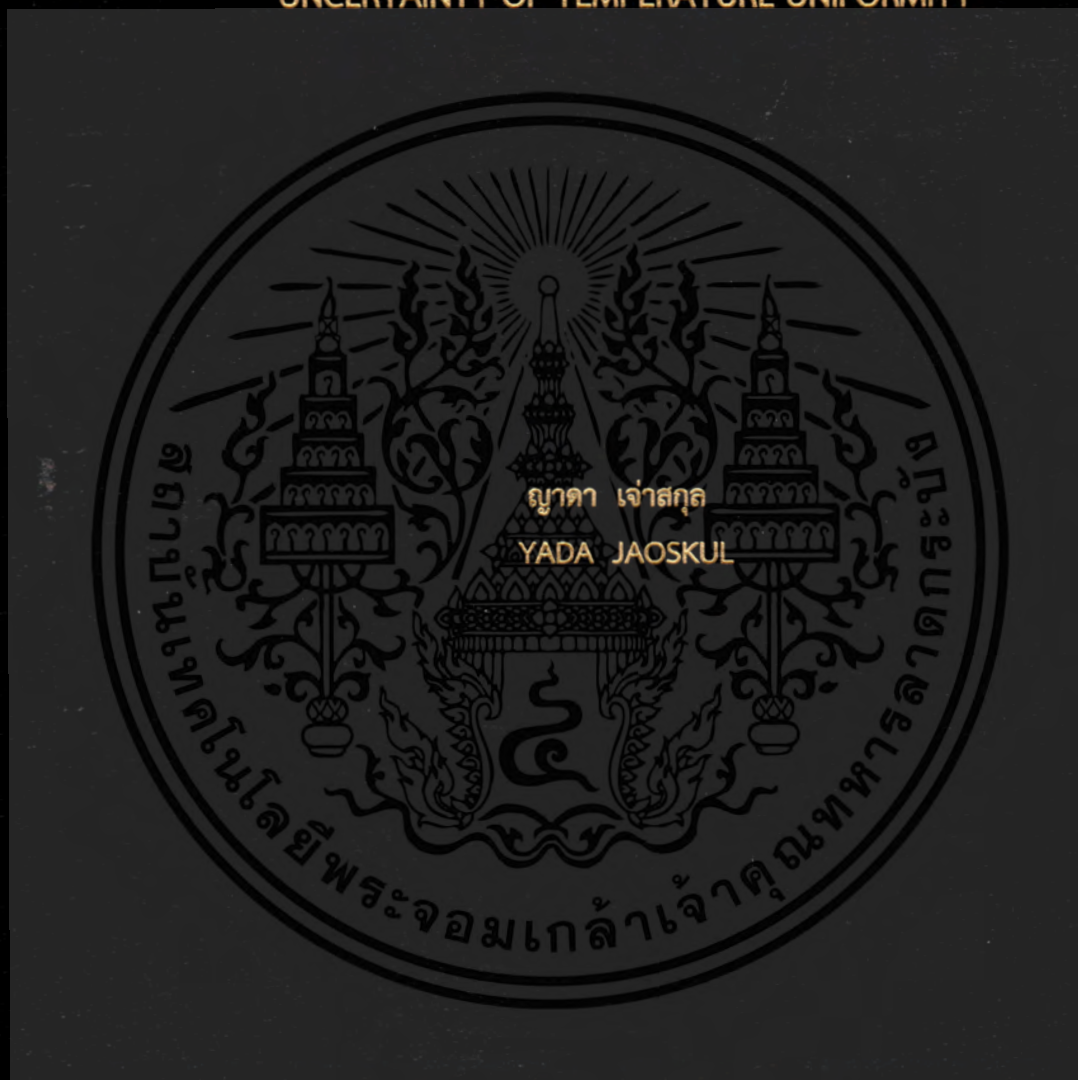


แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน
สำหรับความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

A MATHEMATIC MODEL FOR EVALUATION OF THE STANDARD
UNCERTAINTY OF TEMPERATURE UNIFORMITY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-257-109

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน
สำหรับความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

A MATHEMATIC MODEL FOR EVALUATION OF THE STANDARD
UNCERTAINTY OF TEMPERATURE UNIFORMITY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-257-109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A MATHEMATIC MODEL FOR EVALUATION OF THE STANDARD
UNCERTAINTY OF TEMPERATURE UNIFORMITY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AUTOMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-EN-M-257-109



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานสำหรับความ
สม่ำเสมอของอุณหภูมิ

Thesis Title A Mathematic Model for Evaluation of the Standard Uncertainty of
Temperature Uniformity

นักศึกษา นางสาวญาดา เจ้าสกุล

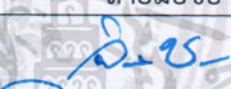

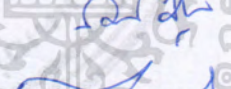
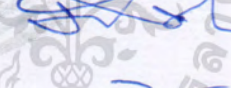
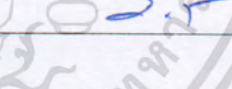
รหัสประจำตัว 58601204

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอัตโนมัติ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เทพมณี

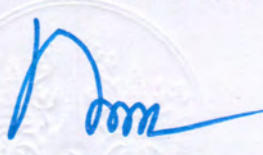
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-257-109

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิชัยธรรม	
รศ.ดร.ไสว	พงศ์สวัสดิ์	
รศ.ดร.อัมพวัน	จุลเสวีวงศ์	
รศ.ดร.พิทยา	ปานนิล	
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	เทพมณี	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-301 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอน มาตรฐานสำหรับความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ
นักศึกษา	นางสาวญาดา เจ้าสกุล
รหัสประจำตัว	58601204
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอัตโนมัติ
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เทพมณี

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานสำหรับความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ โดยทั่วไปเมื่อพิจารณาตู้ทดสอบอุณหภูมิเป็นตู้อุณหภูมิคงที่ที่ได้รับอุณหภูมิสม่ำเสมอ ความไม่แน่นอนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงเวลาและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงระยะ ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแสดงได้ 2 วิธี คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อพื้นที่จุดศูนย์กลางของปริมาตรใช้งานและการแปรผันเชิงระยะทางของอุณหภูมิในปริมาตรใช้งานทั้งหมด วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นจำนวนเต็ม เพื่อใช้ประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ผลการคำนวณเชิงตัวเลขพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองที่นำเสนอนี้มีประโยชน์ต่อการหาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาแกน X และแกน Y พร้อมกัน อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามยังพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นจำนวนเต็ม มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความสม่ำเสมอของตู้ทดสอบอุณหภูมิ

Thesis	A Mathematic Model for Evaluation of the Standard Uncertainty of Temperature Uniformity
Student	Ms.Yada Jaoskul
Student ID.	58601204
Degree	Master of Engineering
Program	Automation Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Teerawat Thepmanee

ABSTRACT

This thesis proposes a technique to evaluate of the standard uncertainty of temperature uniformity. In general, when considering the temperature test chamber as a constant temperature chamber that has achieved an arbitrary uniform temperature, the uncertainty (at that achieved temperature) can be separated into the two factors of chronological temperature fluctuation in time and spatial temperature fluctuation, referred to as temperature uniformity. Temperature uniformity is represented through two methods: temperature variation in space based on the center of the working space, and temperature gradient considering the entire working space. The numerical illustrations and results substantiate that the model proposed is useful to simultaneously consider X and Y axes when determining temperature uniformity. Moreover, the linear integer model has a significant impact on uniformity of the temperature chamber.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เทพมณี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ตลอดจนให้การดูแลและความช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม (หลักสูตรวิศวกรรมอัตโนมัติ) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ความอนุเคราะห์ในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และหัวหน้างานที่คอยให้ความช่วยเหลือในหน้าที่การงานและคำปรึกษาจนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเป็นไปอย่างราบรื่น

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา ที่เป็นกำลังใจ คอยดูแลห่วงใย และให้การสนับสนุนข้าพเจ้าทุก ๆ เรื่องมาโดยตลอด และญาติพี่น้องทุกคนที่เป็นกำลังใจจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์นี้จะประโยชน์ให้กับผู้ที่สนใจและผู้ที่อยู่ในสายงานด้านวิศวกรรมอัตโนมัติเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้งาน และพัฒนาในงานอุตสาหกรรมต่อไป

ญาดา เจ้าสกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ III อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 แนวคิดของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 การวัด.....	4
2.3 ผู้ทดสอบอุณหภูมิตั้ง.....	5
2.3.1 ส่วนประกอบผู้ทดสอบอุณหภูมิตั้ง.....	5
2.3.2 การเลือกใช้งานผู้ทดสอบอุณหภูมิตั้ง.....	7
2.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิตั้ง.....	8
2.4.1 วิธีการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิตั้ง.....	8
2.4.2 ใบรับรองผลการสอบเทียบ.....	9
2.5 หลักการสอบเทียบผู้ทดสอบอุณหภูมิตั้ง.....	10
2.5.1 การตรวจสอบเครื่องมือวัดก่อนทำการสอบเทียบ.....	10
2.5.2 เครื่องมือมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบผู้ทดสอบอุณหภูมิตั้ง.....	10
2.5.3 การติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิตั้ง.....	11
2.5.4 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิตั้ง.....	13
2.5.5 การวัดและการบันทึกค่า.....	18
2.5.6 ตัวอย่างผู้ทดสอบอุณหภูมิตั้งและใบรายงานผลการสอบเทียบ.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด.....	23
2.6.1 สมการของการวัด.....	24
2.6.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A.....	24
2.6.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B.....	25
บทที่ 3 การประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ.....	27
3.1 กล่าวนำ.....	27
3.2 ขั้นตอนนอกแบบการทดลอง.....	27
3.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน.....	28
3.4 Model ของการประเมินค่า Temperature Uniformity.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	31
4.1 กล่าวนำ.....	31
4.2 ผลการจำลองอุณหภูมิในตู้ทดสอบ.....	31
4.3 ผลค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ.....	39
4.4 แบบจำลองการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ.....	41
4.4.1 ผลการหาค่า Regression parameters โดยใช้โปรแกรม Microsoft-Excel.....	42
4.4.2 แบบจำลองการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ.....	44
4.4.3 ตัวอย่างผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	46
4.5 ผลการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ.....	48
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	52
5.1 บทสรุปการวิจัย.....	52
5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	55
ประวัติผู้เขียน.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ V อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของการวัดและบันทึกค่าที่อุณหภูมิ 50 °C.....	18
4.1 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 100 °C.....	32
4.2 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 90 °C.....	33
4.3 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 50 °C.....	34
4.4 ค่าอุณหภูมิจำลองเฉลี่ยในตู้ทดสอบอุณหภูมิ 100 °C.....	35
4.5 ค่าอุณหภูมิจำลองเฉลี่ยในตู้ทดสอบอุณหภูมิ 90 °C.....	36
4.6 ค่าอุณหภูมิจำลองเฉลี่ยในตู้ทดสอบอุณหภูมิ 50 °C.....	36
4.7 ผลลัพธ์ Two-way ANOVA.....	38
4.8 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ 100 °C.....	40
4.9 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ 90 °C.....	40
4.10 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ 50 °C.....	41
4.11 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 100 °C ระบาย Z1.....	42
4.12 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 100 °C ระบาย Z2.....	42
4.13 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 100 °C ระบาย Z3.....	42
4.14 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 90 °C ระบาย Z1.....	42
4.15 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 90 °C ระบาย Z2.....	43
4.16 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 90 °C ระบาย Z3.....	43
4.17 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 50 °C ระบาย Z1.....	43
4.18 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 50 °C ระบาย Z2.....	43
4.19 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression parameters ที่ 50 °C ระบาย Z3.....	44
4.20 Regression parameters ที่ 100 °C.....	44
4.21 Regression parameters ที่ 90 °C.....	44
4.22 Regression parameters ที่ 50 °C.....	45
4.23 Uncertainty Budget.....	50

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับตู้ทดสอบขนาด $\leq 1 \text{ m}^3$	11
2.2 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับตู้ทดสอบขนาด 1 m^3	12
2.3 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับตู้ทดสอบขนาด $\geq 1 \text{ m}^3$	12
2.4 แสดงค่าความต้านทานสัมผัสต่ออุณหภูมิของโลหะ.....	14
2.5 วงจรวีธีสโตนบริดจ์.....	15
2.6 วงจรใช้งานอาร์ทีดีแบบ 3 สาย.....	16
2.7 วงจรใช้งานอาร์ทีดีแบบ 4 สาย.....	17
2.8 กราฟ Temperature Uniformity.....	19
2.9 กราฟ Temperature Stability.....	20
2.10 กราฟ Overall Variation.....	20
2.11 ตัวอย่างตู้ทดสอบอุณหภูมิ.....	21
2.12 ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบ.....	22
3.1 การจำลองอุณหภูมิภายในปริมาตรใช้งาน (working space).....	27
3.2 ตัวอย่างความแตกต่างของอุณหภูมิ.....	28
4.1 ตำแหน่งอุณหภูมิจำลอง X1, Y1, Z1.....	31
4.2 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ระนาบ Z1.....	37
4.3 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ระนาบ Z2.....	37
4.4 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ระนาบ Z3.....	38
4.5 ผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่ระนาบ Z1.....	46
4.6 ผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่ระนาบ Z2.....	46
4.7 ผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่ระนาบ Z3.....	47
4.8 ผลการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ 50 °C และ 90 °C.....	48
4.9 ผลการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ 100 °C.....	49
4.10 ใบรายงานผลการสอบเทียบ.....	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการบริหารงานตามระบบคุณภาพในกระบวนการผลิตและการใช้งานอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้เข้ามามีบทบาทสำคัญทุกสายงาน การใช้งานเครื่องมือที่เป็นประเภทเครื่องมือวัดที่ต้องการความถูกต้องของผลการวัดจากเครื่องมือวัดนั้น กำหนดให้เครื่องมือวัดที่ใช้งานในระบบและส่งผลกระทบต่อคุณภาพที่ใช้งานอยู่ ต้องได้รับการสอบเทียบและควบคุมไม่ให้เครื่องมือมีความผิดพลาด (Error) เกินจากเกณฑ์ที่กำหนด เพื่อรักษาระดับความเชื่อมั่นของผลการวัดให้มีความถูกต้องตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน จะเห็นได้ว่า การที่จะรักษาความถูกต้องของผลการวัดของเครื่องมือวัดนั้น ต้องกระทำ 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ การควบคุมค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดและการทราบค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดนั่นเอง (การสอบเทียบเครื่องมือ) [1]

ในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าชิ้นงานที่ผลิตออกมาจากกระบวนการได้คุณภาพตามที่ต้องการหรือไม่นั้น จำเป็นต้องมีกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานเพื่อให้มั่นใจได้ว่าชิ้นงานนั้นๆ สามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การนำอุณหภูมิเข้ามาช่วยในงานทดสอบเพื่อพิจารณาว่าชิ้นงานนั้นสามารถรักษาสภาพเดิมได้ตามที่กำหนดหรือไม่ เมื่ออุณหภูมิและเวลาเปลี่ยนแปลงไป สิ่งหนึ่งที่จะนำมาพิจารณาในกระบวนการตรวจสอบก็คือ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ

การควบคุมอุณหภูมิในตัวหรือห้องทดสอบอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ โดยทั่วไปมีปัจจัยประกอบไปด้วยหลาย ๆ ส่วน เช่น ตัวควบคุมอุณหภูมิ เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ ความเชื่อถือได้ของระบบ เป็นต้น ซึ่งส่วนสำคัญในการวัดเพื่อควบคุมก็คือ เครื่องมือที่ใช้วัดในระบบและจะมีความน่าเชื่อถือก็ต่อเมื่อเครื่องมือได้รับการสอบเทียบและถูกรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วย

แนวทางสำหรับการสอบเทียบและตรวจสอบตัวทดสอบอุณหภูมิตามเอกสาร Publication Reference G20 โดย Thai Laboratory Accreditation Scheme ได้กำหนดนิยามความสม่ำเสมอของอุณหภูมิไว้คือ ผลต่างที่มากที่สุดที่เกิดจากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ เทียบกับตำแหน่งอ้างอิงหลังสภาวะคงที่ สามารถคำนวณได้จากผลการวัดอุณหภูมิจากตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งภายในตัวทดสอบอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับขนาดของปริมาตรใช้งานภายในตัวทดสอบอุณหภูมิ [2] นอกจากนั้นการทดสอบคุณสมบัติความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตัวทดสอบตามเอกสารมาตรฐาน IEC 60068-3-5 โดยหลักการสามารถประเมินได้จาก Temperature Variation คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่จุดใด ๆ เทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่จุดศูนย์กลางของปริมาตรใช้งานเมื่ออุณหภูมิภายในตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ (After Stabilization) [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหาการวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิพบว่า ปริมาตรที่รักษาอุณหภูมิมีขนาดใหญ่ ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้ไม่ได้มีค่าความสม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด หากค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างจุดวัดมีค่าแตกต่างกันและมีผลต่อผู้ใช้งานตู้ทดสอบอุณหภูมิ อาจทำให้ผู้ใช้งานตัดสินใจผลการทดสอบงานผิดพลาดไป ซึ่งความผิดพลาดนี้มาจากปัจจัยตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในตู้ทดสอบอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสำคัญสำหรับการประเมินผลการวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบ โดยทำการสร้างแบบจำลองอุณหภูมิขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้ทำนายค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานสำหรับค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) ภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ได้ศึกษามีปริมาตรใช้งานขนาด 1 m^3 จากการประเมินค่าแบบ Constant Uniformity เป็นการใชแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ที่มีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งการประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานจากค่า Uniformity ที่ถูกต้องจะส่งผลให้การรายงานผลการสอบเทียบมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

1.3 แนวคิดของวิทยานิพนธ์

แนวคิดในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยทำการแบ่งปริมาตรใช้งานภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิเป็น 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะทำการจำลองอุณหภูมิขึ้นทั้งหมด 9 จุด โดยค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิจะคำนวณได้ทั้งหมด 27 ค่า ตามตำแหน่งแกน X, Y, Z ที่กำหนดขึ้นภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานสำหรับค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ มาจากปัจจัยตำแหน่งที่แตกต่างกันภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ได้ทำการศึกษามีปริมาตรใช้งานขนาด 1 m^3 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้ที่มาจากปัจจัยอื่นจะไม่ถูกนำมาพิจารณา เช่น ความบกพร่องของตู้ทดสอบอุณหภูมิที่อาจเกิดการรั่วซึมและอาจมีผลทำให้อุณหภูมิบางพื้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบมาจากการจำลองเพื่อนำมาใช้

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทและ 1 ภาคผนวก ด้วยกันคือ

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ แนวคิด ขอบเขต และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัด ตู้ทดสอบอุณหภูมิ การสอบเทียบ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ หลักการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิและการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

บทที่ 3 กล่าวถึง การประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ขั้นตอนออกแบบการทดลอง การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานและ Model ของการประเมินค่า Temperature Uniformity

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการจำลองอุณหภูมิในตู้ทดสอบ ผลค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ แบบจำลองการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและผลการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ

บทที่ 5 เป็นบทสุดท้ายที่กล่าวถึงบทสรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ

ภาคผนวก ที่แสดงถึงบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ ระดับนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้อธิบายถึงวัตถุประสงค์ของการวัด หลักการทำงานและองค์ประกอบของตู้ทดสอบ อุณหภูมิ การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความสามารถในการสอบกลับได้ ใบรับรองผลการสอบเทียบ หลักการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ การตรวจสอบเครื่องมือวัดก่อนทำการสอบเทียบ เครื่องมือมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ การติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ การวัดและการบันทึกค่า ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ และการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด

2.2 การวัด [4]

การวัด (Measurement) คือปฏิบัติการทั้งปวงที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการตัดสินค่าของปริมาณ (Set of Operations having The Object of Determining a Value of a Quantity : VIM 2.1) การวัดเป็นปฏิบัติการทางเทคนิคที่ต้องปฏิบัติตามวิธีการวัดที่กำหนดขั้นต้นไว้แล้ว เพื่อการเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณที่ถูกวัดกับปริมาณมาตรฐาน (Standard) ซึ่งเป็นตัวแทนของหน่วยวัด หมายถึงเครื่องมือวัดนั่นเอง สำหรับวิธีการวัดและเครื่องมือวัดที่ใช้จะขึ้นอยู่กับระดับของความถูกต้องของการวัดที่ต้องการรวมทั้งความรู้ความชำนาญในระบบการวัดของผู้ทำการวัดประกอบกัน แต่ไม่ว่าจะใช้วิธีการตลอดจนผู้มีความชำนาญในระบบการวัดของผู้ทำการวัดประกอบกันก็ไม่สามารถทำให้เกิดความถูกต้องของการวัดได้ตามต้องการ หากเครื่องมือวัดที่ใช้ในกระบวนการวัดไม่ได้รับการสอบเทียบความถูกต้อง

ผลการวัดปริมาณทางกายภาพเป็นเครื่องมือบ่งชี้คุณภาพของผลการวัดนั้นว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงใด ถ้าหากไม่มีเครื่องมือบ่งชี้ใด ๆ จะไม่สามารถเปรียบเทียบผลของการวัดเหล่านั้นได้ไม่เท่ากับตัวมันเองหรือกับค่าอ้างอิงมาตรฐานใด ๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมามีเครื่องมือที่สามารถอ่านค่าได้เข้าใจได้ง่ายและมีกระบวนการที่เป็นที่ยอมรับเพื่อบ่งบอกคุณภาพของผลการวัดนั้น

การแสดงผลการวัดจะไม่สมบูรณ์ ถ้าไม่มีการแสดงค่าความไม่แน่นอน ค่าความไม่แน่นอนของการวัดเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับผลการวัด โดยมีคุณลักษณะของการกระจายค่าซึ่งครอบคลุมปริมาณที่วัด เป็นเรื่องจำเป็นที่ต้องแยกคำว่า ความผิดพลาด (Error) ออกจากคำว่า ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ความผิดพลาดของการวัดหมายถึง ผลการวัดลบด้วยค่าจริงของสิ่งที่ถูกวัดและถ้าเป็นไปได้ต้องใส่ค่าแก้ (Correction) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความผิดพลาดแต่มีเครื่องหมายตรงข้าม

เมื่อนำเอาค่าแก้มารวมกับผลการวัดที่ได้ก็จะได้ค่าจริงแต่เนื่องจากค่าจริงคือ ค่าที่ไม่มีใครทราบ เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นอน ค่าแก๊สจะเป็นค่าประมาณและความผิดพลาดก็ยังคงหลงเหลืออยู่ซึ่งจะไปรวมอยู่ในค่าความไม่แน่นอนที่รายงานในผลการวัด

2.3 ตู้ทดสอบอุณหภูมิ

ตู้ทดสอบอุณหภูมิ เป็นระบบที่ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในพื้นที่ปิดได้ เป็นเครื่องมือพื้นฐานชนิดหนึ่งที่พบในห้องปฏิบัติการทดสอบทั่ว ๆ ไปในโรงงานอุตสาหกรรม ใช้สำหรับการทดสอบวัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลาย เช่น

1. งานวิจัย (Research) การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ทดสอบเพื่อค้นหา หรือประเมินผลทางเลือกของผลิตภัณฑ์ ทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบก่อนการผลิตจริง

2. งานทดสอบความน่าเชื่อถือ (Reliability Testing) ตลอดกระบวนการผลิต การทดสอบว่าผลิตภัณฑ์ที่เสร็จสมบูรณ์เป็นไปตามข้อกำหนดและความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิมของผลิตภัณฑ์ ชนิดของการทดสอบนี้จะช่วยลดความเสี่ยงของการที่ไม่คาดคิดและค่าใช้จ่ายของความล้มเหลวของผลิตภัณฑ์หลังจากที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการปล่อยออก นอกจากนี้ยังเป็นการทำนายอายุขัยของผลิตภัณฑ์ตามความคาดหวังของลูกค้า เพื่อสร้างการรับประกันที่มีประสิทธิภาพอย่างสมเหตุสมผล

3. งานด้านประกันคุณภาพ (Quality Assurance) การประกันคุณภาพและการควบคุมคุณภาพทำให้เกิดความเป็นเลิศของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย ส่วนประกอบ และชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมที่แตกต่างมีข้อกำหนดด้านคุณภาพที่เฉพาะเจาะจง ข้อกำหนดเหล่านี้อาจเป็นข้อบังคับหรืออาจเป็นลักษณะสำคัญของข้อกำหนดการออกแบบหรือการผลิต การทดสอบใช้เพื่อวัดว่าตรงตามข้อกำหนดคุณภาพในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน [5]

หลักการการทำงานของตู้ทดสอบอุณหภูมิ ความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนถูกถ่ายเทให้วัตถุ โดยกระบวนการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ความร้อนจะถูกวัดและควบคุมอย่างเหมาะสมด้วยตัวตรวจวัดอุณหภูมิและระบบควบคุมอุณหภูมิ [6]

2.3.1 ส่วนประกอบตู้ทดสอบอุณหภูมิ [6]

1. ผนังตู้อบ โดยทั่วไปจะออกแบบให้มีการกระจายความร้อนภายในได้ดี และป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายในออกสู่ภายนอก วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะที่ไม่เป็นสนิม ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและทำความสะอาดง่าย เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือเหล็กพ่นสีกันสนิม ผนังตู้อบอาจมี 2-3 ชั้น และมีฉนวนหนา 1-2.5 นิ้ว อยู่ระหว่างกลาง ฉนวนกันความร้อนที่ใช้ควรมีความคงทนต่อความร้อน ไม่ดูดความชื้น และนำความร้อนได้ไม่ดี ตัวอย่างเช่น ใยแก้ว (Glass Wool) และอิฐทนไฟ (Fire Brick) เป็นต้น

2. ตัวกำเนิดความร้อน กรณีที่ต้องการสร้างอุณหภูมิไม่เกิน 1,000 °C นิยมใช้แท่งความร้อนหรือลวดความต้านทาน (Resistance Wire) ที่ทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิลกับโครเมียม (นิโครม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานานาชาติ มีอยู่ให้เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีหลาย ๆ ชนิด ตัวอย่างเช่น คลอรีน (Chlorine) โบรมีน (Bromine) ไอโอดีน (Iodine) และฟลูออรีน (Fluorine) แต่ถ้าต้องการสร้างอุณหภูมิสูงกว่านี้ต้องใช้ตัวกำเนิดความร้อนที่ทำจาก Silicon Carbide, Molybdenum Disilicate หรือ Iron-Chromium-Aluminum การติดตั้งตัวกำเนิดความร้อนอาจพบได้ 2 แบบคือ แบบฝังในผนัง (Embedded Type) และแบบไม่ฝังในผนัง (Opened Type) ซึ่งแบบไม่ฝังในผนังมีข้อดีในด้านการลดการสูญเสียความร้อนให้กับผนังตู้อบ ทำให้สามารถใช้ตัวกำเนิดความร้อนกำลัง (วัตต์) ต่ำ ซึ่งช่วยประหยัดกระแสไฟฟ้าและยืดอายุการใช้งานของตัวกำเนิดความร้อนได้มาก

3. ช่องระบายอากาศ (Air Damper) ส่วนใหญ่ติดตั้งที่ด้านบนของตู้อบ มีส่วนน้อยติดตั้งไว้ที่ด้านหลังตู้อบ มีหน้าที่ระบายควัน ไอน้ำ หรือไอสารเคมีออกจากตู้อบ ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียความร้อน อันเนื่องมาจากการมีความชื้นในตู้อบมาก ช่องระบายอากาศส่วนใหญ่ปรับขนาดของรูระบายได้ เพื่อให้ไอน้ำระบายออกได้อย่างเหมาะสม โดยที่สูญเสียความร้อนออกทางช่องระบายอากาศน้อยที่สุด

4. ระบบถ่ายเทความร้อนที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ

ก. การพาความร้อนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity Convection) ทำงานโดยอาศัยความแตกต่างของน้ำหนักของอากาศที่ร้อนและเย็น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างช้า ๆ ช่องให้อากาศเย็นไหลเข้า (Intake Port) มักจะอยู่ส่วนล่างของตู้อบ อากาศร้อนบางส่วนไหลออกทางช่องระบายอากาศด้านบน

ข. การพาความร้อนโดยใช้พัดลม (Mechanical Convection) นิยมใช้มอเตอร์หมุนพัดลมชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor) ซึ่งไม่ต้องการการดูแลมากเพราะไม่ได้ใช้แปรงถ่าน มอเตอร์ดังกล่าวจะทำหน้าที่หมุนพัดลม ซึ่งอาจถูกติดตั้งไว้ที่ส่วนล่างของตู้อบเพื่อเสริมการพาความร้อนในแนวตั้ง (Vertical Convection) หรือติดตั้งไว้ที่ส่วนบนของตู้อบ เพื่อเสริมการพาความร้อนในแนวระดับ (Horizontal Convection)

5. ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature Sensor) มีหน้าที่ป้อนสัญญาณให้วงจรระบบควบคุมอุณหภูมิ หรือป้อนสัญญาณให้ระบบอ่านค่าอุณหภูมิ ตัวตรวจจับอุณหภูมิที่นิยมใช้มีหลายชนิด เช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple), เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor), สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor), โลหะบริสุทธิ์ เป็นต้น

6. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) แบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบกล (Mechanical Type) ที่อาศัยการเคลื่อนที่ของกลไก และแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Solid State Type)

ก. แบบกล ทำงานโดยการตัด (OFF) หรือต่อ (ON) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวกำเนิดความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสของสวิตช์ไฟฟ้าซึ่งถูกควบคุมโดยตัวไวความร้อน แบบกลส่วนใหญ่มีความไวในการควบคุมอุณหภูมิต่ำ จึงเหมาะสำหรับควบคุมอุณหภูมิในเครื่องมือที่ไม่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิต่ำ

ข. แบบอิเล็กทรอนิกส์ มีอยู่หลายชนิด ตัวอย่างเช่น แบบเปิดปิด (ON/OFF) ทำงานโดยการรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณจากตัวตรวจจับอุณหภูมิแล้วตัดหรือต่อวงจรไฟฟ้าของตัวกำเนิดความร้อนด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิด, แบบสัดส่วน (Proportional Control) เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความไวสูง และตอบสนองต่อการควบคุมอุณหภูมิได้เร็ว ตัวกำเนิดความร้อนได้รับกระแสไฟฟ้าอย่างเต็มที่หลังจากเปิดวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่เมื่อถึงช่วงแตกต่างแคบ ๆ (ปรับได้ด้วยปุ่มปรับอัตราขยาย, Gain) ระหว่างอุณหภูมิจริงและอุณหภูมิที่กำหนดไว้ กระแสไฟฟ้าจะถูกตัด และถูกควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ ของเวลา ซึ่งจะเป็นเวลานานหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อให้อุณหภูมิคงที่ ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้และแบบสุดท้าย แบบควบคุมเฟส (Phase Control)

7. ประตูตู้อบ ปกติจะมีประตู 1 บาน แต่ถ้าต้องการรักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่มาก ๆ ตัวอย่างเช่น ตู้เพาะเชื้อ อาจมีประตูกระจกชั้นในเพิ่มขึ้นอีก 1 บาน เพื่อให้สามารถมองเห็นวัตถุภายในโดยไม่จำเป็นต้องเปิดประตูตู้อบบ่อย ๆ

8. ชั้นวาง อาจทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กชุบนิเกิล หรือเหล็กชุบพลาสติก แต่ควรเป็นชนิดที่ปรับระดับได้เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

9. นาฬิกาตั้งเวลา มีทั้งชนิดที่เดินด้วยลานหรือใช้กระแสไฟฟ้า มีช่วงการตั้งเวลาสูงสุดได้แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

10. สวิตช์ตัดการทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน (Overheating Cut-Off Switch) มีความจำเป็นมาก ๆ เนื่องจากเป็นระบบปลอดภัยเพื่อป้องกันการเกิดอัคคีภัย หรือไฟไหม้วัตถุภายในตู้อบ เพราะระบบควบคุมอุณหภูมิอาจเสียที่เวลาใดเวลาหนึ่งได้ปกติจะปรับไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิใช้งาน 5-20 °C

11. ช่องดูดอากาศออก พบในตู้อบลมร้อนชนิดใช้สูญญากาศช่วยทำให้การระเหยของของเหลวเร็วขึ้น

12. ช่องเติมอากาศ พบในตู้อบชนิดพิเศษบางแบบ อาจเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในตู้อบ ตามวัตถุประสงค์ของงานนั้น ๆ

13. อุปกรณ์หมุนเวียนอากาศภายใน (Stirring Device) เป็นพัดลมหมุนเวียนอากาศภายในตู้อบโดยไม่ได้อัดเอาอากาศภายนอกเข้ามาร่วมหมุนเวียนด้วย พบเฉพาะในตู้อบที่มีขนาดใหญ่มากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของตู้อบ

2.3.2 การเลือกใช้งานตู้ทดสอบอุณหภูมิ [6]

1. มีช่วงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งาน ไม่ควรเลือกตู้อบลมร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วงสูงมาใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำ เพราะการควบคุมอุณหภูมิมักจะคลาดเคลื่อน และยังสิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้ามากกว่าปกติ

2. พัดลมกระจายความร้อนในตู้ควรมีขนาดใหญ่ หรือมีขนาดเล็กแต่มีความเร็วรอบสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มีความถูกต้องและความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิเพียงพอ สำหรับงานทางห้องปฏิบัติการแต่ละประเภท
4. มีช่องระบายอากาศที่ปรับขนาดได้ เพื่อช่วยควบคุมการสูญเสียความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด
5. ระบบควบคุมความร้อนควรเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือมีระบบไมโครโพรเซสเซอร์ช่วยควบคุม เพราะมีความละเอียดและความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิดีมาก
6. มีระบบตัดกระแสไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้มาก
7. มีการสูญเสียความร้อนที่ขอบประตู ฉนวนตู้ทดสอบน้อย
8. ภายในตู้ทดสอบควรทำด้วยโลหะไร้สนิมที่ทนความร้อน และทำความสะอาดได้ง่าย
9. ตู้ทดสอบขนาดใหญ่ควรมีประตูแยกเป็นหลาย ๆ บาน เพื่อลดการสูญเสียความร้อนขณะเปิดประตูตู้ทดสอบ
10. พัดลมระบายความร้อนควรมีเสียงดังรบกวนน้อยที่สุด

2.4 การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การสอบเทียบ มีนิยามตาม VIM 6.11 ว่า “ชุดของการดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ขั้วบอกโดยเครื่องมือวัด หรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องมือวัดที่เป็นวัสดุ กับค่าสมนัยที่รู้ ของปริมาณที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ ” จากนิยามดังกล่าว การสอบเทียบจึงหมายถึงการตัดสินใจและทำเอกสารแสดงความเบี่ยงเบนของค่าที่ขั้วบอกของเครื่องมือวัดหรือค่าที่ระบุของวัสดุวัด ออกจากค่าจริงที่ยอมรับร่วมกัน (Conventional True Value) ของปริมาณที่ถูกวัด โดยค่าจริงที่ยอมรับร่วมกันนี้ คือ ค่าจริงที่มีความไม่แน่นอนของการวัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในที่นี้คือค่ามาตรฐานที่สามารถสอบกลับได้ ไปสู่นิยามของหน่วยวัดนั้น ๆ ผ่านทางมาตรฐานแห่งชาติหรือมาตรฐานระหว่างประเทศ [7]

2.4.1 วิธีการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1. การสร้างสเกลอุณหภูมิเปรียบเทียบกับสเกลอุณหภูมิสากล ITS-90 (Fixed-Points)

การสอบเทียบรูปแบบนี้จะใช้ กับมาตรฐานในระดับสูง เช่น มาตรฐานขั้นทุติยภูมิ หรือมาตรฐานอ้างอิง โดยเครื่องมือที่จะทำการสอบเทียบโดยวิธีนี้ จะเป็นเครื่องมือที่มีความถูกต้องสูงและต้องการค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบซึ่งต่ำมาก ๆ เช่น Standard Platinum Resistance Thermometer หรือ Standard Radiation Thermometer เป็นต้น และเครื่องมือซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานในกรณีนี้ คือ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิมาตรฐาน นั่นเอง

2. การเปรียบเทียบค่ากับเครื่องมือมาตรฐาน (Comparison Method)

โดยการสอบเทียบในรูปแบบนี้ จะเหมาะสมกับเครื่องมือวัดซึ่งมีความถูกต้องในการวัดที่ต่ำกว่า เครื่องมือซึ่งสอบเทียบในรูปแบบแรกหรือเป็นเครื่องมือซึ่งสามารถยอมรับค่าความไม่แน่นอนในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามรับรองหรือการยืนยันหรือการให้คำปรึกษา เมื่อผู้ซื้อเห็นประโยชน์ในการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสอบเทียบที่มากกว่าการสอบเทียบในรูปแบบแรก ซึ่งการสอบเทียบโดยการเปรียบเทียบค่านี้เป็นรูปแบบซึ่งเป็นที่นิยมใช้ กันเป็นส่วนใหญ่ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางอุณหภูมิ การสอบเทียบจะทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด (Thermometer Reading) กับค่าจริงซึ่งอ่านได้โดยเครื่องมือมาตรฐาน (True Value หรือ Actual Reading) ณ อุณหภูมิใด ๆ [7]

2.4.2 ใบรับรองผลการสอบเทียบ [1]

ผลการสอบเทียบโดยปกติรายงานในรูปแบบใบรับรองผลการสอบเทียบ (Calibration Certificate) โดยใบรับรองการสอบเทียบแต่ละฉบับ อย่างน้อยต้องประกอบด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้ (ตามระบบ ISO/IEC 17025:2005 ข้อกำหนดที่ 5.10.2 รายงานผลการทดสอบและใบรับรองการสอบเทียบและ 5.10.4 ใบรับรองการสอบเทียบ)

1. หัวเรื่อง (“ใบรับรองการสอบเทียบ”)
2. ชื่อและที่อยู่ของห้องปฏิบัติการ
3. การชี้แจงเฉพาะของใบรับรองการสอบเทียบ (เช่น หมายเลขลำดับที่)
4. ชื่อและที่อยู่ของลูกค้า
5. ระบุวิธีที่ใช้
6. รายละเอียดลักษณะ สภาพและการชี้แจงอย่างไม่คลุมเครือของตัวอย่างที่สอบเทียบ
7. วันเดือนปีที่รับตัวอย่างสอบเทียบไปใช้และวันเดือนปีที่ทำการสอบเทียบ
8. ผลการสอบเทียบพร้อมกับหน่วยของการวัดตามความเหมาะสม
9. ชื่อ หน้าที่และลายมือชื่อของบุคคลที่มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบรับรองการสอบเทียบ
10. ข้อความที่ระบุว่ารายงานนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่ สอบเทียบเท่านั้น
11. ภาวะต่าง ๆ (เช่น ภาวะแวดล้อม) ที่สอบเทียบซึ่งมีอิทธิพลต่อผลการวัด
12. ค่าความไม่แน่นอนของการวัด
13. หลักฐานที่แสดงถึงความสอบกลับได้ของการวัด

เมื่อเครื่องมือวัดทางอุณหภูมิได้ รับการสอบเทียบเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น จะมีการรายงานผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดเพื่อเป็นการบ่งบอกถึงความถูกต้องของเครื่องมือวัดดังกล่าว ซึ่งค่าที่ได้จากใบรายงานผลการสอบเทียบนี้จะต้องนำมาพิจารณาและใช้งานทุกครั้งที่มีการนำเครื่องมือนั้น ๆ มาใช้ ซึ่งค่าในใบรายงานผลการสอบเทียบนี้จะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องมือแต่ละตัว และไม่สามารถใช้แทนกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 หลักการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ [2]

2.5.1 การตรวจสอบเครื่องมือวัดก่อนทำการสอบเทียบ

1. โครงสร้างภายนอกของตู้ทดสอบอุณหภูมิ

สภาพโครงสร้างภายนอกตู้ทดสอบอุณหภูมิต้องมีความแข็งแรง ปลอดภัยต่อการทำงาน ยางขอบตู้ยึดแน่นสนิท ไม่กรอบหรือไม่แตกกร้าว ข้อบกพร่องใด ๆ ที่พบจะถูกบันทึกไว้และประเมินผล เพื่อให้แน่ใจว่าไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของตู้

2. คุณสมบัติของตู้ทดสอบอุณหภูมิ

คุณลักษณะของตู้ทั้งหมด เช่น ระดับของการระบายอากาศ, ตัวทำความร้อนและอื่น ๆ ควรทำการปรับการตั้งค่าให้เป็นสภาวะการทำงานปกติ หากมีการเบี่ยงเบนใด ๆ ที่เกิดขึ้นในการตั้งค่าที่แตกต่างจากการทำงานสภาวะปกติจะต้องทำการบันทึกไว้

3. ตู้ทดสอบอุณหภูมিসภาวะไร้ภาระ

ตู้ทดสอบอุณหภูมิต้องอยู่ในสภาวะไร้ภาระ (Unloaded Condition) คือ ไม่มีสิ่งของหรือชิ้นงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบอยู่ อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ จะอยู่ในตำแหน่งปกติ

4. อุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ

ต้องทำการบันทึกอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 2 เมตรจากตู้ทดสอบอุณหภูมิไม่ควรเปลี่ยนแปลงเกิน 10°C ถ้าหากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 10°C ต้องมั่นใจว่าการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่มีนัยสำคัญที่ส่งผลต่ออุณหภูมิภายในตู้ทดสอบ

2.5.2 เครื่องมือมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ

1. เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ควรมีความสามารถที่จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในปริมาณใช้งาน เครื่องมือมาตรฐานโดยปกติจะประกอบด้วยสองส่วน คือ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เช่น ตัวตรวจวัดอุณหภูมิประเภทการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Resistance Temperature Detectors; RTD) หรือ Thermocouples และอุปกรณ์แสดงค่า เช่น เครื่องวัดอุณหภูมิ, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ ฯลฯ

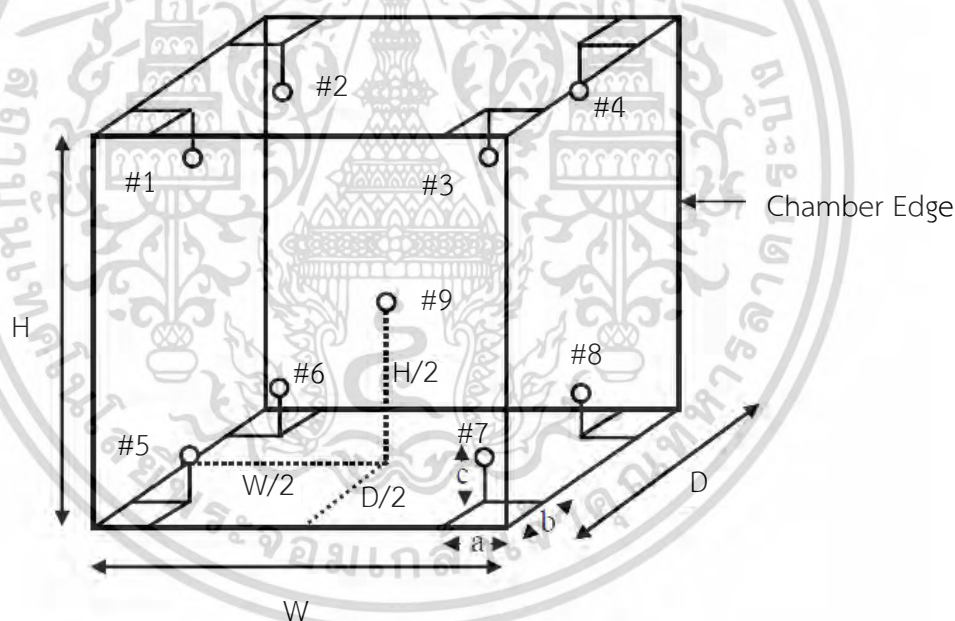
2. ชุดของตัวตรวจวัดอุณหภูมิควรมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบอุณหภูมิของตู้ทดสอบ และครอบคลุมช่วงการสอบเทียบ โดยปกติจะเป็นอาร์ทีดีหรือเทอร์โมคัปเปิ้ล ที่มีความยืดหยุ่นในการติดตั้ง สำหรับฉนวนกันความร้อนของสายไฟและส่วนประกอบต่าง ๆ ของตัวตรวจจับ เช่น วัสดุที่ใช้ ขนาดและตำแหน่งติดตั้ง ต้องมีผลกระทบน้อยที่สุดต่อการตอบสนองของตัวตรวจจับอุณหภูมิ ซึ่งควรจะมีควมยาวมากพอ และมีคุณลักษณะที่เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียการนำและความล่าช้าในการวัดเนื่องจากเวลาการตอบสนองความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จำนวนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิมาตรฐาน จำเป็นต้องสอดคล้องกับปริมาตรใช้งาน (Working Space) ที่จะทำการสอบเทียบ โดยต้องไม่น้อยกว่าจำนวน 9 จุด สำหรับการสอบเทียบความจุของตู้ทดสอบปริมาตร 1 m^3 หรือน้อยกว่า สำหรับตู้ทดสอบขนาดใหญ่ระยะห่างระหว่างตรวจวัดไม่ควรเกิน 100 ซม. อย่างน้อย 2 ตรวจวัดที่จำเป็นสำหรับการตรวจสอบเฉพาะ หนึ่งคือ ตรวจวัดอ้างอิงที่ตำแหน่งอ้างอิงและตำแหน่งอื่น ๆ ซึ่งควรจะติดตั้งอยู่ภายในระยะ 5 ซม. ของตำแหน่งอ้างอิง

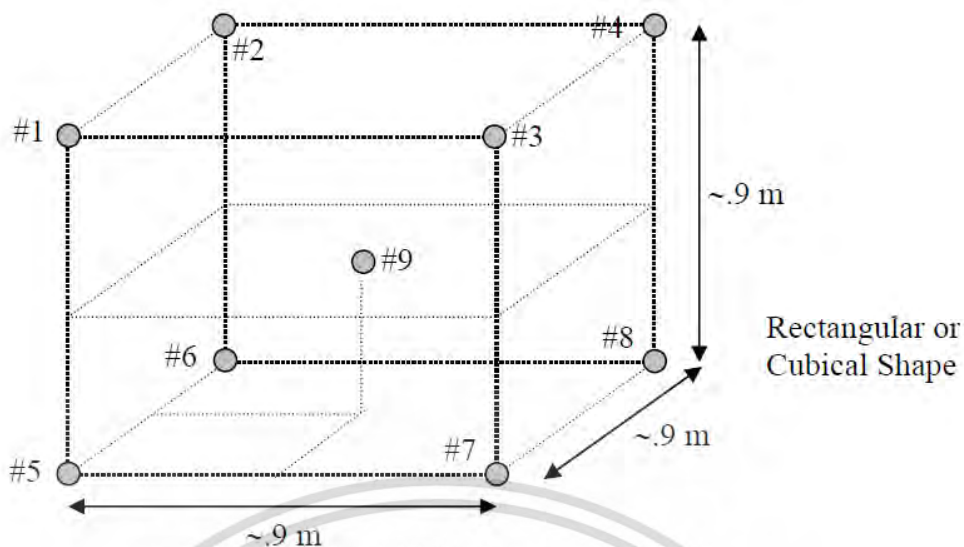
2.5.3 การติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ [2]

การติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor Installation) การวัดอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบจะใช้วิธีอ่านค่าเปรียบเทียบกับตัววัดอุณหภูมิมาตรฐานโดยติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิให้ครอบคลุมภายในปริมาตรใช้งาน ซึ่งตัววัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งอยู่ที่แต่ละมุมภายในปริมาตรใช้งาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของตู้ทดสอบตามเอกสาร Publication Reference G20 (Guidelines for Calibration and Checks of Temperature Controlled Enclosures) ดังรูปที่ 2.1, 2.2 และ 2.3

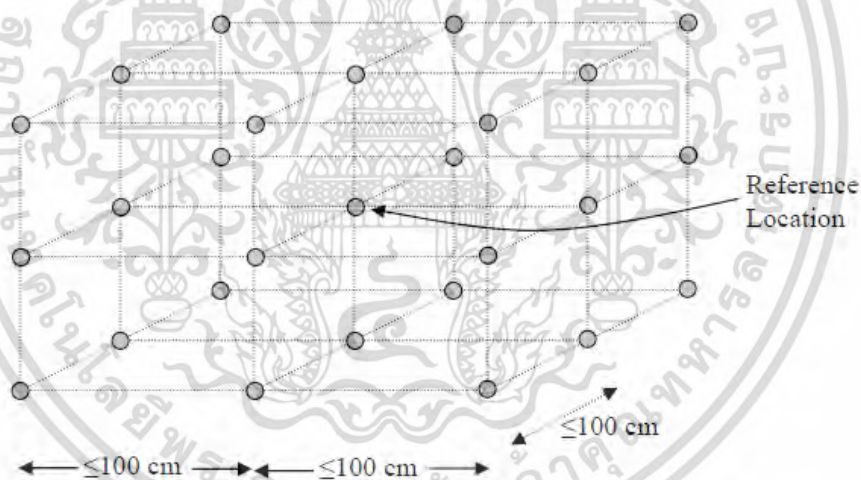


รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับตู้ทดสอบขนาด $\leq 1 \text{ m}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับตู้ทดสอบขนาด 1 m^3



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับตู้ทดสอบขนาด $\geq 1 \text{ m}^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ [8]

ประเภทการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Resistance Temperature Detectors ; RTD) จัดเป็นตัวเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในของวัสดุตามค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ความหมายคือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความต้านทานภายในของอาร์ทีดีก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นบวก (Positive Temperature Coefficient ; PTC) อาร์ทีดีถูกค้นพบในปีเดียวกันกับที่ซีแบ็คค้นพบกฎของพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อนหรือปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Law) Sir Humphry Day ก็ค้นพบว่า ค่าความต้านทานในลวดโลหะก็จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อีก 50 ปีต่อมา Sir William Siemens ได้ทำการทดลองอย่างจริงจังและค้นพบว่า เส้นลวดแพลทินัมสามารถใช้เป็นตัวกลางวัดอุณหภูมิได้ ต่อมาได้กลายเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่แพร่หลายในปัจจุบัน โดยใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานสากลในการวัดอุณหภูมิและกำหนดสเกลมาตรฐานจากจุดแข็งตัวของออกซิเจน ($-182.960\text{ }^{\circ}\text{C}$) ไปจนถึงจุดแข็งตัวของแอนติโมนี ($630.740\text{ }^{\circ}\text{C}$) อาร์ทีดีสามารถสร้างขึ้นได้จากวัสดุต่อไปนี้เช่น แพลทินัม (Platinum), ทองแดงและนิเกิล (Nickel) แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้อาร์ทีดีที่ทำมาจากแพลทินัมเนื่องจากแพลทินัมมีความเที่ยงตรงและมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด โดยความต้านทานไฟฟ้าในเส้นลวดโลหะจะเปลี่ยนค่าไปได้แสดงดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)

ช่วงย่าน $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.1)

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + c(t-100)^3] \quad (2.1)$$

ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.2)

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + ct^3 + \dots] \quad (2.2)$$

โดยที่

R_t คือค่าความต้านทานของลวดโลหะที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส

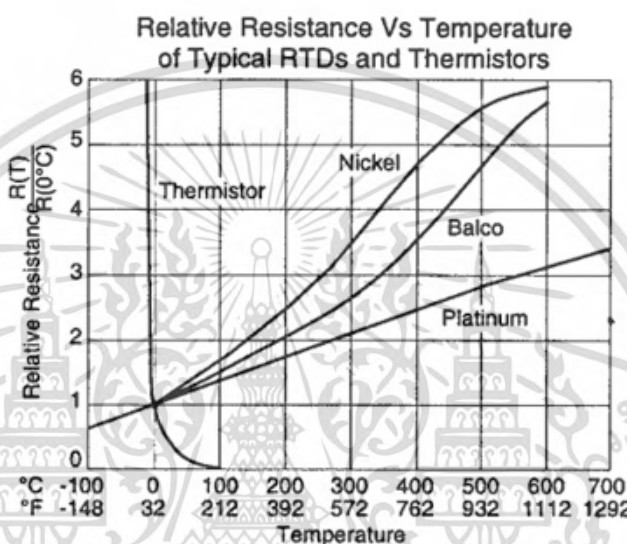
R_0 คือค่าความต้านทานของลวดโลหะที่อุณหภูมิอ้างอิง (โดยทั่วไปคือ 0 องศาเซลเซียส)

a คือสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ Temperature Coefficient of Resistance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b,c คือ Temperature Coefficient of Resistance ที่คำนวณมาจากค่าความต้านทาน ณ อุณหภูมิที่ทราบค่าจากการสอบเทียบ อย่างน้อย 2 จุด ของ RTD ตัวนั้น ๆ

ซึ่งค่า a จะเปลี่ยนไปตามชนิดของโลหะ โดยทั่วไปโลหะเกือบทุกชนิดจะมีคุณสมบัติคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานไฟฟ้าจะมากขึ้นตาม (Positive Temperature Coefficient of Resistance) ยกเว้น Thermistor ที่ความต้านทานไฟฟ้าจะลดลง (Negative Temperature Coefficient of Resistance) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ค่าความต้านทานสัมพันธ์ต่ออุณหภูมิของโลหะ

โดยทั่วไปโลหะแบบแพลทินัมจะนิยมใช้งานทางอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการมากเพราะมีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งชนิด PT100 นิยมใช้กันมากที่สุด

1. โครงสร้างของอาร์ทีดี

อาร์ทีดีทำด้วยลวดโลหะที่มีความยาวค่าหนึ่งซึ่งทำให้เกิดค่าความต้านทานที่ต้องการ ณ อุณหภูมิ 0 °C ลวดโลหะนี้จะพันอยู่บนแกนที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีคุณสมบัติทนต่อความร้อน แกนที่ใช้เป็นสารประเภทเซรามิกหรือแก้ว เช่น อลูมินาบริสุทธิ์, สารที่เจือปนอยู่ (Impurities) เช่น ซิลิกา จะทำให้เส้นลวดความต้านทานสกปรก (Contaminate) สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นกรณีพิเศษในขบวนการผลิตคือ ขณะใช้งานขดลวดนี้ต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความสั่นสะเทือนได้ ทั้งนี้เพราะเมื่อขดลวดได้รับความร้อนจะขยายตัว เมื่อเย็นลงจะหดตัว แกนที่ใช้พันจะต้องมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสัมพันธ์กับการขยายตัวของขดลวด การพันขดลวดจะทำขณะที่ขดลวดร้อนจนอ่อนตัว หลังจากนั้นต้องผ่านกรรมวิธีการอบร้อนคลายความเครียดที่มีอยู่ในขดลวด (Stress Relieve) ด้วยอุณหภูมิอย่างน้อย 500 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สภาพภายนอกของอาร์ทีดีจะเหมือนเทอร์โมคัปเปิล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความผิดพลาดอันเกิดจากกระแสเลี้ยงอาร์ทีดี (Self Heating)

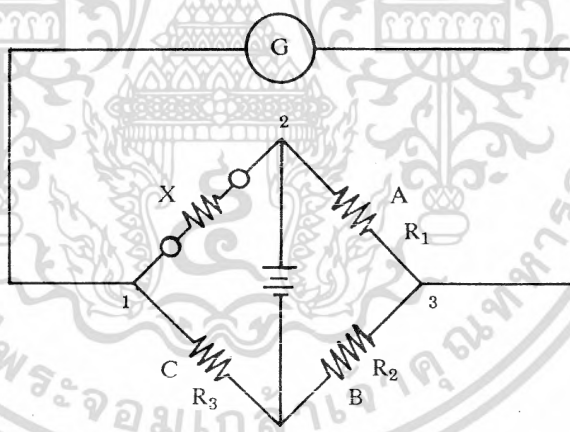
อาร์ทีดีจำเป็นต้องมีกระแสไฟฟ้าเลี้ยงตัวมันเองอยู่จำนวนหนึ่ง ถ้ามีค่ามากขึ้นเอาท์พุทโวลเตจก็จะสูงขึ้นและกระแสจำนวนนี้ก็สร้างความร้อนขึ้นในตัวอาร์ทีดีเองด้วย

$$\text{พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น} = I^2R \quad (2.3)$$

เมื่อ I คือกระแสเลี้ยงอาร์ทีดี และ R คือค่าความต้านทานของอาร์ทีดี ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจำกัดค่ากระแสไม่ให้สูงเกินไปโดยปกติ อาร์ทีดีแบบแพลทินัมจะเกิดค่าผิดพลาดขึ้น $1/2$ °C ต่อค่ากระแสเลี้ยง 1 มิลลิแอมป์ในบรรยากาศปกติ (ไม่มีการไหล) แต่ในสภาวะการใช้งานบางครั้งมีการจุ่มลงไปของเหลว ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะกระจายลงสู่ของเหลว ทำให้ค่าผิดพลาดนี้ต่ำลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการไหล, ความหนาแน่นของตัวกลาง อาจลดลง $1/5$ ของค่าความผิดพลาดในบรรยากาศปกติ

3. วงจรต่อใช้งานอาร์ทีดี

วงจรพื้นฐานของการต่อใช้งานอาร์ทีดี คือวงจร วิสโตนบริดจ์ โดย X คือ อาร์ทีดี A,B และ C คือ ตัวต้านทานที่มีความถูกต้องสูง (อุปกรณ์นี้จะอยู่ใน Temperature Control หรือ Temperature Indicator)



รูปที่ 2.5 วงจรวิสโตนบริดจ์

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ X ก็จะเปลี่ยน ความสมดุลของบริดจ์ก็จะถูกทำลายเกิดกระแสไหลไปที่ G กระแสนี้ก็จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่เปลี่ยนไป วงจรนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ อาร์ทีดีอยู่ใกล้กับวงจรบริดจ์มาก ๆ เพราะถ้าสายยาวค่าผิดพลาดจะเกิดจากความต้านทานของสายทันที ดังนั้นอาร์ทีดีแบบ 2 สาย จึงเหมาะกับการวัดที่ไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์ทีดี 3 สาย เป็นแบบที่นิยมใช้ที่สุดในอุตสาหกรรม โดยสายทั้ง 3 ที่อยู่ระหว่างจุดวัดกับวงจรจะต้องมีขนาด, ความยาวเท่ากันและอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเพื่อให้ค่าความต้านทาน r_1 , r_2 และ r_3 เปลี่ยนไปในทิศทางเดียวกันด้วยขนาดที่เท่ากัน นั่นคือ

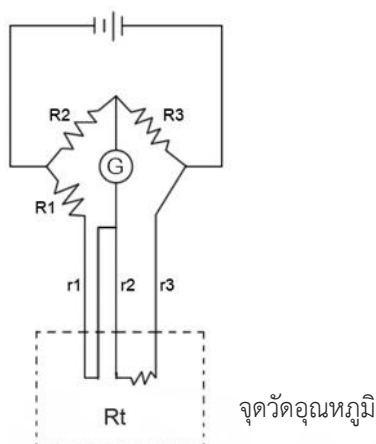
$$\frac{R_t + r_3}{R_3} = \frac{R_1 + r_1}{R_2} \quad (2.4)$$

เนื่องจาก r_1 เท่ากับ r_3 เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่วัดจึงขึ้นอยู่กับ R_t เพียงตัวเดียว ทำให้อาร์ทีดี 3 สาย มีความถูกต้องสูงกว่าอาร์ทีดีแบบ 2 สาย



รูปที่ 2.6 วงจรใช้งานอาร์ทีดีแบบ 3 สาย

อาร์ทีดี 4 สาย เป็นแบบที่มีความถูกต้องสูงที่สุดเนื่องจากเลื่อนจุดต่อของ Bridge ออกไปอยู่ภายนอกทั้ง 4 จุด สามารถชดเชยความต้านทานของสายตัวนำได้ทั้งหมด โดยสายทั้ง 4 ต้องมีขนาดความยาวเท่ากัน และอยู่ในอุณหภูมิเดียวกันตลอดเหมือนกับอาร์ทีดี 3 สาย



รูปที่ 2.7 วงจรใช้งานอาร์ทีดีแบบ 4 สาย

4. ชนิดของอาร์ทีดี

แพลทินัม เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำอาร์ทีดีมากที่สุดในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความสามารถในการทำซ้ำสูงแต่ความไวต่ำ อาร์ทีดีประเภทนี้จะเรียกว่า Pt100, Pt500, Pt1000 ซึ่งหมายถึงที่ 0 °C จะมีค่าความต้านทานอยู่ที่ 100, 500, 1000 โอห์ม สำหรับราคาแพงมากเมื่อเทียบกับนิเกิลซึ่งมีความสามารถในการทำซ้ำน้อยแต่มีความไวมากกว่าและราคาถูกกว่า

นิเกิลมีความเป็นเชิงเส้นต่ำและประกอบได้ง่ายกว่าจึงนิยมใช้งานในช่วงของอุณหภูมิต่ำ ๆ ทองแดงและเงินมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวนำที่ดีแต่ค่าความต้านทานที่ต่ำนี้อาจจะทำให้ใช้งานย่านอุณหภูมิไม่สูงมากนัก ทั้งสแตนมีค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์สูงมักใช้กับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูง เพราะหากใช้ที่อุณหภูมิปกติจะมีความเปราะและยากต่อการใช้งาน

2.5.5 การวัดและการบันทึกค่า

การบันทึกค่าอุณหภูมิของตัววัดอุณหภูมิทั้งหมดภายในตู้ทดสอบควรบันทึกในเวลาเดียวกัน โดยช่วงเวลาในการบันทึกค่าจะเริ่มหลังจากอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) และบันทึกซ้ำอย่างน้อย 1 ครั้งต่อนาที [3] ตัวอย่างของการวัดและบันทึกค่าโดยใช้ตัววัดอุณหภูมิ 9 จุดที่อุณหภูมิ 50 °C แสดงดังตารางที่ 2.1 [2]

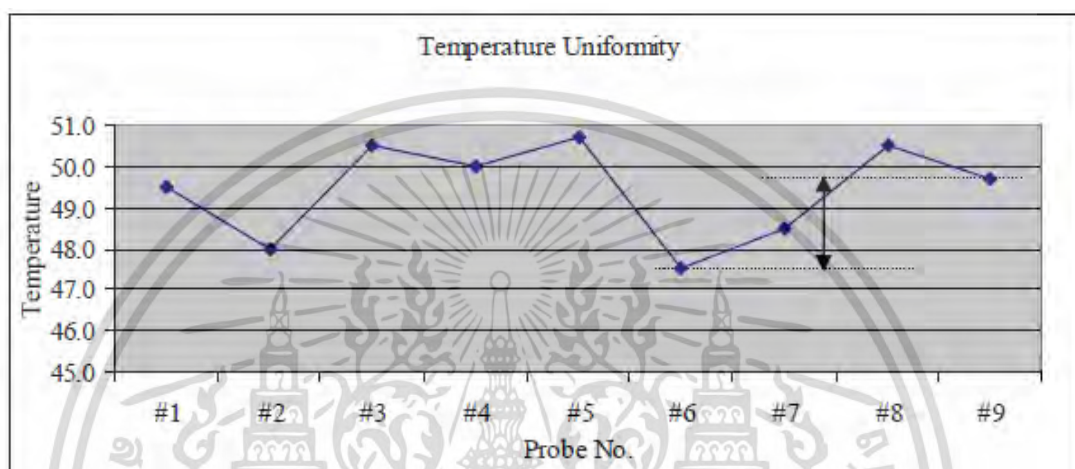
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ 50 °C

Record No.	Chamber Indicator (°C)	Standard Reading (°C) at Sensor Number								Ref
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	50.0	50.5	50.3	49.0	50.3	49.5	51.0	50.7	49.0	49.5
2	50.0	51.0	50.0	48.5	50.5	50.0	50.7	50.3	48.5	49.7
3	50.0	51.3	49.5	49.1	51.0	50.2	50.0	50.3	49.1	50.0
4	50.0	50.5	49.0	49.7	49.8	50.5	49.2	50.0	49.7	50.2
5	50.0	50.0	48.5	50.3	49.5	51.0	48.0	49.0	50.3	50.0
6	50.0	49.5	48.0	50.5	50.0	50.7	47.5	48.5	50.5	49.7
7	50.0	49.0	47.5	51.0	50.2	51.0	47.4	49.1	51.0	49.4
8	50.0	48.5	48.0	49.8	50.5	51.6	48.8	49.7	49.8	49.5
9	50.0	49.1	49.0	49.5	51.0	50.8	49.0	50.3	49.5	49.8
10	50.0	49.7	50.1	50.0	50.7	50.2	48.5	50.5	50.0	50.0
11	50.0	50.3	51.0	50.2	50.5	50.5	49.1	51.0	50.2	50.3
12	50.0	50.5	51.5	50.5	51.0	49.8	49.7	49.8	50.5	50.5
13	50.0	51.0	50.8	51.0	50.7	49.0	50.3	49.5	51.0	50.7
14	50.0	49.8	50.2	50.7	50.3	48.2	50.5	50.0	50.7	50.3
15	50.0	49.5	50.5	50.5	50.3	47.8	51.0	50.2	50.5	49.9
16	50.0	50.0	49.8	51.0	50.0	49.7	49.8	50.5	51.0	49.5
17	50.0	50.2	49.0	50.7	49.0	50.3	49.5	51.0	50.7	49.0
18	50.0	50.5	48.2	50.3	48.5	50.5	50.0	50.7	50.3	49.5
19	50.0	51.0	47.8	50.3	49.1	51.0	50.2	50.5	50.3	49.7
20	50.0	50.7	48.5	50.0	49.7	49.8	50.5	51.0	50.0	50.0
Mean	50.0	50.1	49.4	50.1	50.1	50.1	49.5	50.1	50.1	49.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิสามารถคำนวณได้จากผลต่างที่มากที่สุดที่เกิดจากการวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ เทียบกับตำแหน่งอ้างอิงหลังสภาวะคงที่ ได้แก่ Record Number 6 ที่จุดวัดหมายเลข 6 เทียบกับตำแหน่งอ้างอิงหมายเลข 9 แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{Chamber Uniformity} &= (49.7-47.5) \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

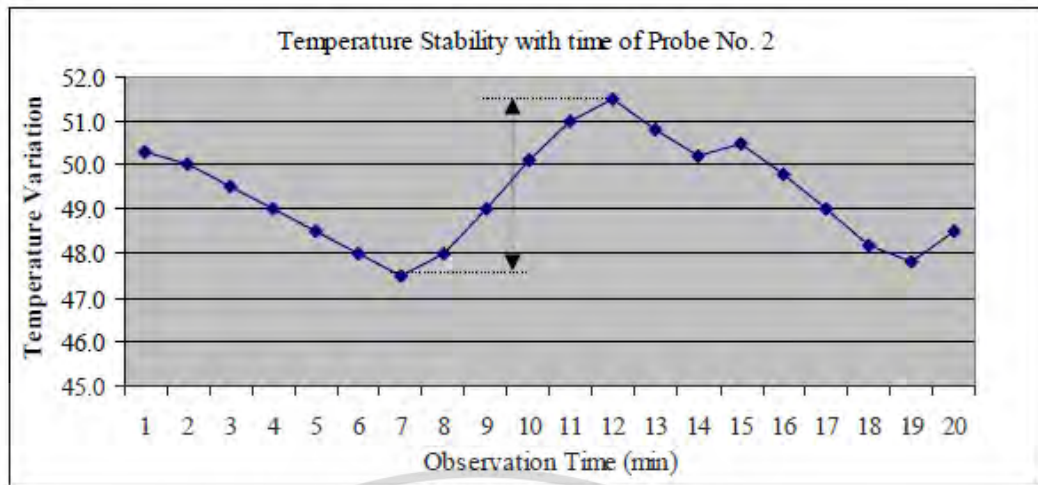


รูปที่ 2.8 กราฟ Temperature Uniformity

Temperature Stability สามารถคำนวณได้จากครึ่งหนึ่งของผลต่างที่มากที่สุดของการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งใด ๆ จากผลการวัดที่ไม่น้อยกว่า 30 นาที หลังสภาวะคงที่ ได้แก่จุดวัดหมายเลข 2 ของ Record Number 7 และ 12 แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{Chamber Stability} &= (51.5-47.5)/2 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= \pm 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

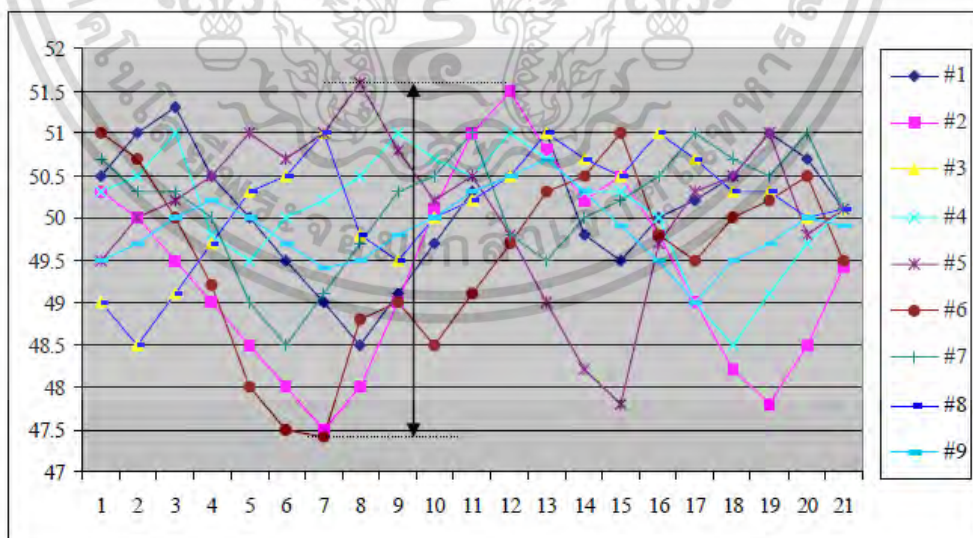
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟ Temperature Stability

Overall Variation สามารถคำนวณได้จากผลต่างของค่าอุณหภูมิสูงสุดและค่าอุณหภูมิต่ำสุด ตลอดเวลาที่ทำการวัด ได้แก่ จุดวัดหมายเลข 5 (Record Number 8) และจุดวัดหมายเลข 6 (Record Number 7) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Overall Variation} &= (51.6 - 47.4) \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= 4.2 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.10 กราฟ Overall Variation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.6 ตัวอย่างตู้ทดสอบอุณหภูมิและใบรายงานผลการสอบเทียบ

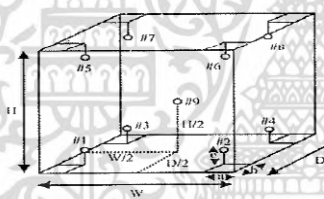
1. ตัวอย่างตู้ทดสอบอุณหภูมิ ยี่ห้อ Associated Environmental Systems รุ่น FD-527 ขนาดปริมาตร 27 cu.ft. Dimensions (H"x W"x D") Internal: 36"x36"x36" และ External: 81"x54"x74"



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างตู้ทดสอบอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ

E/M/C		INTECH METROLOGICAL CENTER CO.,LTD.			CERTIFICATE No. : MT14 - 1144																														
					PAGE : 2 OF 2																														
CERTIFICATE OF CALIBRATION :																																			
ORDER No :	RO 0164/14	RECEIVED DATE :	JAN 30, 2014	CALIBRATE DATE :	JAN 30, 2014																														
DESCRIPTION :	CHAMBER			MANUFACTURER :	ASSOCIATED ENVIRONMENTAL SYSTEMS																														
MODEL :	FD - 527	SERIAL No. :	9680	IDENTIFICATION No. :	N/A	MADE IN : U.S.A.																													
CALIBRATION METHOD : THE INSTRUMENT WAS CALIBRATED BY COMPARISON WITH LXI DATA ACQUISITION AND 20-CHANNEL MULTIPLEXER THE CALIBRATION WAS DONE IN ACCORDANCE WITH CP-TEM-21 (CALIBRATION METHOD) THE TEMPERATURE SCALE WAS BASED ON G-20-1/02-08 (E)																																			
REFERENCE STANDARD : <table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPTION</th> <th>MODEL</th> <th>SERIAL No.</th> <th>CERTIFICATE No.</th> <th>DUE DATE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>LXI DATA ACQUISITION SWITCH UNIT</td> <td>34972A</td> <td>MY49001901</td> <td>1419084</td> <td>JUL 29, 2014</td> </tr> </tbody> </table>							DESCRIPTION	MODEL	SERIAL No.	CERTIFICATE No.	DUE DATE	LXI DATA ACQUISITION SWITCH UNIT	34972A	MY49001901	1419084	JUL 29, 2014																			
DESCRIPTION	MODEL	SERIAL No.	CERTIFICATE No.	DUE DATE																															
LXI DATA ACQUISITION SWITCH UNIT	34972A	MY49001901	1419084	JUL 29, 2014																															
TRACEABILITY : - THE MEASUREMENT ARE TRACEABLE TO INTERNATIONAL SYSTEM OF UNIT (SI) - THE REFERENCE STANDARD OF THAILAND INSTITUTE OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL RESEARCH (TISTR)																																			
RANGE : -20,50,100,150 °C RESOLUTION : 1 °C																																			
FUNCTION : TEMPERATURE MEASUREMENT																																			
FRONT VIEW  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Location</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>#1</td><td>Lower Left Front</td></tr> <tr><td>#2</td><td>Lower Right Front</td></tr> <tr><td>#3</td><td>Lower Left Rear</td></tr> <tr><td>#4</td><td>Lower Right Rear</td></tr> <tr><td>#5</td><td>Upper Left Front</td></tr> <tr><td>#6</td><td>Upper Right Front</td></tr> <tr><td>#7</td><td>Upper Left Rear</td></tr> <tr><td>#8</td><td>Upper Right Rear</td></tr> <tr><td>#9</td><td>Geometric Center</td></tr> </tbody> </table>							Point	Location	#1	Lower Left Front	#2	Lower Right Front	#3	Lower Left Rear	#4	Lower Right Rear	#5	Upper Left Front	#6	Upper Right Front	#7	Upper Left Rear	#8	Upper Right Rear	#9	Geometric Center									
Point	Location																																		
#1	Lower Left Front																																		
#2	Lower Right Front																																		
#3	Lower Left Rear																																		
#4	Lower Right Rear																																		
#5	Upper Left Front																																		
#6	Upper Right Front																																		
#7	Upper Left Rear																																		
#8	Upper Right Rear																																		
#9	Geometric Center																																		
Cal. point (°C)	Temperature of UUC at each position (°C)									Uncertainty (+/-°C)																									
	*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	*8	*9																										
-20	-20.184	-20.300	-20.163	-20.414	-20.399	-20.485	-20.604	-20.579	-20.561	0.65																									
50	50.083	50.364	50.134	50.402	49.895	50.051	50.119	50.028	49.835	0.64																									
100	100.130	100.209	100.109	100.292	99.910	99.971	99.957	99.831	99.838	0.64																									
150	150.612	150.960	151.277	150.936	150.628	150.718	150.634	150.571	150.919	0.64																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Setting Temp (°C)</th> <th>Indicating Temp (°C)</th> <th>Measured Stability (°C)</th> <th>Measured Uniformity (°C)</th> <th>Overall Variation (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-20</td> <td>-20</td> <td>0.405</td> <td>0.55</td> <td>0.74</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>50</td> <td>0.178</td> <td>0.55</td> <td>0.84</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>100</td> <td>0.178</td> <td>0.55</td> <td>0.76</td> </tr> <tr> <td>150</td> <td>150</td> <td>0.178</td> <td>0.55</td> <td>1.00</td> </tr> </tbody> </table>											Setting Temp (°C)	Indicating Temp (°C)	Measured Stability (°C)	Measured Uniformity (°C)	Overall Variation (°C)	-20	-20	0.405	0.55	0.74	50	50	0.178	0.55	0.84	100	100	0.178	0.55	0.76	150	150	0.178	0.55	1.00
Setting Temp (°C)	Indicating Temp (°C)	Measured Stability (°C)	Measured Uniformity (°C)	Overall Variation (°C)																															
-20	-20	0.405	0.55	0.74																															
50	50	0.178	0.55	0.84																															
100	100	0.178	0.55	0.76																															
150	150	0.178	0.55	1.00																															
NOTE UUC* = UNIT UNDER CALIBRATION																																			
# END OF CERTIFICATE #																																			

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด [9]

เมื่อมีการรายงานผลการวัดของปริมาณใด ๆ ก็ตาม มีความจำเป็นที่จะต้องรวมสิ่งบ่งชี้เชิงปริมาณที่บอกถึงคุณภาพของผลการวัดนั้นรายงานไปด้วย เพื่อให้สามารถประเมินความเชื่อถือได้ของผลการวัดนั้น ถ้าปราศจากสิ่งบ่งชี้ดังกล่าวนั้นผลการวัดก็จะไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีที่เข้าใจง่ายและใช้ได้โดยทั่วไปเพื่อการบอกลักษณะคุณภาพของผลการวัด

ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) คือ สิ่งื่บบอกได้ถึงคุณภาพของผลการวัดว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงใด ดังนั้นการรายงานความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องรายงานพร้อมกับผลของการวัดเสมอ เพื่อที่จะให้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับข้อกำหนดจำเพาะหรือมาตรฐาน หรือเกณฑ์ยอมรับสำหรับสิ่งที่ถูกวัด (Measurand) ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) : 1993 ได้แบ่งกลุ่มของความไม่แน่นอนออกเป็น 2 กลุ่มตามพื้นฐานของวิธีการประเมิน คือ Type A และ Type B การแบ่งกลุ่มดังกล่าวใช้กับความไม่แน่นอนและไม่แทนคำว่าสุ่ม หรือ ระบบ

วัตถุประสงค์ของการแยกประเภทเป็น Type A และ Type B ก็เพื่อบ่งบอกวิธีการประเมินความไม่แน่นอนที่แตกต่างกัน 2 วิธี และเพื่อความสะดวกในการอธิบายเท่านั้น การแยกประเภทดังกล่าวไม่ได้ตั้งใจที่จะบ่งบอกถึงความแตกต่างใด ๆ ในธรรมชาติของความไม่แน่นอนที่เป็นผลจากการประเมินทั้ง 2 วิธี การประเมินทั้ง 2 วิธีต่างก็มีพื้นฐานมาจากการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution) และส่วนของความไม่แน่นอนที่เป็นผลมาจากการประเมินแต่ละแบบต่างก็เป็นค่าของความแปรปรวน (Variance) หรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ความแปรปรวนโดยประมาณ (Estimated Variance) u^2 ที่บอกลักษณะของส่วนของความไม่แน่นอนที่ได้จากการประเมิน Type A คำนวณมาจากอนุกรมของการวัดและก็คือความแปรปรวนโดยประมาณ s^2 ที่คุ้นเคยกันดีอยู่แล้ว สำหรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณ u ซึ่งเป็นรากที่สองที่เป็นบวกของ u^2 ดังนั้น $u = s$ และเพื่อความสะดวกบางครั้งเรียกว่า ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A (Type A Standard Uncertainty) สำหรับส่วนของความไม่แน่นอนที่ได้จากการประเมิน Type B ค่าความแปรปรวนโดยประมาณ u^2 ประเมินมาจากความรู้ที่มีอยู่แล้วและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณ u บางครั้งเรียกว่า ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B (Type B Standard Uncertainty)

ดังนั้น ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A จึงได้มาจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการแจกแจงความถี่ (Frequency Distribution) ของค่าที่ได้จากการวัด ในขณะที่ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B จะได้มาจากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นที่มีพื้นฐานมาจากองค์ความรู้ของความเชื่อว่าเหตุการณ์จะเกิดขึ้นในลักษณะนั้น ๆ

2.6.1 สมการของการวัด

สมการของการวัดนั้นโดยทั่วไปแล้วปริมาณที่ถูกวัด Y จะไม่ถูกวัดโดยตรงแต่จะตัดสินจากปริมาณอื่นๆ คือ X_1, X_2, \dots, X_n โดยผ่านความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน f

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.5)$$

ชุดของปริมาณอินพุต X_1, X_2, \dots, X_n อาจแบ่งเป็น 2 จำพวกหลัก ๆ ได้ดังนี้

1. ปริมาณซึ่งค่าและความไม่แน่นอนสามารถตัดสินได้จากการวัดในปัจจุบัน

ค่าและความไม่แน่นอนอาจจะได้จากการวัดเพียงครั้งเดียว การวัดซ้ำ ๆ กัน หรือการตัดสินโดยใช้ประสบการณ์และอาจจะเกี่ยวกับการหาค่าแก่จากการอ่านของเครื่องมือวัด ค่าแก่ของปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการวัด เช่น อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศและความชื้น เป็นต้น

2. ปริมาณซึ่งค่าและความไม่แน่นอนที่ถูกนำมาสู่การวัดจากภายนอก

ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบมาตรฐานการวัด วัสดุอ้างอิงและข้อมูลอ้างอิงที่ได้จากหนังสือคู่มือ เป็นต้น

ค่าประมาณของปริมาณที่ถูกวัด Y ให้สัญลักษณ์ว่า y ได้มาจากการสมการที่ (2.5) โดยการใช้ค่าประมาณอินพุต (Input Estimated) x_1, x_2, \dots, x_n จำนวน n ค่าของ X_1, X_2, \dots, X_n ดังนั้นค่าประมาณเอาต์พุต (Output Estimated) y ซึ่งเป็นผลการวัดของปริมาณที่ถูกวัดจึงเป็นไปตามสมการ

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.6)$$

ความไม่แน่นอนที่ต้องรายงานพร้อมกับปริมาณ y ได้มาจากการรวมความไม่แน่นอนของปริมาณอินพุตทั้งหมดที่ก่อให้เกิดปริมาณเอาต์พุต ด้วยวิธี Root Sum of Square หรือ Law of Propagation of Uncertainty

2.6.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A

ปกติทั่วไปการหาความไม่แน่นอน Type A จะเป็นการหาค่าความสามารถที่จะวัดซ้ำได้ (Repeatability) หรือการวัดอย่างอิสระ (Randomness) ของกระบวนการ n คือจำนวนของการวัดซ้ำของปริมาณ Q ดังนั้นค่าเฉลี่ย \bar{q} หาได้จากสูตร

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j = \frac{q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n}{n} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิสัยของค่าวัดจะแสดงถึงข้อดีหรือความสามารถวัดซ้ำได้ (Repeatability) ของกรรมวิธีการวัดโดยจะขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ วิธีการวัดและผู้ที่ทำการวัดสำหรับบางกรณี อย่างไรก็ตามจากการวัดตัวอย่างขึ้นหนึ่ง ค่าโดยประมาณของ Standard Deviation σ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$s(q_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (2.8)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยประมาณจากการวัดคือ

$$u_i = \frac{s(q_j)}{\sqrt{n}} \quad (2.9)$$

สำหรับค่าประมาณของปริมาณอินพุตที่ตัดสินใจได้จากการวัด n ครั้ง ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A, $u(x_i)$ ที่มีองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom, ν) มีค่าเป็น

$$u(x_i) = s(\bar{q}) \quad (2.10)$$

และ $\nu = n - 1$ เมื่อคำนวณจากการวัดที่เป็นอิสระ n ครั้ง ซึ่งจะต้องรายงานค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom, ν) ทุกครั้งเมื่อประเมินความไม่แน่นอน Type A

2.6.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B

ปกติทั่วไป Type B จะใช้สำหรับหาค่า Systematic Components ของค่าความไม่แน่นอนซึ่งเป็น Component ที่มีค่าคงที่และจะต้องมีการแก้ไขก่อนรายงานผลสุดท้ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดที่ต้องการมาตรฐานสูง Systematic Components มักมาจากอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้วัดและการหาค่าจะต้องมีทั้งความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับการวัด ในการประเมินองค์ประกอบของความไม่แน่นอนจำเป็นที่จะต้องพิจารณาอย่างน้อยดังต่อไปนี้ ใบรายงานการสอบเทียบ, ความละเอียดของเครื่องมือ, ความสม่ำเสมอ ฯลฯ

1. ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ประเมินได้จากค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน (จากใบรายงานผลการสอบเทียบ) โดยมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Distribution), ($k = 2$)

$$ub_1 = \frac{\text{Uncertainty of Standard}}{2} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ประเมินได้จากความละเอียด (Resolution) ของเครื่องมือวัดที่เป็นแบบตัวเลข (Digital) โดยมีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Distribution)

$$u_{b2} = \frac{\text{Resolution}}{2\sqrt{3}} \quad (2.12)$$

3. ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานที่ประเมินได้จากความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity)

$$u_{b3} = \frac{|T_{\text{uniformity}}|}{\sqrt{3}} \quad (2.13)$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม, u_c เป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของผลการวัดเมื่อผลที่ได้จากค่าของผลรวมปริมาณอื่น ๆ เท่ากับผลบวกรากที่สอง

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ u_i คือแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนมาตรฐาน

$$U = k \cdot u_c \quad (2.15)$$

รายงานความไม่แน่นอนของการขยายตัว U จะขึ้นอยู่กับความไม่แน่นอนมาตรฐานคูณด้วยปัจจัยครอบคลุม $K = 2$ ให้ความน่าจะเป็นประมาณ 95%

บทที่ 3

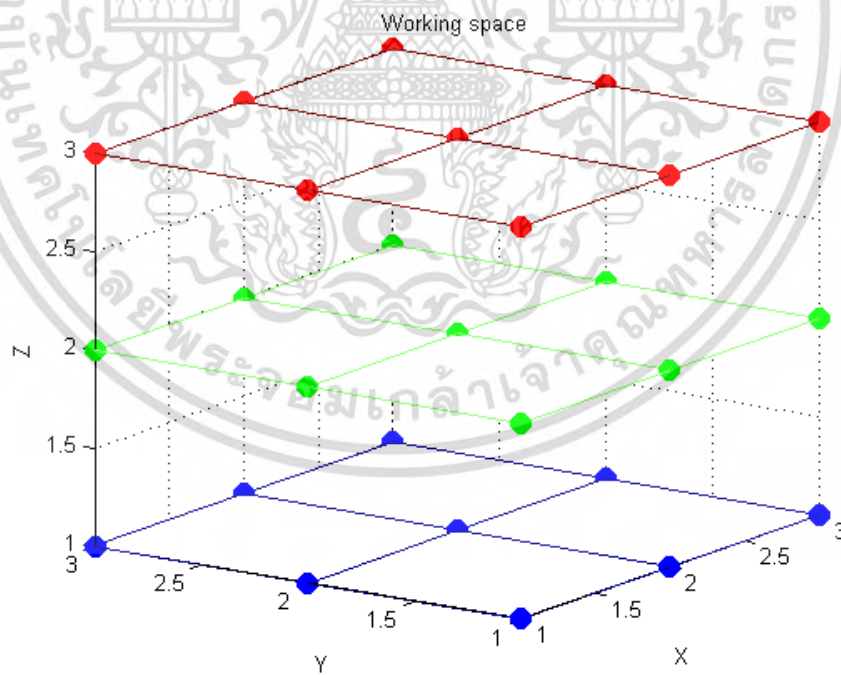
การประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบการทดลองสำหรับการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ โดยการจำลองอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ การประเมินค่า Standard Uncertainty และแบบจำลองที่ได้จากการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

3.2 ขั้นตอนออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองทำโดย จำลองอุณหภูมิภายในปริมาตรใช้งานของตู้ทดสอบอุณหภูมิ ซึ่งปริมาตรใช้งานจะถูกแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นจะจำลองอุณหภูมิ 9 จุด ได้แก่ จุดศูนย์กลางของตู้ 1 จุด, ขอบของตู้ทดสอบ 4 จุดและมุมของตู้อีก 4 จุด โดยเส้นสีน้ำเงิน, เขียวและแดงจะแทนพื้นผิวภายในแต่ละชั้นของตู้ทดสอบในขณะที่จุดสีแต่ละสีจะแสดงอุณหภูมิที่จำลองขึ้นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การจำลองอุณหภูมิภายในปริมาตรใช้งาน (Working Space)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุณหภูมิที่จำลองขึ้นเขียนแทนได้ดังนี้ T_{sim}

$$T_{sim}(X_i, Y_i, Z_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(X_i, Y_i, Z_i) \quad \forall i \quad (3.1)$$

เพื่อให้แน่ใจความถูกต้องของผลการทดลองหลังจากจำลองอุณหภูมิ จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ทำการวิเคราะห์ทางสถิติ สมมติฐาน Two-Way ANOVA ว่า อุณหภูมิมีผลกระทบต่อระยะทางแกน X และแกน Y หรือไม่ (ทดสอบสมมติฐาน โดยใช้ $\alpha = 0.05$) [10-11]

3.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (Standard Uncertainty)

เมื่อพิจารณาผู้ทดสอบอุณหภูมิเป็นคู่ที่ได้รับอุณหภูมิคงที่ ความไม่แน่นอนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงเวลาและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงระยะ ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแสดงได้ 2 วิธีคือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตอบพื้นที่จุดศูนย์กลาง (Variation) ของปริมาตรใช้งาน (Working Space) และการแปรผันเชิงระยะทาง (Gradient) ของอุณหภูมิในปริมาตรใช้งาน (Working Space) ทั้งหมด ดังรูปที่ 3.2 [3],[12-13]



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างความแตกต่างของอุณหภูมิ (อ้างอิง IEC 60068-3-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถประเมินความสม่ำเสมอของอุณหภูมิได้สมการที่ 3.2 และ 3.3

$$T_{var(X_i, Y_i, Z_i)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{j(X_i, Y_i, Z_i)} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{j(X_c, Y_c, Z_c)} \quad \forall i, c=2 \quad (3.2)$$

$$T_{gra} = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{j(X_i, Y_i, Z_i)} \right]_{max} - \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{j(X_i, Y_i, Z_i)} \right]_{min} \quad \forall i \quad (3.3)$$

เมื่อ i คือ จุดวัด (จุดกลางของห้องทดสอบ, จุดขอบ 4 จุดและจุดมุม 4จุด ของจุดใช้งาน) และ j คือ จุดของข้อมูล

โดยทั่วไปคุณสมบัติหลักที่ต้องถูกประเมินของตู้ทดสอบอุณหภูมิ นอกจากความถูกต้องของตัวอ่านค่าแล้วคุณสมบัติความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) เป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อผลการวัดมากที่สุด ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิจะสะท้อนให้เห็นถึงคุณภาพของการออกแบบตู้เกี่ยวกับการติดตั้งเครื่องสร้างอุณหภูมิและรูปแบบการไหลเวียนของอากาศ

การประเมินความสม่ำเสมอของอุณหภูมิมิมี 2 วิธี ตามวิธี Temperature Gradient (T_{gra}) และวิธี Temperature Variation (T_{var}) จากสมการที่ (3.2) กำหนดนิยามของ Temperature Variation ในปริมาตรใช้งาน (Working Space) คือ “ผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่ตำแหน่งใด ๆ ในปริมาตรใช้งาน เทียบกับจุดศูนย์กลางของปริมาตรใช้งานหลังจากอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่” ซึ่งจุดศูนย์กลางของตู้ทดสอบอุณหภูมิ (จุดศูนย์กลางของปริมาตรใช้งาน) จะถูกพิจารณาให้เป็นจุดอ้างอิง การประเมินความไม่แน่นอนของความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ พบว่ามีพื้นฐานมาจาก Temperature Variation ในปริมาตรใช้งาน [3]

สำหรับสมการที่ (3.3) กำหนดนิยามของ Temperature Gradient คือ “ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่มากที่สุดระหว่าง 2 จุดในปริมาตรใช้งานหลังจากอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่ ”

ดังนั้น จากสมการข้างต้นเมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่เราสามารถคำนวณหาค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิได้จากสมการที่ (3.2)

3.4 Model ของการประเมินค่า Temperature Uniformity

การวิเคราะห์ความถดถอยพหุ (Multiple Regression Analysis) เป็นวิธีการทางสถิติสำหรับหาตัวแบบที่เหมาะสมและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยเป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง (Y) จากตัวแปรอื่น ๆ (X) ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องพยากรณ์ โดยจะต้องมีการกำหนดหรือทราบค่าตัวแปรอื่น ๆ ก่อนล่วงหน้า สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ในงานวิจัยนี้ มีสมมติฐานว่า ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับระยะทางแกน X และแกน Y โดยสามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

1. ระยะทางแกน X มีสมมติฐานหลัก $H_0 : T_1 = T_2 = \dots = 0$, สมมติฐานรอง $H_1: T_i \neq 0$

2. ระยะทางแกน Y มีสมมติฐานหลัก $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = 0$, สมมติฐานรอง $H_1: \beta_i \neq 0$

จากสมการที่ 3.2 แบบจำลองความถดถอยพหุสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_{var(x_i, y_i, z_i)} = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i \quad (3.4)$$

เมื่อ T_{var} แสดงถึงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ, x_i แทนระยะทางบนแกน X, y_i แสดงระยะทางบนแกน Y อ้างอิงตามรูปที่ 3.1 แบบจำลองถดถอยพหุ 2 Regressors จะใช้เงื่อนไขเชิงเส้นเนื่องจากสมการที่ (3.4) เป็นแบบเส้นตรงฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า a_0 , a_1 และ a_2 [10]

บทที่ 4

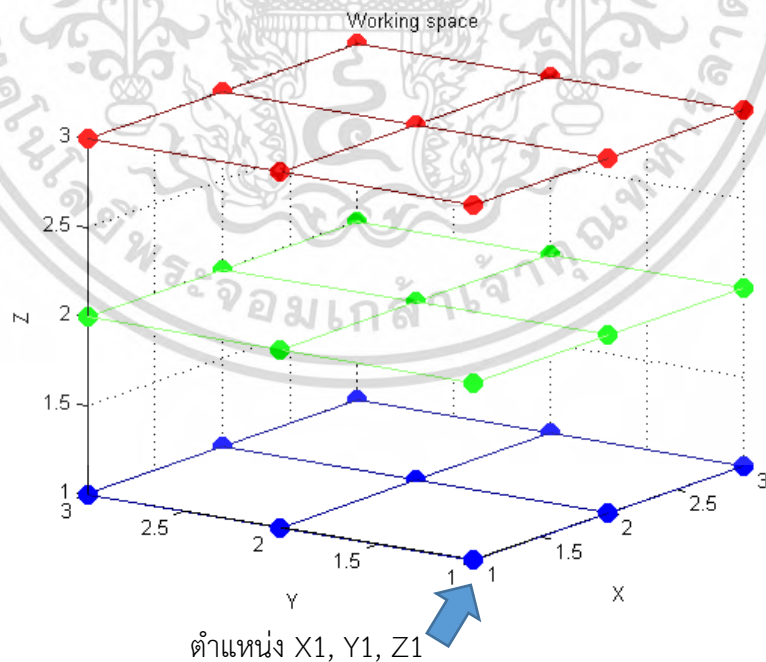
ผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้อธิบายถึงผลการจำลองอุณหภูมิภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ ผลความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ โดยทดลองหาค่า Regression Parameters ที่อุณหภูมิ 100 °C, 90 °C และ 50 °C ผลการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิและค่าความไม่แน่นอน

4.2 ผลการจำลองอุณหภูมิในตู้ทดสอบ

ผลการจำลองภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิโดยโปรแกรม Microsoft-Excel ตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ผลการจำลองได้ค่าอุณหภูมิทั้งหมด 27 ค่า โดยทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้งต่อ 1 ค่า ซึ่งแบ่งเป็นชั้นละ 9 ค่า ตัวอย่างตำแหน่งที่ X1, Y1, Z1 แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเส้นสีน้ำเงินแทนด้วยระนาบ Z1, เส้นสีเขียวแทนด้วยระนาบ Z2 และเส้นสีแดงแทนด้วยระนาบ Z3 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ 100 °C, 90 °C และ 50 °C แสดงดังตารางที่ 4.1-4.3



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งอุณหภูมิจำลอง X1, Y1, Z1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 100 °C

X	Y	Z	No. (degree C)										Mean
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	1	100.19	100.56	100.12	100.59	99.26	100.26	99.77	100.19	99.67	99.79	100.04
2	1	1	99.87	99.37	100.54	99.86	99.54	100.42	99.70	100.56	100.23	99.42	99.95
3	1	1	99.99	99.79	100.68	100.17	99.85	100.20	100.48	100.57	100.02	100.13	100.19
1	2	1	99.25	99.79	99.94	99.68	100.05	99.33	100.25	100.69	100.35	99.68	99.90
2	2	1	99.78	99.74	99.47	100.61	100.26	100.07	99.27	99.67	100.76	100.17	99.98
3	2	1	99.92	100.18	99.71	99.14	99.84	100.16	100.54	100.19	99.82	99.65	99.91
1	3	1	99.59	99.62	99.52	100.01	99.57	100.29	100.01	100.70	99.88	99.12	99.83
2	3	1	100.09	100.14	99.59	99.74	100.73	100.25	100.27	100.52	99.71	100.55	100.16
3	3	1	99.91	99.99	100.88	100.06	100.61	100.55	100.09	100.01	99.65	99.42	100.12
1	1	2	100.41	99.34	100.18	100.59	99.92	100.08	100.83	99.86	99.97	99.81	100.10
2	1	2	100.14	99.49	100.77	100.25	100.41	100.86	100.65	100.42	99.46	99.47	100.19
3	1	2	100.07	100.02	100.10	100.60	100.54	99.94	100.69	99.44	99.35	100.05	100.08
1	2	2	100.54	99.71	100.60	99.92	100.39	100.20	100.03	99.71	99.68	100.03	100.08
2	2	2	100.72	99.97	100.12	99.69	100.29	100.58	99.81	99.93	99.33	99.09	99.95
3	2	2	100.43	100.27	99.47	99.71	99.64	99.47	100.41	100.47	99.19	99.64	99.87
1	3	2	100.33	100.90	100.29	100.25	100.55	100.70	100.47	100.40	99.66	99.54	100.31
2	3	2	99.91	100.16	99.68	100.79	99.51	99.82	100.50	100.18	100.34	99.83	100.07
3	3	2	100.06	100.02	100.39	100.36	100.62	99.32	100.34	100.19	100.11	99.89	100.13
1	1	3	100.04	99.86	99.92	99.63	99.29	100.06	99.64	99.38	99.67	100.45	99.79
2	1	3	100.32	100.10	99.66	100.78	99.81	100.00	99.52	100.69	100.28	100.00	100.12
3	1	3	100.11	100.15	99.38	99.33	100.25	100.22	100.17	100.43	99.42	99.86	99.93
1	2	3	100.19	100.15	99.98	100.06	100.39	99.65	100.04	100.64	100.25	100.34	100.17
2	2	3	100.02	99.41	99.50	100.51	100.45	100.61	100.73	100.29	99.70	100.45	100.17
3	2	3	99.73	100.28	100.02	100.03	99.93	100.71	100.31	99.89	100.46	99.84	100.12
1	3	3	99.94	99.50	99.92	100.21	100.37	99.69	99.17	99.24	100.00	100.21	99.83
2	3	3	99.85	100.18	99.45	99.96	100.28	100.09	99.99	99.72	100.22	100.33	100.01
3	3	3	99.97	100.25	99.90	99.74	100.08	99.80	100.78	100.20	99.75	100.03	100.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 90 °C

X	Y	Z	No. (degree C)										Mean
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	1	88.31	88.64	88.59	89.12	89.55	88.76	89.46	88.76	89.76	89.18	89.01
2	1	1	88.89	88.95	88.27	89.31	88.37	88.47	88.91	89.47	89.28	88.96	88.89
3	1	1	89.71	88.80	89.46	88.87	89.17	88.34	88.88	88.83	88.51	88.42	88.90
1	2	1	88.40	88.88	89.76	88.51	88.93	89.24	88.17	88.98	89.14	89.19	88.92
2	2	1	88.44	88.53	88.86	89.57	88.97	89.19	88.37	89.40	88.64	88.12	88.81
3	2	1	88.85	88.75	89.04	88.53	88.88	89.63	89.16	88.66	88.60	88.63	88.87
1	3	1	89.03	89.31	88.61	88.92	89.45	88.37	88.96	88.75	89.43	89.78	89.06
2	3	1	89.05	89.02	89.18	88.53	88.97	89.43	88.92	88.60	89.03	88.57	88.93
3	3	1	88.82	88.74	89.48	89.62	89.75	89.12	88.98	88.98	88.73	88.30	89.05
1	1	2	88.13	89.26	88.80	88.96	88.45	89.55	88.89	89.44	88.01	88.78	88.83
2	1	2	89.62	89.84	88.95	88.90	89.28	89.60	89.25	89.00	89.64	89.32	89.34
3	1	2	89.05	88.54	88.24	89.42	89.25	88.65	88.18	89.34	89.44	89.19	88.93
1	2	2	88.83	88.85	88.90	89.71	88.87	88.64	88.33	88.52	89.81	88.33	88.88
2	2	2	89.54	88.38	89.49	89.43	88.84	89.17	89.54	88.82	89.37	89.25	89.18
3	2	2	88.68	89.19	88.22	88.90	88.36	88.66	88.11	88.58	89.10	88.99	88.68
1	3	2	88.55	89.62	88.62	89.16	89.86	88.53	88.80	88.70	88.15	89.73	88.97
2	3	2	89.47	88.99	89.72	88.87	89.07	89.35	89.40	88.95	88.43	88.43	89.07
3	3	2	89.45	89.45	88.89	89.38	88.99	89.51	88.19	89.26	88.50	89.39	89.10
1	1	3	89.08	88.37	88.64	89.10	89.19	89.56	88.86	89.45	89.13	88.48	88.98
2	1	3	89.39	89.05	88.39	88.96	89.15	88.34	89.32	89.19	89.65	88.28	88.97
3	1	3	88.76	89.62	88.92	89.36	88.66	89.46	89.30	89.13	89.36	89.16	89.17
1	2	3	89.81	89.49	88.28	88.87	88.94	88.80	89.09	88.83	88.86	88.49	88.95
2	2	3	89.05	89.11	89.15	88.73	88.80	88.87	89.55	89.10	88.53	88.83	88.97
3	2	3	89.02	89.14	88.69	89.24	89.10	88.63	88.98	89.07	89.25	89.33	89.05
1	3	3	88.99	89.48	89.02	88.81	89.36	88.91	88.67	88.35	88.41	88.84	88.88
2	3	3	89.46	88.87	88.51	89.21	88.79	88.54	88.23	88.95	89.04	88.94	88.86
3	3	3	89.26	88.93	88.41	89.67	89.44	88.91	89.01	89.32	89.88	88.47	89.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 50 °C

X	Y	Z	No. (degree C)										Mean
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	1	48.83	49.20	48.61	48.40	49.30	48.77	48.79	48.64	48.83	49.31	48.87
2	1	1	48.71	49.51	48.47	48.79	48.98	49.78	49.11	49.04	49.55	48.72	49.06
3	1	1	49.13	48.92	48.80	49.70	49.20	49.34	49.57	48.62	48.66	48.84	49.08
1	2	1	48.77	49.12	48.73	49.58	48.91	49.68	48.75	48.78	49.05	49.66	49.10
2	2	1	48.87	49.14	49.39	49.42	48.99	48.70	49.19	49.20	49.03	49.20	49.11
3	2	1	48.85	48.94	48.23	49.35	48.49	49.10	49.09	49.60	49.21	48.72	48.96
1	3	1	49.63	49.39	49.38	49.36	49.28	49.14	48.52	49.21	48.63	48.73	49.13
2	3	1	48.12	49.50	48.74	49.52	49.21	48.44	49.28	48.81	48.76	49.55	48.99
3	3	1	48.96	48.56	48.86	49.18	49.60	49.64	48.79	49.49	49.07	49.32	49.15
1	1	2	48.82	48.80	49.16	48.69	48.40	49.00	49.92	49.41	49.00	48.65	48.99
2	1	2	49.14	48.73	48.79	48.30	48.80	48.87	48.84	48.92	48.75	49.31	48.84
3	1	2	48.79	48.98	48.60	49.73	48.63	49.28	48.90	48.40	49.80	48.63	48.97
1	2	2	48.87	49.25	49.38	48.52	48.94	48.53	48.98	49.35	49.22	48.91	48.99
2	2	2	49.17	48.30	48.67	49.29	49.50	48.40	48.66	48.22	49.05	49.70	48.90
3	2	2	49.17	49.08	49.17	48.60	48.42	48.32	49.04	49.08	48.49	48.69	48.81
1	3	2	49.00	49.38	48.67	48.80	48.99	49.32	49.01	48.38	48.92	49.54	49.00
2	3	2	48.69	49.73	48.78	48.85	48.40	49.11	49.77	49.04	48.58	49.88	49.08
3	3	2	48.55	48.18	49.20	49.57	49.70	48.69	49.52	48.54	49.24	48.61	48.98
1	1	3	48.94	49.54	48.43	49.44	49.24	49.51	48.79	48.58	49.27	49.24	49.10
2	1	3	48.82	48.91	48.63	49.41	49.53	49.15	48.93	49.27	49.28	49.00	49.09
3	1	3	48.67	48.44	49.90	48.79	49.16	48.66	48.83	48.47	48.54	49.64	48.91
1	2	3	48.62	48.73	48.60	49.36	49.37	48.51	48.95	48.92	48.65	48.89	48.86
2	2	3	49.11	49.22	49.20	48.66	48.83	48.48	49.47	49.19	49.54	48.78	49.05
3	2	3	49.75	49.25	48.78	48.84	48.42	49.61	49.81	48.44	49.95	49.44	49.23
1	3	3	48.95	49.42	49.26	49.19	48.09	48.69	49.21	49.63	48.16	48.94	48.95
2	3	3	48.50	48.55	48.34	49.74	48.26	48.96	48.94	49.03	48.84	49.15	48.83
3	3	3	48.76	49.33	48.71	49.02	48.92	48.87	49.80	48.22	48.85	49.48	49.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 100 °C แสดงผลตามชั้นที่ถูกกำหนด ชั้น 3 ชั้นตามแนวแกน X, Y, Z ในแต่ละชั้นจะให้ผลการจำลองทั้งหมด 9 ค่า แต่ละค่ามาจากผลเฉลี่ยทั้งหมด 10 ค่า โดยสามารถแสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละจุดได้ดังตารางที่ 4.4 ตามแนวแกน X, Y, Z ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่ตำแหน่ง X1Y1Z1 จะมีค่าเท่ากับ 100.04 °C ทั้งนี้การจำลองอุณหภูมิ จะทำให้เข้าใจง่ายซึ่งผลที่ได้อาจจะแตกต่างจากข้อมูลจริง

ตารางที่ 4.4 ค่าอุณหภูมิจำลองเฉลี่ยในตู้ทดสอบ 100 °C (หน่วย: °C)

อุณหภูมิจำลองที่ค่า 100 ± 1 °C				
แนวแกน Z	แนวแกน Y	แนวแกน X		
		1	2	3
1	1	100.04	99.95	100.19
	2	99.90	99.98	99.91
	3	99.83	100.16	100.12
2	1	100.10	100.19	100.08
	2	100.08	99.95	99.87
	3	100.31	100.07	100.13
3	1	99.79	100.12	99.93
	2	100.17	100.17	100.12
	3	99.83	100.01	100.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าอุณหภูมิจำลองในตู้ทดสอบอุณหภูมิที่ 90 °C และ 50 °C สามารถแสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยแต่ละจุดได้ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิจำลองเฉลี่ยในตู้ทดสอบ 90 °C (หน่วย: °C)

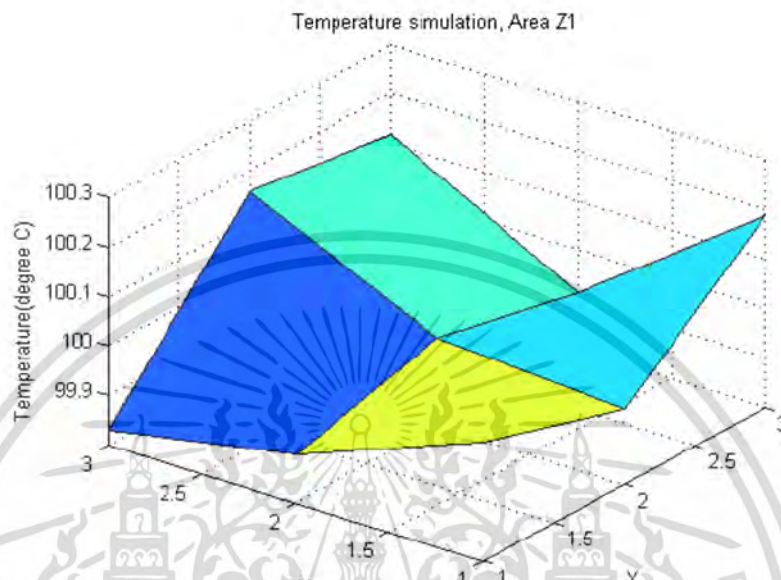
อุณหภูมิจำลองที่ค่า 90 ± 1 °C				
แนวแกน Z	แนวแกน Y	แนวแกน X		
		1	2	3
1	1	89.01	88.89	88.90
	2	88.92	88.81	88.87
	3	89.06	88.93	89.05
2	1	88.83	89.34	88.93
	2	88.88	89.18	88.68
	3	88.97	89.07	89.10
3	1	88.98	88.97	89.17
	2	88.95	88.97	89.05
	3	88.88	88.86	89.13

ตารางที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิจำลองเฉลี่ยในตู้ทดสอบ 50 °C (หน่วย: °C)

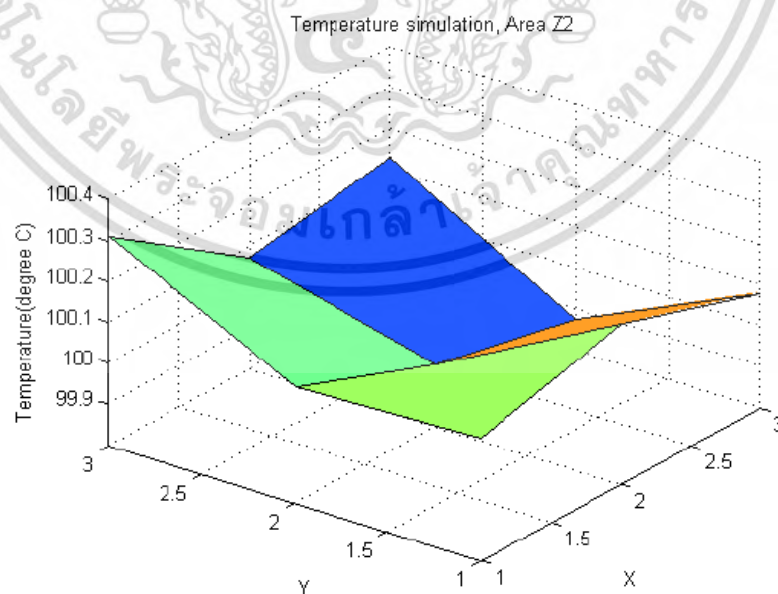
อุณหภูมิจำลองที่ค่า 50 ± 1 °C				
แนวแกน Z	แนวแกน Y	แนวแกน X		
		1	2	3
1	1	48.87	49.06	49.08
	2	49.10	49.11	48.96
	3	49.13	48.99	49.15
2	1	48.99	48.84	48.97
	2	48.99	48.90	48.81
	3	49.00	49.08	48.98
3	1	49.10	49.09	48.91
	2	48.86	49.05	49.23
	3	48.95	48.83	49.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมาแสดงผลตามระนาบ Z1, Z2, Z3 ที่อุณหภูมิ 100 °C สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2- 4.4 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง

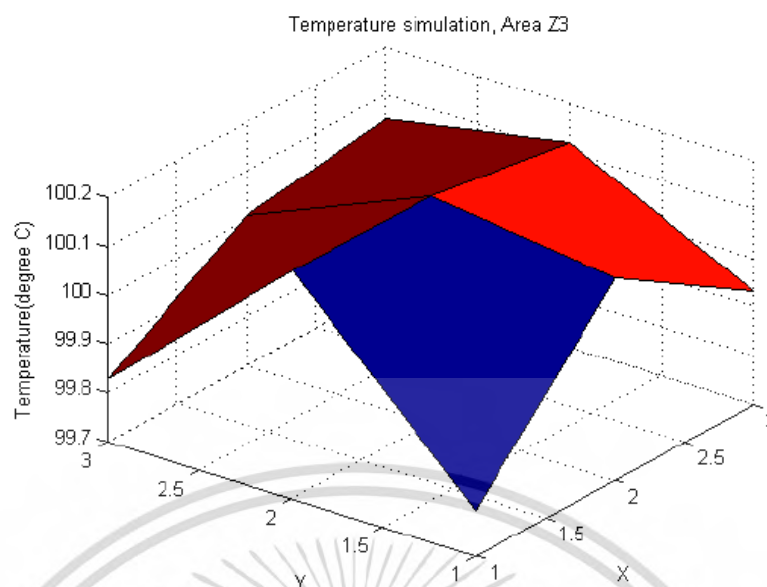


รูปที่ 4.2 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ระนาบ Z1



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ระนาบ Z2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองอุณหภูมิที่ระนาบ Z3

เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Excel ในการทดสอบสมมติฐาน เนื่องจากสามารถคำนวณค่า p-value ได้ง่าย ซึ่งจากผล Two-Way ANOVA วิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.7 ก็สามารถสังเกตได้ว่าสมมติฐานไม่มีผลสำหรับประชากรแกน Y สมมติฐานสำหรับประชากรแกน Y จะปฏิเสธสมมติฐาน เนื่องจากค่า p-value $< \alpha$ ($5.3E-13 < 0.05$) สำหรับประชากรแกน X ค่า p-value $> \alpha$ ทั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่าทั้งแกน X และแกน Y มีผลกระทบต่ออุณหภูมิในตัวทดสอบอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์ Two-way ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	p-value
Y	21612.8	3	7204.25	5.3E-13
X	0.75175	2	0.37587	0.26368
Error	1.3437	6	0.22395	
Total	21614.9	11		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) ที่อุณหภูมิ 100 °C สามารถแสดงการคำนวณความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ระนาบ Z1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X1, Y1, Z1)} &= 100.04 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 0.060 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X2, Y1, Z1)} &= 99.95 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= -0.028 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X3, Y1, Z1)} &= 100.19 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 0.209 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X1, Y2, Z1)} &= 99.90 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= -0.081 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X2, Y2, Z1)} &= 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 0.000 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X3, Y2, Z1)} &= 99.91 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= -0.065 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X1, Y3, Z1)} &= 99.83 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= -0.149 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X2, Y3, Z1)} &= 100.16 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 0.177 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (X3, Y3, Z1)} &= 100.12 \text{ }^{\circ}\text{C} - 99.98 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &= 0.137 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตารางที่ 4.8 – 4.10 แสดงค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่จุด 100 °C, 90 °C และ 50 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ 100 °C (หน่วย: °C)

แนวแกน Z	แนวแกน Y	แนวแกน X		
		1	2	3
1	1	0.060	-0.028	0.209
	2	-0.081	0.000	-0.065
	3	-0.149	0.177	0.137
2	1	0.148	0.241	0.128
	2	0.131	0.000	-0.079
	3	0.358	0.120	0.179
3	1	-0.371	-0.050	-0.235
	2	0.003	0.000	-0.046
	3	-0.340	-0.158	-0.116

ตารางที่ 4.9 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ 90 °C (หน่วย: °C)

แนวแกน Z	แนวแกน Y	แนวแกน X		
		1	2	3
1	1	0.206	0.081	0.092
	2	0.114	0.000	0.066
	3	0.254	0.124	0.246
2	1	-0.357	0.156	-0.253
	2	-0.305	0.000	-0.504
	3	-0.212	-0.118	-0.084
3	1	0.013	0.001	0.200
	2	-0.026	0.000	0.074
	3	-0.088	-0.116	0.158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ 50 °C (หน่วย: °C)

แนวแกน Z	แนวแกน Y	แนวแกน X		
		1	2	3
1	1	-0.244	-0.048	-0.035
	2	-0.009	0.000	-0.155
	3	0.015	-0.119	0.035
2	1	0.089	-0.051	0.077
	2	0.098	0.000	-0.090
	3	0.105	0.186	0.083
3	1	0.050	0.043	-0.140
	2	-0.188	0.000	0.182
	3	-0.096	-0.219	-0.053

4.4 แบบจำลองการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

หลังจากที่ได้ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแต่ละจุดวัด โดยวิธีการคำนวณ จึงได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและสมการการถดถอยพหุจากสมการที่ (3.4) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [10]

$$\begin{bmatrix} T_{var(x_1,y_1)} \\ T_{var(x_1,y_2)} \\ \vdots \\ T_{var(x_3,y_3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1x_1 + a_2y_1 \\ a_0 + a_1x_1 + a_2y_2 \\ \vdots \\ a_0 + a_1x_3 + a_2y_3 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ผลการหาค่า Regression Parameters โดยใช้โปรแกรม Microsoft-Excel

ตารางที่ 4.11 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 100 °C ระบาย Z1

		Standard			Lower	Upper
	Coefficients	Error	t Stat	P-value	95%	95%
Intercept	-0.095868	0.146204	-0.655712	0.536327	-0.453617	0.261881
X	0.074988	0.049663	1.509934	0.181802	-0.046533	0.196510
Y	-0.012610	0.049663	-0.253901	0.808049	-0.134131	0.108912

ตารางที่ 4.12 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 100 °C ระบาย Z2

		Standard			Lower	Upper
	Coefficients	Error	t Stat	P-value	95%	95%
Intercept	0.226152	0.152090	1.486959	0.187583	-0.145999	0.598304
X	-0.068200	0.051662	-1.320111	0.234923	-0.194614	0.058213
Y	0.023169	0.051662	0.448477	0.669550	-0.103244	0.149583

ตารางที่ 4.13 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 100 °C ระบาย Z3

		Standard			Lower	Upper
	Coefficients	Error	t Stat	P-value	95%	95%
Intercept	-0.263947	0.186048	-1.418703	0.205779	-0.719191	0.191296
X	0.051980	0.063197	0.822498	0.442247	-0.102659	0.206618
Y	0.007007	0.063197	0.110882	0.915326	-0.147631	0.161646

ตารางที่ 4.14 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 90 °C ระบาย Z1

		Standard			Lower	Upper
	Coefficients	Error	t Stat	P-value	95%	95%
Intercept	0.106582	0.104079	1.024052	0.345312	-0.148089	0.361253
X	-0.028455	0.035354	-0.804873	0.451600	-0.114963	0.058052
Y	0.040873	0.035354	1.156122	0.291582	-0.045634	0.127381

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 90 °C ระบาย Z2

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
<i>Intercept</i>	-0.210418	0.275477	-0.763832	0.473923	-0.884485	0.463649
<i>X</i>	0.005314	0.093575	0.056785	0.956560	-0.223656	0.234283
<i>Y</i>	0.006734	0.093575	0.071965	0.944969	-0.222235	0.235703

ตารางที่ 4.16 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 90 °C ระบาย Z3

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
<i>Intercept</i>	-0.067562	0.083118	-0.812846	0.447351	-0.270945	0.135820
<i>X</i>	0.088979	0.028234	3.151499	0.019777	0.019893	0.158064
<i>Y</i>	-0.043145	0.028234	-1.528129	0.177343	-0.112230	0.025941

ตารางที่ 4.17 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 50 °C ระบาย Z1

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
<i>Intercept</i>	-0.175693	0.115768	-1.517633	0.179902	-0.458966	0.107580
<i>X</i>	0.013860	0.039324	0.352460	0.736544	-0.082363	0.110083
<i>Y</i>	0.042882	0.039324	1.090460	0.317355	-0.053342	0.139105

ตารางที่ 4.18 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 50 °C ระบาย Z2

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
<i>Intercept</i>	0.043114	0.097928	0.440266	0.675162	-0.196506	0.282734
<i>X</i>	-0.037187	0.033264	-1.117911	0.306357	-0.118582	0.044208
<i>Y</i>	0.043261	0.033264	1.300525	0.241137	-0.038134	0.124656

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ผลที่ได้จากการหาค่า Regression Parameters ที่ 50 °C ระบาย Z3

		Standard			Lower	Upper
	Coefficients	Error	t Stat	P-value	95%	95%
Intercept	-0.014062	0.160272	-0.087740	0.932938	-0.406233	0.378109
X	0.037069	0.054442	0.680891	0.521336	-0.096145	0.170283
Y	-0.053377	0.054442	-0.980454	0.364726	-0.186591	0.079836

4.4.2 แบบจำลองการประเมินค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.20 Regression Parameters ที่ 100 °C

Area	Regression Parameters		
	a ₀	a ₁	a ₂
Z1	-0.095870	0.074988	-0.012610
Z2	0.226152	-0.068200	0.023169
Z3	-0.263950	0.051980	0.007007

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_{\text{var}(x, y, z1)} = -0.095870 + 0.074988 x - 0.012610 y \quad (4.2)$$

$$T_{\text{var}(x, y, z2)} = 0.226152 - 0.068200 x + 0.023169 y \quad (4.3)$$

$$T_{\text{var}(x, y, z3)} = -0.263950 + 0.051980 x + 0.007007 y \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.21 Regression Parameters ที่ 90 °C

Area	Regression Parameters		
	a ₀	a ₁	a ₂
Z1	0.106582	-0.028455	0.040873
Z2	-0.210418	0.005314	0.006734
Z3	-0.067562	0.088979	-0.043145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_{\text{var}(x, y, Z1)} = 0.106582 - 0.028455 x + 0.040873 y \quad (4.5)$$

$$T_{\text{var}(x, y, Z2)} = -0.210418 + 0.005314 x + 0.006734 y \quad (4.6)$$

$$T_{\text{var}(x, y, Z3)} = -0.067562 + 0.088979 x - 0.043145 y \quad (4.7)$$

ตารางที่ 4.22 Regression Parameters ที่ 50 °C

Area	Regression Parameters		
	a ₀	a ₁	a ₂
Z1	-0.175693	0.013860	-0.042882
Z2	0.043114	-0.037187	0.043261
Z3	-0.014062	0.037069	-0.053377

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_{\text{var}(x, y, Z1)} = -0.175693 + 0.013860 x + 0.042882 y \quad (4.8)$$

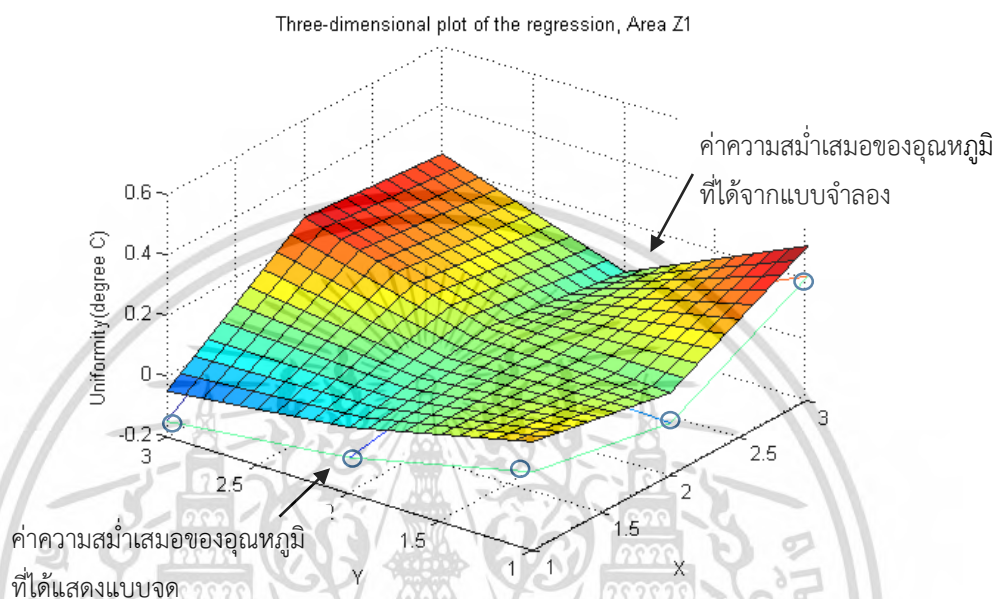
$$T_{\text{var}(x, y, Z2)} = 0.043114 - 0.037187 x + 0.043261 y \quad (4.9)$$

$$T_{\text{var}(x, y, Z3)} = -0.014062 + 0.037069 x - 0.053377 y \quad (4.10)$$

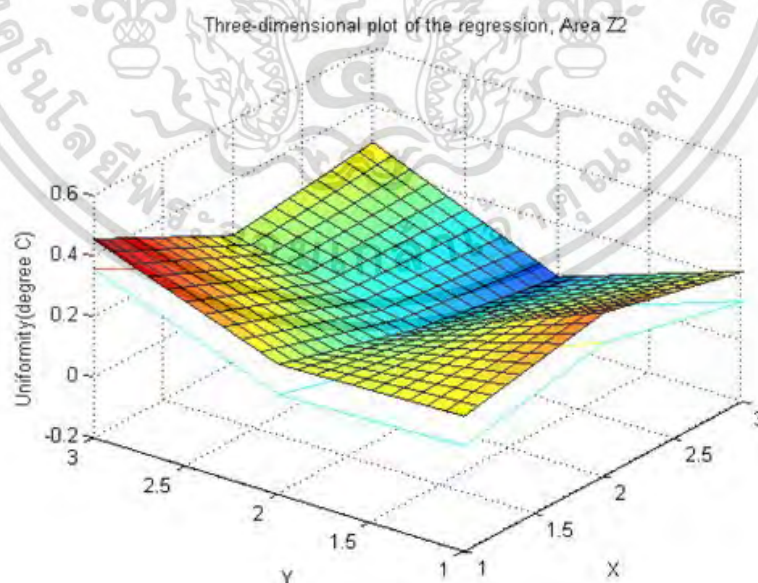
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ตัวอย่างผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยใช้โปรแกรม MATLAB

ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแบบ 3 มิติได้ ดังรูปที่ 4.5 - 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่แสดงแบบจุด

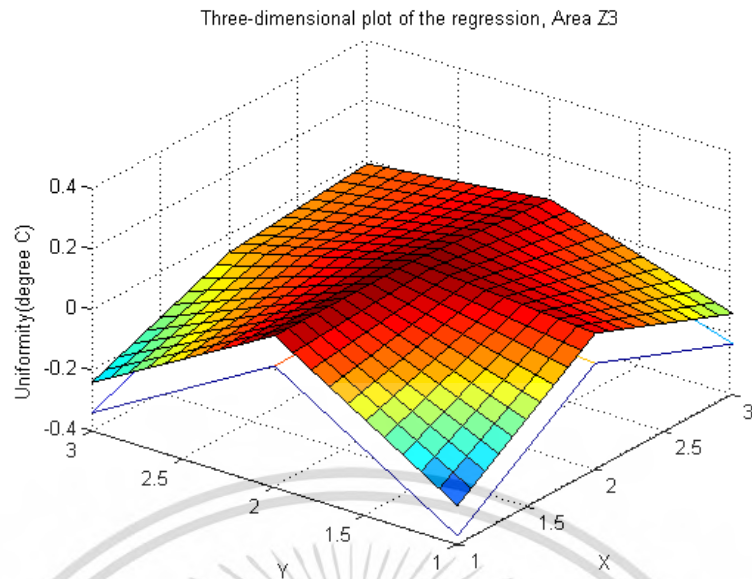


รูปที่ 4.5 ผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่ระนาบ Z1



รูปที่ 4.6 ผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่ระนาบ Z2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลการถดถอยแบบ 3 มิติ ที่ระนาบ Z3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการสอบเทียบตู้ทดสอบอุณหภูมิ

CALIBRATION RECORD										
Temperature Chamber										
Cal. Point 50 °C										unit °C
Record no.	Chamber Indicator	Standard Reading at each position								(Ref.)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50.0	50.31	50.50	50.19	50.60	49.89	50.02	50.13	49.99	49.89
2	50.0	50.35	50.54	50.22	50.57	49.89	49.99	50.14	50.05	49.84
3	50.0	50.33	50.58	50.23	50.60	49.87	49.95	50.14	50.01	49.85
4	50.0	50.30	50.56	50.20	50.60	49.90	50.08	50.12	50.00	49.86
5	50.0	50.28	50.56	50.15	50.60	49.89	50.05	50.11	50.02	49.86
6	50.0	50.25	50.54	50.18	50.55	49.89	50.09	50.12	50.04	49.82
7	50.0	50.25	50.56	50.15	50.57	49.90	50.05	50.14	50.00	49.85
8	50.0	50.32	50.52	50.11	50.55	49.87	50.04	50.13	50.01	49.84
9	50.0	50.28	50.55	50.14	50.51	49.89	50.10	50.15	49.98	49.81
10	50.0	50.33	50.52	50.16	50.52	49.87	50.08	50.14	50.00	49.82
Average	50.0	50.30	50.54	50.17	50.57	49.89	50.05	50.13	50.01	49.84

Cal. Point 90 °C										unit °C
Record no.	Chamber Indicator	Standard Reading at each position								(Ref.)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	90.0	90.35	90.58	90.09	90.59	89.85	89.94	89.90	89.75	89.82
2	90.0	90.39	90.50	90.12	90.62	89.82	89.95	89.93	89.88	89.79
3	90.0	90.40	90.51	90.10	90.60	89.80	89.98	89.92	89.87	89.78
4	90.0	90.44	90.52	90.11	90.61	89.84	89.96	89.90	89.85	89.78
5	90.0	90.43	90.53	90.10	90.60	89.85	89.94	89.90	89.85	89.77
6	90.0	90.48	90.55	90.07	90.57	89.84	89.95	89.90	89.85	89.78
7	90.0	90.50	90.51	90.10	90.60	89.96	89.94	89.90	89.85	89.77
8	90.0	90.48	90.51	90.09	90.59	89.84	89.93	89.89	89.84	89.78
9	90.0	90.42	90.56	90.08	90.61	89.85	89.90	89.85	89.80	89.70
10	90.0	90.42	90.52	90.11	90.58	89.86	89.92	89.89	89.84	89.75
Average	90.0	90.43	90.53	90.10	90.60	89.85	89.94	89.90	89.84	89.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการที่ออกให้เท่านั้น ผู้ดูแลให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALIBRATION RECORD

Temperature Chamber

Cal. Point 100 °C

unit °C

Record no.	Chamber Indicator	Standard Reading at each position								(Ref.)
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	100.0	100.45	100.64	100.05	100.85	99.89	100.01	99.95	99.75	99.74
2	100.0	100.52	100.66	100.12	100.65	99.91	99.99	99.97	99.80	99.83
3	100.0	100.51	100.68	100.14	100.70	99.95	99.94	99.94	99.80	99.81
4	100.0	100.53	100.64	100.15	100.68	99.90	99.98	99.95	99.83	99.80
5	100.0	100.60	100.64	100.16	100.76	99.91	99.97	99.95	99.83	99.89
6	100.0	100.54	100.60	100.17	100.65	99.90	99.98	99.97	99.84	99.84
7	100.0	100.50	100.62	100.23	100.72	99.92	99.98	99.96	99.82	99.79
8	100.0	100.45	100.64	100.16	100.68	99.89	99.97	99.96	99.82	99.85
9	100.0	100.53	100.67	100.15	100.69	99.90	99.98	99.95	99.82	99.80
10	100.0	100.54	100.70	100.14	100.73	99.91	100.00	99.91	99.83	99.84
Average	100.0	100.52	100.65	100.15	100.71	99.91	99.98	99.95	99.81	99.82

รูปที่ 4.9 ผลการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 Uncertainty Budget

Source of Uncertainty	Symbol	Absolute Value (+/-) °C	Probability Distribution	Divisor	C_i	U_i (+/-) °C absolute value	V_i
Calibration of Standard	T_{Cal_Std}	0.62	Normal	2	1	0.3100	∞
Drift of Standard	T_{Drift_Std}	0.064	Rectangular	1.732	1	0.0370	∞
Resolution of Standard	T_{Res_Std}	0.01	Rectangular	3.464	1	0.0029	∞
Resolution of UUC	T_{Res_UUC}	0.1	Rectangular	3.464	1	0.0289	∞
Chamber Stability	T_{Stab}	0.10	Rectangular	1.732	1	0.0577	∞
Loading Effect	$0.2 \times T_{Uniform}$	0.22	Rectangular	1.732	1	0.1270	∞
Repeatability of UUC	T_{Rep_UUC}	0	Normal	1	1	0.0000	9
Combine Uncertainty	Uc		Normal			0.3432	∞
Expanded Uncertainty	U	K= 2	Normal			0.6864	
					Round Up	0.69	

เมื่อ C_i = Sensitivity Coefficient

V_i = Degree of Freedom

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALIBRATION RECORD

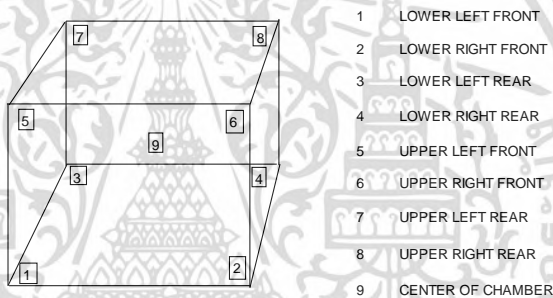
Temperature Chamber

Description

Instrument name : Temperature Chamber
 Model : FD-527
 Manufacturer : Associated Environmental System
 Serial Number : 9680
 Made In : U.S.A

Appearance check

เครื่องมือวัดที่ทำการสอบเทียบ	หัวข้อในการตรวจสอบ	เกณฑ์ในการตัดสิน	ผลการตรวจสอบ
Temperature Chamber	1. สภาพภายนอกของตู้สอบ	1.1 พร้อมใช้งาน กระจกหน้าตู้ไม่แตกร้าว 1.2 หน้าจอแสดงผล ไม่แตกร้าว แสดงผลได้ครบ 1.3 ปุ่มกด สามารถใช้งานได้ 1.4 ฝาตู้ปิดได้สนิท ขางขอบตู้ไม่แตก หรือกรอบ	<input checked="" type="checkbox"/> ปกติ <input type="checkbox"/> ผิดปกติ <input checked="" type="checkbox"/> ปกติ <input type="checkbox"/> ผิดปกติ <input checked="" type="checkbox"/> ปกติ <input type="checkbox"/> ผิดปกติ <input checked="" type="checkbox"/> ปกติ <input type="checkbox"/> ผิดปกติ
	2. สภาพภายในของตู้สอบ	2.1 ไม่มีน้ำขังอยู่ภายใน 2.2 ไม่มีสิ่งอุดคั้นช่องลมทำอุณหภูมิ	<input checked="" type="checkbox"/> ปกติ <input type="checkbox"/> ผิดปกติ <input checked="" type="checkbox"/> ปกติ <input type="checkbox"/> ผิดปกติ



Measurement results

Cal. Point (°C)	Standard Reading at each position (°C)									Ref.	Uncertainty (+/- °C)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
50	50.30	50.54	50.17	50.57	49.89	50.05	50.13	50.01	49.84		0.69
90	90.43	90.53	90.10	90.60	89.85	89.94	89.90	89.84	89.77		0.69
100	100.52	100.65	100.15	100.71	99.91	99.98	99.95	99.81	99.82		0.69

unit °C

Setting Temp.	Indicating Temp.	Measured Uniformity	Measured Stability	Overall Variation
50	50.0	0.75	0.08	0.79
90	90.0	0.91	0.08	0.92
100	100.0	1.11	0.10	1.11

รูปที่ 4.10 ใบรายงานผลการสอบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 บทสรุปการวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) ภายในตู้ทดสอบอุณหภูมิ จากการประเมินค่าแบบ Constant Uniformity เป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปเมื่อพิจารณาตู้ทดสอบอุณหภูมิเป็นตู้อุณหภูมิคงที่ ที่ได้รับอุณหภูมิสม่ำเสมอโดยพลการ ความไม่แน่นอนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปัจจัย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงเวลาและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงระยะอ้างอิงตามความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ จากผลที่ได้เป็นตัวเลขยืนยันว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการหาค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแต่ละพื้นที่เมื่อพิจารณาแกน X และแกน Y พร้อมกัน อย่างไรก็ตามเรายังพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นจำนวนเต็ม มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความสม่ำเสมอของตู้ทดสอบอุณหภูมิ

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (Temperature Uniformity) สามารถนำไปประยุกต์ใช้การหาค่าอุณหภูมิภายในห้องหรือตู้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ เช่น ห้องเย็นเก็บอาหาร, ตู้บ่มเชื้อสำหรับยา, เครื่องมือตรวจวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ ฯลฯ เพื่อให้ทราบค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแต่ละพื้นที่ และนำค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิที่ได้ไปชดเชยหรือปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิ ทั้งนี้ควรพิจารณาปริมาณที่ต้องการหาค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิด้วยหากปริมาณมีขนาดใหญ่มากอาจต้องเพิ่มจำนวนจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น

สำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบและลูกค้าที่นำเครื่องมือมาสอบเทียบจะต้องยอมรับขอบเขตของการสอบเทียบ ระยะเวลาของการทดสอบ (ก่อนหน้าสภาวะคงที่และเวลาการบันทึก), พารามิเตอร์ที่กำหนด (จุดสอบเทียบที่ต้องการ, ศึกษาการกระจายตัวเชิงระยะของอุณหภูมิและความชื้น, ศึกษาสภาวะคงที่ชั่วขณะ, ฯลฯ) Loading Conditions, ฯลฯ สภาวะของการสอบเทียบเหล่านี้ทั้งหมดจะถูกบันทึกโดยห้องปฏิบัติการสอบเทียบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ส่วนวารสารวิชาการ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). **บทบาทมาตรวิทยาต่อการพัฒนาคุณภาพสู่สหัสวรรษใหม่**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ส่วนวารสารวิชาการสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2543.
- [2] TLAS G-20. **Guidelines for Calibration and Checks of Temperature Controlled Enclosures**. 2008.
- [3] INTERNATIONAL STANDARD. **IEC60068-3-5 Supporting documentation and Guidance - Confirmation of the performance of temperature chambers**. 2001.
- [4] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. **บทเรียนมาตรวิทยา**. ปทุมธานี : สำนักพิมพ์สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553.
- [5] Associated Environmental Systems. **“environmental test chambers.”** [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.associatedenvironmentalsystems.com/chambers>
- [6] ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. **เครื่องมือวิทยาศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่3. ขอนแก่น : โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา. 2544.
- [7] นฤตม นวลขาว. **มาตรวิทยาอุณหภูมิเบื้องต้น**. ปทุมธานี : สำนักพิมพ์สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2554.
- [8] วิศรุต ศรีรัตน์นะ. **เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น. 2550.
- [9] UKAS. **M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement**. 2012.
- [10] D. C. Montgomery and G. C. Runger. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. (The Fifth Edition). Wiley Global Education. 2010.
- [11] T. Thepmanee “Performace analysis of AutomationSPRT Module Calibration,” **TNI Journal of Engineering and Technology**, January-June, 2015. vol.3, no.1, pp.40-43
- [12] H. Nakahama. “Estimation method for temperature uncertainty of temperature chamber (JTM K 08)” **Espelc test center corp**, 2008, pp. 1-14.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] Y. A. Abdelaziz. “Guidelines for assessment of temperature uniformity and investigation the measurement uncertainty within laboratory oven”
Proceeding of the XVII IMEKO Word Congress, 2003, pp. 1675-1677.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

ผลงานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ได้รับการตีพิมพ์ในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (Proceedings) ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

[1] Yada Jaoskul and Teerawat Thepmanee

“A Mathematical Model Evaluation for The Standard Uncertainty of Temperature Uniformity”, Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), June 28 – July 1, 2016, pp. 1-5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A mathematical model evaluation for the standard uncertainty of Temperature uniformity

Yada Jaoskul
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Email: yada.instrument@gmail.com

Teerawat Thepmanee
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
Email: teerawat.th@kmitl.ac.th

Abstract— This paper presents a technique to evaluate for the standard uncertainty of temperature uniformity. In general, when considering the temperature test chamber as a constant temperature chamber that has achieved an arbitrary uniform temperature, the uncertainty at that achieved temperature can be separated into the two factors of chronological temperature fluctuation in time, and spatial temperature fluctuation, referred to as temperature uniformity. Temperature uniformity is represented through two methods: temperature variation in space base on the center of the working space, and temperature gradient considering the entire working space. To represent a linear integer mathematical model applied to evaluate temperature uniformity. The numerical illustrations and results substantiate that the model proposed is useful to simultaneously consider x and y axis when determining temperature uniformity. Moreover, we found that the linear integer model made a significant impact on uniformity of the temperature chambers.

Keywords—Uncertainty; Temperature uniformity

I. INTRODUCTION

In recent years, there has been an increasing number of devices that generate high heat values, which include manufacturing products, cable, sound insulation and stepping motor etc. Therefore, thermal design considering the radiation performance will be required in the design phase of the device or system. A thermal test chamber is designed to produce a temperature change in a device. The magnitude and rate of this change should induce a sufficient thermal stress fatigue to identify sources of potential failure without causing catastrophic failure of all components. Calibration of a temperature chamber in principle is the determination of the deviation between the indication on the display values of the chamber and the corresponding values measured in the chamber. The characterization of other parameters like air temperature/humidity spatial distribution in the specified calibration volume, air temperature/humidity temporal stability over a representative period of time, thermal inertia, recovery time, etc. can also be specified in the calibration scope of a laboratory [1]. In general some level of temperature deviation exists between the temperature at the center of the chamber and the setting temperature or indicated temperature on the test chamber temperature controllers. This occurs because of the chamber construction and the placement of the temperature sensors for measurement and control and the method of adjusting the temperature. Whether the chamber temperature

achieved is at the temperature setting on the temperature controller is a control problem, and whether the temperature controller shows the true temperature at the center of the chamber is a measurement problem. In either case, if any temperature controller, this temperature deviation should be seen as related to uncertainty [2]. Compensation for the temperature deviation can be made by providing offset to the temperature controller, but uncertainty from the offset remains. There are many branches of science and engineering devoted to establishing a methodology for modeling the phenomenon of heat transfer between two bodies of differing temperatures. These include thermodynamics, heat and mass transfer and fluid dynamics. To properly apply these disciplines to temperature testing, one must have a fundamental understanding of the way a chamber works and how the operation of the chamber can be maximized for efficiency [3]-[5]. It is the purpose of this paper to provide such a discussion. The topics presented linear integer mathematical model approach which has been proved to be acceptable and widely applied in many applications of modeling and methods supporting the thermal test chamber design and the calibration and/or operators to identify how evaluate standard uncertainty and what are the corresponding effects on the whole system.

II. EVALUATION OF STANDARD UNCERTAINTY

A quantity is a property of a phenomenon, body or substance to which a magnitude can be assigned. The purpose of a measurement is to assign a magnitude to the measurand; the quantity intended to be measured. The assigned magnitude is considered to be the best estimate of the value of the measurand. Calibration is the validation of specific measurement techniques and equipment to ensure that measurements are working correctly as desired and reliably as designed. Calibration is a comparison between measurements which one is known or assigned correctness called the standard and the second one is the unit under test or test instrument, or any other names. The uncertainty evaluation process will encompass a number of influence quantities that affect the result obtained for the measurand. Some uncertainties, particularly those associated with the determination of repeatability, have to be evaluated by statistical methods. Others have been evaluated by examining other information, such as data in calibration certificates, evaluation of long-term drift, consideration of the effects of environment, etc. A Type A evaluation of uncertainty is carried out using statistical

analysis of a series of observations. A Type B evaluation of uncertainty is carried out using methods other than statistical analysis of a series of observations [6].

A. Type A evaluation of standard uncertainty

A Type A evaluation will normally be used to obtain a value for the repeatability or randomness of a measurement process. If there are n independent repeated values for a quantity Q then the mean value \bar{q} is given by

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j = \frac{q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n}{n} \quad (1)$$

The spread in the results gives an indication of the repeatability of the measurement process, which depends on various factors, including the apparatus used, the method, and sometimes on the person making the measurement. However, from the results of a single sample of measurements, an estimate, $s(q_j)$, can be made of the standard deviation σ of the whole population of possible values of the measurand from the relation

$$s(q_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (2)$$

This uncertainty is referred to as the experimental standard deviation of the mean. It is obtained from the estimated standard deviation of the population by the expression:

$$u_i = \frac{s(q_j)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

B. Type B evaluation of standard uncertainty

It is probable that systematic components of uncertainty, i.e. those that account for errors that remain constant while the measurement is made, will be estimated from Type B evaluations. In evaluating the components of uncertainty it is necessary to consider and include at least the following possible sources: calibration report, resolution, uniformity etc.

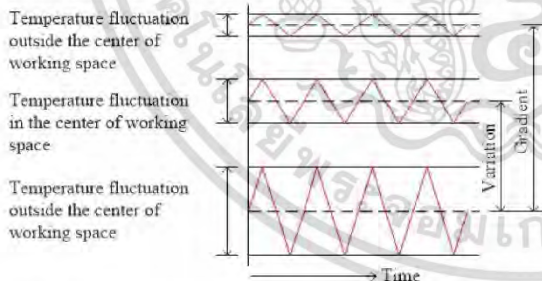


Fig. 1. Temperature differences (IEC60068-3-5)

When considering the temperature test chamber as a constant temperature chamber that has achieved an arbitrary

uniform temperature, the uncertainty at that achieved temperature can be separated into the two factors of chronological temperature fluctuation in time, and spatial temperature fluctuation, refer to as temperature uniformity. Temperature uniformity reflects the quality of chamber design regarding isolation, location of heaters and air circulation patterns. Temperature uniformity is represented through two methods: temperature variation in space base on the center of the working space, and temperature gradient considering the entire working space. We can evaluate the temperature uniformity is defined as follows:

$$T_{var}(X_i, Y_i, Z_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(X_i, Y_i, Z_i) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(X_c, Y_c, Z_c) \quad \forall i, c=2 \quad (4)$$

and

$$T_{gra} = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(X_i, Y_i, Z_i) \right]_{max} - \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(X_i, Y_i, Z_i) \right]_{min} \quad \forall i \quad (5)$$

Where i is measurement points (center of chamber, 4 rim and 4 corner point of working space) and j is a series of observations. The standard uncertainty of temperature uniformity as follows.

$$u_i = \frac{|T_{var}|}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

Temperature uniformity performance is specified as the two items of temperature gradient (T_{gra}) and temperature variation (T_{var}) in space. Equation (4) are defines temperature variation in space as "the difference between the average temperature in the center of the working space and at a separate arbitrary point in the working space after temperature stability has reached." Since the chamber center (center of the working space) is considered to be the reference point, the uncertainty of temperature uniformity is found based on temperature variation in space. Equation (5), it defines temperature gradient as "the maximum difference between the average temperatures at two separate measurement points after temperature stability has been reached, at an arbitrary point in time in the working space."

The combined standard uncertainty, u_c is a standard uncertainty of the result of a measurement when that result is obtained from the values of a number of other quantities, equal to the positive square root of a sum of terms, the terms being the variances or covariance of these other quantities weighted according to how the measurement result varies with changes in these quantities.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (7)$$

Where u_i is source of standard uncertainties

$$U = k \cdot u_c \quad (8)$$

The reported expanded uncertainty U is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$, providing a coverage probability of approximately 95%.

III. EXPERIMENTAL DESIGN

A. Measurement system design

As can be seen in Fig. 1, the temperature chamber is obtained by simulating a three layer each layer total of nine points (center of chamber, 4 rim and 4 corner point of working space) as in expression (8). The temperature simulation points in (X_i, Y_i, Z_i) working space, denoted by the letter T_{sim} .

$$T_{sim}(X_i, Y_i, Z_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j(X_i, Y_i, Z_i) \quad \forall i \quad (8)$$

Fig. 1 shows the XYZ - working space. The solid line grid (red, green, blue) represent the inside surface of the chamber layers, while the each color points represents the temperature simulated in working space.

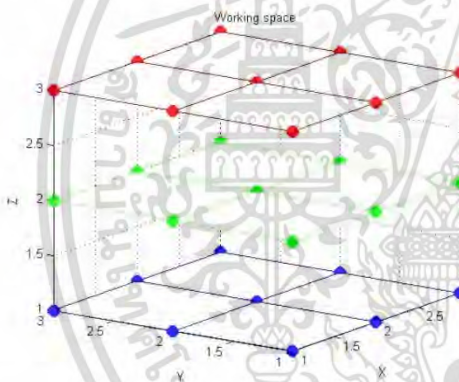


Fig. 2. Working space for temperature simulate in chamber

After temperature simulate, to ensure the validity of experimental results, the power full technique called analysis of variance (ANOVA) was used to perform a statistical analysis. Two-way ANOVA assumptions are that the temperature has the impact on the distance x and y axis. The hypotheses was tested by using $\alpha = 0.05$ significant level [7] - [10].

B. Multiple regression analysis

Many applications of regression analysis involve situations in which there are more than one regressor variable. A

regression model that contains more than one regressor variable is called a multiple regression model. As an example, suppose that the uniformity depends on the distance x and y . From (4) the revised multiple regression models can be written as follow

$$T_{var(x_i, y_i, z_i)} = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i \quad (9)$$

Where T_{var} represents temperature uniformity, x_i represents the distance on X axis, y_i represents the distance on Y axis refers to Fig. 1. This is a multiple linear regression model with two regressors. The term linear is used because (9) is a linear function of the unknown parameters a_0 , a_1 , and a_2 [7].

IV. NUMERICAL ILLUSTRATION

A. Temperature in chamber simulation

For an illustrative example, this data consists of simulated values to aid in understanding, and differs from actual measured data as shown in Table I. The temperature is simulated to be known and shown in Table I and Figs. 3 - 5 respectively.

TABLE I. TEMPERATURE SIMULATION IN CHAMBER

Temperature simulation at $100 \pm 1^\circ\text{C}$				
Z	Y	X		
		1	2	3
1	1	100.04	99.95	100.19
	2	99.90	99.98	99.91
	3	99.83	100.16	100.12
2	1	100.10	100.19	100.08
	2	100.08	99.95	99.87
	3	100.31	100.07	100.13
3	1	99.79	100.12	99.93
	2	100.17	100.17	100.12
	3	99.83	100.01	100.05

From the two-way ANOVA results of Table II, it can be observed that the null hypotheses for the row population means (referred to the Y axis) as well as the null hypotheses for the column population means (referred to the X axis) is rejected, since the computed P -value $< \alpha$ ($5.3\text{E-}13 < 0.05$). It can be concluded that both the X and Y axis have the impact on the temperature chamber.

TABLE II. ANOVA RESULT

Source of Variation	SS	df	MS	P-value
Y	21612.8	3	7204.25	5.3E-13
X	0.75175	2	0.37587	0.26368
Error	1.3437	6	0.22395	
Total	21614.9	11		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

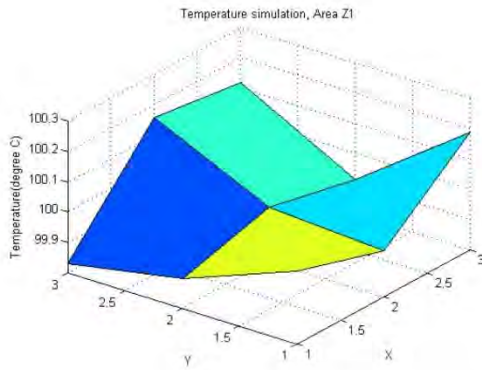


Fig. 3. The temperature simulation in chamber area Z1

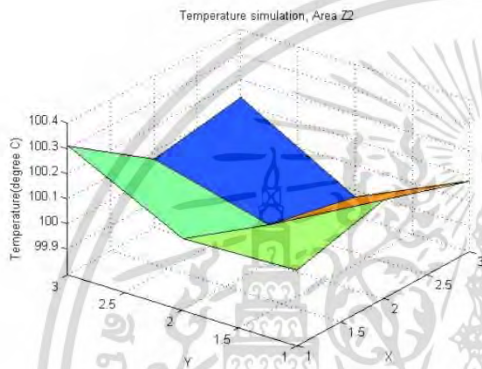


Fig. 4. The temperature simulation in chamber area Z2

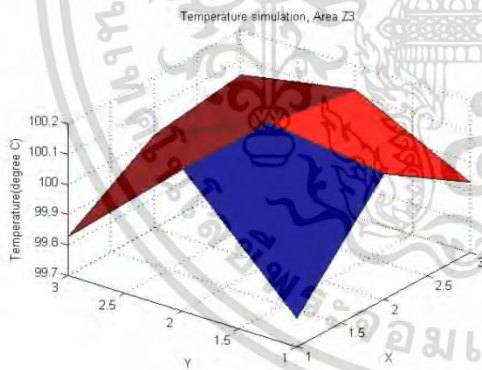


Fig. 5. The temperature simulation in chamber area Z3

B. The temperature uniformity results

From Table I the temperature uniformity on the axis (x , y , z) can be calculate by (4).

TABLE III. TEMPERATURE UNIFORMITY

Z	Y	X		
		1	2	3
1	1	0.060	-0.028	0.209
	2	-0.081	0.000	-0.065
	3	-0.149	0.177	0.137
2	1	0.148	0.241	0.128
	2	0.131	0.000	-0.079
	3	0.358	0.120	0.179
3	1	-0.371	-0.050	-0.235
	2	0.003	0.000	-0.046
	3	-0.340	-0.158	-0.116

C. The modeling of temperature uniformity

Equation (9) and Table III, A multiple regression model that might describe this relationship is

$$\begin{bmatrix} T_{var}(x_1, y_1) \\ T_{var}(x_1, y_2) \\ \vdots \\ T_{var}(x_3, y_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_1 \\ a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_2 \\ \vdots \\ a_0 + a_1 x_3 + a_2 y_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Table IV shows, The solution to this set of equations

TABLE IV. REGRESSION PARAMETERS

Area	Regression parameters		
	a_0	a_1	a_2
Z1	-0.095870	0.074988	-0.012610
Z2	0.226152	-0.068200	0.023169
Z3	-0.263950	0.051980	0.007007

Using the regression parameters introduced in Table IV, a complete integer linear mathematical model can be written as follows:

$$T_{var}(x, y, Z1) = -0.095870 - 0.074988 x - 0.012610 y \quad (11)$$

$$T_{var}(x, y, Z2) = 0.226152 - 0.068200 x + 0.023169 y \quad (12)$$

$$T_{var}(x, y, Z3) = -0.263950 + 0.051980 x + 0.007007 y \quad (13)$$

The illustrative example was solved using the MATLAB software on a personnel computer and plane in the three-dimensional space of temperature uniformity x and y can be found and represented as shown in Figs. 6 – 8. In view of the fact that after fit a linear model using regression analysis, R-squared is a statistical measure of how close the data are to the fitted regression line. The closer to 1, the better the regression line fits the data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

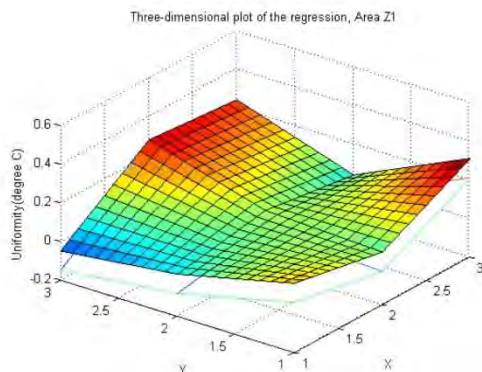


Fig. 6. The regression plane for the model Z1

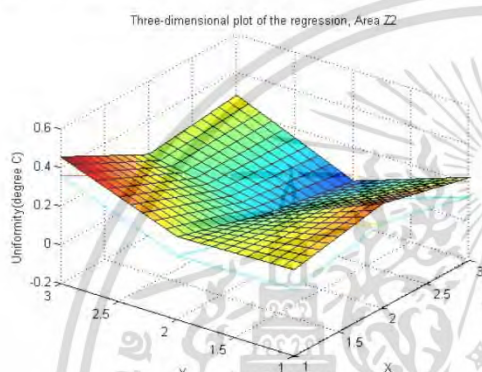


Fig. 7. The regression plane for the model Z2

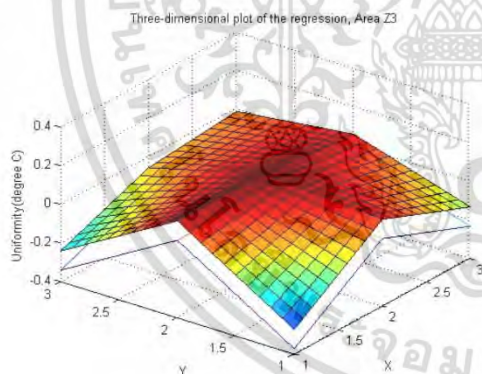


Fig. 8. The regression plane for the model Z3

V. CONCLUSION

This research to represent a linear integer mathematical model applied to evaluate temperature uniformity. In general, when considering the temperature test chamber as a constant temperature chamber that has achieved an arbitrary uniform temperature, the uncertainty at that achieved temperature can be separated into the two factors of chronological temperature fluctuation in time, and spatial temperature fluctuation, referred to as temperature uniformity. The numerical illustrations and results substantiate that the model proposed is useful to simultaneously consider x and y axis when determining temperature uniformity. Moreover, we found that the linear model made a significant impact on uniformity of the chamber. It was, however, suggested the laboratory and customer have to agree the scope of the calibration requested, duration of the test, (previous stabilization and recording time), parameters to be determined (calibration of the set point, study of spatial distribution of temperature/humidity, study of temporal stability, etc.) loading conditions, etc. These calibration conditions have to be recorded by the laboratory.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the helpful comments and suggestions of the reviewers, which have improved our work.

REFERENCES

- [1] Hirokazu Nakahama, "Estimation method for temperature uncertainty of temperature chambers", Espec test center corp.
- [2] "Calibration of temperature and/or humidity enclosures", EURAMET cg -20, Version 4.0, 2015.
- [3] "Thermal Test Chamber Construction, Considerations and Constraints", Sigma Systems Incorporated.
- [4] Yasser A. Abdelaziz, "Guidelines for assessment of Temperature uniformity and Investigation the measurement uncertainty within laboratory oven" Proceedings, XVII IMEKO World congress, June 22-27, 2003.
- [5] Teerawat Thepmanee, Sumetha Namsirilert, Sawai Pongswatd, Ruedee Masuchun, "Automatic SPRT module calibration using Automated Low Thermal Matrix Scanners", International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, May 17-19, 2011, pp. 601 – 604.
- [6] UKAS "M3003. The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement", 3rd, 2012.
- [7] D. C. Montgomery and G. C. Runger, Applied Statistics and Probability for Engineers (The Fifth Edition), Wiley Global Education, 2010
- [8] T. Thepmanee and S. Junlee, "Investigation into nuisance tripping of stream turbine generator due to increase of shaft vibration amplitudes", ICIC Express Letters, Part B: Applications, vol.5, no.1, pp.243-250, 2014.
- [9] T. Thepmanee and Chaowalit, "Analyzing Possible Cause of Imperfect Paper Production", ICIC Express Letters, Part B: Applications, vol.6, no.3, pp.805-809, March, 2015.
- [10] T. Thepmanee "Performance analysis of Automation SPRT Module Calibration" TNI Journal of Engineering and Technology, vol.3, no.1, pp.40-43, January-June, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวญาดา เจ่าสกุล
 วัน เดือน ปีเกิด 25 สิงหาคม 2530
 ที่อยู่ 2/29 หมู่บ้านสุขุมวิท1 ถ.บางนา-ตราด กม.39 หมู่ที่ 1 ตำบลบางสมัคร
 อำเภอบางปะกง ฉะเชิงเทรา 24180
 ประวัติการศึกษา 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
 คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้