทียบเสร็จ โดยที่ข้อมูลต่างๆ ในการสอบเทียบได้แก่

1. รายละเอียดของลูกค้า
2. รายละเอียดของเครื่องวัดอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ
3. ผลของการสอบเทียบ
4. ข้อมูลของสภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขที่ใช้ในการสอบเทียบ

ข้อมูลเหล่านี้จะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูล สำหรับใช้อ้างอิงในการพิจารณาคุณภาพ และในการตัดสินใจใช้เครื่องวัดอุณหภูมินั้นๆ

การทดลองได้ทำการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดเป็นมาตรฐาน และกระบวนการที่เป็นมาตรฐาน สอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิพร้อมๆ กันหลายระบบ โดยมีผู้ดูแลเพียงคนเดียว สามารถออกใบรับรองการสอบเทียบได้ทันทีหลังจากกระบวนการสอบเทียบสิ้นสุดลง เครื่องวัดอุณหภูมิที่ทดสอบมี 4 ชนิดได้แก่ RTD (Resistance Temperature Detector), เทอร์โมคัปเปิล, Dial Thermometer และ Digital Thermometer ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับมนุษย์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การสอบเทียบโดยระบบอัตโนมัติสามารถใช้แทนการสอบเทียบโดยคนได้ เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนจากการทำซ้ำที่คำนวณจากผลการสอบเทียบ ระหว่างการสอบเทียบโดยคนและการสอบเทียบโดยระบบอัตโนมัติแตกต่างกันน้อยมาก เป็นผลให้ค่าความไม่แน่นอนรวมที่คำนวณจากความไม่แน่นอนส่วนอื่นๆ ด้วย มีค่าไม่แตกต่างกัน

2. ความไม่แน่นอนจากการทำซ้ำส่วนใหญ่ จากระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติจะมีค่ามากกว่าระบบสอบเทียบที่ทำโดยคน จึงไม่เหมาะที่จะใช้ระบบอัตโนมัติกับเครื่องวัดอุณหภูมิทดสอบที่ต้องการค่าความไม่แน่นอนน้อยๆ และมีความถูกต้องแม่นยำสูง
3. ข้อผิดพลาดของการสอบเทียบโดยระบบอัตโนมัติน้อยกว่าการสอบเทียบโดยคน และความแน่นอนในกระบวนการสอบเทียบของการสอบเทียบโดยระบบอัตโนมัติดีกว่าการสอบเทียบโดยคน เนื่องจากกระบวนการในการสอบเทียบมีขั้นตอนที่แน่นอน และระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติจะปฏิบัติตามกระบวนการนั้นทุกครั้งโดยไม่มีการกระโดดข้ามขั้นตอน แต่การสอบเทียบโดยคนอาจจะมีการพลั้งเผลอได้ ทำให้บางครั้งข้อมูลที่ได้เกิดความผิดพลาดขึ้น
4. เปรียบเทียบเวลาในการสอบเทียบของระบบสอบเทียบโดยระบบอัตโนมัติและสอบเทียบโดยคน การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละชิ้น ระบบอัตโนมัติจะใช้เวลานานกว่าการสอบเทียบโดยคน แต่เนื่องจากระบบอัตโนมัติสามารถสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้หลายๆ ชิ้นพร้อมกัน โดยใช้คนควบคุมระบบเพียงคนเดียว ซึ่งการสอบเทียบโดยคนนั้นจะต้องใช้คน 1 คนในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละชิ้น ดังนั้นเมื่อเทียบอัตราการใช้แรงงานคนแล้วระบบสอบเทียบแบบอัตโนมัติจะมีประสิทธิภาพการใช้แรงงานสูงกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติที่ได้ออกแบบ ผู้วิจัยเห็นว่ามีหลายจุด ที่สามารถพัฒนาหรือแก้ไขให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้คือ

1. ระบบสอบเทียบที่ได้ออกแบบไว้ สามารถใช้งานได้เฉพาะเครื่องกำเนิดอุณหภูมิ และเครื่องวัดอุณหภูมิที่มีการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เป็นแบบมาตรฐาน RS-232 และชุดคำสั่งในการควบคุมใช้งานได้เฉพาะกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ซึ่งเป็นของบริษัทผู้ผลิตรายใดรายหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับอุปกรณ์ของบริษัทผู้ผลิตรายอื่นๆ และมีการเชื่อมต่อเป็นมาตรฐานอื่น ซึ่งเป็นการจำกัดการใช้งาน ผู้วิจัยเห็นว่าควรจะพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยจะต้องมีการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถเลือกชุดสั่งของบริษัทผู้ผลิตรายอื่นๆ ผ่านทางไลบรารี และส่วนของฮาร์ดแวร์ต้องพัฒนาให้สามารถใช้งานร่วมกับมาตรฐานอื่นๆ เช่น RS-485, RS-422 หรือ IEEE-488 ได้ด้วย

2. ส่วนของการแก้ไขค่าอุณหภูมิสำหรับระบบที่ได้ออกแบบไว้ จะใช้การแก้ไขค่าอุณหภูมิโดยการหาผลต่างของอุณหภูมิที่ทดสอบและอุณหภูมิที่ตั้งไว้ และนำมาชดเชย จากผลการทดลองจะเห็นว่าสามารถใช้งานได้ แต่ใช้เวลานานจึงจะได้อุณหภูมิเสถียรที่จุดทดสอบ ทำให้การสอบเทียบมีความล่าช้าเมื่อเทียบกับการสอบเทียบโดยคน ซึ่งการแก้ไขควรจะมีกระบวนการควบคุมอุณหภูมิให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เช่นกระบวนการในการปรับค่าพารามิเตอร์ในการควบคุม กระบวนการในการทำนายค่าอุณหภูมิหรือประมาณค่าอุณหภูมิล่วงหน้าเพื่อทำการแก้ไขค่าอุณหภูมิก่อนที่ค่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น

3. จากการทดสอบที่ได้แสดงในบทที่ 4 ได้ทำการทดสอบกับเครื่องกำเนิดอุณหภูมิชนิดเดียวคือแบบ Dry-well เนื่องจากเครื่องกำเนิดอุณหภูมิชนิดอื่นที่มีอยู่ไม่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ โดย

เครื่องกำเนิดอุณหภูมิชนิดนี้มีเสถียรภาพไม่สูงนัก และค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียวของอุณหภูมิสูง เมื่อเทียบกับเครื่องกำเนิดอุณหภูมิชนิดอ่างของเหลว ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าเมื่อใช้งานระบบอัตโนมัติกับแหล่งกำเนิดอุณหภูมิชนิดอื่นๆ จะให้ผลเป็นเช่นไร จึงควรจะนำระบบอัตโนมัติไปทดสอบกับเครื่องกำเนิดอุณหภูมิชนิดอื่นๆ ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงกับเครื่องกำเนิดอุณหภูมิชนิดอื่น

5. เนื่องจากกระบวนการสอบเทียบทางด้านความยาว หรือทางด้านอื่นๆ มีกระบวนการใกล้เคียงกับการสอบเทียบทางด้านอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำระบบที่ได้ออกแบบนี้ไปประยุกต์ใช้งานกับการสอบเทียบด้านอื่นๆ โดยจะต้องมีการแก้ไขหรือเพิ่มเติมซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์บางส่วน ให้เหมาะสม แต่ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. กนก กุสุมาลย์นุกูล และ ไกรวุฒิ มั่นเสถียรสิน. การเขียนโปรแกรม Dephi 4. ซัคเซสมีเดีย, 2542.
2. ชูใจ คูหารัตนไชย. สถิติเบื้องต้น. ตำราวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2540.
3. ธันวา ศรีประโมง. การเขียนโปรแกรมภาษาซี สำหรับวิศวกรรม. ตำราวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2539.
4. นุกูล กระจาย. การเขียนโปรแกรมแบบวิชวล ด้วย Dephi 4. ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัดมหาชน, 2542.
5. บรรจบ สุขทัต และ อัจฉรา เจริญสุข. เอกสารอบรมและสัมนา Uncertainty of Measurement. สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2542.
6. ปรีชา ดิษเสถียร. คู่มืออบรมวิชาการความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลและเทอร์มิสเตอร์ชนิดความต้านทาน. สถาบันมาตรวิทยา, 2542.
7. ศิริลักษณ์ โรจนกิจอำนวย. ภาษาฐานข้อมูล SQL. 2542.
8. สุพจน์ ตุงคเศรวงศ์, เกษมสันต์ จันทร์ปลั่ง, ศศิธร ศรีนาารัตน์ และ มิตร วีระธรรม. คู่มืออบรม Temperature Measuring Instrument Calibration. สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น), 2541.
9. เอก ไชยสวัสดิ์. การวัดและเครื่องวัดอุณหภูมิ. ภาควิชาระบบวิศวกรรมควบคุมและเครื่องมือวัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ฤทธิศรีการพิมพ์, 2542.
10. อรรถพล ยิ้มสกุล และ กฤษดา วิศวธีรานนท์. ระบบสอบเทียบอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2542.
11. ASTM. 1992 Annual book of ASTM standards. Volume 14.03 Temperature measurement. 1992.
12. BAILEY, J. A., Use of Software and Computers in Caliration and Certifications. The institution of Electrical Engineering, 1993.
13. Benedict, R. P. Fundamental of Temperature Pressure and Flow Measurement. Willey, 1969.
14. Dally, J. W., Riley, W.F. and Mcconnell, K.G. Instrumentation for Engineering Measurements. John Wiley & Sons, Second Edition, 1993.
15. Drnovsek, J., Bojkovski, J. and Truk, I., An Optimized Temperature Calibraiton System. IEEE Instrumentation and Measument, 1995.

16. Drnovsek, J., Bojkovski, J. and Pusnik, I. A General Precedure for Evaluation of Calibration Baths in Precision Temperature Measurement. IEEE Instrumentation and Measurement, 1997.

17. Doebelin, E. O. Measurement Systems Application and Design. McGraw-Hill, 1990.

18. Hart Scientific. 9122 Dry-Well User manual Reference. 1995.

19. Hart Scientific. 1560 Black Stack User manual Reference. 1998.

20. IBM. Technical Reference Personal Computer Hardware Reference Library. Revised Edition. April 1983.

21. ISOTECH. Temperature Calibration. Isothermal Technology Limited.

22. Mazidi, M. A. and Mazidi, J. G. The 80x86 IBM PC and Compatible Computers. Prentice-Hall, 1998.

23. NAMAS. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement M3003. United Kingdom: Accreditation Service, 1997.

24. Noizette, J. L., Robert, M. and Reviere, J. M., Intelligent Sensor Calibration complexity methodology and consequences. IEEE Instrumentation and Measurement, 1997.

25. Reisdorph, K. and Henderson, K. Tech Yourself Borland C++ Builder in 21 Days. Sams Publishing, First Edition, 1997.

26. Sandige, R. S. Modern Digital Design. McGRAW-Hill Publishing Company, 1990.

27. Varkonyi-Koczy, A. R. and Dobrowiecki, T. P. Imprecise Methods in Measurement. IEEE Instrumentation and Measurement, 1997.

28. Willey, J. S., Improving Productivity of a Temperature Calibration Laboratory. Hart Scientific, 1998.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EQUIPMENT:	RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR
MODEL:	-
SERIAL No.:	9T2605T
ID No.:	S00180
MANUFACTURER:	ISOTECH
MADE IN:	-
SUBMITTED BY:	YOKOGAWA (THAILAND) CO.,LTD. 12/1 SOI EKAMAI 2 EKAMAI ROAD BANGKOK 10110
AMBIENT TEMPERATURE:	25 +/- 2 °C
REL. HUMIDITY:	50 +/-10 %RH
CALIBRATE BY:	ATTAPON YIMSAKUL
CERTIFIED BY:	ATTAPON YIMSAKUL
ISSUE DATE :	12/03/2001

EQUIPMENT: RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR

MANUFACTURER: ISOTECH

MODEL:

SERIAL NUMBER: 9T2605T

ID No.: S00180

RECEIVED DATE: 08/03/2000

CALIBRATION DATE: 12/03/2000

REFERENCE: 910-275

PROCEDURE USE:

THIS INSTRUMENT WAS CALIBRATED BY COMPARISON WITH STANDARD THERMOMETER INTO DRY-WELL CALIBRATOR AND COMPARISON WITH STANDARD PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER (SPRT) INTO DRY-WELL CALIBRATOR.

THE TEMPERATURE SCALE USED BASED ON ITS-90.

CONDITION OF RESULT OF CALIBRATION

1. REFERENCE STANDARD INSTRUMENT

INSTRUMENT	MODEL	SERIAL No.	TEST REPORT No.	DUEDATE
1) BLACK STACK	1560	5675002	99-2010	15/01/2001
2) SPRT MODULE	2560	5655034	7T642	15/01/2001
3) DRY-WELL	9122	2002119	771517	20/12/2000
4) SPRT	5628	0023	8C3004	15/01/2001

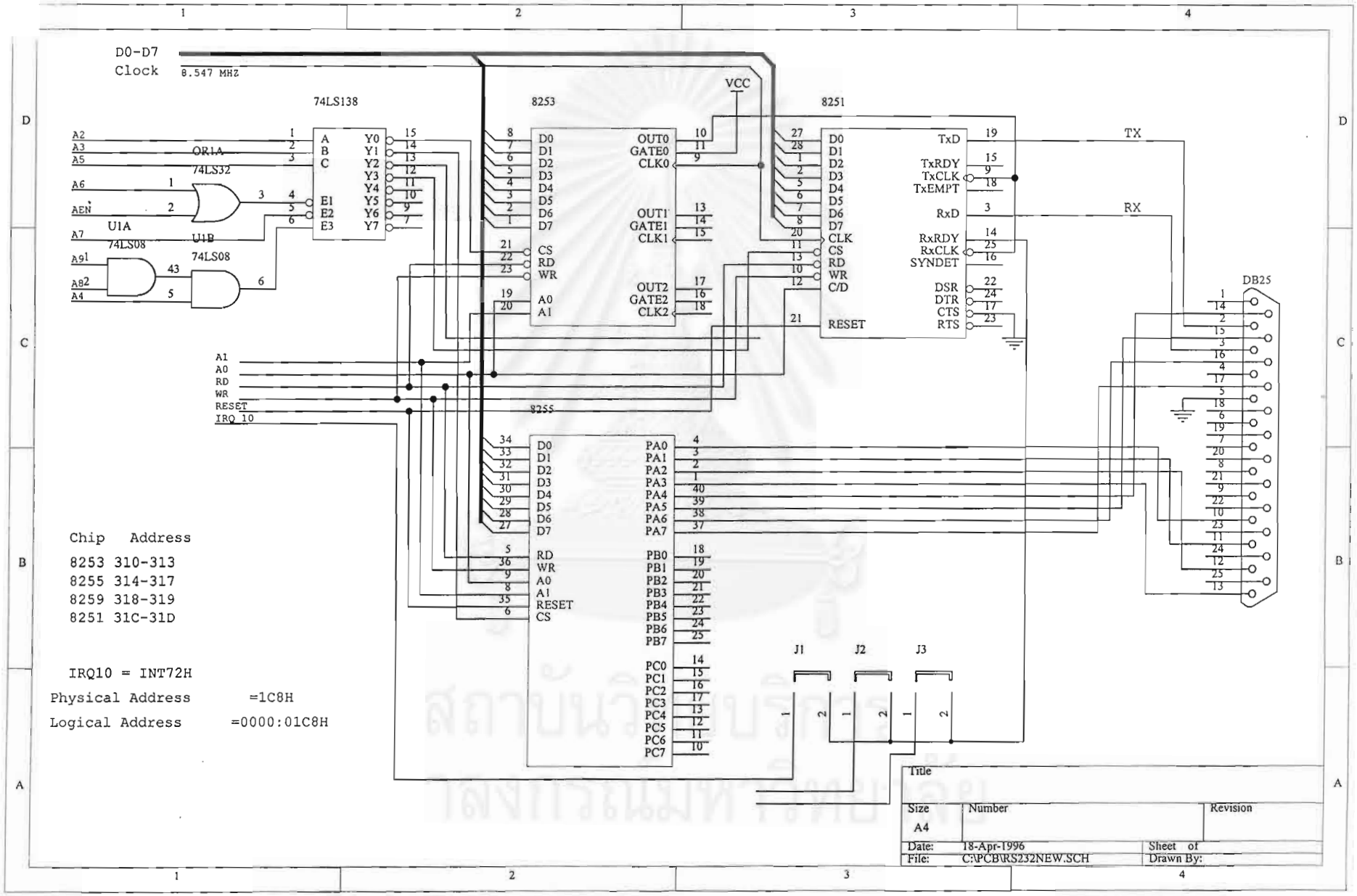
2. THIS RESULT OF CALIBRATION WAS FOUND ACCURATE AS SHOWN ON DATE AND PLACE OF CALIBRATION ONLY.
3. THIS CERTIFICATION IS TRACEABLE TO
   - THE CSIRO NATIONAL MEASUREMENT LABORATORY (NML) AUSTRALIA THROUGH THE REFERENCE STANDARDS LABORATORY OF THAI AIRWAYS INTERNATIONAL PUBLIC CO.,LTD.
   - THE NATIONAL STANDARDS OF FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY AT THE PHYSIKALISCH- TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB) THROUGH THURINGIAN STATE OFFICER OF METROLOGY AND VERIFICATION.

RESULT OF CALIBRATION (*) WITHOUT ADJUSTMENT ( ) ADJUSTMENT

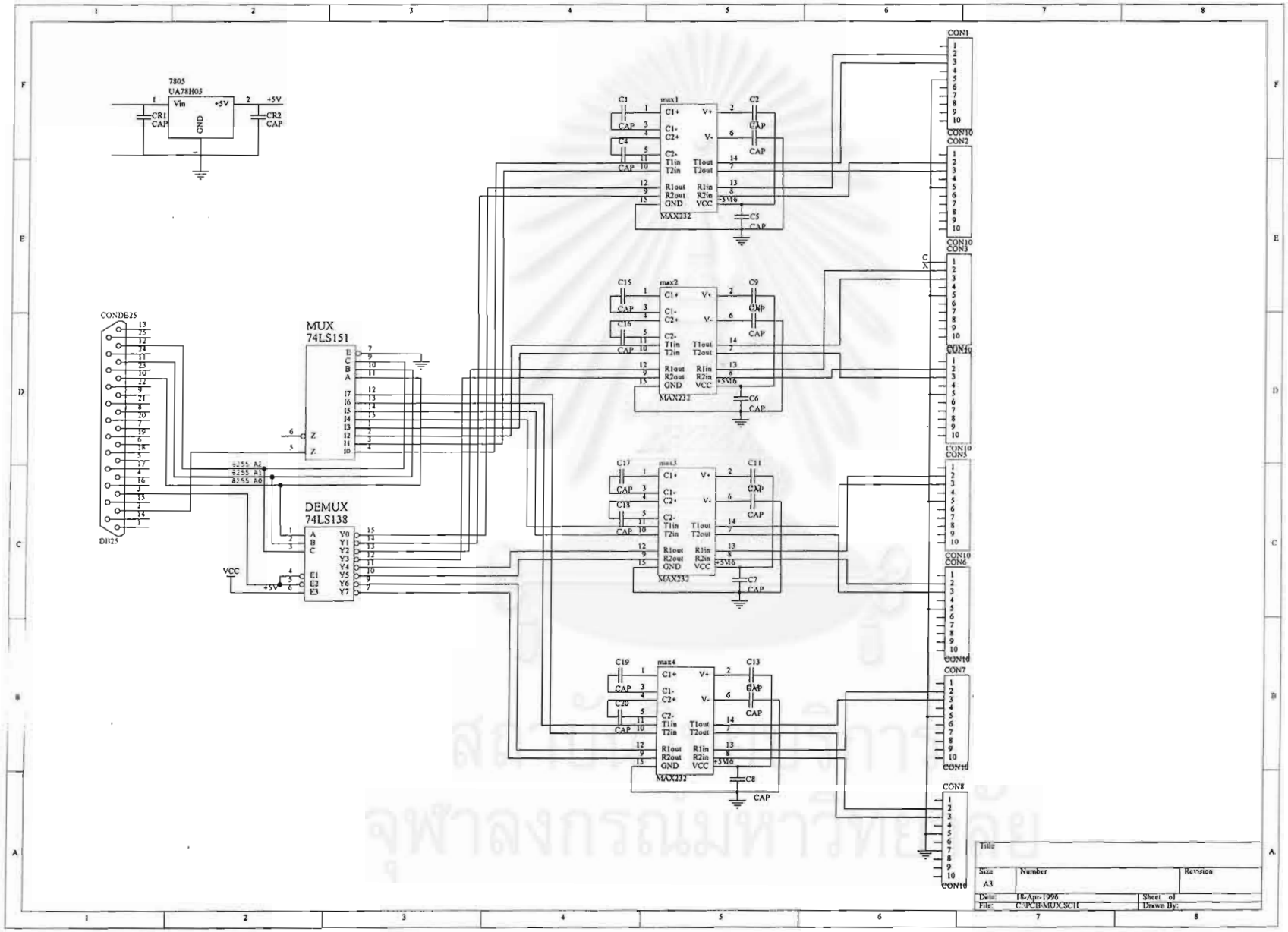
STANDARD TEMPERATURE (^{o}C)	UUC* READING (^{o}C)	ERROR (^{o}C)	UNCERTAINTY OF MEASUREMENT (+/-^{o}C)
50.0014	50.0251	+0.0237	0.52
99.9971	100.0828	-0.0857	0.52
200.0095	200.2162	-0.0267	0.52
300.0080	300.3663	-0.3583	0.52

UUC* : UNIT UNDER CALIBRATION

THE REPORTED UNCERTAINTY OF MEASUREMENT WAS BASED ON A STANDARD UNCERTAINTY MULTIPLED BY A COVERAGE FACTOR k=2, PROVIDING A LEVEL OF CONFIDENCE OF APPROXIMATION 95%.



วงจรการ์ดเชื่อมต่อ



วงจรมัลติเพล็กเซอร์ RS-232

พลสมุทรสาย สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นาย อรรถพล ยิ้มสกุล เกิดวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2519 ที่กรุงเทพมหานครฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย