

การพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ปริญญานิพนธ์
ของ
ธีระพงษ์ สมประจบ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา
พฤษภาคม 2547
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโร

การพัฒนาอํางควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในการทดสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

บทคัดย่อ
ของ
ธีระพงษ์ สมประจบ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา
พฤษภาคม 2547

ธีระพงษ์ สมประจบ (2547). การพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในการสอบเทียบ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ. ปรินซ์นิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร, อาจารย์ โอภาส สุขหวาน.

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายคือ พัฒนอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิแล้วนำมาทดสอบหาประสิทธิภาพและประเมินลักษณะทางกายภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

การพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวใช้หลักการไหลเวียนของเหลวในท่อผ่านขดลวดความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรโดยมีระบบการควบคุมแบบสัดส่วนที่ทำให้อุณหภูมิของของเหลวคงที่อย่างสม่ำเสมอทั่วกันซึ่งมีค่าการแปรปรวนไม่เกินกว่า $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นเกณฑ์การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามมาตรฐานสากลส่วนในด้านโครงสร้างของอ่างควบคุมอุณหภูมิทำจากสเตสและเหล็กซึ่งมีขนาดความ สูง 40 เซนติเมตร กว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตรและมีปริมาตรความจุ 1.2 ลิตร โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้เป็นส่วนประกอบดังนี้คือ มอเตอร์, เครื่องควบคุมแบบสัดส่วน, ขดลวดความร้อนและใบพัดกวนของของเหลว

เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินหาประสิทธิภาพคืออ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 50°C ถึง 200°C และมีค่าความแปรปรวนแปรไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ภายใน 30 นาทีตามวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวโดยใช้มาตรฐานการทดสอบ European Co-operation for Accreditation Guidelines on the Calibration of Temperature Block Calibrators, EA-10/13, ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวโดยต้องหาค่าการความแปรปรวน อุณหภูมิในแนวนอน แนวตั้ง และค่าความคงที่ของอุณหภูมิต่อเวลา

ผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ 5 คน ในลักษณะทางกายภาพ 4 ด้าน คือ

- 1 ด้านความปลอดภัยอยู่ในเกณฑ์ดี คะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 3.5
- 2 ด้านโครงสร้างอยู่ในเกณฑ์ดีคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 3.5
- 3 ด้านการใช้งานอยู่ในเกณฑ์ดีคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 3.9
- 4 ด้านการบำรุงรักษาอยู่ในเกณฑ์ดีคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 4.2

THE DEVELOPMENT OF TEMPERATURE CONTROLLED
BATH FOR THE CALIBRATION OF
TEMPERATURE INSTRUMENTS

AN ABSTRACT
BY
TEERAPONG SOMPRAJOB

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Arts degree in Industrial Education
at Srinakharinwirot University

May 2004

Teerapong Somprajob (2547) *The development of temperature controlled bath for the calibration of temperature instruments*. Master thesis, M.Ed. (Industrial Education).

Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University, Advisor Committee:

Dr. Pairust Vongyuttakrai, Mr.Ophast Sookwhan

The objective of the thesis was to develop temperature-controlled bath for the calibration of the temperature instruments and evaluate its efficiency and its physical characteristics.

The development of the compact temperature controlled bath for calibration of temperature instruments. The principal of this development system is using liquid circulation. When the liquid flow through the heater (Sheath 3-mm) which is controlled by PID (Proportional Integral Derivative) mode in the tube, both the stability and the uniformity of the bath is not more than $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ to meet the need for the basic temperature calibration of International Temperature Scale 90 (ITS-90).

The completed system is including a motor, a temperature controller, a heater, a circulator. The main frame is made of stainless steel and the exterior dimension is 40cm x 35 cm x 35 cm (H x W X L)and the capacity is 1.2 liters. The bath is capable to controlled the liquid temperature range from 50°C to 200°C within 30 minutes ,the stability and the uniformity of the system not more than $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ which is according to The European Co-operation for Accreditation Guidelines on the Calibration of temperature Block Calibrators, Ea-10/13, to evaluate its efficiency includes stability, the vertical and the horizontal variation. After the physical characteristics were appraised by five experts. The result for the evaluation of all the four categories: safety, structure, usage and maintenance are as follows,

Safety: the experts verified safety of the a temperature controller and found it at a good level has average of 3.5

Structure : the experts verified assembled of the a liquid – contained temperature controller and found it at a good level has average of 3.5

Usage: the experts verified the usage the a liquid – contained temperature controller and found it at a good level has average of 3.9

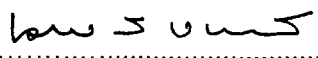
Maintenance: the expert verified that the maintenance was at a good level has average of 4.2

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การพัฒนาอ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุทกภัย

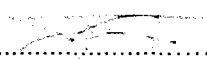
ของ
นายธีระพงษ์ สมประจบ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร หะวานนท์)
วันที่ 14 เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2547

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์


.....ประธาน
(อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)


..... กรรมการ
(อาจารย์ โอภาส สุขหวาน)


..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร.อุปวิทย์ สุคันธกุล)


..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ถนอมสิน ดิสภาพร)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดีจากความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ประธานกรรมการควบคุม และ อาจารย์ โอภาส สุขหวาน กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่เสียสละเวลาพร้อมทั้งให้คำแนะนำแก้ไขดูแลและให้ข้อเสนอแนะทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ สุดใจ เห่งสีไพร อาจารย์ ดร.อุวิทย์ สุวคันทรกุล อาจารย์ วิโรจน์ เพ็งโสภณที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบเค้าโครงปริญญานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ พร้อมแนวความคิดรวมถึงกำลังใจในการดำเนินงานวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.ลักษมี ปลั่งแสงมาศ คุณกำชัย สิงหาภิวัตน์ คุณอภิญา หล้าเตจา คุณศิริลักษณ์ ถาวรรัตน์ คุณกัณดา เหลืองหิรัญ จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการออกแบบสร้างเครื่องมือพร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้พื้นที่ของสถาบันฯ ในการพัฒนาสร้างและทดลองเก็บข้อมูลเครื่องมือที่ผู้วิจัยออกแบบสร้างขึ้น

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณนิสิตเพื่อนร่วมรุ่นอุตสาหกรรมศึกษาพิเศษ 8 ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนเป็นกำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัย ครู อาจารย์ เป็นที่เคารพรักอย่างสูง ที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจสนับสนุนการศึกษาอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ธีระพงษ์ สมประจบ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ภูมิหลัง.....	1
	จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
	ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
	ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
	นิยามศัพท์เฉพาะ	4
	กรอบแนวคิดของงานวิจัย.....	5
	สมมติฐานของงานวิจัย	6
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
	ระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ	7
	- การวัดอุณหภูมิแบบป้อนกลับ	7
	- การควบคุมวัดอุณหภูมิแบบป้อนกลับ.....	9
	- ตัวควบคุมอุณหภูมิ.....	11
	- ตัวส่งสัญญาณแบบวงรอบกระแส.....	17
	- การควบคุมแบบอัตโนมัติ.....	21
	- การควบคุมแบบ ON-OFF.....	23
	- การควบคุมแบบ PROPORTIONAL.....	24
	- การควบคุมแบบ PROPORTIONAL+DERIVATIVE	28
	- การควบคุมแบบ PROPORTIONAL+INTEGRAL+DERIVATIVE	29
	- การจุดมุ่งหมายการควบคุม.....	33
	- ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบความต้านทาน	34
	- การทำงานของโซลิตสเตตรีเลย์.....	45
	กระบวนการพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว.....	46
	- ฮีตเตอร์ความร้อน.....	46
	- มอเตอร์ไฟฟ้า	50
	- หลักการถ่ายเทความร้อน.....	53
	- ฉนวนกันความร้อน	56
	- วัสดุทนการกัดกร่อนที่เป็นโลหะ	60
	- ซิลิโคนเหลว.....	72

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
2 (ต่อ)	หลักการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ	75
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	77
3	วิธีดำเนินการวิจัย	81
	- ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	82
	- รับรู้ปัญหาของการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ	83
	- ออกแบบวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่างที่ใช้ในการพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	83
	- การพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว	84
	- ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบแบบและวงจร	89
	- การกำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	90
	- กำหนดระยะเวลาและสถานที่ในการพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	90
	- พัฒนาสร้างอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว	90
	- ทดสอบหาประสิทธิภาพอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	90
	- ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบประเมินลักษณะทางกายภาพ4ด้านของอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	94
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	97
	ผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบหาประสิทธิภาพของอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	97
	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินลักษณะทางกายภาพ 4ด้านของผู้เชี่ยวชาญ	121
5	สรุป อภิปรายผล ข้อเสนอแนะ	123
	สรุปผลการวิจัย	124
	อภิปรายผล	126
	ข้อเสนอแนะ	128
	บรรณานุกรม	129
	ภาคผนวก	132
	ภาคผนวก ก. หนังสือรับรองผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย	133
	ภาคผนวก ข. ประวัติผู้เชี่ยวชาญมูล	135
	ภาคผนวก ค. รายละเอียดเกี่ยวกับอ่วงควบคุมอุณหภูมิจากต่างประเทศ	137
	ภาคผนวก ง. คู่มือการใช้และภาพประกอบขั้นตอนพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	144
	ภาคผนวก จ. เครื่องมือและเอกสารมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพของอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	157
	ภาคผนวก ฉ. ใบประกาศนียบัตรรับรองของเครื่องมือทดสอบประสิทธิภาพอ่วงควบคุม	165
	ภาคผนวก ช. แบบประเมินเรื่องการพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิ	169
	ประวัติผู้วิจัย	172

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ความสัมพันธ์ของPV กับPB	25
2 ความสัมพันธ์ของPV กับPB	25
3 สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ และความต้านทานจำเพาะที่ 20°C.....	35
4 ความต้านทานของสายทองแดงที่ 25°C	40
5 เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานทองคำขาวอุตสาหกรรม $R(0) = 100.00 \Omega$ (-200°C ~0°C).....	42
6 .เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานทองคำขาวอุตสาหกรรม $R(0) = 100.00 \Omega$ (0°C ~180°C).....	43
7 ค่าการนำความร้อนของวัสดุต่างๆที่ 0°C	54
8 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุที่เป็นของไหลบางชนิด	55
9 ประเภทของวัสดุทนการกัดกร่อน	61
10 การทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุต่าง ๆ ต่อกรดอินทรีย์สาร.....	61
11 ค่าของศักย์ทางไฟฟ้า (potential of metal) ของโลหะต่างๆ ในสารละลายไฟฟ้า	62
12 โครงสร้างทางเคมีของ 18 -8 alloy.....	69
13 คุณสมบัติทางกลของ 18-8 alloy.....	69
14 โครงสร้างทางเคมีของ high nickel alloy.....	70
15 โครงสร้างทางเคมีของ POLOMET alloy.....	71
16 คุณสมบัติทางกลของ POLOMET alloy.....	71
17 การใช้งานของของเหลว	73
18 แบบประเมินผลการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว.....	93
19 แบบประเมินความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ.....	95
20 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน...50 °C.....	98
21 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 50 °C.....	99
22 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน...100 °C.....	100
23 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 100 °C.....	101
24 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน...150°C.....	102
25 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 150 °C.....	103
26 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน...200 °C	104
27 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 200 °C.....	105
28 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้งที่ 50 °C	106
29 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 50 °C.....	107
30 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้งที่ 100 °C	108
31 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 100 °C.....	109
32 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง150°C.....	110

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
33 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 150 °C.....	111
34 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง 200°C.....	112
35 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 200 °C.....	113
36 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา... 50°C	114
37 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 50°C.....	115
38 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา...100°C	115
39 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 100°C.....	116
40 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา 150°C	117
41 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 150°C.....	118
42 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 200 °C.....	118
43 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 200°C.....	120
44 สรุปผล การทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว.....	120
46 สรุปผลการประเมินคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ	122

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กรอบแนวคิดในการวิจัย	5
2 วงจรป้อนกลับในโพเทนชิโอมิเตอร์.....	8
3 บล็อกไดอะแกรมแสดงหน้าที่ต่าง ๆ ในภาพประกอบ 1	8
4 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิ	9
5 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเหลวในถังแบบวงจรปิด	10
6 แสดงเอาต์พุตที่มีเพียง 2 สถานะ และค่าอุณหภูมิจากการควบคุมแบบ เปิด – ปิด	12
7 การควบคุมแบบสัดส่วนเวลา.....	13
8 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบสัดส่วนต่อค่า V_E	14
9 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของกริยาควบคุมแบบ I	15
10 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของการควบคุมแบบ D	16
11 ตัวส่งสัญญาณแบบต่าง	19
12 ความผิดพลาดเนื่องจากวงรอบดินทำให้เกิดการลัดวงจร มิเตอร์ 2	20
13 การหาความต้านทานในสายที่ยอมให้มีได้	21
14 การควบคุมแบบอัตโนมัติ.....	22
15 การควบคุมแบบ ON-OFF	23
16 การควบคุมแบบ ON – OFF โดยมี Hysteresis	23
17 ตัวควบคุมแบบ Proportional.....	24
18 การเกิด Offset.....	26
19 ผลตอบสนองของ PID Control	27
20 ระบบที่ Oscillate และ Unstable เมื่อตั้งค่า T_i ต่ำเกินไป	27
21 สัญญาณควบคุมของ PD Control.....	28
22 ผลตอบสนองของ Proportional + Integral + Derivative (PID) Control.....	29
23 การควบคุมแบบ Fuzzy และ PID	30
24 Fuzzy Control	30
25 การทำ Auto-Tuning.....	31
26 การเปรียบเทียบ เอาต์พุต 4 – 20 mA กับ 0 – 100%.....	32
27 การเปรียบเทียบ เอาต์พุตรีเลย์ กับ 0 – 100%.....	32
28 RTD ทองคำขาวในอุตสาหกรรม	38
29 การต่อ RTD แบบ 2 สาย ไปยังวงจรวีทสโตนบริดจ์.....	40
30 การต่อ RTD แบบ 3 สาย	41
31 การต่อ RTD แบบ 4 สาย	41
32 ฮีตเตอร์	46
33 ฮีตเตอร์แบบจุ่ม	48
34 ประเภทของปั๊มตามรูปทรงของใบพัด	51

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35 ความเร็วจำเพาะ : Ns (ชนิดสูบทางเดียว).....	52
36 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่ประกอบขึ้นจากวัสดุหลายชนิด	57
37 ขีดจำกัดของอุณหภูมิที่ใช้งานของวัสดุจนทนกันความร้อน.....	59
38 กลไกของการกัดกร่อน	63
39 ใบพัดทำด้วยวัสดุ hastelloy C.....	63
40 หน้าประกอบของ Seat packing.....	64
41 การกัดกร่อนที่หน้าประกอบบริเวณที่ออกซิเจนเข้าไม่ถึง.....	64
42 การกัดกร่อนจากความเค้น	65
43 การกัดกร่อนจากการสัมผัสของโลหะต่างชนิด.....	65
44 การกัดกร่อนจากการสัมผัสของโลหะต่างชนิด.....	66
45 การกัดกร่อนจากควิเตชั่น	66
46 फिल्मภาพเฉื่อย	67
47 อีออน	68
48 ซิลิโคลนเหลว.....	72
49 โครงสร้างของของเหลว.....	74
50 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	82
51 ส่วนประกอบของอ่างควบคุมอุณหภูมิ.....	84
52 รูปตัดของอ่างควบคุมอุณหภูมิ.....	85
53 รูปวงจรไฟฟ้าควบคุมการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิ	85
54 การสร้างใบพัดตามขนาดของมอเตอร์.....	87
55 การทดสอบค่าอุณหภูมิแปรปรวนของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวตามแนวนอน.....	91
56 การทดสอบค่าอุณหภูมิแปรปรวนของ อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวตามแนวตั้ง.....	92
57 การทดสอบความคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว	94

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ระบบการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกมาจำหน่ายทั้งภายในและภายนอกประเทศ ในตลาดการค้าโลกจะต้องเปิดให้เป็นเสรีมากขึ้นแต่ยังคงมีมาตรการที่เป็นอุปสรรคทางการค้ากับระบบงานอุตสาหกรรมที่ยังไม่มีระบบงานมาตรฐานตามหลักสากลก็ไม่สามารถส่งสินค้าไปจำหน่ายยังประเทศต่าง ๆ ได้ จากสภาพที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ได้นำเอาระบบงานมาตรฐานสากลเข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมที่ใช้ในการผลิตสินค้า เช่น ระบบ ISO, ระบบมาตรฐานความปลอดภัยของอาหาร (GMP/HACCP) และระบบคุณภาพของห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ทั่วโลกยอมรับกัน(สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2529: 20)

เมื่อธุรกิจอุตสาหกรรมได้นำเอาระบบ ISO, GMP, HACCP และ ISO/IEC 17025 มาใช้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาต้องมี มาตรฐาน และ คุณภาพตาม เกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดย หลักเกณฑ์ในการจัดทำระบบคุณภาพจะต้องจัดทำ วัตถุประสงค์ขององค์กร, ขนาดและโครงสร้างขององค์กร, กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้เพื่อให้มั่นใจในคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ในระบบคุณภาพจะต้องมีการควบคุมในเรื่องของระบบและวิธีการทางเทคนิคการผลิตให้เป็นไปตามขั้นตอนของระบบคุณภาพที่กำหนด เช่น หลักการผลิตที่ใช้เครื่องมือและเครื่องจักรในการผลิต ต้องมีการใช้งานอย่างถูกต้องและมั่นใจในสภาพเครื่องมือ เครื่องจักร ว่าเมื่อใช้ในการผลิตแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาแล้วต้องได้มาตรฐานและมีคุณภาพซึ่งผู้ใช้เครื่องมือ เครื่องจักร จะมั่นใจได้อย่างไรว่าเครื่องมือ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีความถูกต้องและแม่นยำที่จะทำให้การผลิต ผลิตภัณฑ์ที่มีมาตรฐานและคุณภาพ ตามข้อกำหนดของระบบคุณภาพจะมีการกำหนดให้เครื่องมือ (Equipment) ที่ใช้ในระบบต้องมีการตรวจสอบความแม่นยำอยู่เสมอ นั่นก็คือการสอบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่เครื่องมือวัดทางด้านแรงดัน ด้านมวล และด้านอุณหภูมิ (สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น. 2543 : 12)

การสอบเทียบ (Calibration) เป็นวิธีการปฏิบัติตามขั้นตอนที่กำหนดไว้เพื่อทำการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องมือวัดกับเครื่องมือที่อ่านค่าได้ถูกต้องมากกว่า ซึ่งการสอบเทียบเครื่องมือที่มีความสำคัญคือให้มั่นใจว่าเครื่องมือมีความผิดพลาดในการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเสมอ เช่น ในการวัดอุณหภูมิของตู้บ่ม (Incubator) กำหนดให้บ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ 36°C แต่ตู้บ่มสามารถอ่านได้ 35°C นั่นก็หมายถึงเครื่องมือในการวัดอุณหภูมิอ่านค่าคลาดเคลื่อนไป 1 ซึ่ง ซึ่งโดยหลักเกณฑ์ของระบบคุณภาพกำหนดให้มีการสอบเทียบเครื่องมือและกำหนดเกณฑ์การสอบเทียบของความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือต่าง ๆ ดังนั้นการสอบเทียบอุณหภูมิของเครื่องมือก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและมีผลต่อการผลิตสินค้าให้ได้มาตรฐานและคุณภาพ (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ. 2542 : 1)

อนึ่งการสอบเทียบอุณหภูมิของตู้บ่มจะต้องอาศัยเครื่องวัดและตัวรับสัญญาณมาตรฐาน (Sensor) เป็นตัวบอกค่าความถูกต้อง ฉะนั้นต้องมีการทำการสอบเทียบตัวอ่านและตัวรับสัญญาณมาตรฐานก่อนเพื่อประเมิน

ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดก่อนว่าถูกต้องเพียงใดภายในเวลา 30 นาที เพราะตัวรับสัญญาณและเครื่องมือวัดมีเวลาในการทำการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างหลักในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ ตามมาตรฐานการสอบเทียบอุณหภูมิกำหนดเวลาอย่างต่อเนื่องภายในเวลาไม่น้อยกว่า 10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM E220 แต่ถ้าต้องการให้มีความเชื่อมั่นสูงเราจะต้องสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิให้เวลามากกว่า 10 นาที นั่นคือ เครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานหรืออ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมาใช้ในการสอบเทียบจะต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้มากกว่า 10 นาที แต่ถ้าใช้เวลามากไปจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงเช่นค่าเสียเวลาทั้งผู้สอบเทียบและผู้ให้บริการในการผลิตสินค้าขึ้นเพื่อให้ได้ความถูกต้องและได้ประโยชน์ควรใช้เวลาที่เหมาะสมประมาณ 30 นาที

เครื่องสร้างอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวช่วงใช้งาน 50°C - 200°C ที่ใช้ในการสอบเทียบที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีขนาดความจุของเหลว 6 ลิตร ถึง 23 ลิตร (ดูจากภาคผนวก ค) ไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปได้ทำให้ไม่สะดวกในการนำออกไปสอบเทียบอุณหภูมินอกสถานที่ และเครื่องมือวัดอุณหภูมิบางอย่างไม่สามารถจะนำมาสอบเทียบในห้องปฏิบัติการได้ เช่น เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ติดอยู่กับเครื่องจักรขนาดใหญ่ ถ้าจะถอดออกมาสอบเทียบจะต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงและเสียหายต่อการผลิตสินค้าคือผลิตไม่ทันตามกำหนดการส่งมอบ จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้โรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งมีการนำเข้าเครื่องสร้างอุณหภูมิ ชนิดใช้แท่งโลหะเป็นตัวนำความร้อนหรือ DRY BLOCK ซึ่งมีขนาดประมาณ $35.1 \times 56.5 \times 18.0$ (HxWxD) (ดูจากภาคผนวก ค) จากต่างประเทศทำให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย มาใช้ในการสอบเทียบนอกสถานที่ทำให้เกิดปัญหาหลายอย่างตามมา เช่น เสียเปรียบทางด้านดุลย์การค้า ในการนำเข้าเครื่องสร้างอุณหภูมิชนิดใช้แท่งโลหะเป็นตัวนำความร้อน หรือ DRY BLOCK และคุณภาพการใช้งานไม่เหมาะสมกับงานบางชนิดเพราะว่าเครื่องสร้างอุณหภูมิชนิดใช้แท่งโลหะเป็นตัวนำความร้อนที่นำมาใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิมีโครงสร้างการทำงานคือ ตัวกลางที่ใช้ในการนำความร้อนเป็นแท่งโลหะจะเป็นรูเพื่อใส่แท่งเทอร์โมคัปเปิลขนาดต่าง ๆ ที่ จะทำการสอบเทียบ จะต้องใช้แท่งโลหะนำความร้อนหลาย ๆ แท่ง ทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งานเพราะการควบคุมอุณหภูมิกว่าจะต้องใช้เวลานานมาก และอุณหภูมิภายในก็ไม่สม่ำเสมอทั่วกันทุกจุดที่ใช้งาน (Working Area) ทำให้ไม่สามารถใช้กับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความละเอียดเช่น อุตสาหกรรมอาหารจะต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นเกณฑ์ข้อกำหนดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามมาตรฐานสากล (ITS 90) ที่ใช้สำหรับห้องปฏิบัติการตรวจสอบอาหาร ฉะนั้นเครื่องมือและ อุปกรณ์ที่จะเป็นมาตรฐานในการสอบเทียบจะต้องมีค่าความละเอียดมากกว่า 3-10 เท่าของเกณฑ์การใช้งาน ตามข้อกำหนดของ UKAS คือจะต้องมีค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ นั่นหมายความว่า เครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานจะต้องมีค่าการกระจายความร้อนไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่เครื่องสร้างอุณหภูมิมิแบบโลหะนำความร้อนของต่างประเทศ (ดูจากภาคผนวก ค) จะมีอุณหภูมิภายในสม่ำเสมอทั่วกันทุกจุดการใช้งาน

จากสภาพปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวขนาดใกล้เคียงกับเครื่องสร้างอุณหภูมิ ชนิดใช้แท่งโลหะเป็นตัวนำความร้อนหรือ DRY BLOCK ที่สามารถสร้างอุณหภูมิตั้ง 50°C ถึง 200°C ให้คงที่ สม่ำเสมอ ทั่วทุกจุดการใช้งาน และสามารถเคลื่อนย้ายได้เพื่อมาทดแทนเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบโลหะนำความร้อนที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยให้มี ประสิทธิภาพการแปรปรวนของอุณหภูมิ $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ในเวลาไม่เกิน 30 นาทีตามมาตรฐานวิธีการทดสอบเครื่องสร้างอุณหภูมิ EA-10/13

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

ความสำคัญของงานวิจัย

1. สามารถนำไปใช้ในงานสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิตามเกณฑ์มาตรฐานการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ
2. สามารถทดแทนการนำเข้าของเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานจากต่างประเทศ

ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยครั้งนี้บรรลุความมุ่งหมายที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตไว้ดังนี้

1. พัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่สามารถเคลื่อนย้ายได้
 - 1.1 ด้านบนของเครื่องติดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับกวนของเหลวประมาณ 15 วัตต์
 - 1.2 ภายในของของเหลวมีขดลวดความร้อนประมาณ 511 วัตต์
 - 1.3 ของเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนได้แก่ น้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) มีประมาณ 1.2 ลิตร
 - 1.4 มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นระบบ Proportional Integral Derivative (PID) controller มีความ

ละเอียด 0.1 °C

2. ตัวแปรที่ศึกษา

2.1 ประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวตามมาตรฐานการสอบเทียบเครื่องสร้างอุณหภูมิของยุโรป (EA-10/13)

- 2.1.1 สร้างอุณหภูมิ 50 °C ถึง 200 °C ให้คงที่ สม่าเสมอ ในเวลาไม่เกิน 30 นาที
- 2.1.2 ค่าการแปรปรวนของอุณหภูมิไม่เกิน ± 0.05 °C

2.2 ลักษณะทางกายภาพ 4 ด้านของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมีดังนี้

- 2.2.1 ด้านความปลอดภัย
- 2.2.2 ด้านโครงสร้าง
- 2.2.3 ด้านการใช้งาน
- 2.2.4 ด้านการบำรุงรักษา

นิยามศัพท์เฉพาะ

การพัฒนาอ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลวที่ใช้งานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุทกภัย

หมายถึง การปรับปรุงคุณลักษณะรูปร่างโครงสร้าง วงจรและอุปกรณ์ไฟฟ้าให้มีความสัมพันธ์กันเพื่อให้สามารถใช้เครื่องสอบเทียบอุทกภัยที่มีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบอุทกภัย

หมายถึง เครื่องมือที่สามารถพิจารณาหาข้อมูลความถูกต้องของอุทกภัยชนิดต่าง ๆ ว่ามีคุณภาพได้ตามมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่

ประสิทธิภาพ อ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลว

หมายถึง ความสามารถในการปรับอุทกภัย 50°C ถึง 200°C และคุณสมบัติการควบคุมอุทกภัยแปรปรวนไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ภายในเวลาไม่เกิน 30 นาที

อ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลว หมายถึง เครื่องสร้างอุทกภัยที่บรรจุของเหลวซึ่งมีอุทกภัยคงที่แบบสม่ำเสมอ ใช้สำหรับงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุทกภัย

ลักษณะทางกายภาพของอ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลว

หมายถึง การประเมินด้านความปลอดภัย ด้านกายภาพ ด้านการใช้งาน และ ด้านการบำรุงรักษา ซึ่งประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่านว่าผลการออกแบบและสร้างอ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลวมีความสามารถทำงานได้จริงซึ่งประกอบด้วยสมรรถนะต่าง ๆ ดังนี้

- ด้านความปลอดภัย

หมายถึง มีระบบป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าผิดปกติหรือจากการใช้งาน

- ด้านโครงสร้าง

หมายถึง ความสามารถในการถอดและแยกอุปกรณ์ของเครื่องได้ ความแข็งแรงของโครงสร้าง การจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

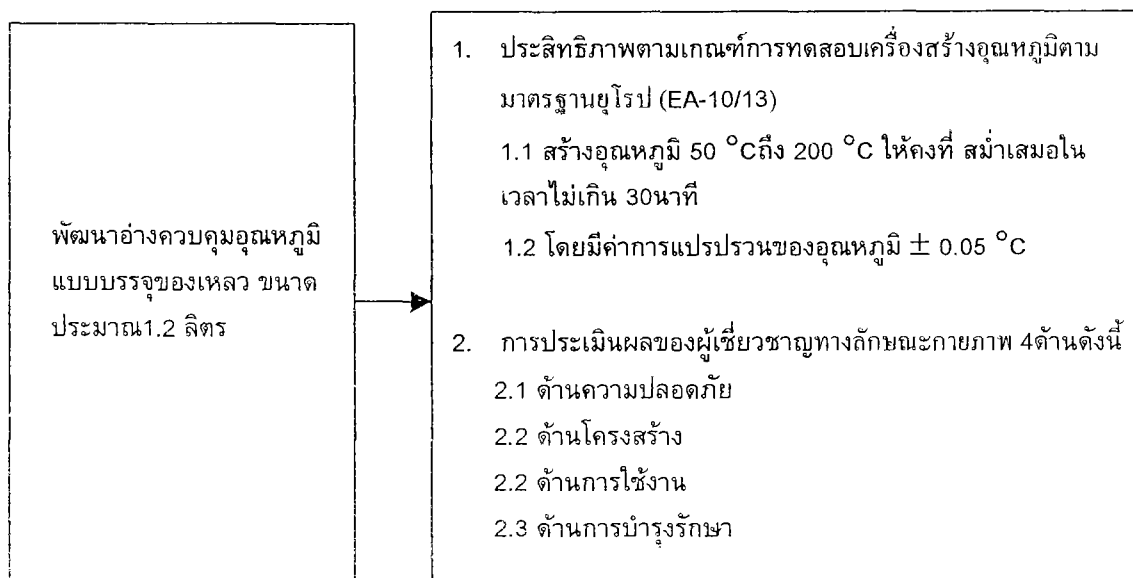
- ด้านการใช้งาน

หมายถึง ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องได้อย่างเหมาะสมความสะดวกในการเคลื่อนย้ายทำได้ง่าย

- ด้านการบำรุงรักษา

หมายถึง อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาซื้อได้ง่าย มีจุดตรวจซ่อมบำรุงน้อยและมีความสะดวกในการประกอบและถอดชิ้นส่วนต่างๆ

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

สมมุติฐานในการวิจัย

อ้างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐานการสอบเทียบเครื่องสร้างอุณหภูมิของยุโรป (EA-10/13) และมีลักษณะทางกายภาพอยู่ในเกณฑ์ดี

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมีจุดมุ่งหมายเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งจะนำไปใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ในการจัดสร้าง จะต้องศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อ ดังต่อไปนี้

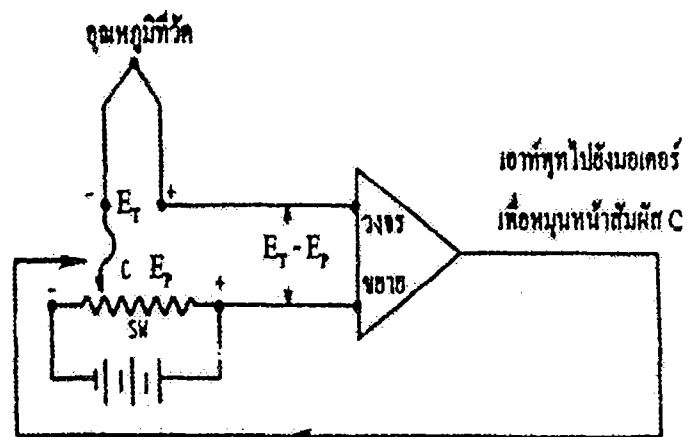
1. ระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Instrumentation and Control)
2. กระบวนการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว
3. การสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ
4. ประสิทธิภาพอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Instrumentation and Control)

1.1 การวัดอุณหภูมิแบบป้อนกลับ

ภาพประกอบ 2 แสดงแผนภาพการวัดค่าแรงดันเทอร์โมคัปเปิลในเครื่องบันทึกสัญญาณแบบโพเทนชิโอมิเตอร์ แรงดันจากเทอร์โมคัปเปิล (E_T) จะมีขั้วที่ตรงกันข้ามกับแรงดันที่เกิดจากกระแสผ่านลวดต้านทาน SW ของโพเทนชิโอมิเตอร์ (E_P) ถ้าหากทำการปรับด้วยมือ โดยการปรับหน้าสัมผัส C จนกระทั่งแรงดันทั้งสองเท่ากัน (ขั้วตรงข้ามกัน) ซึ่งจะแสดงโดยการที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในกัลวานอมิเตอร์ที่ใส่เข้าไปในวงจร ในกระบวนการปรับด้วยมือนี้ เราจะต้องปรับหน้าสัมผัส C ไปทางซ้ายหรือขวามือ จนกระทั่งเกิดสภาวะสมดุล กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า เราจะต้องตรวจจับสัญญาณแตกต่าง คือความแตกต่างระหว่างแรงดันจากเทอร์โมคัปเปิลกับแรงดันตกคร่อมลวดต้านทานของโพเทนชิโอมิเตอร์ ($E_T - E_P$) และปรับโพเทนชิโอมิเตอร์จนกระทั่งสัญญาณแตกต่างเข้าสู่ศูนย์ จะเห็นว่าเราผู้ปรับจะเป็นส่วนหนึ่งของวงรอบการควบคุม เพราะเราเป็นผู้อ่านค่ากระแส (ทิศทาง) และทำกริยาแก้ที่ต้องการ ซึ่งหมายถึงเราทำหน้าที่เป็นตัวย่อยเทียบ และตัวแก้

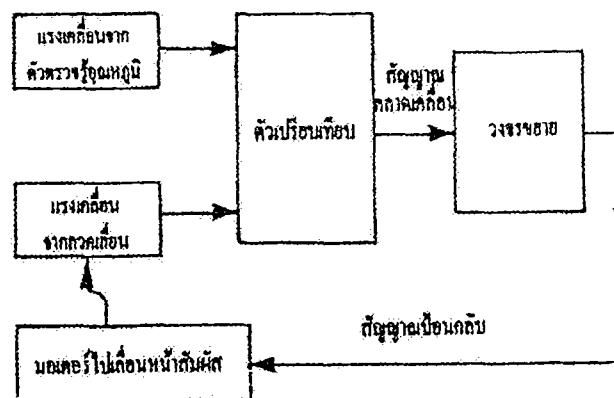
โดยการเพิ่มวงจรขยาย (Operational Amplifier) ซึ่งจะขยายสัญญาณแตกต่าง แล้วให้เอาท์พุทที่ต่อไปป้อนให้แก่มอเตอร์ซึ่งจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาตามสัญญาณแตกต่างที่ถูกขยาย การหมุนของมอเตอร์ทำให้หน้าสัมผัส C ของลวดเลื่อนเคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือขวา เมื่อสอบเทียบลวดเลื่อนจะสามารถแสดงค่าของแรงดันที่ตั้งไว้ได้ ถ้าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนแปลงไปก็จะเกิดสัญญาณแตกต่าง ซึ่งจะถูกลดขยายไปทำให้เกิด การเลื่อนตำแหน่งของหน้าสัมผัส C เพื่อลดสัญญาณแตกต่างให้เป็นศูนย์



ภาพประกอบ 2 วงรอบป้อนกลับในโพเทนชิโอมิเตอร์

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:122)

ภาพประกอบ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงรอบป้อนกลับของภาพประกอบ 2 กรณีนี้
 กริยาป้อนกลับจะเรียกว่าเป็นการป้อนกลับแบบลบ (Negative) ซึ่งหมายถึงถ้าหากการตั้งหน้าสัมผัส C
 ทำให้ E_p สูงเกิน E_T การป้อนกลับจะทำให้ E_p มีค่าลดลง

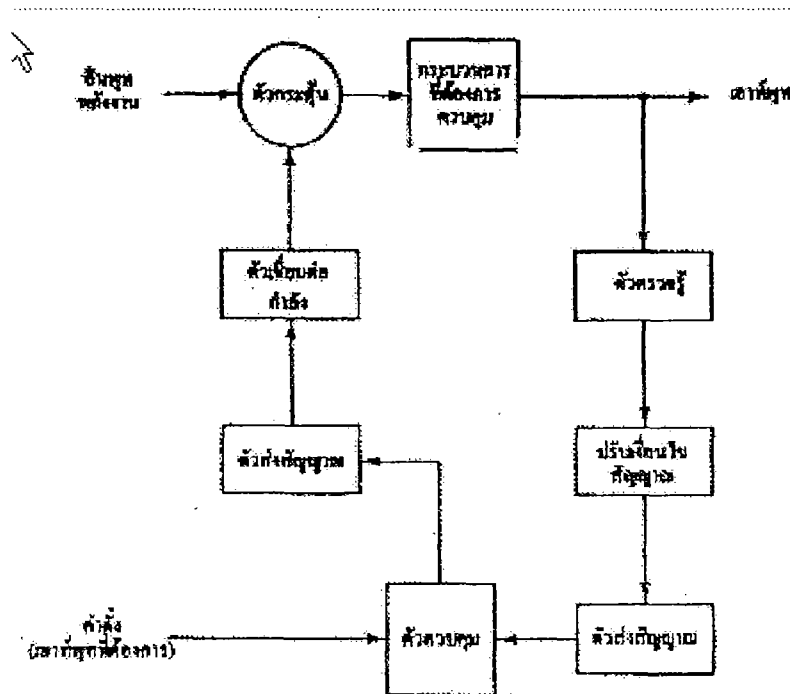


ภาพประกอบ 3 บล็อกไดอะแกรมแสดงหน้าที่ต่าง ๆ ของวงรอบป้อนกลับในโพเทนชิโอมิเตอร์

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:122)

1.2 การควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ

วงจรวัดอุณหภูมิในภาพประกอบ 3 ถือได้ว่าเป็นรูปแบบหนึ่งของการควบคุมแบบป้อนกลับ แต่เป็นการควบคุมเพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิของตัวเทอร์โมคัปเปิล แต่ในหัวข้อนี้จะพูดถึงระบบควบคุมอัตโนมัติที่ทำให้กระบวนการ (Process) มีอุณหภูมิตามที่ต้องการ ระบบควบคุมอุณหภูมินี้มีบล็อกไดอะแกรมตามภาพประกอบ 4

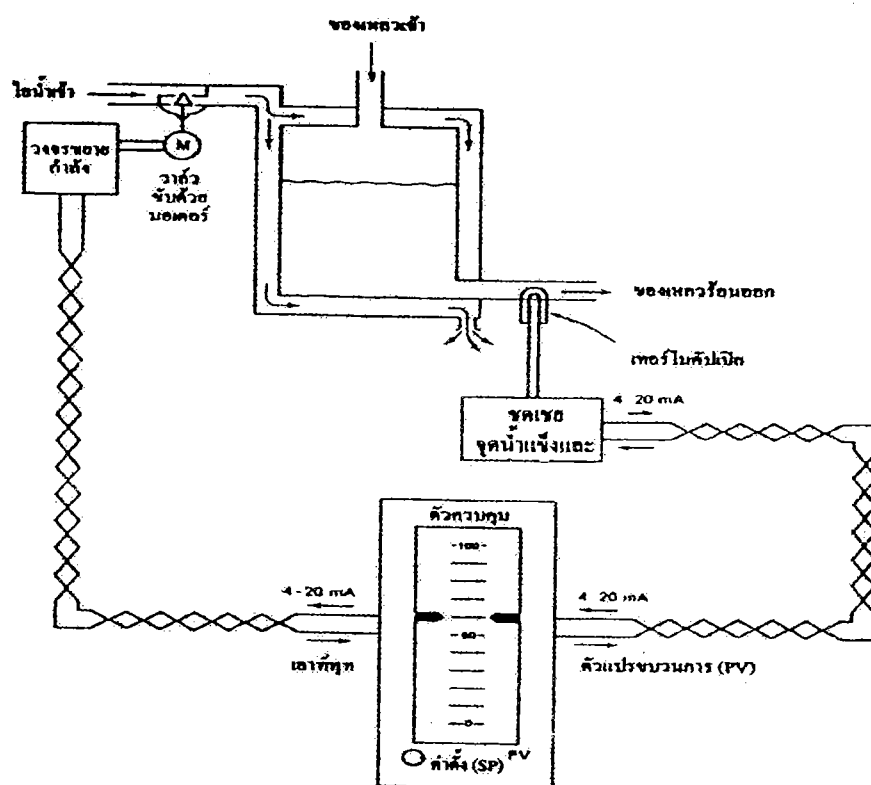


ภาพประกอบ 4 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมอุณหภูมิ

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:123)

ภาพประกอบ 4 แสดงตัวอย่างการควบคุมอุณหภูมิของของเหลวในถัง เริ่มแรกจะต้องมีการวัดอุณหภูมิ ซึ่งในรูปทำโดยเทอร์โมคัปเปิลที่อยู่ภายในปลอกป้องกัน เอาท์พุทจากเทอร์โมคัปเปิลเป็นแรงดันที่มีค่าไม่กี่มิลลิโวลต์ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิรายรอบและอุณหภูมิที่กำลังวัด วงจรชดเชยจุดน้ำแข็ง และส่งผ่านสัญญาณจะทำหน้าที่ชดเชยอุณหภูมิรายรอบ ขยายและแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยที่เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ค่าต่ำสุด เอาท์พุทของตัวส่งสัญญาณจะเป็น 4 mA เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ค่าสูงสุด ตัวส่งสัญญาณจะให้เอาท์พุทเป็น 20 mA

กระแสนาลอกจะถูกส่งผ่านคู่สายบิดเกลียว มีการซีลด์ไปยังตัวควบคุม (Controller) ปกติ ตัวควบคุมจะอยู่ในห้องควบคุม ซึ่งอาจจะอยู่ห่างจากจุดวัดเป็นร้อยเมตร ตัวควบคุมจะเปรียบเทียบตัวแปรกระบวนการ (กรณีนี้คืออุณหภูมิ) กับค่าที่ตั้งเอาไว้ (Set Point) ทำการคำนวณค่าเอาต์พุตค่าใหม่แล้วส่งผ่าน (เป็นกระแส 4 – 20 mA) ไปยังตัวกระตุ้น สัญญาณนี้จะถูกขยายและนำไปขับมอเตอร์ มอเตอร์จะหมุนเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของวาล์วปรับปริมาณของไอน้ำที่นำไปให้ความร้อนแก่ของเหลว ในระหว่างการควบคุมอาจจะมีการรบกวน เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันของไอน้ำ การเปลี่ยนอุณหภูมิขาเข้าของของเหลว หรือ การเปลี่ยนระดับของของเหลวในถัง ตัวควบคุมจะต้องเปลี่ยนเอาต์พุตเพื่อรักษาให้อุณหภูมิของของเหลวในถังยังคงเท่ากับค่าที่ตั้งเอาไว้เสมอ



ภาพประกอบ 5 ระบบควบคุมอุณหภูมิของเหลวในถังแบบวงจรมอด

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:124)

1.3 ตัวควบคุมอุณหภูมิ

หน้าที่พื้นฐานของตัวควบคุมอุณหภูมิคือ ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้กับค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ แม้ว่าตัวควบคุมเป็นเพียงส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุม แต่ในการเลือกตัวควบคุมที่เหมาะสมจะต้องวิเคราะห์ถึงระบบทั้งหมด โดยพิจารณาแต่ละข้อต่อไปนี้

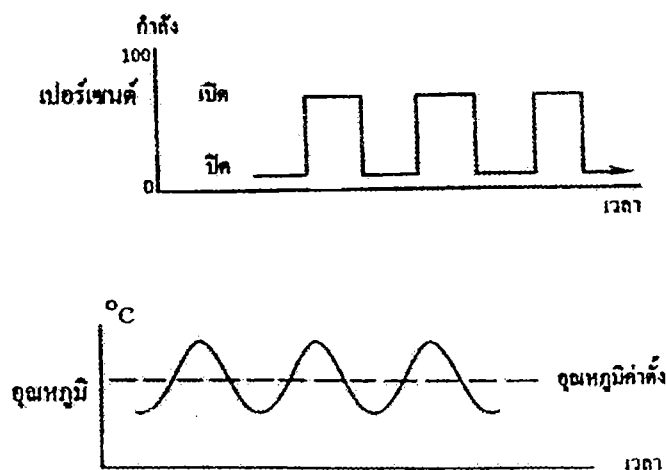
1.3.1. ชนิดของตัวตรวจวัดที่ใช้ เช่น RTD และ เทอร์โมคัปเปิล เป็นต้น การเลือกต้องพิจารณาพิสัยของอุณหภูมิที่ต้องการ การแยกชุด ความแม่นยำ ของการวัดที่ต้องการ รายละเอียดเกี่ยวกับตัวตรวจวัดได้กล่าวถึงแล้วในแต่ละบทที่ผ่านมา

1.3.2. ตำแหน่งของตัวตรวจวัด ตำแหน่งที่ถูกต้องของตัวตรวจวัดเทียบกับงานและแหล่งกำเนิดความร้อน จะมีความสำคัญที่สุดสำหรับการควบคุมที่ดี ถ้าทั้งสามอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจะสามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีความแม่นยำถึงขีดจำกัดของตัวควบคุมได้โดยไม่ยาก อย่างไรก็ตามถ้าแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ห่างจากงาน แล้ววางตัวตรวจวัดที่ตำแหน่งที่หลากหลายระหว่างนั้น จะทำให้ได้ความแม่นยำของการควบคุมที่แตกต่างกันค่อนข้างกว้าง

ก่อนเลือกตำแหน่งของตัวตรวจวัด จะต้องหาว่าความร้อนที่ต้องการจะเป็นแบบคงค่าหรือแปรไปเรื่อย ๆ ถ้าความร้อนที่ต้องการเป็นลักษณะคงตัว การวางตำแหน่งตัวตรวจวัดใกล้กับแหล่งกำเนิดความร้อน จะรักษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ขึ้นงานให้ต่ำสุด แต่ถ้าความร้อนที่ต้องการเป็นลักษณะแปรไป การวางตำแหน่งตัวตรวจวัดใกล้ชิ้นงาน จะทำให้ตัวตรวจวัดสามารถรับรู้ถึงการเปลี่ยนความต้องการความร้อนได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามเนื่องจากจะมีการล่าช้าเชิงความร้อน (Thermal Lag) ระหว่างตัวแหล่งกำเนิด และตัวตรวจวัดสูงขึ้น จะเกิด Overshoot หรือ Undershoot มากขึ้น ทำให้การแปรของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดจะกว้างขึ้น การขยายนี้จะลดลงโดยเลือกอัลกอริทึมการควบคุมให้ดีขึ้น เช่น เป็นแบบ PID

1.3.3 อัลกอริทึม (โหมด) การควบคุม จะหมายถึง วิธีที่ตัวควบคุมพยายามทำให้ อุณหภูมิของระบบสู่ระดับที่ต้องการ วิธีสามัญในการควบคุม คือ

1.3.3.1 แบบเปิด – ปิด (On – Off) เป็นวิธีการควบคุมแบบง่ายที่สุด เอาท์พุทจะมีเพียงเปิด (On) หรือ ปิด (Off) ไม่มีสถานะระหว่างกลาง ตัวควบคุมแบบเปิด – ปิด จะสวิตช์เอาท์พุทเพียงเมื่อค่าอุณหภูมิที่วัดข้ามค่าที่ตั้งไว้ สำหรับการควบคุมแบบให้ความร้อน เอาท์พุทจะเปิดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ เพราะว่าอุณหภูมิข้ามค่าที่ตั้งไว้เพื่อจะเปลี่ยนสถานะของเอาท์พุท ดังนั้น อุณหภูมิของกระบวนการจะมีลักษณะแกว่งอย่างต่อเนื่อง ตามภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงเอาต์พุตที่มีเพียง 2 สถานะ และค่าอุณหภูมิจากการควบคุมแบบ เปิด – ปิด

(เอก ไชยสวัสดิ์, 2542:126)

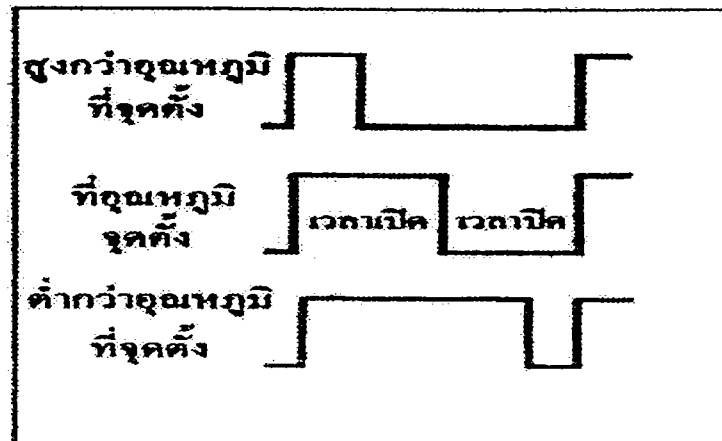
ในกรณีการแกว่งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จะต้องมีการใส่ฮิสเทรีซิส (Hysteresis) เข้าไปเพื่อป้องกันการเสียหายของคอนแทกเตอร์และวาล์ว จากการที่ต้องเปิด – ปิด อย่างรวดเร็ว

ปกติจะใช้การควบคุมแบบ เปิด – ปิด ในที่ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมที่ละเอียดเที่ยงตรง ในที่ซึ่งมวลของระบบมากในลักษณะที่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้ามาก หรือใช้เป็นตัวเตือน (Alarm) เมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าขีดจำกัดที่กำหนด

1.3.3.2 แบบสัดส่วน (Proportion) การควบคุมแบบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการจัดการแกว่ง (Cycling) ซึ่งเกิดขึ้นในการควบคุมแบบ เปิด – ปิด ขณะที่อุณหภูมิเข้าใกล้ค่าตั้ง ตัวควบคุมแบบนี้จะลดกำลังเฉลี่ยที่จ่ายให้แก่ตัวกำเนิดความร้อน ทำให้ความร้อนจากตัวกำเนิดลดลง และค่าจะไม่พุ่งเกินค่าตั้ง แต่ จะเข้าใกล้และรักษาอุณหภูมิที่เสถียร กริยาสัดส่วนนี้อาจทำได้โดยการเปิด – ปิด เอาท์พุทในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยแปรอัตราส่วนของเวลาเปิดกับเวลาปิด เพื่อควบคุมอุณหภูมิ วิธีนี้เรียกว่า วิธีสัดส่วนเวลา

(Time Proportional) คาบเวลาระหว่างสองช่วงเปิดที่ติดกัน จะเรียกว่า Cycle Time หรือ Duty Cycle กริยาสัดส่วนจะเกิดขึ้นภายในแถบสัดส่วน (Proportional Band) บริเวณค่าที่ตั้งภายนอกแถบนั้น ตัวควบคุมจะทำหน้าที่เป็นแบบเปิด – ปิด คือเอาท์พุทจะเปิดเต็มที่ (ที่ต่ำกว่าแถบ) และปิดเต็มที่ (ที่สูงกว่าแถบ) อย่างไรก็ตาม ที่ภายในแถบสัดส่วน เอาท์พุทจะเปิดหรือปิดในอัตราส่วนของความแตกต่างของค่าวัดจากค่าที่ตั้ง (ดังภาพประกอบ 7) สำหรับที่ค่าอุณหภูมิที่ตั้ง (ตรงกลางของแถบสัดส่วน) อัตราส่วน เปิด : ปิด ของเอาท์พุทจะเป็น 1 : 1 นั่นคือ เวลาเปิดจะเท่ากับเวลาปิด ถ้าอุณหภูมิแตกต่างจากค่าที่ตั้งไว้ เวลาปิด และเวลาเปิดจะแปรไปเป็นสัดส่วนของค่าอุณหภูมิที่แตกต่าง ถ้าอุณหภูมิที่วัดต่ำกว่าค่าตั้ง เอาท์พุทจะมีช่วงเวลาเปิดยาวกว่าปิด ถ้าอุณหภูมิที่วัดสูงกว่าค่าที่ตั้ง เอาท์พุทจะมีช่วงเวลาปิดยาวกว่าเปิด

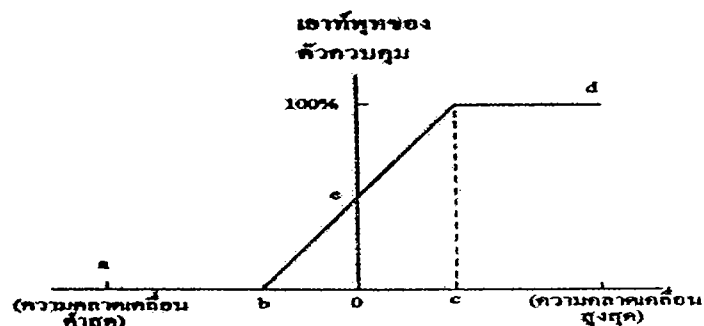
ปกติจะกำหนดแถบสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของพัลส์อินพุท บางทีอาจเรียกว่า ค่าอัตราขยาย (Gain) ซึ่งเป็นส่วนกลับของแถบ เอาท์พุทของตัวควบคุมแบบนี้จะเป็นแบบรีเลย์ ไฟฟากล หรือสารกึ่งตัวนำ



ภาพประกอบ 7 การควบคุมแบบสัดส่วนเวลา
(เอก ไชยสวัสดิ์, 2542:127)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนอีกแบบ คือ แบบที่ให้เอาต์พุตสัดส่วนที่เป็นแบบอนาลอก คือ ให้เอาต์พุทเป็นกระแส 4 ถึง 20 mA หรือแรงดัน 1 ถึง 5 โวลท์กระแสตรง ตัวควบคุมแบบนี้จะให้เอาต์พุทเป็นระดับขนาดที่แปรไป ซึ่งจะต่างกับแบบ Time Proportion ที่ให้เอาต์พุทเป็นเวลา เปิด ปิด ที่แปรไป

ภาพประกอบ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_E (ค่าจากการวัดลบด้วยค่าที่ตั้งไว้) การควบคุมแบบนี้จะเหมือนกับการควบคุมแบบเปิด - ปิด ในกรณี V_E มีค่ามาก ถ้า V_E เป็นลบมาก จะทำให้เอาต์พุทของตัวควบคุมปิดหมด (เช่นที่จุด a) อย่างไรก็ตาม เมื่อ V_E อยู่ในช่วง b ถึง c ตัวควบคุมจะตอบสนองในลักษณะเป็นเชิงเส้น ค่า V_E ที่เปลี่ยนแปลงน้อย ๆ รอบค่าศูนย์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุทของตัวควบคุมอย่างเป็นสัดส่วน ซึ่งทำให้ตัวควบคุม ควบคุมกระบวนการได้ละเอียดขึ้น



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบสัดส่วนต่อค่า V_E

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:128)

$$K_p = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุม}}{\text{การเปลี่ยนของ } V_E}$$

ค่าที่สำคัญสำหรับตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือ ค่าแถบสัดส่วน (Proportional Band) ซึ่งนิยามว่า การเปลี่ยนแปลงใน V_E เป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าสูงสุด ที่ทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนจากปิดเต็มที่ เป็นเปิดเต็มที่ เช่น 10% PB หมายถึง ถ้า V_E เปลี่ยนแปลงไป 10% ของการเปลี่ยนแปลง V_E เต็มสเกล จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต 100% จากภาพประกอบ 8 คำนี้อธิบาย

$$out = K_p V_E$$

$$= \frac{100\%}{10\%} = 10$$

หรือ

มีข้อสังเกต ขณะ $V_E = 0$ เอาต์พุตของตัวควบคุมจะมีค่าอยู่ค่าหนึ่ง คือค่าที่จุด $c = V_0$

$$= \frac{1}{PB}$$

ข้อได้เปรียบประการหนึ่งของการควบคุมแบบสัดส่วน ก็คือ ใช้งานง่าย ผู้ควบคุมอาจจะต้องทำการปรับเล็กน้อย (Manual Reset) เพื่อให้ค่าอุณหภูมิเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้เมื่อเวลา Initial Startup หรือ ถ้าเงื่อนไขขอบกระบวนการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ระบบที่เกิดการแกว่งของอุณหภูมิกว้าง ควรจะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (ซึ่งอาจเป็นแบบสัดส่วนอย่างง่าย หรือแบบ PID ขึ้นอยู่กับกระบวนการ และความเที่ยงตรงที่ต้องการ) กระบวนการที่มีเวลาล่าช้าหรือมีอัตราการเพิ่มสูงสุดค่ามาก (เช่น Heat Exchanger) ต้องการแถบสัดส่วนที่กว้างเพื่อกำจัดการออสซิลเลท แถบสัดส่วนที่กว้างเมื่อมีการเปลี่ยนโหลด ทำให้มีค่าออฟเซต

ใหญ่ เพื่อกำจัดออฟเซตเหล่านี้ เราสามารถใช้การรีเซตอัตโนมัติ (Integral) เราจะใช้กริยา Derivative กับกระบวนการที่มีเวลาหน่วงยาว เพื่อเร่งการกลับสู่ค่าที่ตั้งไว้ ภายหลังจากมีการรบกวนกระบวนการ

1.3.3.3 แบบ PID (Proportional + Integral + Derivative) การควบคุมแบบนี้ รวมเอาการควบคุมแบบสัดส่วนเข้ากับการปรับ 2 ชนิดเพิ่มเติมเข้าไป (Integral, Derivative) เพื่อช่วยให้ตัวควบคุมสามารถชดเชยการเปลี่ยนแปลงในระบบได้อย่างอัตโนมัติ

กริยา Integral จะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า (Automatic Reset) ตามหน้าที่ ที่จะกำจัดความคลาดเคลื่อนตกค้างในกรณีการควบคุมแบบสัดส่วน กริยาอินทิกรัล จะให้อัตราการเปลี่ยนแปลง (Rate of Change) เอาท์พุทเป็นส่วนกับ V_E

$$\frac{dv_{out}}{dt} = K_I V_E$$

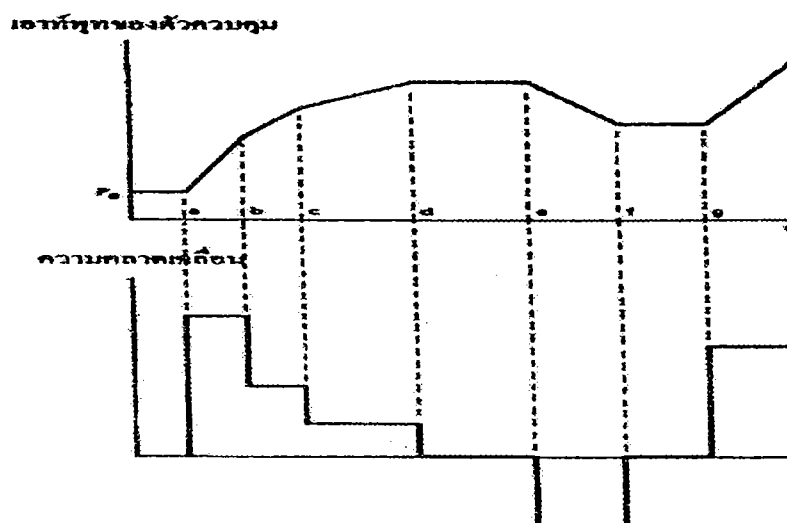
หรือ

$$out = K_I \int V_E dt + V_O$$

ดังนั้น ถ้า V_E มีค่ามาก เอาท์พุทจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเพื่อแก้ความแตกต่าง ถ้า V_E มีค่าน้อยลง เอาท์พุทของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงช้าลง การเปลี่ยนแปลงจะกระทำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง V_E เข้าสู่ศูนย์

การเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุทจะเข้าสู่ศูนย์ด้วย ซึ่งหมายถึง ตัวควบคุม จะรักษาค่าเอาท์พุทนี้ไว้

ภาพประกอบ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทของกริยาควบคุมแบบอินทิกรัล



ภาพประกอบ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทของกริยาควบคุมแบบ I

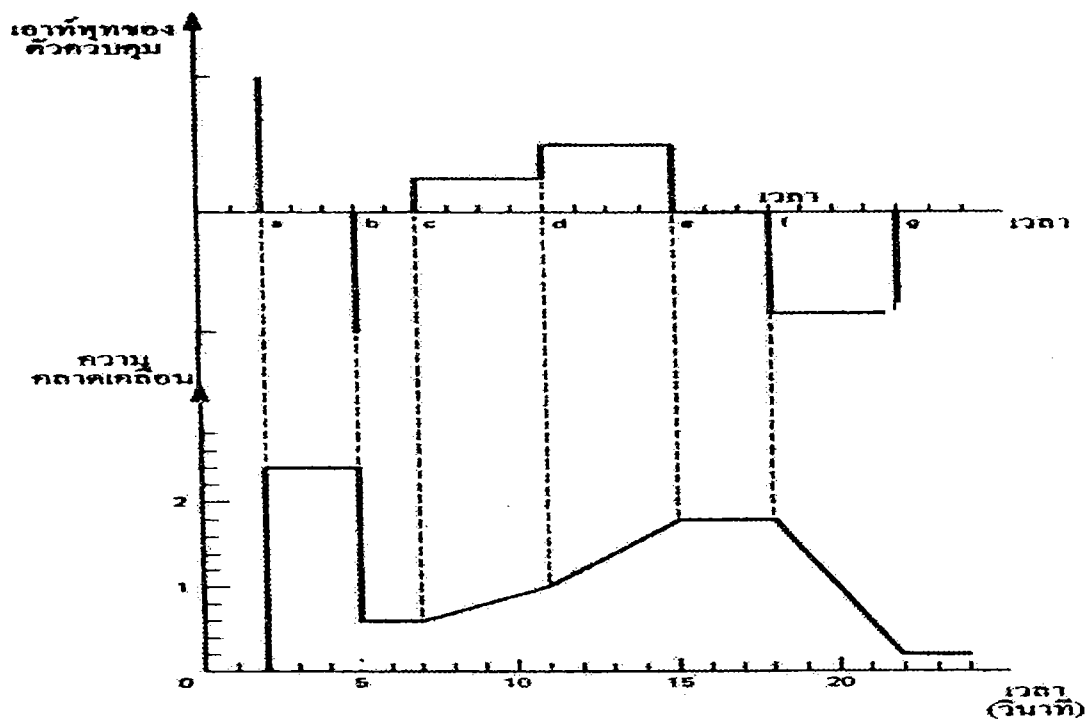
(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:130)

กริยาอนุพันธ์ (Derivative) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กริยาอัตรา (Rate) เนื่องจากเอาท์พุทของตัวควบคุมแบบนี้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนของ V_E

$$out = K_D \frac{dV_E}{dt}$$

ดังนั้น ถ้า V_E มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เอาท์พุทของตัวควบคุมจะมีค่ามาก เช่น ในกรณีที่ V_E เปลี่ยนแปลงลักษณะเป็นขั้น เอาท์พุทของตัวควบคุมจะเข้าสู่ค่าอิมพัลส์ ภาพประกอบ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทของกริยาควบคุมแบบอนุพันธ์

มีข้อสังเกตคือ กริยาแบบนี้จะไม่สามารถใช้โดยลำพัง คือ จะต้องใช้ร่วมกับการควบคุมชนิดอื่น เนื่องจากถ้าหากไม่มีการเปลี่ยนแปลง V_E เอาท์พุทจะเป็นศูนย์ ดังนั้น แม้ V_E จะมีค่ามากแต่คงที่ (หมายถึง มีความแตกต่างค่ามากระหว่างค่าวัด กับค่าที่ตั้งไว้) แต่จะไม่มีเอาท์พุทเนื่องจากกริยาอนุพันธ์นี้



ภาพประกอบ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทของการควบคุมแบบ D

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:131)

ตัวควบคุมแบบ PID จะมีอัลกอริทึมการควบคุมเป็น

$$out = K_P V_E + K_I \int V_E dt + K_D \frac{dV_E}{dt} + VO$$

การควบคุมแบบ PID จะให้การควบคุมที่แม่นยำ และเสถียรกว่าตัวควบคุมแบบ เปิด – ปิด หรือแบบสัดส่วน การควบคุมแบบนี้จะเหมาะที่สุดกับระบบที่มีมวลค่อนข้างต่ำ (ซึ่งจะมีปฏิกิริยาตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เพิ่มเข้าไปในระบบ) นอกจากนี้จะใช้ในระบบที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงบ่อย ตัวควบคุมจะชดเชยปริมาณพลังงานที่มีหรือมวลที่จะควบคุมเนื่องจากการเปลี่ยนค่าที่ตั้ง (Set point) บ่อยครั้ง ปกติจะต้องตั้ง (Tune) ค่า KP, KI, KD ที่เหมาะสม สำหรับแต่ละกระบวนการ ตัวควบคุมสมัยใหม่จะมีความสามารถในการปรับค่าดังกล่าวโดยอัตโนมัติ

1.3.3.4. ชนิดของฮาร์ดแวร์ทางเอาท์พุท (ในตัวควบคุม) ฮาร์ดแวร์เอาท์พุทในตัวควบคุมอุณหภูมิจะมีหลายรูปแบบ การตัดสินใจเลือกชนิดของฮาร์ดแวร์ควบคุม จะขึ้นกับตัวทำความร้อนที่ใช้ และกำลังของตัวทำความร้อน ขึ้นกับอัลกอริทึมการควบคุมที่เลือก และขึ้นกับฮาร์ดแวร์ภายนอกตัวควบคุม สำหรับจัดการกับโหลด ฮาร์ดแวร์เอาท์พุทในตัวควบคุมที่นิยมใช้ คือ

1. แบบสัดส่วนเวลา หรือ แบบเปิด – ปิด

- 1.1 รีเลย์ไฟฟ้าทางกล
- 1.2 ไทรแอก (รีเลย์กึ่งตัวนำไฟสลัป)
- 1.3 ไตรเวอร์ (รีเลย์กึ่งตัวนำไฟตรง)

2. แบบสัดส่วนอนาลอก

- 2.1 4 – 20 มิลลิแอมป์กระแสตรง
- 2.2 0 – 5 โวลท์ หรือ 0 – 10 โวลท์กระแสตรง

3. ฮาร์ดแวร์เอาท์พุทนอกตัวควบคุมที่ทำให้สามารถดูแลจัดการโหลด คือ

- 3.1 คอนแทกเตอร์ทางกล
- 3.2 รีเลย์กึ่งตัวนำควบคุมโดยไฟสลัป
- 3.3 รีเลย์กึ่งตัวนำควบคุมโดยไฟตรง
- 3.4 ตัวควบคุมกำลังใช้ SCR (แบบข้ามจุดศูนย์)
- 3.5 ตัวควบคุมกำลังใช้ SCR (แบบมูฟเฟสเริ่มทำงาน)

1.4 ตัวส่งสัญญาณแบบวงรอบกระแส

การส่งสัญญาณแบบวงรอบกระแสได้เริ่มมีการใช้อย่างแพร่หลายในต้นทศวรรษที่ 1940 เมื่อมีความจำเป็นต้องขบกลไกของตัววัดสัญญาณทั้งระยะทางไกล มีการใช้กระแสสูงถึง 200 มิลลิแอมป์ในการขับอุปกรณ์ไฟฟ้าไฮดรอลิกสำหรับตัวแสดงผล หรือเครื่องบันทึกสัญญาณจะใช้กระแสประมาณ 50

มิลลิแอมป์ ในตอนปลายของทศวรรษที่ 1950 มีการใช้การควบคุมกระบวนการแบบอิเล็กทรอนิกส์ และมีการตั้งมาตรฐานวงรอบกระแสค่า 20 มิลลิแอมป์ ด้วยเหตุผลด้านความปลอดภัย คือ ก) การลัดวงจรพร้อมสาย จะไม่ทำให้เกิดประกายไฟขึ้น และ ข) การเลือกค่าศูนย์อยู่ที่ 4 มิลลิแอมป์ ทำให้สามารถตรวจจบการเปิด

วงจรได้ จนกระทั่งตอนปลายทศวรรษที่ 1960, ISA ในกำหนดที่ประชุมเพื่อพัฒนามาตรฐานที่จะใช้กับ สัญญาณกระแสตรงอนาล็อกที่ใช้สำหรับส่งสาระหว่างอุปกรณ์ เพื่อการเฝ้าตรวจและควบคุมกระบวนการ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1975 ได้มีการนิยามสัญญาณ 4 – 20 mA เป็นมาตรฐาน

(เอก ไชยสวัสดิ์, 2542:133)

ในหลายกรณี จะต้องมีการเฝ้าตรวจอุณหภูมิของกระบวนการที่อยู่ไกลออกไป อุปกรณ์ตรวจอุณหภูมิแบบสามัญ เช่น เทอร์โมคัปเปิล หรือ RTD จะให้สัญญาณเอาต์พุตที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นจะต้องมีการขยาย และปรับเงื่อนไขสัญญาณเหล่านี้ก่อนที่จะส่งผ่านสายทองแดงธรรมดาไปยังตัวรับที่อยู่ปลายทาง เช่น มิเตอร์ จาตาลอกเกอร์ เครื่องบันทึกสัญญาณ คอมพิวเตอร์ หรือตัวควบคุม ถ้าทำการส่งสัญญาณที่ผ่านการขยายและปรับเงื่อนไข ไปในลักษณะเป็นการส่งแรงดันออกไปเป็นระยะไกลในโรงงานจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวน ซึ่งแม้จะสามารถใช้สายชีลด์ แต่จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มสำหรับสาย นอกจากนั้นสายส่งจะมีความต้านทานของสาย ทำให้จำเป็นต้องใช้เครื่องวัดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ ภายในค่าสูงมาก

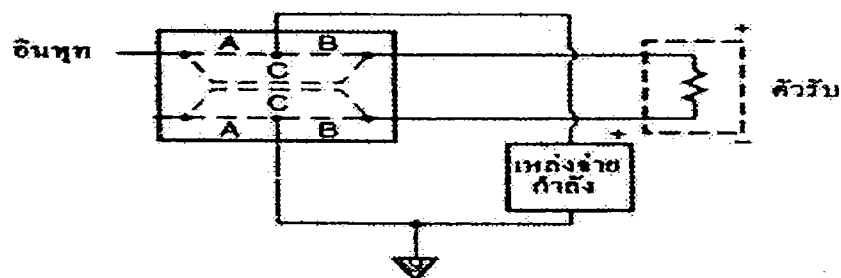
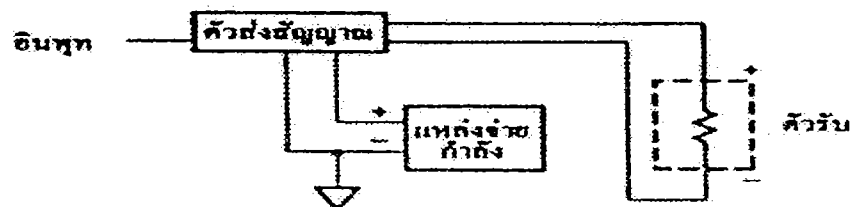
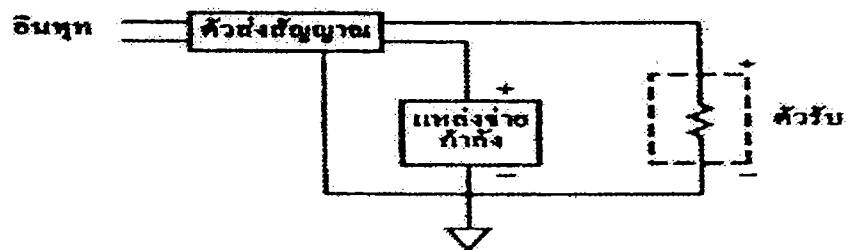
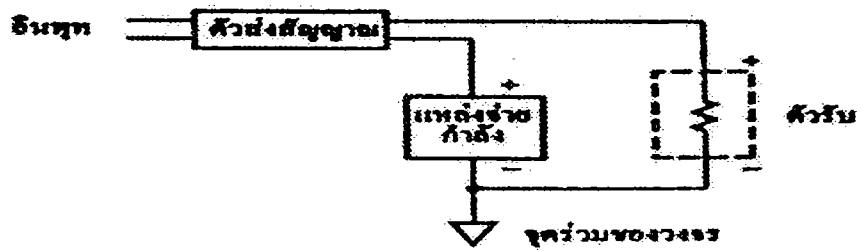
เพื่อป้องกันการลดทอนของสัญญาณ เนื่องจากความต้านทานของสาย แต่ถ้าหากมิเตอร์มีอิมพีแดนซ์สูงมาก สัญญาณรบกวนที่เข้ามาสู่ระบบจะสูงขึ้น แต่ถ้าหากเราใช้สัญญาณเอาต์พุตไปขับตัวกำเนิดกระแส วงรอบกระแสจะกำจัดการสูญเสีย เนื่องจากความต้านทานของสาย เพราะว่าแรงดันที่ตกคร่อมในสายไม่ส่งผลกระทบต่อกระแสสัญญาณรบกวนจะถูกกำจัดโดยความทนต่อสัญญาณรบกวนของตัวกำเนิดกระแส มิเตอร์ที่นำมาต่อก็ไม่จำเป็นต้องมีอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งสามารถต้านทานการนำสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้สายชีลด์

1.4.1 ตัวส่งสัญญาณแบบ 2 สาย

ตัวส่งสัญญาณจะมีหลายชนิด เช่น แบบ 2 สาย, 3 สาย, 4 สาย หรือแบบแยกจาก (Isolated) ดังภาพประกอบ 11 แต่แบบที่นิยมจะเป็นแบบ 2 สาย โดยที่ตัวส่งสัญญาณจะดึงกระแสจากแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง (ที่อยู่ห่างออกไป) เป็นสัดส่วนกับตัวตรวจวัดที่อินพุตของมัน สัญญาณที่ส่งไปก็คือ

ค่ากระแสของแหล่งกำลังที่เปลี่ยนแปลง ตัวส่งสัญญาณ เช่น ชนิดที่มีอินพุตเป็นเทอร์โมคัปเปิลจะดึงกระแส 4 มิลลิแอมป์จากแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง เมื่อวัดอุณหภูมิต่ำสุดของกระบวนการ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตัวส่งสัญญาณแบบ 2 สาย จะดึงกระแสสูงขึ้น (อย่างเป็นสัดส่วน) จนถึง 20 มิลลิแอมป์ สัญญาณค่า 20

มิลลิแอมป์ นี้จะสมนัยกับอุณหภูมิสูงสุดที่ตรวจวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลนี้ วงจรปรับเงื่อนไขสัญญาณภายในตัวส่งสัญญาณจะกำหนดพิสัยของอุณหภูมิที่สัญญาณกระแสเอาต์พุตจะแทน



การแยกทางไฟฟ้า	การมีอยู่ของเส้นตัวนำ		
	A	B	C
แยกเต็มที	-	-	-
แยกที่อินพุต	-	/	-
แยกที่เอาต์พุต	/	-	-
แยกกำลัง	-	-	/
ไม่แยก	/	/	-

ภาพประกอบ 11 ตัวส่งสัญญาณแบบต่าง ๆ

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542 :134)

1.4.2 ข้อดีของการใช้ตัวส่งสัญญาณแบบ 2 สาย

1. ไม่ต้องการกำลังกระแสสลับที่ตำแหน่งห่างไกล เพื่อให้ตัวส่งสัญญาณแบบ 2 สายทำงาน เพราะว่าตัวส่งสัญญาณจะได้รับกำลังระดับต่ำ (4 – 20 มิลลิแอมป์) ดังนั้น จึงไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายกำลังอื่นที่ตำแหน่งห่างไกล นอกจากนี้ แรงดันกระแสตรง 24 โวลท์ที่จำเป็นในการทำงานเป็นค่าสามัญมาตรฐานสำหรับโรงงานที่มีเครื่องมือวัดจำนวนมากอยู่แล้ว

2 สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าและการลดคุณภาพของสัญญาณจะไม่เป็นปัญหาสำหรับผู้ใช้งานตัวส่งสัญญาณแบบ 2 สาย สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นกระแสของตัวส่งสัญญาณจะมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนรอบรอบ โดยปกติสัญญาณรบกวนใด ๆ ที่ปรากฏในกระแสเอาต์พุตจะถูกกำจัดโดย Common – Mode Rejection ของอุปกรณ์ด้านรับ นอกจากนี้ สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นกระแสจะไม่เปลี่ยนแปลง

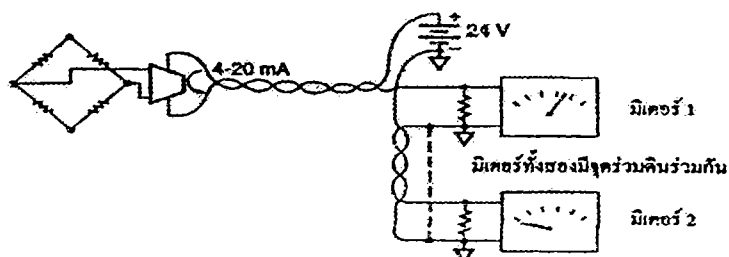
(ลดหายไป) ตามระยะทาง เหมือนเช่นกรณีสัญญาณแรงดัน

3 ราคาของสายจะลดลงเมื่อใช้ตัวส่งสัญญาณแบบ 2 สาย สัญญาณที่สร้างขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลโดยปกติจะมีขนาดเล็ก จึงต้องการสายที่มีการชีลด์ ถ้าหากต้องส่งเป็นระยะไกล ๆ ซึ่งถ้าไม่ใช่สายชีลด์ จะทำให้เกิดการรบกวนสูง นอกจากนี้ ถ้าหากต้องส่งสัญญาณระยะไกล จำเป็นต้องใช้สายขนาดใหญ่ (เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากแรงดันตกคร่อมสายเนื่องจากความต้านทาน)

1.4.3 ปัญหาของเรื่องวงรอบดิน (Ground Loop)

ถ้าหากเราฝังแท่งตัวนำ 2 แท่ง ลงดินที่ 2 จุดที่แตกต่างกัน และทำการต่อโวลท์มิเตอร์ระหว่างแท่งทั้งสอง จะพบว่ามีความแตกต่างของแรงดันเกิดขึ้น ความต่างศักย์นี้จะเกิดขึ้นที่ทุก ๆ 2 จุดใด ๆ บนผิวโลก เมื่อเราพยายามวัดกระบวนการที่อยู่ตำแหน่งที่ห่างไกลออกไป ค่าแรงดันแตกต่างจะทำให้เกิดกระแสคลาดเคลื่อนตามสาย ซึ่งเรียกว่า สัญญาณวงรอบดิน ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่ตัวแสดงค่า เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน เนื่องจากวงรอบดิน ให้เลือกตัวส่งสัญญาณ 2 สายแบบแยกจาก ตัวส่งสัญญาณชนิดนี้จะแยกจากสัญญาณจากตัวตรวจจู่จากวงรอบกระแสเอาต์พุต โดยอิเล็กทรอนิกส์แสง ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้สามารถลงดินทั้งตัวตรวจจู่ และด้านหนึ่งของวงรอบกระแส

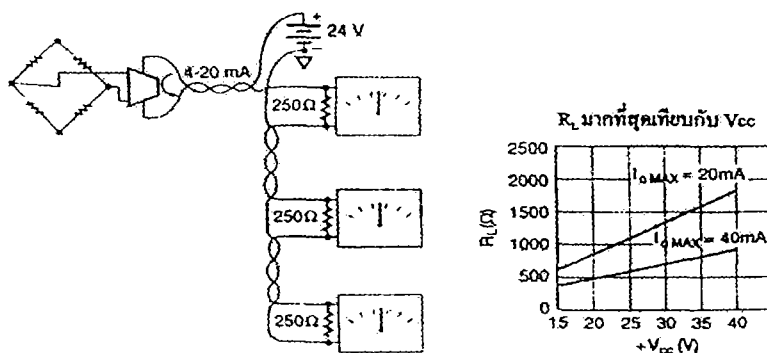
นอกจากนั้น เมื่อเราต่อตัวรับมากกว่า 1 ตัว อนุกรมกัน ถ้าหากต่อตัวรับตัวที่หนึ่งลงดิน (ที่ตัวต้านทานตรวจจู่) จะต้องมีการแยกจากตัวรับตัวที่สองที่ต่ออนุกรมอยู่ มิฉะนั้น ตามภาพประกอบ 12 ตัวต้านทานตรวจจู่จะลัดวงจร และไม่มีแรงดันปรากฏ เนื่องจากกระแสทั้งหมดจะไม่ผ่านไปยังตัวรับ



ภาพประกอบ 12 ความผิดพลาดเนื่องจากวงรอบดินทำให้เกิดการลัดวงจร มิเตอร์ 2

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:136)

นอกจากนั้น ผู้ใช้ไม่ควรจะต่อตัวต้านทานหลาย ๆ ตัว อนุกรมกัน โดยปกติจะมี การกำหนดค่าความต้านทานสูงสุดเทียบกับค่าแรงดันที่จ่ายแก่ตัวส่งสัญญาณ ดังภาพประกอบ 13 ใช้ตัวรวม ความต้านทานของสายต่อเข้าไปในการคำนวณ สายเบอร์ 22 (AWG) แบบคู่ตีเกลียว ยาว 160 เมตร จะทำให้ เกิดความต้านทานต่อคู่สายมากกว่า 16 โอห์ม อนุกรมกับโหลด



ภาพประกอบ 13 การหาความต้านทานในสายที่ยอมให้มีได้

(เอก ไชยสวัสดิ์, 2542:136)

วิธีการวัดสัญญาณกระแส ทำโดยการใส่ตัวต้านทานคร่อมสาย จากนั้น อ่านค่าโดยโวลท์ มิเตอร์แบบตัวเลข (DVM) หรือ ตัวแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล ผู้ใช้ควรที่จะเลือกตัวต้านทานอย่างระมัดระวัง เพราะว่า มันสามารถทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากกำลังสูญเสียภายในตัวต้านทานเอง ทำให้มันร้อนขึ้น และเปลี่ยนค่า ตามสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ เราจึงควรพยายามเลือกตัวต้านทานที่มีสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิต่ำ และมีพิกัดกำลังเพียงพอ แต่ถ้าหากไม่สามารถหาได้ อาจใช้ตัวต้านทานสูงหลายตัวขนานกันเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานแต่ละตัวให้ต่ำที่สุด อีกวิธีหนึ่งในการอ่านค่ากระแส ทำโดยใช้วงจรแปลงกระแสเป็นแรงดัน วงจรนี้มีข้อได้เปรียบที่ไม่เพิ่มแรงดันตกคร่อมอนุกรมกับวงจร และสามารถลบออฟเซ็ทศูนย์จากเอาต์พุต นอกจากนั้นโดยปกติ จะไม่ใช้โหมดเครื่องวัดกระแสของ DVM ในการวัดกระแส นอกจากในการวัดแบบหยาบ เครื่องมือวัดเหล่านี้จะมีความแม่นยำ ถึงความละเอียดเพียง 8 หรือ 9 บิต (0.4% หรือ 0.2% ตามลำดับ)

1.5 การควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control)

การควบคุมแบบดั้งเดิมที่เป็น Manual Control คือ ใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมเองทั้งหมด เช่น ปิด-เปิด วาล์วเอง, กดสวิตช์หรือปุ่มจ่ายไฟเอง ในปัจจุบันได้ถูกแทนที่ด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติแล้วทั้ง สิ้น เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่า และมีเสถียรภาพสูงกว่าการควบคุมดังกล่าวจะเป็นลักษณะของการควบคุมแบบ ป้อนกลับ (Feedback Control) คือมีการวัด และส่งค่าที่วัดกลับมายังส่วนควบคุม เพื่อคำนวณและจ่าย

สัญญาณควบคุมที่เหมาะสมไปยังอุปกรณ์ใช้งาน จากที่กล่าวมาการควบคุมแบบอัตโนมัติจะต้องประกอบด้วย 3 ภาคเสมอคือ (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T14)

1. ภาควัด เช่น เทอร์มอคัปเปิล, หัววัดความชื้น มีหน้าที่วัดค่าที่โพรเซสแล้วส่งมายังภาคควบคุม
2. ภาคควบคุม เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ มีหน้าที่รับค่าจากภาควัดนำมาคำนวณแล้วส่งให้ภาคจ่าย
3. ภาคจ่าย เช่น ในระบบทำความร้อน ตัวจ่ายคือฮีตเตอร์, ในระบบควบคุมอัตราไหล ตัวจ่ายคือวาล์วเป็นต้น มีหน้าที่เพิ่มหรือลดค่าที่ควบคุมอยู่ บางครั้งก็เรียกตัวจ่ายเหล่านี้ว่า Final Element

กำหนดให้

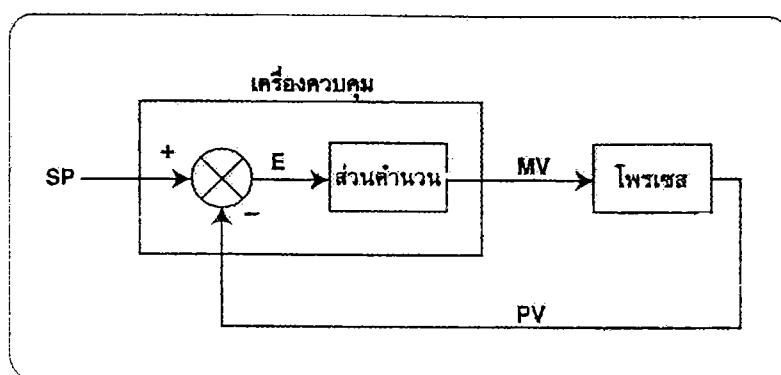
SP คือ Setpoint หรือค่าที่ต้องการควบคุม เช่น ต้องการต้มน้ำที่ 100 C

PV คือ Process Variable หรือค่าที่วัดมาจากโพรเซส เช่น อุณหภูมิปกติเป็น 30 C

MV คือ Manipulated Variable หรือสัญญาณควบคุมที่เครื่องควบคุมคำนวณได้มีหน่วยเป็น % (0-100%)

E คือ Error หรือผลต่างระหว่างค่าที่ต้องการควบคุมกับค่าที่วัดได้ ($E = SP - PV$)

จากรูปจะเห็นว่าเครื่องควบคุมจะได้รับอินพุต 2 ค่า คือ PV (ค่าที่วัดจากโพรเซส) และ SP (ค่าที่ต้องการควบคุมโดยผู้ใช้งานเป็นผู้ป้อน) และมีเอาต์พุต 1 ค่า คือ MV ส่งไปที่โพรเซส เพราะฉะนั้นสิ่งที่ทำให้เครื่องควบคุมแต่ละตัวแตกต่างกัน คือ ส่วนคำนวณของเครื่องควบคุมที่อยู่ภายใน ซึ่งถึงรูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน รูปแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือการควบคุมแบบ ON-OFF, PID และรูปแบบใหม่ล่าสุดคือ Fuzzy Control

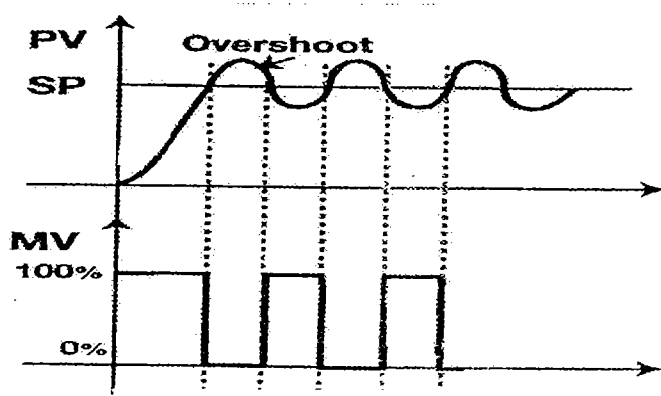


ภาพประกอบ 14 การควบคุมแบบอัตโนมัติ
(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T14)

1.6 การควบคุมแบบ ON – OFF หรือ two – position Control

ในระบบควบคุมแบบ ON-OFF เครื่องควบคุมจะสั่งเอาต์พุตทำงานเพียง 2 สถานะเท่านั้น คือ ON และ OFF เป็นการควบคุมแบบง่าย ๆ และราคาไม่แพง ดังนั้นจึงนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานควบคุมทางอุตสาหกรรม ในกรณีที่ผลจากการแกว่งของอุณหภูมิเป็นที่ยอมรับได้ กำหนดให้สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุมเป็น MV และผลต่างระหว่าง SP กับ PV เป็น E (Error) ฉะนั้นในการควบคุมแบบ ON-OFF สัญญาณ MV จะมีค่าเป็น 100% (ON) หรือ 0% (OFF) เท่านั้น โดยจะขึ้นอยู่กับว่า E มีค่าเป็น + หรือเป็น - นั่นคือ (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T15)

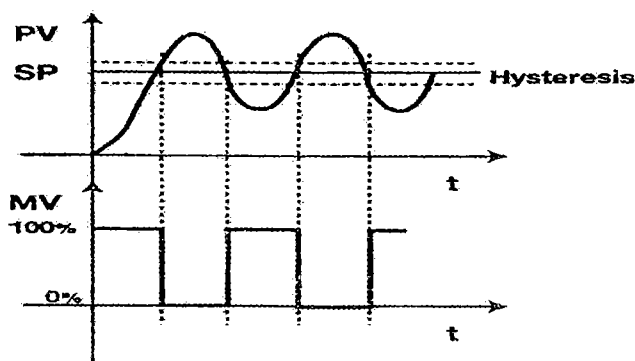
$$\begin{aligned} \text{MV} &= 100\% \text{ (ON) เมื่อ } E > 0 \text{ (PV} < \text{SP)} \\ &= 0\% \text{ (OFF) เมื่อ } E < 0 \text{ (PV} > \text{SP)} \end{aligned}$$



ภาพประกอบ 15 การควบคุมแบบ ON-OFF

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ จำ. 2002:T15)

ในกรณีที่อุณหภูมิที่โพรเซสมีการกระเพื่อมที่ Set point จะมีผลทำให้เอาต์พุตของเครื่องควบคุม ON และ OFF อยู่ตลอดเวลา ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยกำหนด Hysteresis หรือ Differential gap หรือ Dead band เพื่อลดการติด – ต่อก่ที่เกิดขึ้น แต่ผลเสียคือจะทำให้เกิด Overshoot มากขึ้น



ภาพประกอบ 16 การควบคุมแบบ ON – OFF โดยมี Hysteresis

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T15)

ลักษณะของ ON-OFF Control คือ จะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิ (Oscillation) อยู่ตลอดเวลา โดยในกรณีที่มี Hysteresis ความถี่ในการตัดต่อจะลดลง แต่ค่า Overshoot จะมากขึ้น ในระบบที่ช้า ภายใน การแกว่งจะยาวกว่าในระบบที่เร็วกว่า

1.7 การควบคุมแบบ Proportional (P Control)

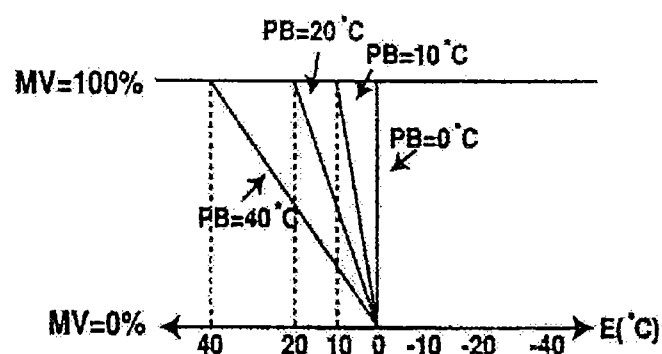
ในกระบวนการบางอย่าง การควบคุมแบบ ON-OFF จะไม่ใช่วิธีที่ดีพอเนื่องจากจะเกิดการแกว่งของอุณหภูมิตลอดเวลา อันเป็นผลมาจากการ ON และ OFF ที่ตัดสินใจจากเครื่องหมายของ Error เท่านั้น นั่นคือสำหรับ ON-OFF Control ไม่ว่า Error จะเป็นค่าบวกจะมีค่ามากหรือน้อยเพียงใด เครื่อง ควบคุมก็จะจ่าย 100 % เสมอจนกว่า Error จะกลับเป็นลบ จึงจะจ่าย 0% ดังนั้นถ้าต้องการความแน่นอนใน การควบคุมสัญญาณควบคุมควรจะเป็นสัดส่วน (Proportional) กับค่า Error ที่รับเข้ามา ซึ่งเป็นลักษณะ การควบคุมแบบ Proportional ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม (MV) กับค่า Error (E) คือ (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T16)

PB : Proportional Band

B : Bias คือค่าเปอร์เซ็นต์เอาต์พุต

เมื่อ E เป็น 0 ($PV = SP$)

ตัวควบคุมแบบ Proportional มีลักษณะเป็นแอมพลิฟายที่มีค่า gain คือ สามารถแสดงความหมายของ PB ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 17 ตัวควบคุมแบบ Proportional

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T16)

ตาราง1 แสดงความสัมพันธ์ของPV กับ PB(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T16)

SP	PV	E	MV
100 °C	50	50	100%
	90	10	100%
	92	8	80%
	94	6	60%
	96	4	40%
	98	2	20%
	100	0	0%
	102	-2	0%
	110	10	0%

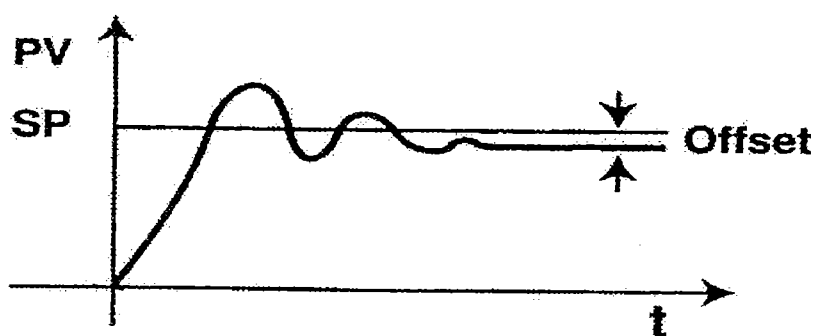
จากตารางสามารถอธิบายได้ว่า กรณี PV เพิ่มขึ้น PB คือย่านอุณหภูมิที่สัญญาณควบคุม MV จะลดลงจาก 100% ไปเป็น 0 % นั่นคือเมื่อ PV อยู่ใต้ PB MV จะเป็น 100% เสมอ เมื่อ PV อยู่เหนือ PV อยู่ใน PB จะเห็นได้ว่า PB มีค่าเล็กลง อัตราการขยายสูงขึ้น และเมื่อ PB เป็น 0 C อัตราการขยายเป็นอนันต์หรือเสมือนว่าการทำงานของ เครื่องควบคุมจะกลายเป็นแบบ ON-OFF นั่นเอง ส่วนค่า Bias เป็นค่าที่ต้องการให้เครื่องควบคุมจ่ายออกไปเมื่อ E = 0 ถ้ากำหนดให้ bias เป็น 0 ในขณะที่ E = 0MV จะมีค่าเป็น 0% (OFF) ทำให้ไม่สามารถควบคุมให้ PV นิ่งที่ SP ได้ จึงควรตั้งค่า bias ให้เหมาะสมกับการรักษาระดับที่ SP นั้น ๆ โดยทั่วไปเครื่องควบคุม อุณหภูมิจะมี bias ไว้ที่ 50% และสามารถตั้งค่า Manual Reset ได้

ตาราง 2 แสดงความสัมพันธ์ของPV กับ PB(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T17)

SP	PV	E	MV
100 °C	50	50	100%
	90	10	100%
	95	5	100%
	98	2	70%
	100	0	50%
	102	-2	30%
	105	-5	0%
	107	-7	0%
	110	-10	0%

การเกิด Offset คือ ข้อเสียอันเป็นลักษณะของการควบคุมแบบ Proportional ที่ PV จะนิ่งอยู่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งไม่เท่ากับ SP ซึ่งอาจนิ่งอยู่เหนือ SP หรือใต้ SP ก็ได้ โดย Offset คือค่าความแตกต่างระหว่าง SP กับ PV ที่เวลาสุดท้าย

Offset จะเกิดในระบบที่ใช้ Proportional Control ที่มีค่า PB กว้าง หรือ Load มีการเปลี่ยนแปลงหรือในกรณีที่มีการรบกวน (Disturbance) เข้ามาในโพรเซส การลด PB ให้แคบลงสามารถลด Offset ได้ แต่จะทำให้แอดแอมป์มีการแกว่งมากขึ้น สามารถแก้ไข Offset ได้โดยการตั้งค่า Manual Reset ซึ่งเสมือนเป็นการเลื่อน (Shift) กราฟขึ้น (หรือลง) ให้ PV ไปหนึ่งที่ SP พอดี



ภาพประกอบ 18 การเกิด Offset
(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T17)

1.8 การควบคุมแบบ Proportional Integral (PI Control)

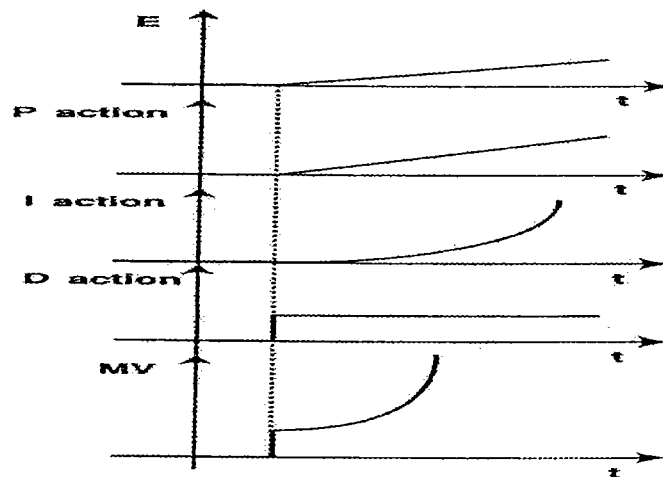
ลักษณะของ Integral จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม MV กับค่า Error (E) ดังนี้

$$MV = \frac{1}{T_i} \int_0^t E dt$$

T_i : Integral Time

บางครั้งกิริยาการควบคุมแบบ Integral เรียกว่า Reset Control ซึ่งไม่สามารถใช้งานเดี่ยว ๆ ได้จะใช้ร่วมกับ Proportional action เสมอ กิริยาการควบคุมแบบ PI สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$MV = \frac{100}{PB} E + \frac{1}{T_i} \int_0^t E dt$$

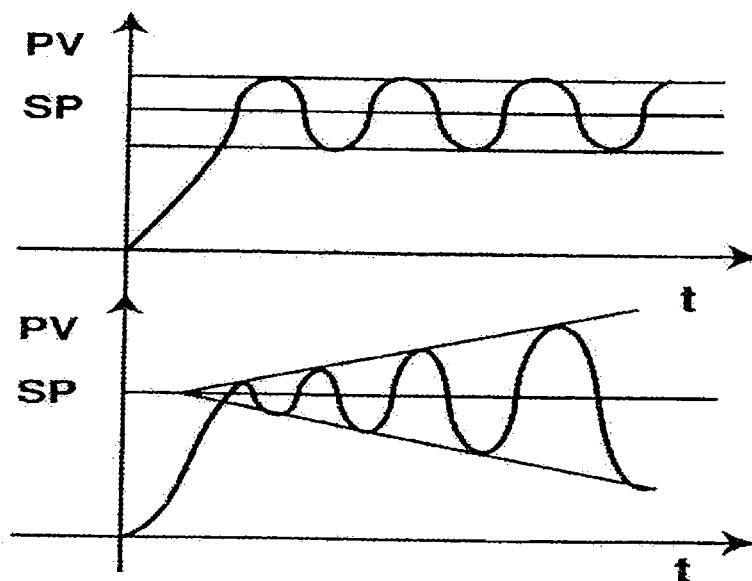


ภาพประกอบ 19 ผลตอบสนองของ PID Control

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T19)

ลักษณะการทำงานของ Integral action คือ สะสมค่า E เมื่อเวลาผ่านไป นั่นคือขณะที่ E จะมีค่าคงที่สัญญาณควบคุมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในกรณี E เป็นบวกและจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในกรณี E เป็นลบ นั่นคือสาเหตุที่ Integral action สามารถแก้ Offset ได้ และทำให้ PV ไปนิ่งที่ SP ได้ท้ายที่สุด

เมื่อลดค่า T_i ลงผลของ Reset action จะมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดการแกว่งและ Overshoot สูงขึ้น ถ้าลดค่า T_i ต่ำเกินไปจะทำให้ระบบ Oscillate หรือ Unstable ได้



ภาพประกอบ 20 ระบบที่ Oscillate และ Unstable เมื่อตั้งค่า T_i ต่ำเกินไป

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T18)

1.9 การควบคุมแบบ Proportional + Derivative (PD Control)

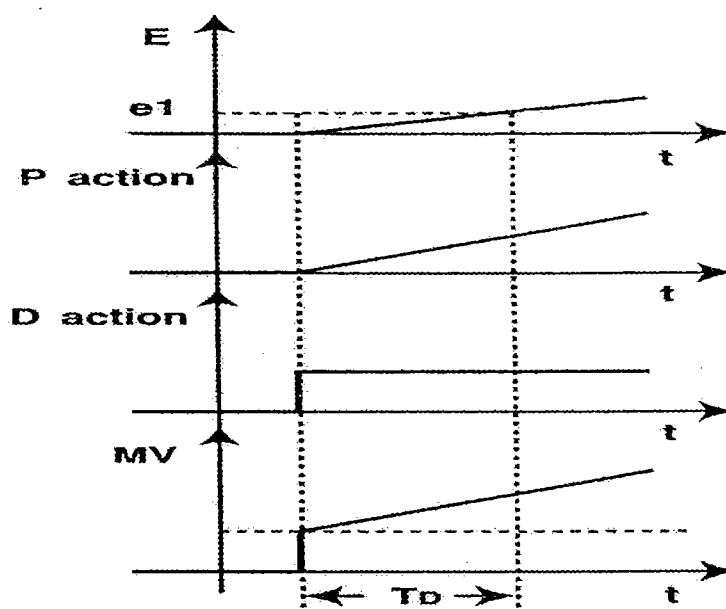
ลักษณะของ Derivative จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณควบคุม MV กับค่า Error ดังนี้

$$MV = T_D \frac{dE}{dt}$$

$$T_D = \text{Derivative Time}$$

ในบางครั้งจะเรียกการควบคุมแบบ Derivative ว่า Rate control ทั้งนี้ เพราะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error (E) ซึ่งใช้ร่วมกับ Proportional action เสมอ การควบคุมแบบ PD สามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

สัญญาณควบคุมจะแปรผันตามอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของค่า Error การควบคุมชนิดนี้มีลักษณะเหมือนการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงโพสเซสล่วงหน้าทำให้อุ่นหภูมิเข้าสู่เสถียรภาพเร็วขึ้น Derivative action เหมาะสำหรับโพสเซสที่ช้าหรือมี Time lag มาก ๆ (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T18)



ภาพประกอบ 21 สัญญาณควบคุมของ PD Control

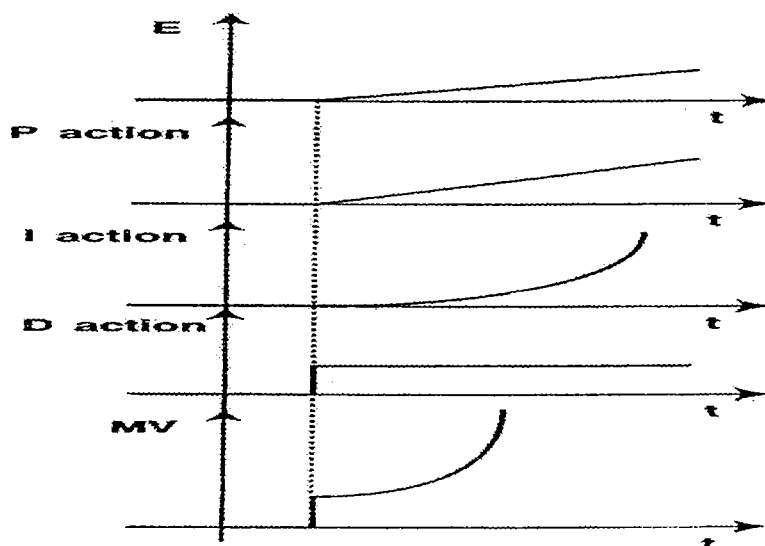
(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T19)

เมื่อเพิ่มค่า T_D ขึ้น ผลของ Rate action จะมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าเพิ่มค่า T_D มากเกินไปจะทำให้ระบบ Oscillate ขาดเสถียรภาพ PD Control เหมาะกับ Process ที่มี Time lag มาก จะช่วยทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการเร็วขึ้น ไม่เหมาะกับ Process ที่ไวหรือมีการเปลี่ยนแปลงเร็วอยู่แล้ว เช่น ระบบควบคุมการไหล (Flow) ระบบควบคุมความดัน (Pressure) เป็นต้น

1.10 การควบคุมแบบ (Proportional + Integral + Derivative (PID)

เป็นการรวมกิริยาการควบคุมแบบ Proportional, แบบ Integral และแบบ Derivative เข้าด้วยกันสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้ (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T19)

ลักษณะการทำงานของ PID Control สามารถแสดงได้ดังรูป

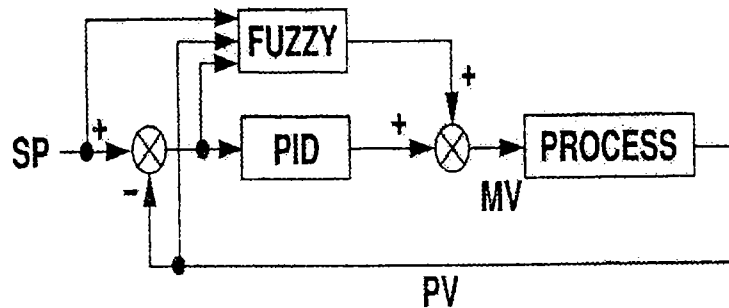


ภาพประกอบ 22 ผลตอบสนองของ Proportional + Integral + Derivative (PID) Control

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T19)

1.11 การควบคุมแบบ FUZZY

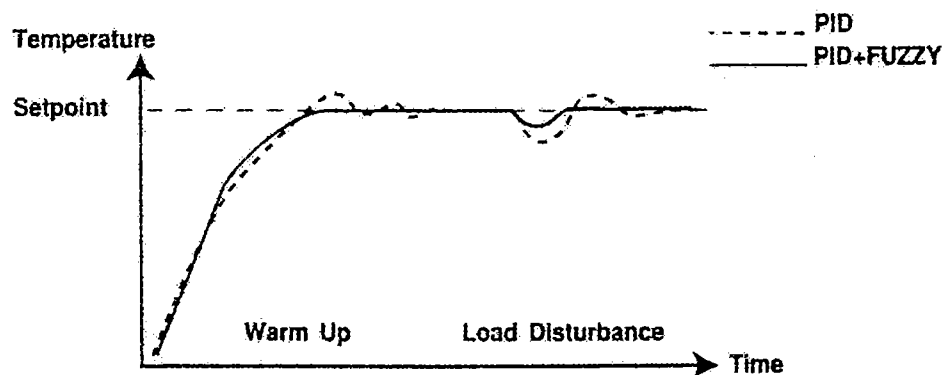
FUZZY เป็นทฤษฎีหนึ่งทางคณิตศาสตร์ คือ Fuzzy Sets ซึ่งเป็นลักษณะของตัวเลขที่สามารถบ่งชี้ได้ถึงคุณภาพ (Quality) ไม่ใช่เพียงปริมาณ (Quantity) เพียงอย่างเดียวเหมือนตัวเลขทั่ว ๆ ไปที่เป็น Crisp set ลักษณะของ Fuzzy จะมีความใกล้เคียงภาษามนุษย์มากกว่าที่จะเป็นแค่ตัวเลขตายตัวค่าหนึ่ง เช่น หากเราจะสอนคนหนึ่งขับรถให้จอดตรงไฟแดงพอดี เรามักบอกว่า "ให้ค่อย ๆ เหยียบเบรค" มากกว่าจะบอกว่า "ให้เหยียบเบรคด้วยอัตราหนึ่ง $-3m / s^2$ " คำว่า Fuzzy แปลว่า คลุมเครือ, ไม่แน่ชัด ถือเป็นคณิตศาสตร์ที่ไม่ได้ระบุเพียงแค่ว่าใช่หรือไม่ แต่สามารถระบุความใกล้เคียงที่จะใช่หรือไม่ใช่ได้ นั่นคือ ช่วงตรงกลางระหว่างใช่กับไม่ใช่ ซึ่งเป็นลักษณะของภาษามนุษย์ (Language) ที่มักใช้คำว่าค่อย ๆ, ค่อนข้าง, เล็กน้อย, เกือบ เป็นต้น (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T21)



ภาพประกอบ 23 การควบคุมแบบ Fuzzy + PID

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T21)

Fuzzy Control เอาชนะข้อด้อยของ PID ได้ และสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพด้วยกรณีต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบที่แตกต่างกันไปเหมือนกับ การบันทึกประสบการณ์ที่เคยผ่านมาแล้ว Fuzzy Control จะปรับแต่ง PID ทางอ้อมเพื่อให้สัญญาณควบคุม MV สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างยืดหยุ่นและรวดเร็วตาม Process ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยวิธีนี้จะทำให้ Process เข้าสู่ Set point ด้วยเวลาที่สั้นที่สุด และมี Overshoot ต่ำสุด ภายใต้การรบกวนของ Disturbance ภายนอก มีเสถียรภาพเหนือกว่าการควบคุม PID แบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด PID เป็น Digital Information ต่างจากFuzzy ที่เป็นLanguage Information



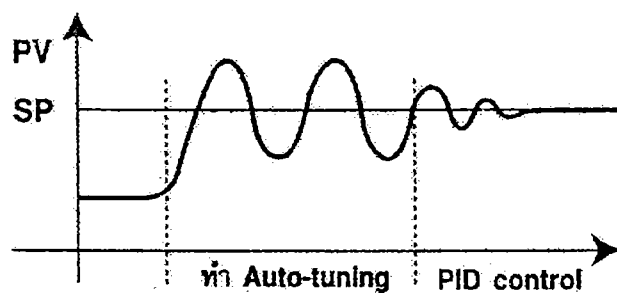
ภาพประกอบ 24 Fuzzy Control

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T21)

1.11.1 การปรับแบบอัตโนมัติ (AUTO – TUNING)

เป็นฟังก์ชันที่มักมีอยู่ในเครื่องควบคุมชนิดดิจิทัล ใช้สำหรับคำนวณหาค่า PID ที่เหมาะสมกับโพรเซสโดยอัตโนมัติ เมื่อเริ่มการทำงาน Auto – Tuning เครื่องควบคุมจะทำงานเป็น ON-OFF ระยะเวลาหนึ่งทำให้ระบบเกิดการแกว่ง (Oscillate) เพื่อศึกษาคุณลักษณะของโพรเซสว่าช้าหรือเร็ว, มี Overshoot สูงเท่าใด เครื่องควบคุมจะควบคุมในลักษณะ ON-OFF อยู่ประมาณ 3-5 Cycle แล้วจึงทำการคำนวณหา

ค่า PID ออกมาและเริ่มควบคุมระบบด้วย PID Control (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T22)



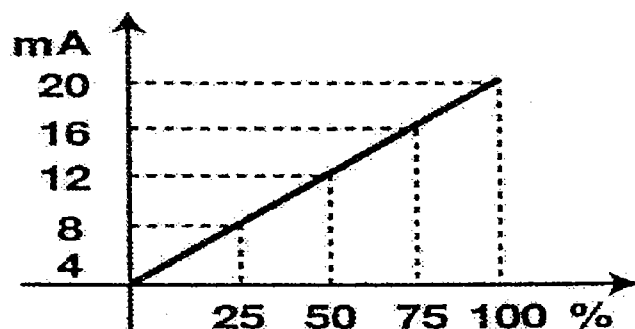
ภาพประกอบ 25 การทำ Auto-Tuning

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T22)

โดยทั่วไปตัวเครื่องควบคุมจะมีไฟแสดงผลขณะที่ทำ Auto-Tuning อยู่ และเมื่อทำ Auto – Tuning เสร็จไฟแสดงผลจะดับ แสดงว่าเข้าสู่การทำงานแบบ PID Control แล้ว ฟังก์ชัน Auto-Tuning จะช่วยอำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้โดยคำนวณหาค่า PID ออกมาให้โดยอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทำการคำนวณด้วยตนเอง แต่อย่างไรก็ตาม ในบางโพรเซสที่ควบคุมได้ยากค่า PID ที่คำนวณได้จากการทำ Auto-Tuning ก็ไม่สามารถควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพหรือมีผลตอบสนองที่ดีพอได้ จำเป็นที่ผู้ใช้จะต้องทำงานปรับแก้ค่า PID เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด

1.11.2 เอาต์พุตของเครื่องควบคุม

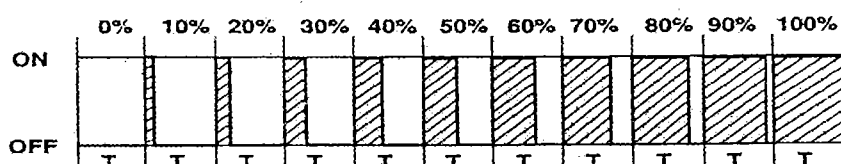
ค่าสัญญาณควบคุม (MV) จากเครื่องควบคุม เป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณตามขนาดของค่า Error โพรเซส โดยสัญญาณควบคุมนี้จะถูกส่งไปที่ตัวจ่าย (Final element) เพื่อทำการแก้ไข Error ที่ได้รับเข้ามา โดยสัญญาณมีลักษณะเป็นแอนะล็อก คือ 0- 100% สำหรับเครื่องควบคุมที่มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณมาตรฐาน เช่น 4-20 mAสามารถเทียบเอาต์พุตในลักษณะของเปอร์เซ็นต์กับสัญญาณมาตรฐานได้ดังนี้



ภาพประกอบ 26 การเปรียบเทียบ เอาต์พุต 4 – 20 mA กับ 0 – 100%

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T22)

สำหรับเครื่องควบคุมที่มีเอาต์พุตเป็นรีเลย์หรือพัลส์ชับโซลิตเตอรีเลย ซึ่งเป็นลักษณะของสวิตช์ ON-OFF ที่มีเพียง 2 สภาวะ คือ ON (100%) กับ OFF (0%) จะไม่สามารถส่งสัญญาณเอาต์พุต ในลักษณะของแอนะล็อกได้โดยตรง แต่จะใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ON (Duty Cycle) บนคาบคงที่แทน โดยในเครื่องควบคุมแบบ PID ที่มีเอาต์พุตเป็นรีเลย์หรือพัลส์ชับโซลิตเตอรีเลย จะต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ตัวหนึ่งคือค่า Proportioning time หรือ Cycle time ซึ่ง ON ตลอดคาบ และเมื่อสัญญาณควบคุมเป็น 0% เอาต์พุต Off ตลอดคาบ ส่วนค่าสัญญาณควบคุมที่อยู่ระหว่าง 0-100% ก็จะมี Duty Cycle ที่แตกต่างกันไป ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบ เอาต์พุตรีเลย์ กับ 0 – 100%

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T23)

1.11.3 เครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐาน เป็นเครื่องตรวจ, เครื่องวัด เครื่องทดสอบตามข้อ

กำหนดที่กล่าวอ้างอิงว่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อการตรวจวัดและทดสอบที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะมีการสอบเทียบ เพื่อควบคุมความถูกต้องแม่นยำเสมอ, มีการบันทึกรายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่จะทำการสอบเทียบ การสอบเทียบต้องมีการสอบกลับไปยังมาตรฐานระดับประเทศหรือระหว่างประเทศ, มี

การบันทึกผลการสอบเทียบ ให้มีการวิเคราะห์ผลและมีการกำหนดการสอบเทียบในครั้งต่อไป มีป้ายบอกแสดงสถานะการสอบเทียบให้มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษาและในการสอบเทียบอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดอีกทั้งแยกเครื่องมือที่ชำรุดไม่รวมอยู่ในจุดที่ใช้งาน

1.12 จุดมุ่งหมายของการควบคุม

จุดมุ่งหมายของการควบคุม คือพยายามรักษาค่า PV ให้มีค่าเท่ากับ SP อยู่ตลอดเวลา เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในระบบ เช่น Load เปลี่ยน มี Disturbance หรือมีการเปลี่ยนค่า Set point ค่า PV จะไม่เท่ากับค่า SP (เกิด Error ขึ้น) อยู่ขณะหนึ่งแล้วเครื่องควบคุมจะต้องสามารถควบคุมให้ค่า PV เข้าสู่ Set point ให้ได้ โดยลักษณะในการนำค่า PID ที่ตั้งไว้ระบบใด ๆ อาจรักษาค่า PV ไว้ที่ Set point ได้เหมือนกันแต่ผลตอบสนองของระบบหนึ่งอาจเร็วกว่า และมี Overshoot น้อยกว่า นั่นแสดงว่าระบบนี้มีการควบคุมที่ดีกว่า ถึงแม้ที่เวลาสุดท้ายทั้ง 2 ระบบจะมีเสถียรภาพเหมือนกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าถึงแม้จุดประสงค์หลักของการควบคุมระบบใด ๆ คือ เสถียรภาพการรักษาค่า PV ไว้ที่ Set point ให้ได้ก็ตาม แต่ในความเป็นจริงการควบคุมที่ดีจะต้องมองถึงลักษณะของผลตอบสนองด้วยจึงเป็นสาเหตุที่ต้องมีการศึกษาลักษณะของโพรเซสและปรับค่า PID ให้เหมาะสมกับโพรเซสนั้น ๆ เพื่อให้มีผลตอบสนองที่ดีที่สุด สามารถสรุปลักษณะของการควบคุมที่ดีได้ดังนี้ (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T23)

1. ระบบมีเสถียรภาพ (Stable) สามารถรักษาค่า PV ไว้ที่ Set point ได้
2. ระบบมีการตอบสนองเร็ว
3. ระบบไม่แกว่ง มีค่า Overshoot น้อย
4. ไม่เกิด Offset ที่สภาวะสุดท้าย
5. ระบบสามารถรองรับการเกิด Disturbance หรือการเปลี่ยนค่า Set point ได้

การปรับค่า PID ที่โพรเซสหนึ่งแล้วมีผลตอบสนองที่ดี เมื่อนำค่า PID นี้ไปใช้กับโพรเซสหนึ่ง อาจได้ผลตอบสนองที่ไม่ดีก็ได้ ผลของการปรับค่า PID มีดังนี้

ผลของ P action

สามารถเพิ่มผลของ P action ได้โดยลดค่า PB ลง จะมีผลทำให้

1. มีค่า Offset น้อยลง
2. มี Overshoot สูงขึ้น เกิดการแกว่งมากขึ้น
3. ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าวัดค่า PB มากเกินไปจะทำให้ระบบ Oscillate

ผลของ I action

สามารถเพิ่มผลของ I action ได้โดยลดค่า T_i ลงจะมีผลทำให้

1. ไม่มี Offset
2. มี Overshoot สูงขึ้น เกิดการแกว่งมากขึ้น
3. ระบบขาดเสถียรภาพมากขึ้น ถ้าวัด T_i มากเกินไปจะทำให้ระบบ Oscillate หรือ

Unstable ได้

ผลของ D action

สามารถเพิ่มผลของ D action ได้โดยเพิ่มค่า T_D ขึ้นจะมีผลทำให้

1. มี Overshoot ลดลงมีคาบการแกว่งสั้นลง
2. ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น ไวขึ้น
3. ในระบบที่เร็วอยู่แล้วจะขาดเสถียรภาพ

1.13 ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบความต้านทาน (Resistance Temperature Detector)

คำว่า RTD และเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานสามารถใช้แทนที่กันได้ในการอธิบายถึงตัวตรวจอุณหภูมิที่เป็นโลหะลักษณะเป็นลวดเส้นเล็ก ๆ หรือแบบฟิล์มบาง ซึ่งความต้านทานของมันเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เราสามารถหาค่าอุณหภูมิของตัวมันได้จากค่าความต้านทานที่วัดได้ โดยใช้สมการหรือตารางการสอบเทียบ (เอก ไชยสวัสดิ์ 2543:27)

1.13.1 หลักการเบื้องต้น

เราสามารถแบ่งวัสดุออกได้เป็นตัวนำไฟฟ้า (Conductor) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) หรือฉนวน (Insulator) ตามการนำไฟฟ้าของมันที่อุณหภูมิห้อง โลหะเกือบทุกชนิดจะมีความต้านทานจำเพาะ (Resistivity) ประมาณ 10^{-3} หรือ 10^{-6} $\Omega\text{-cm}$ สารกึ่งตัวนำจะมีประมาณ 10 ถึง 10^6 $\Omega\text{-cm}$ และฉนวนจะมีมากกว่า 10^{12} $\Omega\text{-cm}$

โลหะทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ทุก ๆ อุณหภูมิ(ยกเว้นที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ) การนำไฟฟ้าเป็นส่วนกลับกับการต้านทานต่อการไหลของกระแส ความต้านทานของตัวนำไฟฟ้ามักมีหน่วยเป็นโอห์ม ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกันตามกฎของโอห์ม คือ $R = E/I$

เมื่อ R คือ ความต้านทานที่มีหน่วยเป็นโอห์ม E คือ ความต่างศักย์ มีหน่วยเป็นโวลต์ I คือกระแส มีหน่วยเป็น แอมแปร์ โลหะต่างชนิดกันจะมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่างกันอย่างกว้างขวางด้วยความต้านทานของตัวนำจะแปรผันตรงกับความยาวของตัวนำ แต่แปรผกผันกับ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ นั่นคือ

$$R = \rho L/A$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานของตัว ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุ มีหน่วยเป็นโอห์ม เมตร L คือ ความยาวของตัวนำ มีหน่วยเป็นเมตร A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ มีหน่วยเป็นตารางเมตร ความต้านทานจำเพาะของตัวนำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สำหรับโลหะนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะมีค่าเป็นบวก นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น R ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับสารกึ่งตัวนำโดยปกติค่าสัมประสิทธิ์ อุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะมีค่าเป็นลบ

โดยปกติ ในช่วงอุณหภูมิจำกัดใกล้ ๆ 0°C อาจถือว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิจะเป็นลักษณะเชิงเส้น

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิ t (มีหน่วยเป็นโอห์ม) R_0 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง (มีหน่วยเป็นโอห์ม) Δt เป็นอุณหภูมิจากอุณหภูมิอ้างอิง t_0 (เป็นองศาเซลเซียส) α เป็นสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ ของความต้านทานของวัสดุ (มีหน่วยเป็น (โอห์ม / โอห์ม) / °C หรือ (°C)⁻¹ หรือ (K)⁻¹) ตาราง 3 แสดงความต้านทานจำเพาะ และสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิของโลหะสามัญหลายชนิด ทั้งที่เป็นธาตุและโลหะผสม (ที่ 20°C)

ตาราง 3 สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ และความต้านทานจำเพาะที่ 20°C

วัสดุ	α (°C) ⁻¹	ρ ($\mu\Omega$ -cm)
นิกเกิล	0.0067	6.85
เหล็ก (โลหะผสม)	0.002 to 0.006	10
ทังสเตน	0.0048	5.65
อลูมิเนียม	0.0045	2.65
ทองแดง	0.0043	1.67
ตะกั่ว	0.0042	20.6
เงิน	0.0041	1.59
ทอง	0.004	2.35
ทองคำขาว	0.00392	10.5
ปรอท	0.00099	98.4
คาร์บอน	-0.0007	1400
อิเล็กทรอนิกส์	-0.02 to -0.09	Variable
เทอร์มิสเตอร์	0.068 to +0.14	10 ⁹

1.13.2 ชนิดของตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบความต้านทาน (Resistance Temperature

Detector: RTD)

1. การเลือกโลหะมาทำเป็น RTD ควรพิจารณาคุณสมบัติ ดังนี้

1.1 มีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานไฟฟ้าต่ออุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ความไว ในการวัดสูงสามารถอ่านค่าได้ถูกต้องแม่นยำ

1.2 มีความต้านทานจำเพาะสูง ทำให้ไม่ต้องใช้สายโลหะยาวเกินไป ขนาดจะเล็กกะทัดรัด และช่วยให้ได้ความไวในการวัดที่ดีด้วย

1.3 มีความคงทนถาวร แม้จะใช้เป็นเวลานาน หรือใช้ในอุณหภูมิช่วงกว้างมาก ๆ ก็ไม่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเสื่อม หรือเปลี่ยนแปลงไป

1.4 มีความต้านทานไฟฟ้า สัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) หรือใกล้เคียงเพื่อให้สเกลที่เครื่องวัดเป็นเชิงเส้นตรง สะดวกแก่การปรับค่าความต้านทานในการปรับจุดศูนย์ เป็นต้น

1.5 มีความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิที่เป็นค่าคงที่แน่นอนคือ มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) น้อย หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ณ อุณหภูมิหนึ่งจะต้องมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แน่นอนเพียงค่าเดียว

1.6 ทำเป็นเส้นได้ง่าย และมีความแข็งแรงในเชิงโครงสร้าง และถ้าเป็นไปได้ควรมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่อความร้อนต่ำ มีความบริสุทธิ์สูง

2 โลหะที่นำมาทำ ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบความต้านทาน

(Resistance Temperature Detector : RTD)

โลหะที่นิยมใช้ในการวัดอุณหภูมิแบบความต้านทาน (RTD) คือ ทองคำขาว นิเกิล และทองแดง โลหะเหล่านี้มีข้อดี คือ สามารถผลิตให้มีความบริสุทธิ์ได้ค่อนข้างสูง ผลที่ตามมาคือ สามารถผลิตให้ลักษณะจำเพาะความต้านทานที่มีความสามารถสร้างใหม่ (Reproducibility) สูงมาก

แม้ว่าเซอร์ฮัมฟรี เดวีส์ จะเป็นผู้ศึกษาการเปลี่ยนความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ ต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ และพบว่าความต้านทานจำเพาะของทองคำขาวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1821 (ปีเดียวกับที่ ซีเบคค้นพบเกี่ยวกับไฟฟ้าความร้อน) แต่การประยุกต์ใช้ทองคำขาวเป็น RTD สำหรับวัดอุณหภูมิได้เกิดขึ้นครั้งแรกอีก 50 ปี ต่อมา โดย เซอร์วิลเลียม ซิเมนส์ ในปี ค.ศ. 1871 มีการใช้ทองคำขาวเป็นวัสดุมาตรฐานใช้ในเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานซึ่งนิยามสเกลอุณหภูมิในทางปฏิบัติสำหรับนานาชาติ (ITS 90) จากจุดสามสถานะของไฮโดรเจน ($-259.3467^{\circ}\text{C}$) ไม่ใช่เพราะว่ามันมีสัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะสูงแต่ที่ใช้เพราะมีเสถียรภาพต่อการใช้งานดี ความจริงแล้วโดยทั่วไปสัมประสิทธิ์ความต้านทานที่มีค่าสูงเป็นสิ่งไม่จำเป็นในวัสดุที่ทำเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน เพราะค่าความต้านทานสามารถหาค่า โดยให้มีระดับความแม่นยำสูงได้ด้วยอุปกรณ์ที่เหมาะสม และระมัดระวังอย่างเพียงพอ เป็นไปได้ว่า ทองคำขาวซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะสูงที่สุด จะถือว่าเป็นวัสดุที่ดีที่สุดที่ใช้สำหรับการสร้างเทอร์โมมิเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจำเพาะที่มีค่าสูงนี้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงความบริสุทธิ์ของทองคำขาวว่ามีค่าสูงด้วยเช่นกัน การปรากฏของสารไม่บริสุทธิ์ในเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ขณะที่การแพร่หรือการระเหยเป็นไอจะเกิดขึ้นในขณะใช้งาน ทำให้ผลที่ตามมา คือ เทอร์โมมิเตอร์ขาดเสถียรภาพ ค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิของความต้านทานจำเพาะ จะมีความไวต่อความเครียดภายในวัสดุ จึงจำเป็นที่จะต้องนำทองคำขาวมาอบที่อุณหภูมิสูงกว่า ค่าอุณหภูมิใช้งานสูงสุด ผลรวมของการบอบอย่างเพียงพอ และความบริสุทธิ์ (มากกว่า 99.99%) ทำให้อัตราส่วนของความต้านทานที่จุดเป็นไอและจุดน้ำแข็งมีค่าสูงสุดซึ่งตรงกับข้อกำหนดของ IPTS 1968 ว่า ค่าอัตราส่วน R_{100}/R_0 นี้ต้องเกิน 1.39250 (ใน ITS - 90 ต้องการให้เทอร์โมมิเตอร์เป็นไปตามเกณฑ์สำหรับความไว $W(29.7646^{\circ}\text{C}) \geq 1.11807$ และที่อุณหภูมิสูง $W(961.78^{\circ}\text{C}) \geq 4.2844$ เมื่อ $W(t_{90})$ คืออัตราส่วนความต้านทาน $R(t_{90})/R(0.01^{\circ}\text{C})$) จุดที่สำคัญ คือ ในการติดตั้งต้องไม่ให้มันได้รับแรงดันในขณะใช้งาน มันไม่ออกซิไดซ์ แต่ต้องป้องกันการปนเปื้อน สาเหตุพื้นฐานที่

สุดของการปนเปื้อนของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานทองคำขาว คือ สัมผัสกับทราย (Silica) ในบรรยากาศรีดิวิง ซึ่งในบรรยากาศนี้ทรายจะถูกรีดิวซ์เป็นซิลิคอน (Si) ซึ่งจะเข้าผสมกับทองคำขาวทำให้เปราะ แตกง่าย

นิเกิลจะเป็นทางเลือกราคาถูกแทนทองคำขาว สำหรับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน

มันมีพิสัยการใช้งานจำกัดอยู่ในช่วง -100 องศาเซลเซียส ถึง ± 350 องศาเซลเซียส โดยมีค่า R_0 เท่ากับ 50, 100, 120 และ 600 Ω ที่ 0°C แต่สัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิของนิเกิล สูงกว่าของทองคำขาว 50% ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับเครื่องวัดบางแบบ การใช้งานเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานนิเกิลจะพบมากในระบบทำความร้อนและปรับอากาศ ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่า กระแสที่ไหลผ่านตัวตรวจวัดของเทอร์โมมิเตอร์ต้องมีค่าต่ำพอที่จะจำกัดการเกิดความร้อนขึ้นภายในตัวมัน อย่างไรก็ตามในการประยุกต์บางแบบ เช่น Flow Meter, Anemometer และ Psychrometer จะใช้ผลของ Self Heating โดยที่อุณหภูมิสุดท้ายของตัวตรวจวัดจะเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของของไหลหรืออากาศของกระบวนการ

ทองแดงอาจใช้เป็นตัวตรวจวัดที่ใช้สำหรับอุณหภูมิในช่วง -200 ถึง 250°C โดยมีค่า

R_0 เท่ากับ 10 Ω ที่ 20°C แม้จะมีความเป็นเชิงเส้นดีและราคาถูก แต่ทองแดงจะมีข้อเสีย คือ มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ เมื่อทำเป็นตัวตรวจวัดจะมีขนาดใหญ่ ไม่สะดวก นอกจากนั้นมันยังมีความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion) ต่ำ เป็นผลให้ลักษณะจำเพาะทางไฟฟ้าไม่เสถียร การประยุกต์หลักของมันสำหรับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน คือ ใช้ในเครื่องมือวัดอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อตัวมันอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีการควบคุม

3. ข้อได้เปรียบ เสียเปรียบของการใช้ RTD

3.1 ข้อได้เปรียบของการใช้ RTD คือ

- 3.1.1 มีความเป็นเชิงเส้นตลอดพิสัยการใช้งานดี
- 3.1.2 มีพิสัยของอุณหภูมิใช้งานกว้าง
- 3.1.3 สามารถวัดอุณหภูมิสูง
- 3.1.4 มีความสามารถสับเปลี่ยน (Interchangeable) ตลอดช่วงพิสัย

กว้างกว่าทรานสดิวเซอร์อุณหภูมิอื่น ๆ

- 3.1.5 มีเสถียรภาพที่ดีที่อุณหภูมิสูง

3.2 ข้อเสียเปรียบของการใช้ RTD คือ

- 3.2.1 มีความไวต่ำ
- 3.2.2 มีราคาสูงกว่าทรานสดิวเซอร์อุณหภูมิอื่น ๆ
- 3.2.3 ต้องการการต่อแบบสาม หรือสี่สาย

1.13.3 Resistance Temperature Detector หรือ RTD ทำจากทองคำขาวในงานอุตสาหกรรม

ในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิจะไม่เป็นเชิงเส้นตรง ใน

ปี ค.ศ. 1887 H.L. Callendar นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิจากความต้านทาน โดยเริ่มจาก

$$R_t = R (1 + A_t + Bt^2)$$

เมื่อ $A = 3.92 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ และ $B = -5.88 \times 10^{-7}/(^{\circ}\text{C})^2$ จากนั้นจะได้

$$t = \left[\frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \right] 100 + \delta \left[\frac{t}{100} \right] \left[\frac{t}{100} - 1 \right]$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิที่วัดเป็นองศาเซลเซียส R_t , R_{100} และ R_0 คือ R ที่ $t^{\circ}\text{C}$, R ที่ 100°C และ R ที่ 0°C

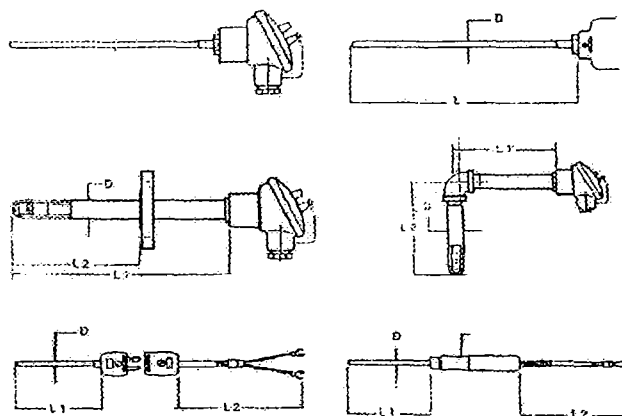
ตามลำดับ δ เป็นค่าคงที่ ที่แสดงการเบี่ยงเบนเล็กน้อยจากเส้นตรง ($\delta = -1.5$) สมการนี้จะใช้เป็นส่วนในการนิยามอุณหภูมิ IPTS จากจุดน้ำแข็งถึงจุดแอนติโมนี (630.74°C) จากจุดออกซิเจน (-182.96°C) ถึงจุดน้ำแข็ง สมการจะให้ผลไม่ผิดนัก ในปี 1925 Van Dusen ได้เสนอเพิ่มเทอมที่สาม

(Ct^3 , $C = 4.33 \times 10^{-10}/(^{\circ}\text{C})^3$) แก่สมการ Calendar ทำให้ความแม่นยำในพิสัยดังกล่าวดีขึ้น และได้ใช้สำหรับ IPTS จากปี ค.ศ. 1927 ถึง 1968 เรียกว่าสมการ Calendar – Van Dusen

$$t = \left[\frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} \right] 100 + \delta \left[\frac{t}{100} \right] \left[\frac{t}{100} - 1 \right] + \beta \left[\frac{t}{100} - 1 \right] \left[\frac{t}{100} \right]^3$$

ค่า β จะหาจากที่จุดออกซิเจน ($\beta = 0$ ที่ $t > 0$ และ $\beta = 0.11$ ที่ $t < 0$) สมการนี้ถูกแทนในปี 1968 ด้วย โพลีโนเมียลอันดับสี่สิบ

RTD ทองคำขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรม จะมีลักษณะเป็นหัววัด (Probe) ซึ่งประกอบด้วย 1) ตัวต้านทานตรวจอุณหภูมิ 2) ปลอกหุ้มตัวต้านทาน 3) สายต่อ (อาจเป็นแบบ 2 สาย 3 สาย หรือ 4 สาย) และ 4) ปลายสำหรับต่อสาย ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 RTD ทองคำขาวในอุตสาหกรรม

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ . 2002:T15)

ตัวต้านทานตรวจอุณหภูมิ (Sensing Element) จะมี 2 แบบ

1. แบบลวดพัน ทำจากลวดทองคำขาว 99.99% บนแกนแก้วหรือเซรามิค ปิดฉนวนที่อยู่
ในแคปซูลแก้ว หรือเซรามิค เพื่อป้องกันการปนเปื้อน และทำให้เกิดเสถียรภาพทางกล และไฟฟ้า ตัวต้าน
ทานจะมีค่า $\alpha = 0.00385 \Omega/\Omega^{\circ}\text{C}$ (ยุโรป) หรือ $\alpha = 0.00392 \Omega/\Omega^{\circ}\text{C}$ (อเมริกัน)

2. แบบฟิล์มบาง ทำจากทองคำขาวที่เคลือบเป็นฟิล์มหนาประมาณ 1 ไมครอน บนฐาน
รองเซรามิค จากนั้นก็ใช้เลเซอร์เล็มจนมีค่า R_0 ที่เที่ยงตรง จากนั้นจึงปิดฉนวนด้วยแก้วเพื่อป้องกัน

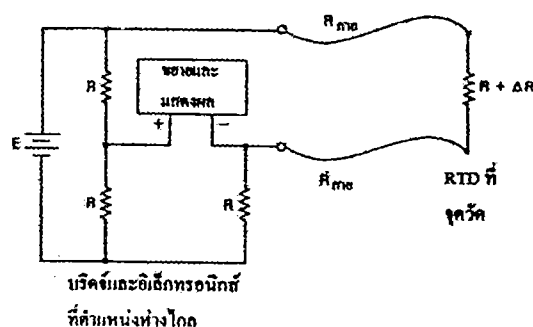
RTD ทองคำขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรม จะมีค่า R_0 (Ω ที่ 0°C) ให้เลือกหลายค่า เช่น 20,
50, 100, 200, 500,... แต่แบบที่นิยมที่สุด คือ 100 โอห์ม (Pt 100) โดยจะมีสาระในการเลือก ดังนี้

1. พิสัยอุณหภูมิใช้งาน จาก -200 ถึง 850°C (แบบพิเศษสูงถึง 962°C)
2. สัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิ เป็นเปอร์เซ็นต์/ $^{\circ}\text{C}$ ที่ $25^{\circ}\text{C} = \alpha = 0.39$
3. การสร้าง (Construction) : เป็นลวดทองคำขาวพัน (Wire Wound) หรือ
เป็นทองคำขาวบนฟิล์มบาง
4. Self – Heating : 0.02 ถึง $0.75^{\circ}\text{C}/\text{mW}$ (ทั่วไป)
5. สายต่อ : ทองแดง อาจเป็นแบบสองสาย สามสาย หรือสี่สาย ขึ้นกับระบบ
6. การชดเชยความต้านทานสาย : ใช้แบบสามสาย หรือสี่สาย
7. ความแม่นยำ : 0.6°C ที่ 100°C
8. การแยกชุด : 0.29 ถึง $0.39 \Omega/^{\circ}\text{C}$
9. Drift : ประมาณ 0.01°C ถึง 0.1°C ต่อปี

1.13.4 การวัดความต้านทานของ(Resistance Temperature Detector : RTD)

โดยพื้นฐานตัวต้านทานตรวจอุณหภูมิจะเป็นอุปกรณ์ที่มี 2 สาย แต่เมื่อต่อตัวต้านทานกับ
สายขยายระยะ (Extension Wire) จะต้องพิจารณาการต่อว่าจะใช้การต่อแบบ 2, 3 หรือ 4 สาย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ
กับวัตถุประสงค์ในการวัดที่ต้องการ เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของมันแปรไปตามอุณหภูมิ เราจะวัด
อุณหภูมิโดยอ้อม ด้วยการอ่านค่าแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โดยใช้กระแสคงที่ ผ่านตัวต้านทานตามกฎ
ของโอห์ม ค่ากระแสที่ใช้ ควรมีค่าน้อยเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้การเกิดแรงดันตกคร่อม 0.1 โวลต์ ในตัวตรวจ
แบบ Pt100 ที่ 0°C จากนั้นจะต้องมีวงจร หรืออุปกรณ์ที่จะวัดค่าแรงดันที่แปรตามค่าอุณหภูมิ

เนื่องจากปกติมักติดตั้ง RTD ไว้กับจุดที่จะวัด ซึ่งอยู่ไกลออกไปจากเครื่องวัด วิธีวัดที่ง่ายที่
สุด คือ ให้ RTD เป็นแขนหนึ่งของวงจรวีทสโตน บริดจ์ ซึ่งหมายถึง ใช้สายทองแดงต่อเชื่อม RTD จากจุดวัด
ไปยังเครื่องวัดโดยใช้สายต่อ 2 เส้น ดังภาพประกอบ 28 $R_{สาย}$ จะแทนความต้านทานของสายต่อจากภาพ
ประกอบ จะเห็นว่า ความต้านทาน R_x ที่ต้องการ แทนที่จะเป็น $R + \Delta R$ จะกลายเป็น $R + R + 2 R_{สาย}$ นั่น
คือ ค่าที่อ่านได้จะมากกว่าค่าที่ควรจะเป็นอยู่เท่ากับ $2 R_{สาย}$ ซึ่งค่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ
รายรอบโดย ตาราง 2 แสดงค่าความต้านทานของสายต่อ (ทองแดง) ขนาดต่าง ๆ

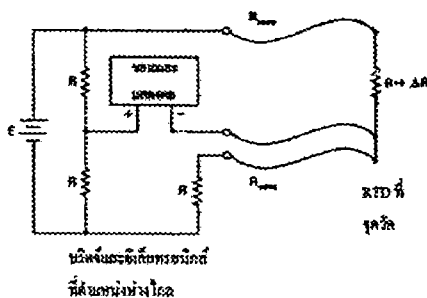


ภาพประกอบ 29 การต่อ RTD แบบ 2 สาย ไปยังวงจรวีทสโตนบริดจ์
(เอก ไชยสวัสดิ์, 2542:34)

ตาราง 4 ความต้านทานของสายทองแดงที่ 25°C

ขนาดสาย			โอห์ม / ฟุต	โอห์ม / เมตร
AWG เบอร์	เส้นผ่าศูนย์กลาง			
	(นิ้ว)	(มิลลิเมตร)		
12	0.0808	2.05	0.0016	0.0052
14	0.0641	1.63	0.0026	0.0085
16	0.0508	1.29	0.0041	0.0134
18	0.0403	1.02	0.0065	0.0213
20	0.0320	0.81	0.0103	0.0338
22	0.0253	0.64	0.0165	0.0541
24	0.0201	0.51	0.0262	0.0860
26	0.0159	0.40	0.0418	0.1371
28	0.0126	0.32	0.0666	0.2185
30	0.0100	0.25	0.1058	0.3471

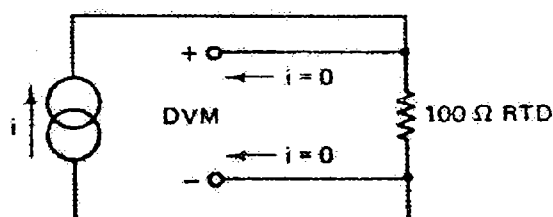
การต่อโดยใช้สายต่อ 3 เส้น จาก RTD ไปยังเครื่องวัด ดังภาพประกอบ 30 จะทำให้ความคลาดเคลื่อน เนื่องจากความต้านทานของสายต่อหมดไป เนื่องจาก R_{wire} เส้นที่ 1 และ 2 จะปรากฏอนุกรมอยู่กับ R ในแขนสองแขนของบริดจ์ ที่อยู่ติดกัน ทำให้สามารถหักล้างกันได้ ขณะที่ R_{wire} เส้นที่ 3 จะอยู่กับตัวตรวจจิบ หรือกับแหล่งกำเนิดแรงดัน เป็นผลให้ไม่มีผลกระทบ



ภาพประกอบ 30 การต่อ RTD แบบ 3 สาย

(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:35)

โดยการใช้แหล่งจ่ายกระแสที่ร่วมกับโวลต์มิเตอร์ดิจิทัล จะช่วยให้การวัดความต้านทานของ RTD ง่ายกว่าการวัดโดยใช้บริดจ์ จากภาพประกอบ 31 แรงดันเอาต์พุตที่อ่านจากโวลต์มิเตอร์ดิจิทัลจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความต้านทานของ RTD แม้ว่าวิธีนี้จะใช้สายต่อ 4 เส้น แต่วิธีนี้จะเพิ่มความแม่นยำในการวัด (นอกเหนือจากความสะอาดรวดเร็วในการอ่านค่า) เนื่องจาก แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสายต่อเนื่องจากอุณหภูมิรอบเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากโวลต์มิเตอร์ดิจิทัลจะวัดเฉพาะแรงดันคร่อม RTD การเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมสายต่อจะไม่มีผลต่อค่าที่อ่านจากโวลต์มิเตอร์ดิจิทัล นอกจากนั้นจะสามารถทำการอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์ดิจิทัล นอกจากนั้นจะสามารถทำการอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์ดิจิทัลโดยอัตโนมัติ



ภาพประกอบ 31 การต่อ RTD แบบ 4 สาย(เอก ไชยสวัสดิ์. 2542:36)

แม้การวัดแบบ 3 สาย หรือ 4 สาย จะเป็นวิธีที่ง่ายและแม่นยำในการวัดค่าความต้านทานของ RTD อย่างไรก็ตาม เพราะว่าความต้านทานของ RTD จะเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของอุณหภูมิ ดังนั้นจำเป็นจะต้องใช้ตารางเพื่อแสดงความสัมพันธ์ค่าความต้านทานที่วัดได้ต่อค่าอุณหภูมิ (ดังแสดงในตาราง 4)

ขั้นตอนการแปลงโดยใช้ตารางนี้จะเสียเวลา และทำให้ไม่สามารถแสดงค่าบนเครื่องบันทึกสัญญาณเป็นค่าอุณหภูมิโดยตรง

ตาราง 5 เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานทองคำมาตรฐาน $R(0) = 100.00 \, \Omega$ (-200°C $\sim 0^{\circ}\text{C}$)

$^{\circ}\text{CITS90}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	18.52									
-190	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95
-180	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25
-170	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52
-160	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76
-150	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.61	37.22	36.80	36.38	35.96
-140	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14
-130	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29
-120	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42
-110	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52
-100	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60
-90	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66
-80	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70
-70	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73
-60	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73
-50	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62
-10	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55
0	100	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48

ตาราง 6 เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานทองคำมาตรฐาน $R(0) = 100.00 \, \Omega$ ($0^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$)

0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.51	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33
90	134.71	135.09	135.47	135.82	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21
140	153.58	153.93	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95
150	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68
160	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40
170	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11
180	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80

ความสัมพันธ์อุณหภูมิ – ความต้านทานที่ใช้ในมาตรฐานนี้ จะเป็นดังนี้

สำหรับพิสัย – 200°C ถึง 180°C

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3]$$

สำหรับพิสัย 0 ถึง 850°C

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2]$$

$$\text{เมื่อ } A = 3.9083 \times 10^{-3} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \, ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12} \, ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

1.13.5 ข้อพิจารณาในทางปฏิบัติของความต้านทาน

1. การติดตั้งระบบวัดของ RTD จะไม่ยุ่งยาก เนื่องจากไม่ต้องการสาย หรือจุดต่ออ้างอิง นอกจากนั้น ในปัจจุบันได้มีการผลิตเครื่องวัดและเครื่องควบคุมที่มีความแม่นยำสูง มีการแยกชุดดีกว่า และมีสมรรถนะสูงในราคาที่ลดลง
2. เนื่องจากโครงสร้าง (ในการสร้าง) ของตัวตรวจรู้อุณหภูมิทำให้มันแตกหักง่ายกว่าเทอร์โมคัปเปิล จึงทำให้ต้องมีปลอกหุ้ม แต่อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้ตัวตรวจรู้อุณหภูมิจะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ทำปลอกหุ้มที่ใช้ เช่น ถ้าหากใช้พวกสเตนเลส ไม่ควรใช้ที่อุณหภูมิเกิน 500°C เนื่องจากมีการปนเปื้อน
3. เนื่องจากจะต้องมีการป้อนกระแสผ่านตัว RTD เพื่อให้เกิดแรงดันตกคร่อมสำหรับวัดกระแสจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน RTD ทำให้ความต้านทานของตัวมันเปลี่ยนไป ผลคือทำให้เราได้ค่าอุณหภูมิที่ผิดพลาด เรียกว่าการกำเนิดความร้อนในตัว (Self – Heating) ค่าทั่วไป คือ $\frac{1}{2}^{\circ}\text{C}$ ต่อ มิลลิวัตต์ในอากาศ ซึ่งถ้า RTD อยู่ในตัวกลางที่นำความร้อนมันจะส่งผ่านความร้อนสู่ตัวกลาง และความผิดพลาดจากการกำเนิดความร้อนในตัวจะมีค่าต่ำลง RTD ที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ต่อ มิลลิวัตต์ในอากาศจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง $1/10^{\circ}\text{C}$ ในอากาศที่ไหลด้วยอัตรา 1 เมตรต่อวินาที การลดความผิดพลาดเนื่องจากการกำเนิดความร้อนในตัว ทำโดยใช้กระแสผ่านค่าต่ำสุดเท่าที่ยังคงให้การแยกชุดตามที่ต้องการ และใช้ RTD ใหญ่ที่สุดเท่าที่ทำได้ที่ยังคงให้เวลาตอบสนองดี
4. เมื่อเรานำ RTD เข้าไปวัด อุณหภูมิที่ต้องการวัดจะต้องเปลี่ยนแปลงไป การแบ่งอุณหภูมิไปในกรณี RTD จะมีมากกว่ากรณีเทอร์โมคัปเปิล เนื่องจากปกติ RTD มีขนาดใหญ่กว่า
5. เมื่อต่อขยายระยะ RTD (ทองคำขาว) ไปยังเครื่องวัดจะเป็นการนำสายทองแดงต่อเข้ากับทองคำขาว อันจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อนที่จุดต่อ ทำให้ค่าแรงดันที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป
6. สังเกตรหัสสีและการกำหนดปลายสาย
7. ในกรณีต้องใช้สายต่อยาว ต้องแน่ใจว่า ความต้านทานของสายต่อไม่มากกว่าที่กำหนดที่อินพุทของเครื่องวัด
8. วัสดุฉนวนที่หุ้มสายต่อจะมีหลายแบบ ตามการประยุกต์ที่หลากหลาย เวลาใช้ต้องพิจารณาสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น
9. เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในค่าที่วัด ให้ทำการตรวจสอบตัวตรวจรู้ สายต่อขยายระยะจุดต่อร่วม และเครื่องวัดบ่อยครั้งที่ปัญหาจะเนื่องมาจากการต่อสายไม่ถูกต้องหรือเนื่องจากการสอบเทียบเครื่องวัดมากกว่าจะเกิดที่ตัวตรวจรู้อุณหภูมิ

1.14 การทำงานของโซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay)

โซลิดสเตตรีเลย์ ที่เห็นกันในห้องตลาดส่วนใหญ่จะเป็นแบบ ZERO SWITCHING (สำหรับโหลด AC) และ DC SWITCHING (สำหรับโหลด DC) เพราะจะใช้ได้กับโหลดทุกประเภทไม่ต้องสอบถามรายละเอียดมากมาย และอาจจะมี ANALOG SWITCHING อยู่บ้าง เพื่อนำไปควบคุมโหลดที่สามารถทำได้ เช่น ฮีตเตอร์ โดยใช้ร่วมกับเครื่องควบคุมอุณหภูมิระบบ PID ซึ่งโซลิดสเตตรีเลย์ประเภทนี้ มีผู้ผลิตน้อยมากที่หาได้ในประเทศไทยก็จะมียี่ห้อ CARLO GAVAZZI (เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ 2002:T140

1.14.1 ข้อดีและข้อเสียของโซลิตสเตรียล

คำถามนี้ตอบยากเพราะว่าไม่มีสิ่งใดในโลกที่สมบูรณ์แบบ 100% และไม่มีสิ่งใดในโลกที่จะแย่ 100% จึงขึ้นอยู่กับว่าเราจะมองข้อเปรียบเทียบจุดไหน แต่สามารถบอกได้แค่เพียงว่าโซลิตสเตรียลมีข้อดีมากกว่า รีเลย์ธรรมดา ดังนี้

ข้อดีของโซลิตสเตรียล

1. อายุการใช้งานมากกว่า 1 พันล้านครั้ง ข้อนี้หลายท่านคงจะนึกคิดคำนึงอยู่ในใจว่าไม่จริงเคยใช้อยู่ต้องเปลี่ยนอยู่บ่อย ๆ เสียง่าย ข้อนี้จะขออธิบายเพิ่มเติม เจาะรายละเอียดภายหลัง
2. ไม่มีการสปาร์ก หรือ อาร์ก, เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) น้อย
3. ไม่กลัวการสั่นสะเทือน หรือการกระทบกระเทือน
4. ไม่กลัวฝุ่น
5. ไม่มีเสียงรบกวน ทำงานเงียบสนิท
6. ใช้งานกับ PLC หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้โดยตรง
7. ทำงาน (การตัดต่อ) ได้เร็ว

ข้อเสียของโซลิตสเตรียล

1. ต้องใช้แผ่นระบายความร้อน (HEAT SINK)
2. ทน TRANSIENT VOLTAGE ได้ต่ำ
3. เกิดแรงดันตกคร่อม
4. มีกระแสรั่วไหล เมื่ออยู่ในสถานะ OFF

1.14.2 การใช้งานของโซลิตสเตรียล

วิธีการใช้งานที่ถูกต้องด้วย ไม่ใช่ว่า ซื้อโซลิตสเตรียลมาแล้ว ต่อไฟอินพุท เอาท์พุท ใช้งานเลย ถ้าทำอย่างนี้เสียง่ายแน่นอน ในบางงานอาจจะเสียโดยใช้งานได้ไม่ถึงชั่วโมง ถ้าต้องการใช้โซลิตสเตรียลให้ทนทานนานจนลืม ต้องมีเฟอร์นิเจอร์หรืออุปกรณ์ช่วยโซลิตสเตรียล ดังนี้

1. HEAT SINK (แผ่นระบายความร้อน) เนื่องจากโซลิตสเตรียล เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิดแผ่ความร้อน ถ้าการระบายความร้อนไม่ดีพอจะเกิดความร้อนสะสมที่ตัวโซลิตสเตรียล ทำให้ OVER HEAT และเสียได้ ในบางงานถ้าใช้กระแสไฟฟ้าสูง ๆ เพียงแค่ติด HEAT SINK ก็ยังไม่พอ ต้องติดพัดลมระบายอากาศช่วยอีกด้วย และการติดตั้ง HEAT SINK COMPOUND ช่วยด้วย เพื่อไม่ให้มีช่องอากาศอยู่ระหว่าง HEAT SINK กับตัวโซลิตสเตรียล

2. SEMICONDUCTOR FUSE ฟิวส์นี้จะช่วยป้องกัน OVER LOAD ถ้าโหลดเกิดชอร์ตขึ้นมา

3. METAL OXIDE VARISTOR (MOV) ป้องกัน TRANSIENT VOLTAGE ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทุกขณะ จึงต้องป้องกันไว้ก่อน ปัญหานี้พบบ่อยมากที่อยู่ดี ๆ โซลิตสเตรียลก็เกิดเสียขึ้นมา โดยที่สภาพ

ภายนอกก็ยิ่งเหมือนเดิม ทำให้หลาย ๆ ท่านเข้าใจว่าปัญหาอยู่ที่โซลิดสเตตรีเลย์ใช้งานได้ไม่ทน แต่ถ้าเอา MOV มาต่อคร่อม LINE OUT ก็จะช่วยลดปัญหานี้ไปได้

นอกจากที่จะต้องใช้อุปกรณ์ช่วยเหลือแล้ว ในการเลือกใช้โซลิดสเตตรีเลย์ก็สำคัญเช่นกัน ต้องดูคุณสมบัติให้ละเอียดว่าใช้กับโหลดประเภท RESISTIVE ได้เท่าไร และโหลดประเภท INDUCTIVE ได้เท่าไรให้ชัดเจน เพราะว่าโดยทั่วไปแล้วโซลิดสเตตรีเลย์จะทนกระแสโหลดประเภท RESISTIVE ได้สูงกว่า โหลดประเภท INDUCTIVE ฉะนั้นในการทำแคตาล็อกของผู้แทนจำหน่ายจึงลงค่ากระแสโหลดประเภท RESISTIVE ไว้ แต่ถ้าท่านจะซื้อโซลิดสเตตรีเลย์ไปใช้งานกับโหลดประเภท INDUCTIVE เช่น มอเตอร์ ก็ต้องดูข้อมูลในแคตาล็อกด้วยว่ามีบอกไว้ชัดเจนหรือไม่ ถ้าไม่บอกไว้ต้องสอบถามผู้แทนจำหน่ายให้ทราบข้อมูลชัดเจนในแคตาล็อกอาจจะบอกไว้ แต่ไม่อธิบายประเภทของโหลด แต่จะลงไว้ว่า AC-1, AC-3 ซึ่งมันก็คือการแบ่งประเภทของโหลดนั่นเอง AC-1 คือโหลดทั่วไปไม่ใช่มอเตอร์ เช่น ฮีตเตอร์ ส่วน AC-3 คือโหลดประเภทมอเตอร์ เมื่อทราบกระแสโหลดที่แท้จริงแล้ว ก็ไม่ควรที่จะใช้งานเต็มที่ตามนั้น ควรจะใช้กระแสโหลดเพียง 70% เท่านั้น เพราะประเทศไทยเราร้อน ถึงเราจะติดตั้ง HEAT SINK และพัดลมช่วยในการระบายความร้อนแล้วก็ตาม มันก็ยังไม่เหมือนกับทางยุโรปเมืองหนาวอยู่ดี

2 กระบวนการพัฒนาอย่างควบคุมคุณภาพแบบบรรจุของเหลว

การพัฒนาอย่างควบคุมคุณภาพแบบบรรจุของเหลวที่ดัชนีในงานสอบเทียบมีขั้นตอนดังนี้

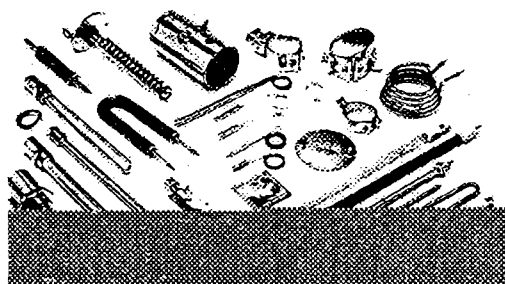
สำรวจรูปแบบการออกแบบขนาดรูปร่างและศึกษาหลักการทำงานของส่วนประกอบต่างๆ

ของเครื่องสร้างอุณหภูมิจากเอกสารผลิตภัณฑ์สินค้าของผู้นำเข้าจากต่างประเทศประมาณ 3 บริษัท (ดูที่ภาคผนวก ค) และทำการศึกษาค้นคว้าหลักทำงานของอุปกรณ์ต่างๆเพิ่มเติมตามรายละเอียดดังนี้

2.1 ฮีตเตอร์ความร้อน

หลักการทำงานของฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในอุตสาหกรรมที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่าน ลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำความร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียว และทนอุณหภูมิได้สูง สำหรับลวดฮีตเตอร์ TIC เป็นลวด Kanthal (นิกเกิล : โครเมียม/80 : 20) จากประเทศสวีเดน ทนอุณหภูมิได้ถึง 1250 °C ส่วนประกอบอื่น ๆ ในการผลิตฮีตเตอร์มีดังนี้



ภาพประกอบ 32 ฮีตเตอร์

(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T22)

2.1.1 ฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ (Mgo) มีค่าความนำไฟฟ้าต่ำแต่ค่าความร้อนดีมาก ทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างลวดฮีตเตอร์กับปลอกโลหะเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสรั่ว (Leak Current) จากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ จุดสำคัญคือ ห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น หากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตาอบ

2.1.2 Insulation Tester เป็นเครื่องแนใจว่าในการใช้งานจริงจะไม่มีกระแสรั่วจากลวดฮีตเตอร์สู่ผิวโลหะซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้ มาตรฐานของ TIC ได้กำหนดการทดสอบแรงดันที่ 1500 VAC และค่าความเป็นฉนวนต้องมากกว่า 500 M

2.2 ฮีตเตอร์ถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังนี้

2.2.1 ฮีตเตอร์แท่ง หรือ Cartridge Heater ใช้ให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก และโลหะต่าง ๆ ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก

2.2.2 ฮีตเตอร์ครีป หรือ Finned Heater และ ฮีตเตอร์ท่อกลม ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้งในเตาอบ

2.2.3 ฮีตเตอร์จุ่ม หรือ Immersion Heater หรือบางที่เรียกว่า ฮีตเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานต้มน้ำ – ต้มน้ำมัน งานผสมสาร

2.2.4 บอบบินฮีตเตอร์ (Bobbin Heater) ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม

2.2.5 ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัส โดยตรงไม่เหมาะกับวัสดุที่มีลักษณะมันวาว เนื่องจากวัตถุมันวาวจะมีคุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ใช้ติดตั้งในเตาอบ หรือเหนือคอนเวเยอร์ได้

2.2.6 ฮีตเตอร์รัดท่อ หรือ Band Heater ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อหรือถึงรูปทรงกระบอกโดยรัดจากด้านนอก

2.2.7 ฮีตเตอร์แผ่น หรือ Strip Heater ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรงสามารถออกแบบให้เป็นรูปทรงใด ๆ ก็ได้

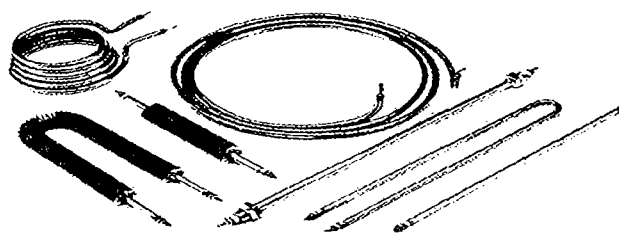
ลักษณะการใช้งานทั่วไปของ Cartridge Heater คือ ใส่ไว้ในช่องบนวัตถุ ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากฮีตเตอร์ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน ตัวอย่างงาน เช่น ให้ความร้อนแม่พิมพ์ของเครื่องบรรจุหีบห่อ Cartridge Heater แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ High Density และ Low Density (บางครั้งเรียกว่า High Temperature และ Low Temperature)

การกำหนดว่า Cartridge Heater ตัวใดเป็น High Density และ Low Density จะพิจารณาจากค่า Watt Density ซึ่งเป็นหน้าที่ของทางผู้ผลิต ทาง TIC สามารถผลิตฮีตเตอร์ให้ตามที่ต้องการได้ โดยผู้ใช้งานเพียงระบุค่า 4 ค่า เท่านั้น คือ 1. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2. ความยาว 3. แรงดัน 4. กำลังวัตต์

โครงสร้างของ Tubular Heater คือ มีขดลวดความร้อนบรรจุอยู่ในท่อโลหะ ช่องว่างระหว่างขดลวดความร้อนและท่อโลหะ จะถูกอัดแน่นด้วยผงแมกนีเซียมออกไซด์และถูกรีดลงให้มีความหนาแน่นตามมาตรฐานวัสดุที่ใช้ทำ Tubular Heater มีหลายชนิดต่างกันตามลักษณะการใช้งานดังนี้

ทองแดง	ใช้กับ	น้ำสะอาด
สแตนเลส 304	ใช้กับ	อากาศที่มีการหมุนเวียน, เตาอบ, น้ำ, น้ำมัน ของเหลว หรือในอุตสาหกรรมอาหารที่ pH 5-9
สแตนเลส 316	ใช้กับ	อากาศที่มีการหมุนเวียน, กรด สารละลาย, สารเคมี หรือของเหลวที่มีลักษณะกัดกร่อน
อินโคลอย 800	ใช้กับ	อากาศที่ไม่มีการหมุนเวียน เช่น ในเตาอบ, น้ำ, น้ำมัน, และของเหลวทั่วไป

2.2.8 ฮีตเตอร์ครีป ทำจาก Tubular Heater ที่ดัดเป็นรูปต่าง ๆ และเพิ่มแผ่นครีปม้วนติดกับท่อฮีตเตอร์ อย่างต่อเนื่องจากปลายด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนของแผ่นครีปที่เพิ่มขึ้นมาจะทำให้ฮีตเตอร์ สามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วขึ้น ส่วนฮีตเตอร์ท่อกลมคือ Tubular Heater ที่ใช้ให้ความร้อนโดยตรงโดยไม่ติดครีป



ภาพประกอบ 33 ฮีตเตอร์ครีปและฮีตเตอร์ท่อกลม
(เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์. 2002:T25)

ฮีตเตอร์ครีปและฮีตเตอร์ท่อกลม ใช้กับงานต่อไปนี้

1. ใช้ในเตาอบ
2. ใช้ในท่อ DUCT
3. ใช้กับเครื่องปรับอากาศ

การติดตั้งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

ติดตั้งแบบให้ความร้อนโดยตรง และแบบส่งผ่านความร้อนจากห้องเผาไปยังห้องอบโดยใช้ลมร้อน เป็นฮีตเตอร์ที่ใช้กับอากาศ ไม่ควรใช้กับของเหลว เนื่องจากจะเกิดตะกอนจับที่ครีปของฮีตเตอร์ทำให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้ ในกรณีที่ให้ความร้อนกับอากาศที่ไม่หมุนเวียน ควรเลือกวัสดุที่ใช้ทำฮีตเตอร์เป็นอินโคลอย เนื่องจากมีคุณสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดี และทนอุณหภูมิได้สูงกว่าชนิดอื่น ทำจาก

Tubular Heater ที่ตัดเป็นรูปตัวยู และเชื่อมติดกับเกลียว ซึ่งมีขนาดเกลียวตั้งแต่ 1", 1 ¼", 1 ½", 2" และ 2 ½" ขนาดของเกลียวจะขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นของฮีตเตอร์ ซึ่งมีตั้งแต่ 1U, 2U, 3U, 6U ตามความเหมาะสมของกำลังวัตต์ และความยาวของตัวฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์แบบจุ่ม เหมาะสำหรับใช้กับของเหลว เช่น ต้มน้ำหรืออุ่นน้ำมัน การติดตั้งสามารถทำได้โดยเชื่อมเกลียวตัวเมียติดกับถังแล้วใส่ฮีตเตอร์แบบเกลียวเข้าไปโดยตัว ฮีตเตอร์ขนานกับพื้นถัง ควรระวังไม่ให้ส่วนของฮีตเตอร์โผล่พ้นของเหลวเนื่องจากจะทำให้ส่วนที่อยู่เหนือของเหลวร้อนจัดเกินไป ทำให้อายุการใช้งานสั้น และเพื่อให้ความร้อนกระจายทั่วถึง ควรติดตั้งใบพัดกวนของเหลวด้วย

ฮีตเตอร์แบบจุ่มชนิดหนึ่ง ถูกออกแบบสำหรับให้ความร้อนกับของเหลว สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ปลอกฮีตเตอร์สามารถเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน มีให้เลือกทั้งสแตนเลส 304, สแตนเลส 316 และคอปเปอร์ โดยแบบสแตนเลสมีข้อดี คือ เมื่อฮีตเตอร์เสียสามารถซ่อมได้ แบบคอปเปอร์ใช้สำหรับงานชุบโดยใช้ไฟฟ้า, แชนโครด หรือ สารละลาย

2.2.9 การให้ความร้อนแบบแผ่รังสี (INFRARED HEATER)

ลักษณะของ Infrared Heater

1. เป็นการส่งผ่านความร้อนแบบแผ่รังสี (เหมือนกับที่ดวงอาทิตย์ส่งความร้อนมายังโลก) จึงมีประสิทธิภาพสูง ความสูญเสียต่ำ ประหยัดไฟได้ 30-50%
2. สามารถให้ความร้อนวัตถุได้ถึงเนื้อใน จึงทำให้ประหยัดเวลาได้ 1-10 เท่า (การให้ความร้อนแบบการพา และการนำความร้อนจะทำให้วัตถุร้อนเฉพาะที่ผิว แล้วค่อย ๆ ซึมเข้าไปเนื้อในจึงใช้เวลามาก)

3. มีขนาดเล็กกว่าฮีตเตอร์แบบทั่ว ๆ ไป ทำให้ประหยัดเนื้อที่
4. การติดตั้ง และการถอดเปลี่ยนเพื่อซ่อมบำรุงง่าย
5. มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากไม่มีเปลวไฟ ตัวเรือนมีความเป็นฉนวนสูง ไฟไม่รั่ว
6. ให้รังสีช่วง 3-10 m. ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเกือบทุกชนิดสามารถดูดซับรังสีได้ดี

การประยุกต์ใช้งาน

1. ใช้ในการอบแห้งต่าง ๆ เช่น สี, แล็กเกอร์, กาว, เมล็ดพันธุ์พืช, อีพอกซี
2. ใช้กับอุตสาหกรรมพลาสติก อบพลาสติกให้อ่อนตัวก่อนนำไปเข้าเครื่องเป่า
3. ใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร ขนมปัง เบเกอรี่
4. ใช้ในวงการแพทย์ เช่น การอบฆ่าเชื้อ, ห้องอบเด็กทารก
5. ใช้กับอุตสาหกรรมเคลือบผิวต่าง ๆ เช่น เคลือบสี, ผิว, เซรามิค, มีรามีน

ข้อควรระวัง

1. การให้ความร้อนแบบอินฟราเรด สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ ตัววัตถุจะต้องดูดซับรังสีได้ดี ดังนั้น วัตถุบางชนิดที่มีผิวมันวาว หรือมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงได้ดี จะไม่เหมาะกับการให้ความร้อนด้วยวิธีนี้

2. ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิ พยายามวางหัววัตถุอุณหภูมิให้ใกล้วัตถุมากที่สุด หรือใช้วัตถุอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า มีขนาด 220 V 20 W ส่วนประกอบที่สำคัญมี สเตเตอร์ โรเตอร์และ ฝาครอบหุ้มท้ายพร้อมตัวระบายความร้อน

สเตเตอร์ ส่วนที่เป็นแกนขดลวดจะทำด้วยแผ่นเหล็กบางลามิเนตนำมาอัดติดกันเป็นรูปทรงกระบอก ด้านในของแกนจะมีส่วนที่ยื่นออกไป เพื่อทำหน้าที่รองรับขดลวดแม่เหล็กและทำหน้าที่เป็นขั้วแม่เหล็กแบบเซเลียมโพล ที่เซเลียมโพลจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือเซตเตดโพล (Shaded pole) และอันเซตเตดโพล (Unshared pole) เซตเตดโพลจะมีพื้นที่ผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กแคบและมีไว้สำหรับพันขดลวดเซตเตดโพล (Shaded coil) ขดลวดนี้จะทำด้วยแผ่นทองแดงแบนสวมไว้อย่างแน่นสำหรับอันเซตเตดโพลจะมีพื้นที่ผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กมากและพันด้วยขดลวดอันเซตเตด (Unshared coils) บางที่เรียกว่า ขดลวดเมน (Main Winding)

โรเตอร์ เป็นแบบสไลด์เรจเกจโดยมีสลิตสำหรับฝังตัวนำจะมีลักษณะเฉียงกับแนวแกนเพลลาและยึดติดแน่นกับเพลลา ฝาปิดหุ้มท้าย ทำด้วยเหล็กหล่อเหนียว

หลักการทำงาน เมื่อเริ่มป้อนไฟสลับหนึ่งเฟสเข้าขดลวดเมน กระแสไฟฟ้าไหลเข้าจะเริ่มมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามลักษณะรูปคลื่นไซน์ ไขกุญไขควงมือขวาพิจารณาทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ที่จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากขั้วแม่เหล็ก ขั้วแม่เหล็กจะเป็นขั้วเหนือ (N) ขณะที่เกิดเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วแม่เหล็กนั้น ที่เซตเตดโพลจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กมาหักล้างกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านเซตเตดโพลตามกฎของเลนซ์ แต่เส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านเซตเตดโพลจะไม่หมดไปแต่กลับจะบิดเบนไปรวมตัวกับเส้นแรงแม่เหล็กของส่วนที่เคลื่อนที่ผ่านอันเซตเตดโพลอยู่แล้วให้เข้มข้นมากขึ้น ความหนาแน่นสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง A กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนสูงสุด (ตามรูปคลื่นไซน์) เมื่อกระแสไฟสูงสุดจะไม่เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นที่เซตเตดโพลดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าให้มอเตอร์จะพุ่งออกจากขั้วแม่เหล็กมากที่สุดประมาณกึ่งกลางขั้วดังตำแหน่ง B เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์สูงสุดแล้วก็จะเริ่มลดลงเรื่อยๆเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟขณะนี้จะน้อยลงๆเส้นแรงแม่เหล็กนี้จะตัดกับขดลวดเซตเตด เกิดเส้นแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นมาเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเมน ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านเซตเตดโพลมีความเข้มข้นสูงสุดตำแหน่ง C

สูตรคำนวณหาความเร็วรอบ (ณรงค์ ชอนตะวัน 2530:20)

$$N = 120f/P$$

N = ความเร็วรอบของมอเตอร์ รอบ / นาที

f = ความถี่

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จะได้เท่ากับ f = 50 Hz, P = 4 ขั้ว

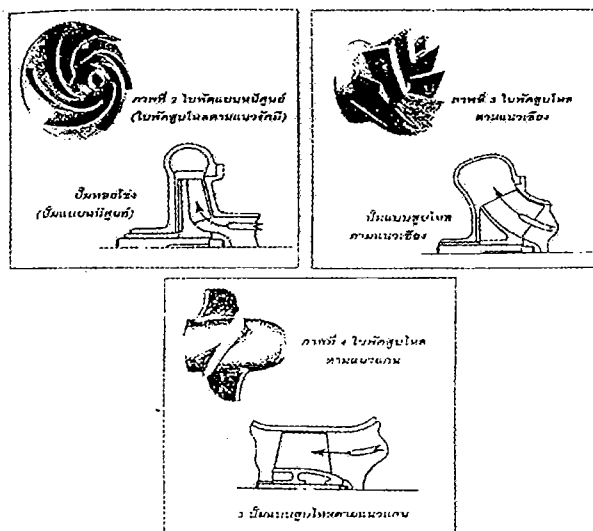
$$(120 \times 50) / 4 = 1,500 \text{ รอบ/นาที}$$

ความเร็วรวมที่ใช้เท่ากับ 1,500 รอบ/นาที

$$(120 \times 50) / 4 = 1,500 \text{ รอบ/นาที} \quad \text{ความเร็วรวมที่ใช้เท่ากับ } 1,500 \text{ รอบ/นาที}$$

2.4 การจำแนกประเภทของปั๊มตามรูปทรงของใบพัด

ปั๊มชนิดที่มีใบพัดสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังรูปที่ 1-3



ภาพประกอบ 34 ประเภทของปั๊มตามรูปทรงของใบพัด
(ฉัตรชัย มานะดี 2542:3)

2.4.1 ความเร็วจำเพาะ (specific speed:Ns) กับการเลือกประเภทของปั๊ม

1 ค่า Ns คือค่าความเร็วจำเพาะ (specific speed) ปกติจะเป็นค่าดัชนีที่บุคคลทั่วไปไม่ค่อยมีความคุ้นเคยและไม่ใช่ว่าสิ่งที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่า Ns เป็นเครื่องมือสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการเลือกประเภทของปั๊ม ในที่นี้จึงขออธิบายโดยยึดเรื่องนี้เป็นหลัก

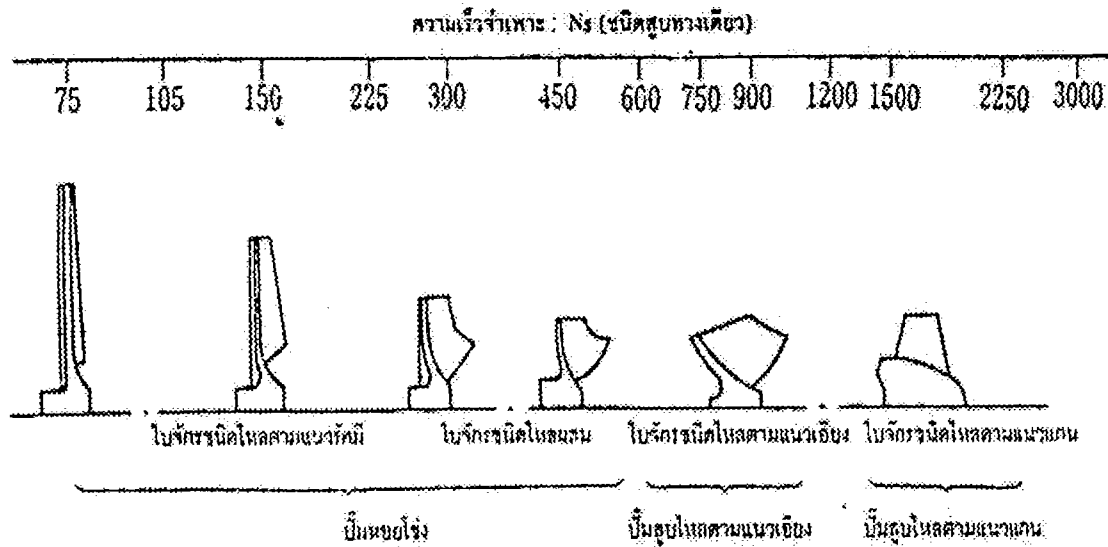
2.(ค่า Ns นอกจากจะใช้เพื่อการนี้แล้ว ยังเป็นค่าดัชนีสำหรับการออกแบบใบพัด การออกแบบเรือนสูบ และการคำนวณ NPSH)

2.4.2 ความหมายของ Ns จากคำกล่าวที่ว่า การทำให้ปั๊มที่มีใบพัดคล้ายกัน ทำงานในสภาพที่คล้ายกัน (การเปลี่ยนความเร็วรอบ ทำให้ Ns เท่ากัน) จะเท่ากับเป็นการทำให้ปั๊มมีคุณลักษณะที่คล้ายกันเนื่องจากแนวความคิดดังกล่าว สำหรับกัณฑ์ของ Camerer* ซึ่งมีทฤษฎีว่า เมื่อกัณฑ์มีความเร็วจำเพาะเท่ากันจะมีรูปทรงคล้ายกัน และมีสมรรถนะที่คล้ายกัน สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปั๊มได้เช่นกัน ดังสมการที่ (1)

$$NS = \frac{N \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

โดย N : ความเร็วรอบ (rpm), Q: อัตราการสูบ (M ยกกำลัง 3 / min) H: เฮด (m)

2.4.3 การเลือกประเภทของปั๊มและการจำแนกความแตกต่าง สมมติว่าทราบค่าของอัตราไหล
เฮดความดัน และความเร็รรอบ แล้วต้องการจะหาว่าควรเลือกปั๊มประเภทใด จากรูปที่ 34 หากทำการคำนวณ
จากสมการที่ (1) แล้วเทียบกับรูปที่ 35 ก็จะสามารถประเมินได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้



ภาพประกอบ 35 ความเร็วจำเพาะ : N_s (ชนิดสูบทางเดียว)

(ฉัตรชัย มานะดี 2542:4)

2.4.4 ตัวอย่าง จากข้อมูลจำเพาะที่กำหนดให้ดังต่อไปนี้ จงหาค่า N_s และเทียบกับภาพ
ประกอบ 35 เพื่ออธิบายว่าควรเลือกปั๊มประเภทใด

1 ถ้า $N = 1750 \text{ rpm}$; $Q 0.47 \text{ m}^3/\text{min}$ ยกกำลัง 3/ min ; $H = 16 \text{ m}$

$$N_s = \frac{1750 \times \sqrt{0.47}}{\sqrt[4]{16^3}}$$

$$= \frac{1750 \times 0.686}{8} = 150$$

ประเภทของปั๊มที่เลือกคือ ปั๊มหยอโซ่ง (centrifugal pump) ชนิดมีใบพัดสูบไหลตามแนวรัศมี
(radial flow impeller)

2 ถ้า $N = 1150 \text{ rpm}$; $Q = 35.6 \text{ m}^3/\text{min}$; $H = 15 \text{ m}$

ประเภทของปั๊มที่เลือกคือ ปั๊มแบบสูบไหลตามแนวเอียง (mixed flow pump) ชนิดมีใบพัด

$$NS = \frac{1150 \times \sqrt{35.6}}{\sqrt[4]{15^3}} = 900$$

สูบไหลตามแนวเอียง (mixed flow impeller)

3 ถ้า $N = 1020 \text{ rpm}$; $Q = 20 \text{ m}^3/\text{min}$; $H = 3 \text{ m}$

$$NS = \frac{1020 \times \sqrt{20}}{\sqrt[4]{3^3}} = 2000$$

ประเภทของปั๊มที่เลือกคือ ปั๊มแบบสูบไหลตามแนวแกน (axial flow pump) ชนิดมีใบพัดสูบไหลตามแนวแกน (axial flow impeller)

2.5 หลักการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินค่าการถ่ายเทของพลังงาน ซึ่งอาจเกิดขึ้นระหว่างวัตถุเนื่องจากความแตกต่างของระดับอุณหภูมิ โดยที่เราสามารถบอกได้ว่ากระบวนการถ่ายเทความร้อนนั้นจะเกิดขึ้นได้เร็วมากน้อยเพียงใด ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงช่วยให้การวิเคราะห์พลังงานของระบบเป็นไปอย่างถูกต้องยิ่งขึ้น

จากวิชาฟิสิกส์พื้นฐานทำให้เราทราบว่า การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็นสามแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งแต่ละแบบจะมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

2.5.1 การนำความร้อน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อบริเวณใดมีความแตกต่างของระดับ

อุณหภูมิในวัตถุใด ๆ จะต้องมีการถ่ายเทพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำได้ ส่วนค่าการนำความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่นั้น จะแปรผันโดยตรงกับค่าความชันของอุณหภูมิ (ค่าความชันของอุณหภูมิจะเป็นอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว) และสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$Q_z/A \propto dt/dx$$

$$Q_z = k_a \cdot dt/dx \quad (1)$$

เมื่อ	Q_z	=	อัตราการนำความร้อน
	dt/dx	=	ความชันของอุณหภูมิทางการไหลของความร้อน
	A	=	พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน
	k	=	ค่าการนำความร้อนของวัตถุแต่ละชนิด

จากสมการ (1) จะเห็นว่าค่า k ซึ่งเป็นค่าการนำความร้อนของวัตถุนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของวัสดุแต่ละชนิดดังแสดงในตาราง 7 นั้นเป็นการแสดงค่าความร้อน (k) ของวัสดุบางชนิด จะเห็นว่าในกรณีนี้วัสดุเป็นของเหลวและก๊าซจะมีค่าความร้อนค่อนข้างต่ำทั้งนี้เพราะว่าอัตราการ

ถ่ายเทความร้อน ของโมเลกุล นั่นคือ มีการพาความร้อนไปพร้อมกับโมเลกุลนั้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นค่าความร้อนของของเหลวและก๊าซจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากวัสดุที่ใช้เป็นของแข็ง ของเหลว

และก๊าซ ตามลำดับ (ประเสริฐ ภูนั้นทพงษ์ 2533:85-91)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุที่มีค่านำความร้อนสูงขึ้นเท่าใดจะมีการนำความร้อนสูงขึ้นตาม หรือถ้าจะกล่าวกันอย่างง่าย ๆ คือ วัสดุใดที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีก็จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีด้วย และในบรรดาของแข็งด้วยกันนั้นโลหะบริสุทธิ์ (เช่น ทองแดง เงิน และอะลูมิเนียม) จะมีอัตราการนำความร้อน ที่สูงมาก อย่างไรก็ตามหากโลหะเหล่านั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะมีผลต่อค่าการนำความร้อน กล่าวคือ ค่าการนำความร้อน จะมีค่าลดลง ซึ่งแตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น (เช่น วัสดุที่เป็นฉนวนความร้อน) ที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าอัตราการนำความร้อนก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

ตาราง 7 ค่าความนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ 0°C

วัสดุ	ค่าความนำความร้อน k
	W / m.C
โลหะ :	
เงิน (บริสุทธิ์)	410
ทองแดง (บริสุทธิ์)	385
อะลูมิเนียม (บริสุทธิ์)	202
นิกเกิล (บริสุทธิ์)	93
เหล็ก (บริสุทธิ์)	73
เหล็กกล้าคาร์บอน, 1% C	43
ตะกั่ว (บริสุทธิ์)	35
เหล็กกล้าโครม – นิกเกิล (18% Cr , 8% Ni)	16.3
อโลหะที่เป็นของแข็ง :	
ควอตซ์ , แกนขนาน	41.6
แกรไฟต์	4.15
หินอ่อน	2.08-2.94
หินทราย	1.83
กระจก, หน้าต่าง	0.78
เมเปิล หรือโอ๊ค	0.17
ซีลีเนียม	0.059
ใยแก้ว	0.038

ตาราง 7(ต่อ)

ของเหลว :	
ปรอท	8.21
น้ำ	0.556
แอมโมเนีย	0.540
ก๊าซ :	
ไฮโดรเจน	0.175
ฮีเลียม	0.141
ไอน้ำ (อิ่มตัว)	0.0206
คาร์บอนไดออกไซด์	0.0146

2.5.2 การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบอาศัยการเคลื่อนที่ของก๊าซหรือของเหลว เช่น ถ้าเราเอาแผ่นโลหะนั้นเย็นลงเร็วกว่าเมื่อวางไว้ในบริเวณที่มีอากาศอยู่หนึ่ง ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะพบว่า ความร้อนได้ถูกพาออกไปจากแผ่นโลหะนั้น และยิ่งอากาศที่พัดผ่านนั้นมีความเร็วมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้มีการพาความร้อนออกไปจากแผ่นโลหะมากยิ่งขึ้น

ถ้าให้ T_w = อุณหภูมิของแผ่นโลหะความร้อน และ T_∞ = อุณหภูมิของของไหล

เราจะได้การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนั้น จะแปรตามความแตกต่างของอุณหภูมิ ทั้งสอง คือ

$$Q_c/A \propto T_w - T \text{ หรือ } Q_c = h \cdot A (T_w - T_\infty) \dots\dots (2)$$

เมื่อ h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยเฉลี่ย และจะมีค่าแปรตามสภาวะของตัวกลางขณะนั้น (การเคลื่อนที่ของตัวกลางที่พาความร้อนจะแบ่งออกเป็นสองสภาวะคือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนแบบบังคับ) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุที่เป็นของไหลบางชนิดอาจพิจารณาได้จากตาราง 8

ตาราง 8 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุที่เป็นของไหลบางชนิด

ชนิดของของไหล	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W / (m^2 - K)$)
อากาศที่มีการพาแบบธรรมชาติ	5 – 25
อากาศที่มีการพาแบบบังคับหรือไอน้ำความร้อนยิ่งยวด	30 – 300
น้ำมันที่มีการพาแบบบังคับ	60 – 1,800
น้ำที่มีการพาแบบบังคับ	300 – 6,000
น้ำระหว่างต้ม	3,000 – 60,000
ไอน้ำระหว่างการควบแน่น	6,000 – 120,000

2.5.3 การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนที่มีลักษณะแตกต่างกับการนำ

ความร้อน และการพาความร้อน คือ จะเป็นการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณหนึ่งไปสู่อีกบริเวณหนึ่งได้โดยอาศัยกลไกของการแผ่รังสีด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และจากกฎของสเตฟาน-โบลทซ์แมน จะได้

$$Q_r = \sigma \cdot A (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots (3)$$

จากสมการ (3) เป็นสมการที่ใช้กับการแผ่รังสีของวัตถุดำเท่านั้น ส่วนวัตถุนิตอื่น ๆ ที่มีใช้สีดำ เช่น วัตถุสีเทาเราอาจใช้สมการ (3) ที่เรียกว่า ค่าการแผ่รังสีของวัตถุเพื่อสร้างความสัมพันธ์ของผิวสีเทาและสีดำแบบอุดมคติ นอกจากนี้ในการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุอีกชนิดหนึ่งได้ทั้งหมด แต่จะมีบางส่วน สูญหายไปเป็นสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ทั้งสองนี้ด้วย ดังนั้น สมการ (3) จะกลายเป็น

$$Q_r = \sigma \cdot A \cdot F_{1-2} \cdot E (T_1^4 - T_2^4)$$

เมื่อ σ = ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์แมน $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$

และ E = emissivity ของวัสดุซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะผิวของวัสดุว่าจะมีปฏิกิริยาอย่างไรต่อรังสีความร้อนนั้น ๆ เช่น การสะท้อนกลับ การดูดกลืนหรือการส่งผ่านไปทั้งหมด เป็นต้น

จากสภาพความเป็นจริงแล้ว เราอาจกล่าวได้ว่า การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่อาจเกิดขึ้นรวมกันทั้งสามแบบก็ได้ เช่น การถ่ายเทความร้อนของหลังคาบ้าน

(ดูในรูปภาพที่ 4) ตามรูปที่ 4 เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นได้โดยใช้หลักความสมดุลของพลังงานได้เป็น

$$Q_{r1} = Q_{r2} + Q_c + Q_e \dots\dots\dots (5)$$

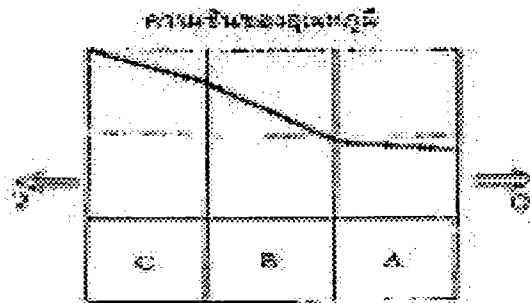
อย่างไรก็ตาม ความจำเป็นในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำเป็นฉนวนกันความร้อนจากหลังคาบ้านก็ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบหลายประการ เช่น อัตราการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าสารที่ยังมีชั้นอากาศเล็ก ๆ ซ้อนกันมากเท่าไร ก็จะมีค่าอัตราการนำความร้อนน้อยลงเท่านั้น

2.6 ฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อนทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนของสารโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันพลังงานความร้อนสูญเสีย ซึ่งการทำฉนวนกันความร้อนนี้อาศัยหลักการที่ว่า จงพยายามหลีกเลี่ยงการใช้สาร หรือวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่เนื่องจากความร้อนสามารถถ่ายเทได้หลายวิธี ดังนั้นการป้องกันจึงควรกระทำหลาย ๆ วิธี และเลือกใช้ฉนวนให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน ก่อนที่จะกล่าวถึงชนิดของฉนวนกันความร้อนและเทคนิคการเลือกใช้งานนั้น ลองมาดูกฎของ ฟูเรียร์ (สมการ 1) ว่าเป็นอย่างไร

ถ้าให้ dx = ความหนาของผนัง

T_1 และ T_2 = อุณหภูมิที่ผิวของผนังทั้งสองด้าน



ภาพประกอบ 36 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่ประกอบขึ้นจากวัสดุหลายชนิด

(ประเสริฐ ภูพันธ์พงษ์ 2533:85)

ตามกฎของฟูเรียร์จะได้

$$Q = kA/dx (T_2 - T_1) \dots\dots (6)$$

และถ้าผนังมีหลายชั้น โดยที่แต่ละชั้นก็ใช้วัสดุต่างชนิดกัน ดังนั้นค่าความชันก็ใช้วัสดุต่างชนิดกัน ดังนั้นค่าความชันของอุณหภูมิในวัสดุทั้งสามจะเป็นดังภาพประกอบ 17 และการไหลของความร้อนอาจเขียนได้เป็น

$$Q = k_A \cdot A \cdot T_2 - T_1 / dx_A$$

$$Q = k_B \cdot A \cdot T_3 - T_2 / dx_b \dots\dots (7.1)$$

$$Q = k_C \cdot A \cdot T_4 - T_3 / dx_c \dots\dots (7.2)$$

$$\text{นั่นคือ } Q = \frac{T_1 - T_4}{dx_A / h_A \cdot A + dx_b / K_B \cdot A + dx_C / k_C \cdot A} \dots\dots (8)$$

จากสมการ (7) และ (8) จะเห็นได้ว่าการไหลของความร้อนจะเท่ากันทุกชั้นตอน ดังนั้นสมการดังกล่าวจะมีความคล้ายคลึงกันทางไฟฟ้ามาก ซึ่งสามารถเขียนสมการของฟูเรียร์ใหม่ได้เป็น

$$\text{ความร้อนที่ไหล} = \frac{\text{ผลต่างของความร้อน}}{\dots\dots (9)}$$

ความต้านทานความร้อน

ในที่นี้ $dx/k \cdot A$ เป็นความต้านทานความร้อน

จากสมการ (9) อาจกล่าวได้ว่า ความต้านทานความร้อนของวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนนั้น หากมีค่าสูงย่อมทำให้ความร้อนที่ไหลผ่านนั้นได้น้อย นอกจากนี้ยังมีเงื่อนไขที่จำเป็นอื่น ๆ อีกบางประการ

สำหรับการเลือกวัสดุในงานฉนวนกันความร้อน คือ จะต้องมียัตราการนำความร้อน คือ จะต้องมียัตราการนำความร้อนต่ำ มีความหนาแน่นต่ำ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานกว้าง มียัตราการดูดน้ำและความชื้นต่ำ ไม่ลุกไหม้และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนสภาพทั้งทางฟิสิกส์และเคมีเพื่อใช้งานไปนาน ๆ ฯลฯ

2.6.1 ชนิดของวัสดุฉนวนกันความร้อน

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนว่า วัสดุฉนวนที่เลือกใช้นั้นตามปกติจะเป็นวัสดุที่มีเส้นใยหรือผงต่าง ๆ จัดอยู่ระหว่างชั้นอากาศ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการพาและการแผ่รังสีความร้อน รวมทั้งอาศัยคุณสมบัติของอากาศที่เป็นตัวนำความร้อนที่เลว ดังนั้นชนิดของวัสดุฉนวนนี้มักจะจำแนกตามรูปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้ ซึ่งในที่นี้จะแบ่งตามรูปร่างของสารที่ใช้ดังต่อไปนี้

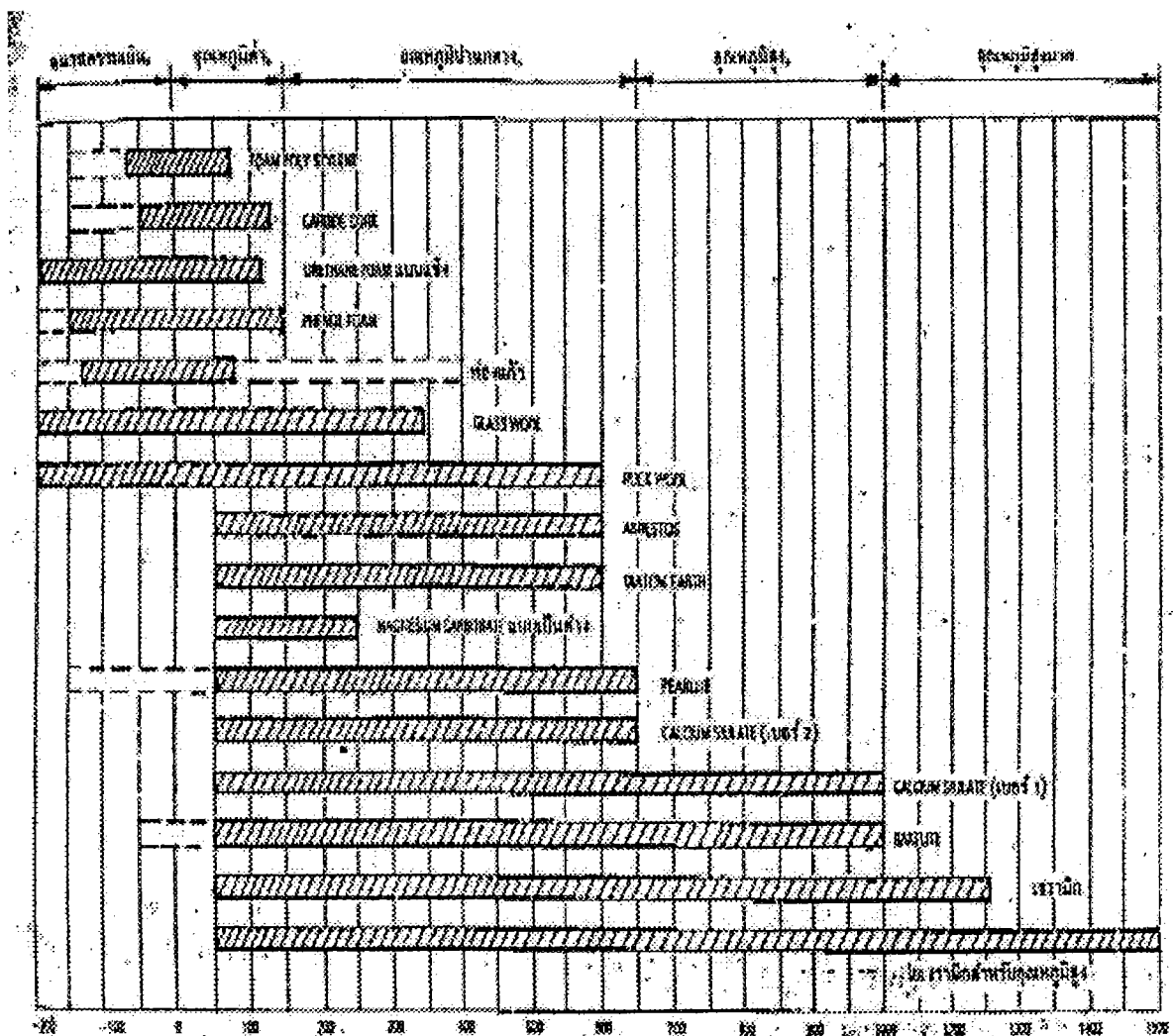
1. วัสดุฉนวนแบบเส้นใย เป็นวัสดุฉนวนที่เกิดจากการจัดวางตัวของเส้นใยและภายในจะมีอากาศแทรกอยู่ซึ่งในปัจจุบันมักจะใช้เส้นใยทนความร้อนของสารอนินทรีย์

2. วัสดุฉนวนแบบผง ปัจจุบันใช้สารแคลเซียมซิลิเกต (Calcium Silicate) ที่เกิดจาก Diatom Earth และหินปูนผสมกันแล้วทำให้แข็งตัว วัสดุชนิดนี้เป็นที่นิยมกันในท้องตลาดมาก

3. วัสดุฉนวนแบบเป็นฟองอากาศ เป็นวัสดุที่มีฟองอากาศเล็ก ๆ แทรกอยู่ในชั้นอากาศอีก ซึ่งก๊าซที่ใช้อัดเป็นฟองอากาศนี้จะแตกต่างกันตามการใช้งานและคุณสมบัติของวัสดุ กล่าวคือ ถ้าเป็นสารอนินทรีย์ อาจใช้ฟองแก้วหรือเซรามิก แต่ถ้าเป็นสารอินทรีย์ก็มีฟองของ Urethane Raisin Polystyrene Phenol เป็นต้น

4. วัสดุฉนวนแบบชั้นอากาศ เป็นวัสดุฉนวนแบบมีชั้นอากาศ ตามปกติมักจะมีขนาดบาง ๆ เช่น กระดาษลูกฟูก พลาสติกฟิล์ม ที่ฉาบผิวด้วยอะลูมิเนียมซึ่งวัสดุฉนวนแบบนี้มักใช้เป็นฉนวนกันการแผ่รังสีความร้อนเป็นส่วนใหญ่

สำหรับขีดจำกัดของอุณหภูมิที่ใช้งานของวัสดุฉนวนกันความร้อนแบบต่าง ๆ อาจพิจารณาได้จากภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 ขีดจำกัดของอุณหภูมิใช้งานของวัสดุทนความร้อน
(ประเสริฐ ภู่นั้นทพงษ์ 2533:87)

วัสดุฉนวนชนิดที่ใช้กันทั่วไปในทางอุตสาหกรรมนั้น มักจะกำหนดขีดจำกัดการใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดของวัสดุแต่ละชนิดไว้ ซึ่งมักจะพิจารณาจากการทนต่อความร้อนของวัสดุเป็นหลัก (รวมทั้งต้องคำนึงถึงจุดหลอมเหลวและจุดเยือกแข็งด้วย) ทั้งนี้เพราะว่าโลหะต่าง ๆ มักจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแต่วัสดุฉนวนต่าง ๆ มักจะเกิดการหดตัวซึ่งหากความแตกต่างนี้มีถึงระดับหนึ่งก็จะทำให้ชิ้นฉนวนแตกได้ นั่นคือ ทำให้มีการสูญเสียความร้อนมาก หนึ่งในกรณีที่น่าไปใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำมากก็ต้องพิจารณาเลือกวัสดุฉนวนอย่างระมัดระวังด้วย เพราะว่าอาจเกิดปัญหาไอน้ำซึมผ่านและมีการหดตัวได้ทำให้ชั้นของฉนวนอาจเกิดรอยแตกเป็นช่องขึ้นและทำให้เสียหายในที่สุด ดังนั้นฉนวนอุณหภูมิต่ำนี้มักจะทำการป้องกันความชื้นควบคู่ไปด้วยเสมอ

2.6.2 ปัจจัยสำคัญในการเลือก

ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาทำเป็นฉนวนกันความร้อนนั้น มีสิ่งที่ควรพิจารณาบางประการ คือ ค่าอัตราการนำความร้อนของวัสดุฉนวน ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่สำคัญมากในการประเมินความหนาของวัสดุฉนวนความร้อน สำหรับกรณีที่มีค่าอัตราการนำความร้อนสูงสุดที่อุณหภูมิปกติ คือ เงิน ซึ่งมีค่าอัตราการนำความร้อนเป็น $361 \text{ kcal/m.h } ^\circ\text{C}$ และสารที่มีค่าอัตราการนำความร้อนต่ำสุด คือ ก๊าซฟรอน ซึ่งมีค่าประมาณ $6.4 \times 10^{-6} \text{ kcal/mho } ^\circ\text{C}$ ส่วนสารอื่น ๆ อาจพิจารณาได้จากตารางที่ 7

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญอีกประการในการเลือกวัสดุฉนวนความร้อนที่น่าสนใจและควรทราบก่อนตัดสินใจได้แก่ ความหนาแน่นของวัสดุจะต้องมีค่าต่ำไม่ลุกไหม้ น้ำและความชื้นซึมผ่านได้น้อย และที่สำคัญคือ ราคาถูก สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนจะต้องพิจารณาให้ถี่ถ้วนก่อนเลือกใช้งาน

2.6.3 การเลือกความหนาของฉนวน

ในการกำหนดความหนาของฉนวนนี้มีหลักอยู่ 3 ประการ คือ ค่าความร้อนสูญเสียที่ยอมให้ได้ อุณหภูมิผิว และราคาของฉนวนที่ใช้ อย่างไรก็ตามจากหลักสามประการดังที่กล่าวข้างต้นนั้น อาจกล่าวได้ว่า หากมีการหุ้มฉนวนที่มีความหนามาก ๆ ก็จะทำให้ค่าความร้อนสูญเสียนั้นลดลงมากขึ้น แต่สิ่งที่แปรตามมาก็คือ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งใช้งานจะสูงขึ้นตาม ดังนั้นการคำนวณความหนาของฉนวนที่ใช้งานจริงจึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำอย่างยิ่ง

อนึ่งกรณีที่อุณหภูมิผิวของฉนวนมีค่าสูงมาก เราจำเป็นต้องใช้ฉนวนหนาขึ้นตาม ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วมักไม่นิยมใช้ฉนวนเพียงชั้นเดียวที่ทนอุณหภูมิมาหุ้มเพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงถึงระดับหนึ่งก่อน แล้วจึงห่อหุ้มด้วยฉนวนธรรมดาอีกทีหนึ่ง สำหรับสูตรที่ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของฉนวนแต่ละชั้นแสดงไว้ในตาราง 7

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าฉนวนพื้นที่มีมากหลายชนิด อีกทั้งการหาความหนาของฉนวนก็มีความยุ่งยากพอสมควรโดยเฉพาะอย่างยิ่งการหุ้มฉนวนที่เป็นท่อกลมหรือทรงกระบอก จะมีความยุ่งยากมากกว่าแบบพื้นเรียบ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีหลายบริษัทที่ได้ผลิตฉนวนหุ้มท่อแบบสำเร็จรูปทรงกระบอกโดยมีมากมายหลายขนาดซึ่งการเลือกใช้วัสดุหุ้มฉนวนนั้น ๆ ก่อนก็จะเป็นการดีอย่างยิ่ง รวมทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

2.7 วัสดุทนการกัดกร่อน

การเลือกใช้วัสดุทนการกัดกร่อน ปืมทนการกัดกร่อนที่ใช้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ กล่าวได้ว่าเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่ต้องถูกใช้งานอย่างสมบูรณ์มากที่สุด การเลือกวัสดุจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง หากวัสดุที่ใช้ไม่เหมาะสมกับสารเคมีที่สูบอาจเกิดการเสียหาย หรือกัดกร่อนอย่างรุนแรง

กล่าวกันว่า แม้แต่สหรัฐฯ ซึ่งเป็นประเทศที่มีประสบการณ์ด้านนี้มายาวนาน ก็ยังต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับซื้ออะไหล่ถึงปีละ 60-70% ของราคาตัวปั๊มในบางแห่ง

สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ จำเป็นต้องทราบชนิดของส่วนประกอบของส่วนประกอบของสารที่นำมาสูบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนประกอบที่ปนอยู่จำนวนน้อย เช่น ปริมาณของ CI ที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นปัญหาอยู่ในปัจจุบันจะเป็นตัวกระตุ้นสำคัญ ที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนต่อสแตนเลส เป็นต้น

ดังนั้นในแง่ของทางเศรษฐศาสตร์ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุของปั๊มที่เหมาะสมกับสารละลายนั้น ๆ เป็นต้นว่า ปั๊มน้ำขนาดใหญ่สำหรับหมุนเวียนน้ำปูนขาวของอุปกรณ์จัดกรดกำมะถันในปล่องควัน ดังภาพที่ 37 และ 10 ตัวใบพัด, wear ring, wear plate ทำด้วย two phase stainless เรือนปั๊ม (casing) ทำด้วย เหล็กหล่อ ส่วนที่สัมผัสกับสารละลายด้วยยางธรรมชาติแบบอ่อน (natural soft rubber) หากเรือนปั๊มทำ ด้วย two phase stainless เช่นเดียวกับใบพัด หรือ wear ring แล้ว ต้นทุนการผลิตจะสูงขึ้นตามมาและหาก ขนาดของปั๊มใหญ่ขึ้น จำเป็นต้องเลือกหาวัสดุที่เหมาะสมหลาย ๆ ชนิดมาใช้ร่วมกัน

2.7.1 ชนิดและการใช้งานของวัสดุทนการกัดกร่อน

วัสดุทนการกัดกร่อน สามารถแยกได้ 3 ประเภทใหญ่ ดังแสดงในตาราง 9 ในการออกแบบ ปั๊มชนิดทนการกัดกร่อน อาจเลือกใช้วัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งทั้งตัวปั๊ม หรือใช้หลายชนิดร่วมกันก็ได้

ตาราง 9 ประเภทของวัสดุทนการกัดกร่อน

ประเภท	ชื่อวัสดุ
โลหะ	สแตนเลส, นิกเกิล, ตะกั่ว, เหล็กหล่อซิลิคอนสูง, ไทเทเนียม และแทนทาลัม
อนินทรีย์สาร	ซิลิกา, คาร์บอน และเซรามิก
อินทรีย์สาร	พลาสติก, ยาง และไม้

ตาราง 10 การทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุต่าง ๆ ต่อกรดอินทรีย์สาร (ฉัตรชัย มานะดี 2542:4)

วัสดุ ของเหลว และก๊าซ	อะลูมิเนียม	ซีเมนต์	ทองแดง	ตะกั่วดำ	ตะกั่ว	นิกเกิล	เทฟลอน	ยาง (แข็ง)	ยาง (อ่อน)	สแตนเลส (316)	เซรามิก	ไม้	ดีบุก	แทนทาลัม	ไทเทเนียม	เซอร์โคเนียม
กรดเกลือ	U	S	U	S	U	U	S	S	S	U	S	U	U	S	Q	S
คลอรีน (ชื้น)	S	S	S	Q	S	Q	S	U	U	S	S	U	U	U	U	U
คลอรีน (แห้ง)	U	S	U	U	S	S	S	S	S	U	S	U	U	U	Q	U
กรดซัลฟูริก	U	S	Q	S	S	U	S	U	U	Q	S	U	U	S	U	U
ซัลไฟต์ (แห้ง)	S	S	S	S	S	S	S	-	-	S	S	U	S	S	-	-
กรดซัลฟูริก (ชื้น)	U	S	U	S	S	U	S	S	S	U	S	U	Q	S	Q	-
กรดไนตริก	S	S	U	U	U	U	S	U	U	Q	S	U	U	Q	S	U

ที่มา : Anti Corrosion Manual

หมายเหตุ S : ใช้งานได้ Q : ไม่แน่ใจ U : ใช้งานไม่ได้

2.7.2 กลไกของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนที่เราเห็นกันอยู่ในชีวิตประจำวันก็คือ การเกิดสนิมของเหล็ก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่โลหะหรือเหล็กกำลังกลับเข้าสู่สภาวะของธรรมชาติ ซึ่งเป็นสภาวะเสถียรปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นลำดับได้ดังนี้

โลหะ $\longrightarrow$ การกัดกร่อน $\longrightarrow$ แร่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ

กล่าวคือ เหล็กซึ่งเป็นโลหะได้จากการถลุงแร่เหล็ก เกิดปฏิกิริยารวมตัวกับความชื้นในอากาศและออกซิเจน และพยายามกลับไปในสภาวะเสถียรคือ เป็นแร่เหล็กเช่นเดิม ในกรณีนี้ ความชื้นดังกล่าวทำหน้าที่เป็นสารละลายไฟฟ้า (liquid electrolyte) ทำให้เกิดเป็นเซลล์แบตเตอรี่เฉพาะจุด (local cell) และเกิดการกัดกร่อน

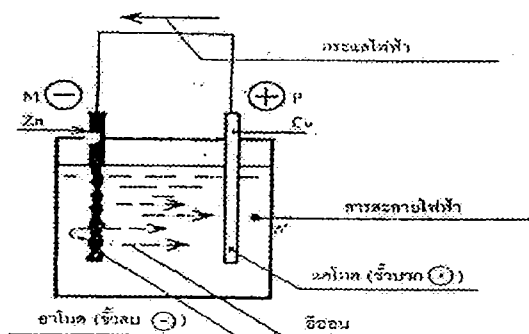
ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน คือ ความชื้นในอากาศ ในสูญญากาศ ซึ่งไม่มีไอน้ำ จะไม่มีการกัดกร่อนเกิดขึ้น ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการกัดกร่อน ซึ่งเกิดในสภาพที่มีความชื้น (Wet corrosion) เท่านั้น จะไม่กล่าวถึงการกัดกร่อนสภาพแห้ง (dry corrosion) ซึ่งเกิดขึ้นในสภาพแห้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เมื่อโลหะต่างชนิดกัน สัมผัสกันในที่ซึ่งมีความชื้น โลหะชนิดหนึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง แต่อีกชนิดหนึ่งไม่เกิดการกัดกร่อนเลย แม้แต่โลหะชนิดเดียวกัน บริเวณที่ออกซิเจนไปไม่ถึงทั่วถึงจะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุด (Local corrosion) ปฏิกิริยาการกัดกร่อนดังกล่าวข้างต้นเปรียบได้จากการกัดกร่อนของขั้วแบตเตอรี่นั่นเอง

ตาราง 11 ค่าของศักย์ทางไฟฟ้า ของโลหะต่าง ๆ ในสารละลายไฟฟ้า (ฉัตรชัย มานะดี 2542:110)

ชนิดโลหะ	ศักย์ทางไฟฟ้า (v)
Au	1.680
Pt	1.200
Ag	0.800
Hg	0.799
Cu	0.522
H ₂	0.000
Pb	-0.126
Sn	-0.136
Ni	-0.250
Fe	-0.440
Cr	-0.710
Zn	-0.762
Mn	-1.050
Al	-1.670
Mg	-2.340
Na	-2.712
K	-2.922

กลไกของการกัดกร่อน แสดงไว้ในภาพประกอบ 38 (เช่นเดียวกับกลไกการกัดกร่อนในแบตเตอรี่รถยนต์) จากรูป P เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้โลหะมีค่า Cu และ M เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้โลหะไร้ค่า Zn เมื่อนำขั้วทั้งสองจุ่มในสารละลายไฟฟ้า แล้วต่อขั้วทั้งสองด้วยลวดทองแดง กระแสไฟจะไหลจาก P สู่ม M ในสารละลายไฟฟ้า M ซึ่งเป็น Zn จะกลายเป็นไอออน ละลายในสารละลาย ทำให้ M เกิดการกัดกร่อน โดยปกติกลไกการกัดกร่อนของแบตเตอรี่ จะเกิดขึ้นที่ขั้วซึ่งเป็นโลหะที่มีศักย์ต่ำกว่า



ภาพประกอบ 38 กลไกของการกัดกร่อน
(ฉัตรชัย มานะดี 2542:111)

2.7.3 ชนิดของการกัดกร่อนมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งมีดังต่อไปนี้

1. การกัดกร่อนสม่ำเสมอ (general corrosion) หมายถึง การกัดกร่อนที่บริเวณผิวสัมผัสของโลหะกับสารละลาย เกิดการกัดกร่อนโดยทั่ว เนื่องจากเกิดการสลายตัวของฟิล์มสภาพเฉื่อย (passivity film) เช่น โลหะตระกูลฮาโลเจน (halogen) ถูกสัมผัสกับ HCl, HF, Br เป็นต้น

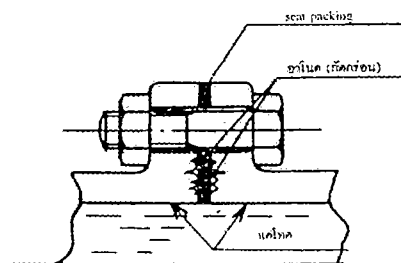
ภาพประกอบ 39 เป็นภาพของใบพัดทำด้วยวัสดุ hastelloy C สำหรับสูบลมเกลือจากเรือบรรทุกสารเคมี ซึ่งเกิดการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอ การกัดกร่อนชนิดนี้สามารถคาดเดาอายุการใช้งานของใบพัดได้



ภาพประกอบ 39 ใบพัดทำด้วยวัสดุ hastelloy C
(ฉัตรชัย มานะดี 2542:111)

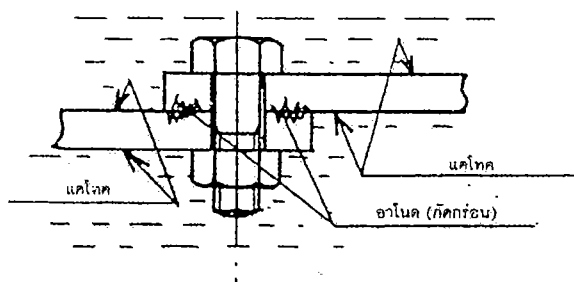
2. การกัดกร่อนที่หน้าประกบ (crevice corrosion) เกิดได้ในลักษณะเช่นเดียวกับหน้าประกบของ seat packing ดังภาพประกอบ 40 หรือบริเวณที่มีออกซิเจนเข้าไม่ถึง ดังภาพประกอบ 41 บริเวณดังกล่าวจะเป็นแอโนด (anode) และเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง

แม้แต่โลหะชนิดเดียวกัน หากถูกจุ่มลงในสารละลายไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นต่างกัน ก็สามารถทำให้เกิดเซลล์แบตเตอรี่ได้ เซลล์แบตเตอรี่ดังกล่าว เรียกว่า concentration cell



ภาพประกอบ 40 หน้าประกบของ Seat packing

(ฉัตรชัย มานะดี 2542:112)

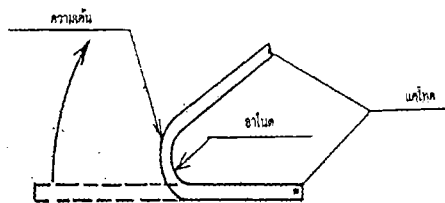


ภาพประกอบ 41 การกัดกร่อนที่หน้าประกบบริเวณที่ออกซิเจนเข้าไม่ถึง

(ฉัตรชัย มานะดี 2542:112)

3. การกัดกร่อนจากความเค้น (Stress corrosion) โลหะแผ่น เช่น สปริงแผ่น

ในภาพประกอบ 42 จุดที่ถูกงอจะเกิดแรงเค้น (stress) แม้ว่าจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน จุดที่มีแรงเค้นหลงเหลืออยู่ จะกลายเป็นแอโนดเมื่ออยู่ในสารละลายไฟฟ้า และเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง กลไกนี้เรียกว่า stress cell



ภาพประกอบ 42 การกัดกร่อนจากความเค้น
(จักรชัย มานะดี 2542:113)

4. การกัดกร่อนจากการสัมผัสของโลหะต่างชนิด

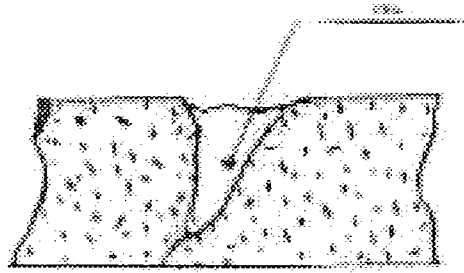
การกัดกร่อนนี้เกิดจากกลไกของแบตเตอรี่จากโลหะต่างสกุล (composition cell) เช่น นำ Cu และ Zn มาซ้อนกัน ดังภาพประกอบ 41 แล้วจุ่มลงในสารละลายไฟฟ้า Zn จะกลายเป็นแอโนด และเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง (กลไกการกัดกร่อนเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ ในภาพประกอบ 38)



ภาพประกอบ 43 การกัดกร่อนจากการสัมผัสของโลหะต่างชนิด
(จักรชัย มานะดี 2542:113)

5. การกัดกร่อนระหว่างเกรน (intergranular corrosion) สแตนเลสซึ่งมี Cr เป็นส่วนประกอบ ดังภาพประกอบ 43 ผลึกของคาร์โบโครเมียม (Cr_{23}C_6) จะกลายเป็นแคโทด

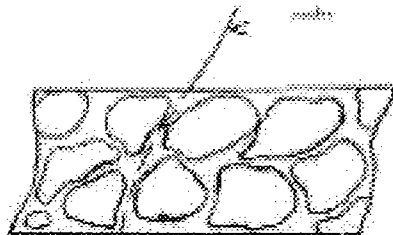
การกัดกร่อนจะเกิดที่ขอบต่อของเกรน (grain) ซึ่งมองจากภายนอกไม่เห็น แต่ภายในเรือนปั๊ม จะเกิดการกัดกร่อนที่มีลักษณะเป็นรังผึ้งทำให้เปราะแตกหักง่ายเรือนปั๊มอาจแตกและสารเคมีที่สูบลบเกิดการรั่วไหล หรือทำให้ใบพัดแตกหัก ลักษณะการเกิดเซลล์ไฟฟ้าเป็นลักษณะ composition cell



ภาพประกอบ 44 การกัดกร่อนจากการสัมผัสของโลหะต่างชนิด
(ฉัตรชัย มานะดี 2542:114)

6. การกัดกร่อนจากคาวีเตชัน (cavitation corrosion) เกิดจากปรากฏการณ์ คาวีเตชัน ทำให้การกัดกร่อนเป็นไปอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

การกัดกร่อนที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่า นอกจากการกัดกร่อนในข้อ 1 และ 6 แล้วการกัดกร่อนใน ข้อ 2, 3, 4, 5 เป็นการกัดกร่อนของกลไกเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งเรียกกันทั่ว ๆ ไปว่า galvanic cell การกัดกร่อนในข้อ 2, 3, 4 จะมีการเกิดหลุม (pitting) ดังภาพประกอบ 14 และการกัดกร่อน ในข้อ 5 จะมีการร้าวระหว่างเกรน ดังภาพประกอบ 45



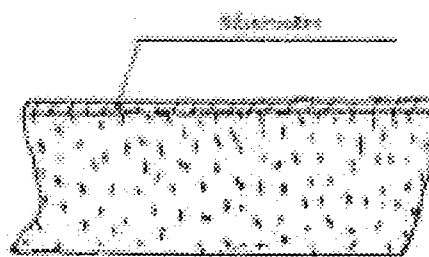
ภาพประกอบ 45 การกัดกร่อนจากคาวีเตชัน
(ฉัตรชัย มานะดี 2542:114)

หากเรือนปั๊ม เกิดการกัดกร่อนเช่นนี้ นับว่าเป็นอันตรายอย่างยิ่ง เนื่องจากตัวเรือนอาจแตก ทำให้สารเคมีซึ่งเป็นอันตรายไหลออกมาภายนอกได้ตลอดเวลา การกัดกร่อนต่าง ๆ เหล่านี้ที่เกิดกับสเตเลส สามารถเกิดขึ้นได้แม้แต่จะมี Cl⁻ เพียงเล็กน้อยก็ตาม

2.7.4 การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ

กลไกป้องกันการกัดกร่อน ดังภาพหน้าตัดของภาพประกอบ 46 เกิดจากฟิล์มสภาพเฉื่อย (passivity film) ของโลหะต่าง ๆ เช่น

1. สแตนเลส จะเกิดฟิล์มของ Cr-O_2
2. เหล็กหล่อชนิดซิลิกาสูง จะเกิดฟิล์มของ Si-O_2
3. ไทเทเนียม จะเกิดฟิล์มของ Ti-O_2

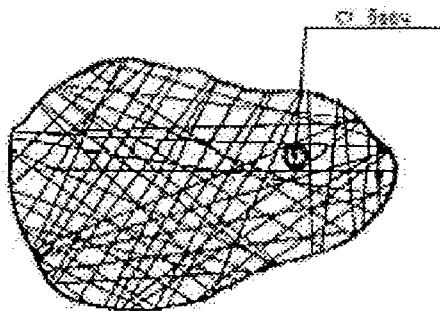


ภาพประกอบ 46 ฟิล์มสภาพเฉื่อย

(จัดรัชย์ มานะดี 2542:115)

ฟิล์มต่าง ๆ เหล่านี้ จะเกิดขึ้นทันทีเมื่อโลหะต่าง ๆ ดังกล่าว สัมผัสกับอากาศ กล่าวกันว่า ความหนาของฟิล์มราว 10-30 Å ($1\text{Å} = 1\text{ Angstrom} = 10^{-7}\text{ mm}$)

ในหัวข้อที่ผ่านมา ได้มีการกล่าวถึง Cl⁻ อีออน ซึ่งเป็น halogenion ว่ามีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนสแตนเลสในลักษณะของเซลล์ไฟฟ้านั้น เนื่องจาก Cr-O_2 ฟิล์มสภาพเฉื่อยของสแตนเลส เมื่อขยายออกเป็นภาพ ดังภาพประกอบ 47 แล้ว จะมีลักษณะเป็นตาข่ายที่มีตาห่างกว่า แล้วเข้าไปยังเนื้อของโลหะ โลหะที่ถูก อีออนดังภาพประกอบ 47 ส่วนไทเทเนียมนั้น จะมีฟิล์มสภาพเฉื่อย ซึ่งมีตาข่ายละเอียดกว่า สแตนเลส จึงทำให้ Cl⁻ อีออนผ่านเข้าไปไม่ได้ ไทเทเนียม จึงทนต่อการกัดกร่อนที่เกิดจาก Cl⁻ อีออนได้ดี



ภาพประกอบ 47 อีออน
(ฉัตรชัย มานะดี 2542:115)

2.7.5 วัสดุทนการกัดกร่อนที่เป็นโลหะ

2.7.5.1 สแตนเลส (stainless steel) หากแปลความหมายตรง ๆ ตัว อาจหมายถึง เหล็กไร้สนิมแต่ความเป็นจริงแล้วสิ่งที่ทำให้สแตนเลสทนต่อการกัดกร่อนได้คือ ฟิล์มสภาพเฉื่อย (passivity film) ของ $\text{Cr}-\text{O}_2$ ดังนั้น สแตนเลสจึงเป็น เหล็กที่เป็นสนิมได้ยาก มากกว่าที่จะเป็น เหล็กไร้สนิม

2.7.5.2 นิยามของสแตนเลส คำจำกัดความของสแตนเลสสามารถสรุปได้คร่าว ๆ คือ เป็นโลหะผสมที่สร้างฟิล์มสภาพเฉื่อยของ Cr เพื่อทนต่อการเกิดสนิม โดยโลหะผสมดังกล่าว มี Cr ผสม อยู่ราว 12-32 % ทั้งนี้ ฟิล์มสภาพเฉื่อยดังกล่าวข้างต้นแตกต่างจากฟิล์มที่ได้จากการชุบ คือ ฟิล์มสภาพเฉื่อยสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เอง หากฟิล์มเดิมถูกทำลาย

2.7.5.3 ประวัติความเป็นมา ในช่วงปลายศตวรรษที่ 19 ถึงต้นศตวรรษที่ 20 อุตสาหกรรมของโลกมีการผลิตเหล็กเป็นจำนวนมาก แต่คุณสมบัติของเหล็กก็คือ เป็นสนิม เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเป็นคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้เกิดปัญหาใหญ่หลังจากที่มีการปฏิวัติอุตสาหกรรมแล้ว ดังนั้น สิ่งก่อสร้าง หม้อ กังไอน้ำ เครื่องยนต์ เรือ รถยนต์ เครื่องบิน โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงสนิม (การกัดกร่อน) ได้ โดยมีผู้คำนวณความสูญเสียของเหล็กจากสนิมหลายราย ซึ่งในจำนวนนั้น บางรายมีตัวเลขความสูญเสียสูงถึง 20 % ของปริมาณเหล็กที่ผลิตได้ กล่าวได้ว่าเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจที่ไม่สามารถจะมองข้ามไปได้

มาตรการป้องกันมิให้เกิดสนิม สามารถทำได้ 3 วิธีหลัก ๆ ด้วยกันคือ

1. โดยวิธีการเคลือบผิว (ทาสี ชุบ เคลือบ บู เป็นต้น)
2. โดยการปรับปรุงโครงสร้างวัสดุ (อัลลอยด์ที่ทนการกัดกร่อน)
3. โดยวิธีการทางไฟฟ้า (sacrifide anode cathodic protection)

สำหรับแนวคิดของวิธีการ 2 คือ ทำโดยการปรับปรุงที่ตัววัสดุ เป็นแนวคิดที่ก่อให้เกิดการวิจัยพัฒนาสแตนเลสขึ้นกว่าสแตนเลสที่เราเห็นอยู่ในปัจจุบัน จะพัฒนาได้สำเร็จต้องผ่านการลองผิดลองถูกมานับครั้งไม่ถ้วน จนกระทั่งปี พ.ศ. 2447 – 2455 ในช่วงเวลาดังกล่าว E. Maurer B. Strauss ซึ่งเป็น

ชาวเยอรมัน (นักวิจัยของบริษัท Krupp) และคณะได้ค้นพบโลหะผสม ซึ่งเป็นต้นแบบของ 18-8 อัลลอยด์ (18 Cr – 8Ni หรือเรียกกันว่า 304, 316) ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน และเขาได้จดสิทธิบัตรโลหะผสมนี้ไว้เป็นคนแรก ทำให้เกิดการพัฒนาสแตนเลสในรูปแบบอื่น ๆ ตามมา

2.7.5.4 ชนิดของสแตนเลส

สแตนเลสที่ใช้ผลิตปั๊ม สามารถแยกลักษณะตามโครงสร้างได้ 2 ชนิดหลัก คือ

1.austenite stainless steel ชนิดนี้ จะไม่มีแรงเหนียวเข้ากับแม่เหล็ก ใน

ตารางที่ 12, 13 ได้แสดงโครงสร้างและคุณสมบัติของสแตนเลสชนิดนี้ (18-8 staubkess = Cr18 - Ni8) สแตนเลสชนิดนี้เป็นชนิดที่มีใช้กันทั่ว ๆ ไป ไม่เพียงแต่เฉพาะในอุตสาหกรรมเท่านั้น ตามบ้านเรือน ต่าง ๆ ก็ใช้อยู่ในชีวิตประจำวัน (เช่น ช้อน ส้อม มีด อ่างล้างจาน อ่างอาบน้ำ เป็นต้น)

ในตารางที่ 14 จะเห็นว่ามีสแตนเลสชนิด 316 L ซึ่ง L ดังกล่าวหมายถึง low carbon โดย C น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.03 ผลที่ได้รับก็คือ สามารถลดการกัดกร่อนระหว่างเกรน (grain) กล่าวคือ ทำให้การแตกตัวของ Cr₂₃C₆ ลดลง สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้สูงขึ้น

ตาราง 12 โครงสร้างทางเคมีของ 18 –8 alloy (ฉัตรชัย มานะดี 2542:117)

ส่วนผสม ชนิดของสแตนเลส	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
SCS 13 (SUS 304)	0.08	1.0	2.0	10	19	-
SCS 14 (SUS 316)	0.08	1.0	2.0	13	19	2.0
SCS 16 (SUS 316L)	0.03	1.0	2.0	13	19	2.0

ตาราง 13 คุณสมบัติทางกลของ 18-8 alloy (ฉัตรชัย มานะดี 2542:117)

รายการ ชนิดของสแตนเลส	ความถ่วง จำเพาะ	ความทนทาน ต่อแรงดึง (kgf / mm ²)	แรงอัดที่ทำให้เกิด ความเครียด 0.2% (kgf / mm ²)	ความแข็ง
SCS 13 (SUS 304)	7.7	45	19	140
SCS 14 (SUS 316)	7.7	45	19	140
SCS 16 (SUS 316L)	7.7	45	19	140

ในตารางที่ 14 ได้แสดงโครงสร้างของสแตนเลสชนิดที่มีนิกเกิลสูง (high nickel alloy) นอกจากฟิล์มสภาพเฉื่อยแล้ว จะเห็นว่ามี Ni เข้ามาช่วยในการทนต่อการกัดกร่อนอีก จึงทำให้สามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อม ที่ 18 – 8 alloy ทนไม่ได้

ตาราง 14 โครงสร้างทางเคมีของ high nickel alloy (ฉัตรชัย มานะดี 2542:117)

ส่วนผสม ชนิดของสแตนเลส	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Other
20 alloy	0.07	1.0	2.0	30	20	3	
Hastelloy C	-	1.0	1.0	51	17	19	Fe6
Hastelloy F	-	-	-	47	22	6	Cu<0.15
Illum G	-	1.0	1.0	60	21	5.0	Cu8

2. two-phase stainless steel เป็นสแตนเลสที่ใช้กับป้อนการกัดกร่อน เช่น ป้อน

สารละลายชั้นของอุปกรณ์แยกกำมะถันออกจากควีน ป้อนอุปกรณ์กำมะถัน ป้อนสารเคมีสำหรับงานชุบเป็นต้น

ตารางที่ 13, 14 กล่าวถึงโครงสร้างและคุณสมบัติของสแตนเลสชนิดนี้

1. โครงสร้างของโลหะผสม เป็นชนิด two phase ซึ่งมี austenite (ราว 40%) + ferrite (ราว 60 %) มีการเหนียวกับแม่เหล็กสูง

2. มีความทนทานต่อการกัดกร่อน เท่าเทียมกันกับหรือมากกว่าชนิด 316L หรือ alloy 20 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทนต่อการกัดกร่อนแบบ Crevice corrosion หรือ stress corrosion ซึ่งเป็นผลมาจาก Cl ได้ดี

3. ความทนต่อการสึกหรอ คุณสมบัติข้อนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งของสแตนเลส นั้น ๆ จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับ 316 stainless แล้ว จะมีความแข็งมากกว่า 2-3 เท่าตัว โดยเฉพาะ P30 stainless ดังตารางที่ 41, 42 จะสึกหรอน้อยกว่า 316 stainless ถึง 1 ใน 4

4. ความแข็งแรงทางกล ในการพิจารณาเรื่องความแข็งแรงทางกล เราจะใช้เกณฑ์ของแรงกดอัดที่ทำให้เกิดความเครียด 0.2 % จากตารางที่ 42 เห็นว่า เมื่อเทียบกับ 316 แล้วจะมีความแข็งแรงทางกล มากกว่า 2 เท่าตัว

กรณีที่ชิ้นส่วนของปั๊มเสียหาย แล้วเราไม่ทราบว่าชิ้นส่วนนั้นเป็น austenite หรือ two phase ข้อสังเกตอื่น stainless เราสามารถตรวจเช็คได้ง่าย ๆ โดยนำแม่เหล็กถาวรมาตรวจดูแม่เหล็กจะไม่ดูด austenite แต่จะดูด two phase stainless

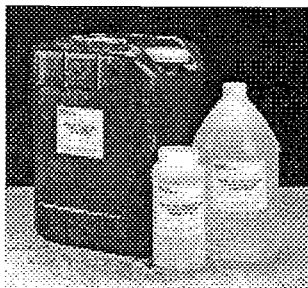
ตารางที่ 15 โครงสร้างทางเคมีของ POLOMET alloy (ฉัตรชัย มานะดี 2542:118)

ส่วนผสม โลหะผสม	ส่วนผสม						
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Other
PILOMET26A (P26A)	0.05	1.0	1.0	5.0	27	2.0	
PILOMET26 (P26)	0.05	1.0	1.0	5.0	27	2.0	
PILOMET27 (P27)	0.05	1.0	1.0	6.0	27	2.0	
PILOMET30 (P30)	0.08	1.0	1.5	7.0	28	3.0	
*SCS14 (SUS316)	0.08	1.5	2.0	13	18	3.0	

ตาราง 16 คุณสมบัติทางกลของ POLOMET alloy(ฉัตรชัย มานะดี 2542:119)

รายการ ชนิดของสแตนเลส	ความถ่วง จำเพาะ	ความทนทาน ต่อแรงดึง (kgf / mm ²)	แรงอัดที่ทำให้เกิด ความเครียด 0.2% (kgf / mm ²)	ความแข็ง
PILOMET26A (P26A)	7.7	65	40	220
PILOMET26 (P26)	7.7	70	45	280
PILOMET27 (P27)	7.7	60	45	400
PILOMET30 (P30)	7.7	40	-	500
*SCS14 (SUS316)	7.7	45	19	140

2.8 ซิลิโคนเหลว(Silicone Fluids)



ภาพประกอบ 48 ซิลิโคนเหลว

(From Dow Corning Customer Services in Midland 2546 :11)

การเลือกของเหลวที่มีความสำคัญต่อการทำงานของอ่างสอบเทียบแบบบรรจุของเหลว
ซิลิโคนเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมีหลายเบอร์เช่น

1. 200® Fluid, 50CS, 2. 200® Fluid, 100CS, 3. 200® Fluid, 200CS,
4. 200® Fluid, 250CS, 5. 200® Fluid, 350CS, 6. 200® Fluid, 500CS, แต่การใช้งานจะต้อง
เลือกเบอร์ให้เหมาะสมกับงานจึงเลือกเบอร์ 200® Fluid, 100CS ที่ใช้สำหรับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุ
ของเหลว ซึ่งมีความหมายดังนี้

200® หมายถึง เครื่องหมายของซิลิโคนเหลวที่ผลิตโดย Dow Corning

100CS หมายถึง ค่าความหนืดของซิลิโคนเหลวมีค่าเท่า 100 CS (centistokes) ที่อุณหภูมิ 25°C
ชื่อซิลิโคนออยล์ทางเคมีเรียกว่า Linear Polydimethylsiloxane polymers ซึ่งมีส่วนผสมตามสูตรดังนี้

ข้อมูลคุณสมบัติของซิลิโคนออยล์ หมายเลข 200® Fluid, 100CS มีดังนี้

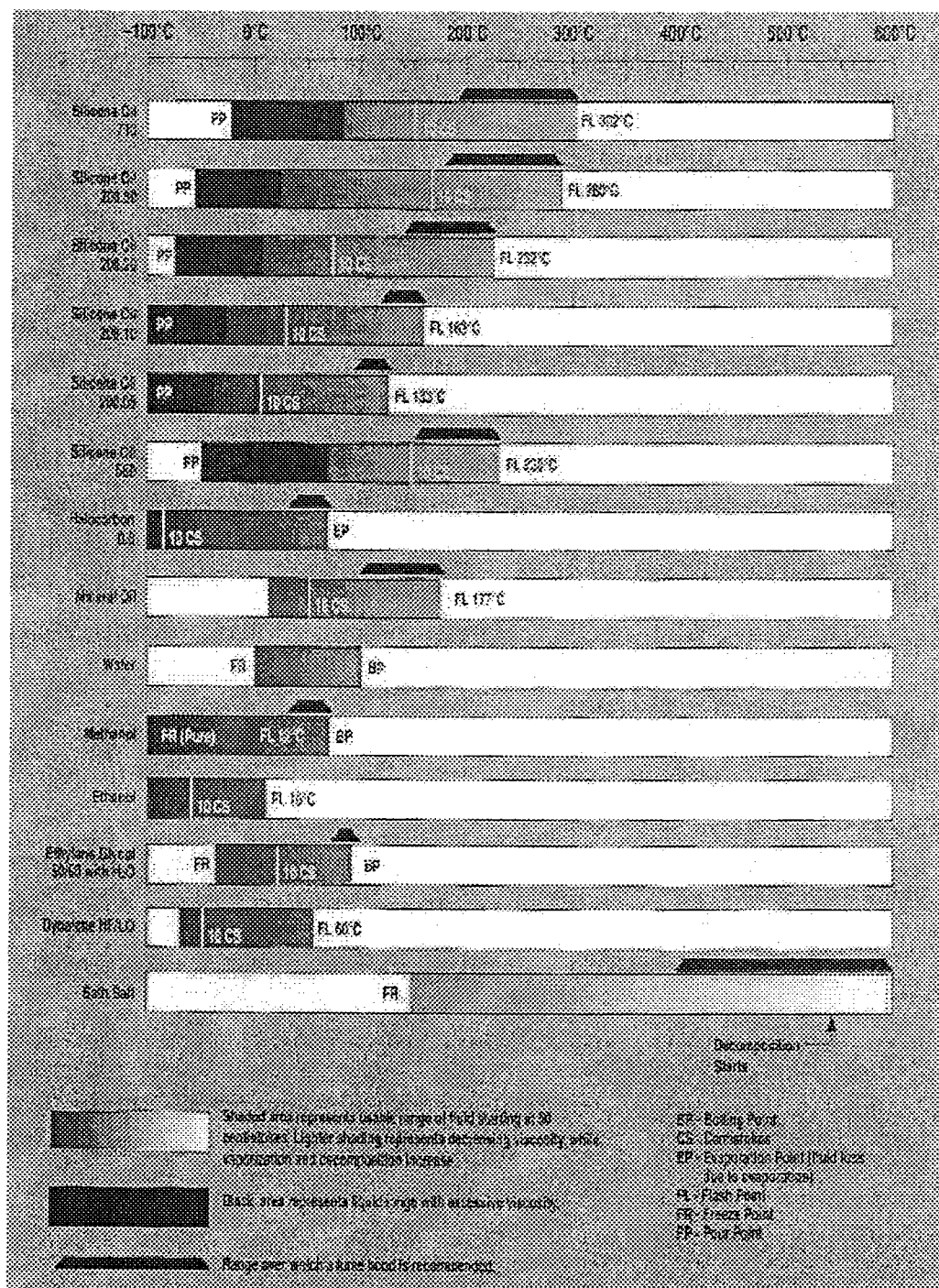
- 1 ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Colour) : เป็นของเหลวใสไม่มีสี ไม่มีกลิ่น
- 2 จุดหลอมเหลว (Melting Point) : -28°C
- 3 การละลายได้ในน้ำ (Solubility In Water) : ไม่สามารถละลายน้ำได้
- 4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) : ความหนาแน่น 0.954 กก./ลิตร ที่ 25°C
- 5 จุดวาบไฟ (Flash Point) : มากกว่า 326°C
- 6 อุณหภูมิช่วงการใช้งาน (Operating Temperature Range) : -60 to 200°C
- 7 จุดเยือกแข็ง (Pour Point) : -70°C
- 8 ค่าทนแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ที่ 25°C : 400 V / mil

9 อันตรายต่อสุขภาพ : ภาวะปกติ (อุณหภูมิ -60°C to 200°C) ไม่จำเป็นต้องป้องกัน แต่ถ้ามีปริมาณไอน้ำมันมากหรือไม่สามารถควบคุมไอน้ำมันได้ ให้ใช้หน้ากากที่มีตัวกรองสามารถป้องกันไอระเหยของสารได้

(From Dow Corning Customer Services in Midland 2546 :12)

ตาราง 17 การเลือกของเหลวสำหรับการใช้งาน (HART SCIENTIFIC 2546:110)

Ordering Information					
Fluid	Usable Range ^s	Flash	Model #	Price	
		Point ^t		1 gal.	5 gal.
Halocarbon 0.8 Cold Bath Fluid	-100°C to 70°C	n/a	5019		
Dynalene HF/LO*	-65°C to 58°C	60°C	5022		
Ethylene Glycol (Mix 1:1 with water)	-30°C to 90°C	n/a	5020		
Silicone Oil Type 200.05	-40°C to 130°C	133°C	5010		
Silicone Oil Type 200.10	-30°C to 160°C	163°C	5012		
Silicone Oil Type 200.20	10°C to 230°C	232°C	5013		
Silicone Oil Type 200.50	30°C to 278°C	280°C	5014		
Silicone Oil Type 550	70°C to 228°C	230°C	5014		
Silicone Oil Type 710	80°C to 175°C	302°C	5017		
Mineral Oil	10°C to 175°C	177°C	5011	n/a	
Bath Salt, 125 lb. [‡]	180°C to 550°C	n/a	5001	n/a	
Potassium Nitrate 53%					
Sodium Nitrite 40%					
Sodium Nitrate 7%					
^s Atmospheric pressure affects the usable ranges of some fluids. The temp quoted is at sea level.					
^t Flash point is the temperature at which a vapor (not the fluid) will ignite if exposed to an open					
*Electrical resistivity is greater than 20-MΩ-cm.					
[‡] 125 lb. Bath salt fills a 7.9-gallon tank.					
MSDS available at www.hartscientific.com					



ภาพประกอบ 49 โครงสร้างของของเหลว

(HART SCIENTIFIC 2546:111)

3. หลักการสอบเทียบระบบวัดอุณหภูมิ

การหาค่าการชดเชย หรือค่าเอชท์พุทของตัวตรวจอุณหภูมิ เทียบกับของมาตรฐาน ที่จำนวนจุดของอุณหภูมิที่พอเพียง ในลักษณะที่ถ้ามีเครื่องมือหรือวิธีการประมาณค่าในช่วงที่ยอมรับได้แล้ว จะสามารถรู้ค่าการชดเชย หรือค่าเอชท์พุทของตัวตรวจตลอดช่วงพิสัยอุณหภูมิที่ใช้

ในบางจุด ระหว่างการเตรียมระบบวัดจะต้องมีการป้อนปริมาณอินพุทที่รู้ค่าเข้าสู่ตัวตรวจ และสังเกตพฤติกรรมของเอชท์พุทของระบบ การเปรียบเทียบลักษณะนี้ ทำให้สามารถแปลความหมายของขนาดของเอชท์พุทอย่างถูกต้องในเทอมของขนาดของอินพุท ขั้นตอนการสอบเทียบนี้ได้จัดตั้งสเกลเอชท์พุทที่ถูกต้องสำหรับระบบวัด

โดยดำเนินการทดสอบเครื่องวัดในลักษณะนี้ เราสามารถสอบเทียบสเกลของมัน และพิสูจน์ความสามารถของมันในการวัดอย่างเชื่อถือได้ ในกรณีนี้ เราบางครั้งหมายถึงการพิสูจน์เครื่องวัด ซึ่งแน่นอนว่า ถ้าจะได้รับการสอบเทียบที่มีความหมายจริง ๆ ตัวอินพุทที่รู้ค่าเองจะต้องได้มาจากมาตรฐานที่ได้มีการนิยามไว้

ถ้าหากเอชท์พุทเป็นสัดส่วนตรงกับอินพุทอย่างแน่นอน (เอชท์พุท = ค่าคงที่ x อินพุท) ดังนั้น การสังเกตเอชท์พุทและอินพุทพร้อม ๆ กันที่จุดเดียวกันเพียงพอที่จะหาค่าคงที่ของการเป็นสัดส่วนได้ เรียกว่า การสอบเทียบจุดเดียว อย่างไรก็ตาม ส่วนใหญ่จะทำการสอบเทียบหลายจุด เนื่องจากปกติเอชท์พุทจะไม่เป็นสัดส่วนกับอินพุท และโดยปกติเราต้องการเพิ่มความแม่นยำในการสอบเทียบ

ถ้ามีการใช้ระบบวัดในการตรวจอินพุทที่แปรตามเวลา ดังนั้น ควรทำการสอบเทียบ โดยใช้มาตรฐานอินพุทที่ขึ้นกับเวลา การสอบเทียบไดนามิกจะเป็นเรื่องยาก และบ่อยครั้งจะทำการสอบเทียบ สเตตติกที่ใช้อินพุทที่คงที่แทน

แม้จะเป็นความจริงสำหรับทุกสาขาการวัดที่ว่า ผลของการวัดที่จะมีความหมายจริง ๆ จะต้องสามารถพิสูจน์ได้ถึงขั้นตอนการวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ แต่ยังคงมีความเข้าใจคลาดเคลื่อนหลายประการเกี่ยวกับระบบการวัดอุณหภูมิ เช่น เข้าใจว่าขีดจำกัดในการใช้ตารางเทอร์โมคัปเปิล ก็คือเลือกคู่โลหะให้ตรงกับที่กำหนดเอาไว้ตรงหัวตาราง หรือมีการยอมรับการแบ่งสเกลในเทอร์โมมิเตอร์ปรอทในแก้วหรือยอมรับในลักษณะจำเพาะของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน อย่างไม่มีข้อสงสัยและสมมติว่าเมื่อได้พิสูจน์

(โดยการสอบเทียบ) ครั้งหนึ่งแล้ว ว่ามีความแม่นยำที่ยอมรับได้ ค่าจากการสอบเทียบจะคงเป็นเช่นนั้นตลอดไป

เอชท์พุทของเทอร์โมคัปเปิลจะขึ้นเป็นอย่างมากต่อความบริสุทธิ์ของโลหะพื้นฐาน ต่อความแน่นอนของส่วนผสมและความเป็นเนื้อเดียวของโลหะผสม โลหะผสมที่คาดว่าจะมีลักษณะจำเพาะ แต่ผลิตโดยผู้ผลิตที่ต่างกันอาจจะมีคุณสมบัติอุณหภูมิ - แรงเคลื่อนที่แปรไป นอกจากนั้นอายุการใช้งานสามารถเปลี่ยนเอชท์พุทของเทอร์โมคัปเปิลไปจากค่าเริ่มต้น

เสถียรภาพของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานจะขึ้นเป็นอย่างมากต่อระดับความเป็นอิสระจากแรงเค้นตึงเครียดในองค์ประกอบ ถ้าหากต้องการผลจากการวัดที่ใกล้เคียงกัน จะต้องมีการใช้อย่างระมัดระวัง และมีการควบคุมทางโลหะวิทยาของวัสดุที่ดีเพียงพอ

เครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบ จะต้องมี

1. เครื่องมือหรือวิธีการสำหรับวัดเอาต์พุตของตัวตรวจรู้อุณหภูมิ
2. มาตรฐานอุณหภูมิที่ยอมรับเป็นสากล
3. สิ่งแวดล้อมทางอุณหภูมิที่มีการควบคุม ที่ซึ่งใช้หาเอาต์พุตของตัวตรวจรู้ เช่น

อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวหรือ เตาควบคุมอุณหภูมิที่จะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่อย่างสม่ำเสมอ

4. แผนสำหรับการประมาณในช่วงระหว่างจุดการสอบเทียบ

วิธีที่ใช้ในการสอบเทียบระบบวัดอุณหภูมิ จะแบ่งเป็น 2 แบบ

1. เปรียบเทียบกับมาตรฐานปฐมภูมิ หรืออุณหภูมิจุดตรึงตามที่กำหนด โดย มาตรฐาน ITS – 90
2. เปรียบเทียบกับมาตรฐานทุติยภูมิที่ถูกสอบเทียบมา (ไพโรมิเตอร์ เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน เทอร์โมมิเตอร์แก๊ส สำหรับสอบเทียบเครื่องวัดที่ใช้งาน)

วิธีการที่ดีที่สุดในการสอบเทียบตัวตรวจรู้อุณหภูมิ คือ ทำการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และควบคุมความผิดพลาดเนื่องจากการจุ่ม เมื่อเราทำเช่นนี้ ปกติจะมีคำถามเสมอว่า ตัวตรวจรู้จะตอบสนองในงานจริงเหมือนกับที่มันตอบสนองในอุปกรณ์สอบเทียบ (โดยเฉพาะเมื่อต้องดัดแปลงให้เหมาะสมเข้ากับอุปกรณ์สอบเทียบ) เงื่อนไขที่ต้องการสำหรับการสอบเทียบ ก็จะเป็นเงื่อนไขที่ต้องการในการสอบเทียบที่ตำแหน่งงาน อย่างไรก็ตาม ถ้าหากไม่สามารถควบคุม

ก. ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ

ข. ขนาดของบริเวณที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ หรือ

ค. ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการจุ่ม

โดยให้เป็นไปตามที่กำหนดแล้ว จะต้องมีการหาค่าแก้ โดยการสอบเทียบ ที่ตำแหน่งงานปกติเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานสอบเทียบจะดีกว่า เครื่องวัดที่ใช้งานโดยเฉพาะในงานอุตสาหกรรม ที่ซึ่งบริษัทที่มีจะเป็นแบบที่มีอายุมากกว่า หรือราคาสูงกว่า ดังนั้น การทดสอบการตอบสนองของบริษัท และการทดสอบหน้าทำการควบคุมที่รวมอยู่กับบริษัทนั้นอาจต้องทำการวัดที่ตำแหน่งงาน บ่อยครั้งที่รวมถึงการใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณมาตรฐานเพื่อทดสอบการตอบสนองของเครื่องวัด (โดยการจำลองสัญญาณเหมือนกับที่จะมาจากตัวตรวจรู้) ตัวอย่างเช่น ในการทดสอบเทอร์โมคัปเปิลอาจใช้ตัวกำเนิดแรงดันมาตรฐานเพื่อจ่ายแรงดันที่แทนพิสัยของสัญญาณที่คาดว่าจะได้จากเทอร์โมคัปเปิล เพื่อเป็นการทดสอบการตอบสนองของเครื่องวัดด้วย

เงื่อนไขจำเป็นสำหรับเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้ คือห้องปฏิบัติการมาตรฐานจะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิรอบอย่างดี ปกติจะคงที่อยู่ที่ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ การทดสอบที่ตำแหน่งงานโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิรอบอาจก่อให้เกิดการเข้าใจผิดในการประเมินเครื่องวัด และประเมินตัวตรวจรู้

ระบบทั้งหมดที่ใช้งานก็ต้องการการทดสอบด้วยเช่นกัน วิธีการที่ดีที่สุด คือ ทำการสอบเทียบปฐมภูมิ ณ ที่ตำแหน่งใช้งานโดยใช้จุดตรึงในพิสัยอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน วิธีนี้จะช่วยให้สามารถประมาณค่าความไม่แน่นอนของอุปกรณ์ ถ้าทำการวัดซ้ำเพียงพอเพื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติ

4. มาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องสร้างอุณหภูมิ

ตามข้อกำหนด EA-10/13 ของยุโรป ซึ่งมีจำนวนรายการทดสอบประสิทธิภาพที่ต้องหา 4 รายการได้แก่

รายการที่ 1 การทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอนหรือรัศมี

(Radial Temperature Homogeneity) ความแตกต่างระหว่างข้างซ้ายและข้างขวาในระดับความลึกเดียวกัน การเก็บข้อมูลต้องเก็บอย่างน้อย 3 ช่วงอุณหภูมิเพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานเช่น 50°C 100°C และ 200°C

รายการที่ 2 การทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวแกนตั้ง

(Axial Temperature Homogeneity) ต้องการความแปรปรวนตามแกนตั้งคือ บน ล่าง กลาง ที่อุณหภูมิเดียวกัน มีค่าความแปรปรวนมากที่สุดในแต่ละช่วงอุณหภูมิในการวางตัวมาตรฐานในตำแหน่งบนความยาวของการจุ่มของตัวมาตรฐานจะต้องมีระยะการจุ่มไม่ต่ำกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวมาตรฐานทำการวัด

รายการที่ 3 อิทธิพลที่มีต่อความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิเนื่องมาจากภาระความร้อนที่ต่างกัน (Loading Effect) เป็นการหาผลกระทบเนื่องจากภาระของตัวที่ถูกสอบเทียบมีขนาดที่ไม่เท่ากันว่ามีผลกระทบกับค่าความแปรปรวนหรือไม่

รายการที่ 4 ความคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา (Stability with Time) เป็นการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 30 นาที เพื่อหาค่าความแปรปรวนในแต่ละระดับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะต้องทำการทดสอบ 3 ระดับอุณหภูมิ เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานเช่น 50°C 100°C และ 200°C (ดูที่ภาคผนวก จ)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้างาน วิจัยภายในประเทศและต่างประเทศที่เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา ออกแบบ และสร้างเพื่อนำหลักการและวิธีการสร้าง ขอบกพร่องต่าง ๆ มาเป็นข้อมูลในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

งานวิจัยภายในประเทศ

ชาลี อินทรชัย. (2545) ได้ทำการทดลองใช้โมดูลไฟฟ้าพลังงานความร้อนในตู้เย็นขนาด 53 ลิตร โดยทดลองใช้และหาประสิทธิภาพการทำความเย็นของโมดูลไฟฟ้าพลังงานความร้อนในตู้เย็นขนาด 53 ลิตรซึ่งใช้โมดูลไฟฟ้าพลังความร้อนต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงติดตั้งอยู่ในตู้เย็นและทำการตรวจสอบวัดระดับอุณหภูมิความเย็นที่ได้ในเวลา 24 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวิจัยทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของโมดูลไฟฟ้าพลังความร้อนจำนวน 3,4 และ 5 ชุด ที่ติดตั้งอยู่ในตู้เย็นขนาดความจุ 53 ลิตร ไม่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) 455 - 2537

สาคร พลราชม. (2542) การศึกษาเริ่มจากการหา ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของเตาไฟฟ้า, วงจรไฟฟ้าควบคุมเฟส และเกนป้อนกลับของเครื่องวัดอุณหภูมิ การกำหนดระบบควบคุมรวมที่เหมาะสมแบบ ITAE (ITAE Optimal Overall Transfer Function) การคำนวณหาตัวควบคุมโดยใช้สมการ Diophantine แล้วจัดโครงสร้างของตัวชดเชยแบบสองพารามิเตอร์ จากนั้นจึงออกแบบสร้างวงจรควบคุม ทั้งสองแบบ ผลการทดลองปรากฏว่าตัวควบคุมแบบ พีไอ สามารถสร้างและทำงานได้ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้สำหรับตัวควบคุม

คุมแบบใช้โครงร่างแบบสองพารามิเตอร์ จะมีปัญหาด้านการสร้างความจริงเพราะภาคหน้าของวงจรควบคุมได้รับสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับมีขนาดต่ำมากเมื่อเทียบกับสัญญาณรบกวน

รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ. (2543) การวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการจัดวางฉนวนและมวลสารที่เหมาะสมในลำดับถัดมา คือ การทดสอบพฤติกรรมการหน่วงเหนี่ยวความร้อนจากการใช้งานในสภาพไม่ปรับอากาศและปรับอากาศ ในขั้นตอนสุดท้าย คือ การทดสอบตัวแปรจากอิทธิพลภายนอกที่ส่งผลต่อการหน่วงเหนี่ยวความร้อน ในการศึกษาเพื่อหาตำแหน่งฉนวนและมวลสารที่เหมาะสมได้ใช้ฉนวนโพลีโพลีสไตรีน ความหนา 1 นิ้ว ติดตั้งกับมวลสารคอนกรีตความหนา 4 นิ้ว 2 ชุด การติดตั้งฉนวนได้ทำการติดตั้งฉนวนด้านนอกแผ่นคอนกรีตทั้งกลางแผ่นคอนกรีต และด้านในแผ่นคอนกรีต จากการทดสอบพบว่าตำแหน่งของฉนวนและมวลสารที่เหมาะสม คือ การใช้วัสดุฉนวนด้านนอกเพื่อลดอิทธิพลที่รุนแรงจากสภาพภูมิอากาศภายนอก และใช้วัสดุมวลสารที่มีค่าความจุความร้อนสูงไว้ด้านในเพื่อหน่วงเหนี่ยวความร้อนที่ผ่านวัสดุฉนวนเข้ามา ผลของการวิจัยพบว่าวัสดุทดสอบชนิดนี้มีอุณหภูมิอากาศสูงสุดภายในเขตทดสอบต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุดประมาณ 7 องศาเซลเซียส ส่วนวัสดุทดสอบอีก 2 รูปแบบคือ วัสดุทดสอบที่มีฉนวนอยู่กึ่งกลางมวลสารและวัสดุทดสอบที่มีฉนวนอยู่ด้านในมวลสารมีอุณหภูมิอากาศสูงสุดภายในเขตทดสอบต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด ประมาณ 6 องศาเซลเซียส และ 5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผลการทดสอบการใช้งานในสภาพไม่ปรับอากาศและปรับอากาศ พบว่าควรใช้การติดตั้งฉนวนภายนอกและใช้มวลสารด้านในทั้งสองกรณี อย่างไรก็ตามมีข้อควรระวังในการเลือกใช้ปริมาณมวลสารภายในสภาพปรับอากาศ เนื่องจากมวลสารปริมาณมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการลดความร้อนสะสมภายในมวลสารเมื่อเริ่มเปิดเครื่องปรับอากาศ ผลการทดสอบตัวแปรจากอิทธิพลภายนอกที่ส่งผลต่อการหน่วงเหนี่ยวความร้อน พบว่าการใช้วัสดุเคลือบผิวด้วยสีดำส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในสูงกว่าวัสดุทดสอบชนิดเดียวกันที่เคลือบผิวด้วยสีขาวประมาณ 1 องศาเซลเซียส ในทำนองเดียวกันกับการได้รับรังสีตรงจากดวงอาทิตย์จะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในเขตทดสอบสูงกว่าวัสดุที่มีการบังแดดให้กับผิวภายนอก วัสดุที่ไม่มีการบังแดดให้กับผิวภายนอกจะมีอุณหภูมิอากาศภายในสูงกว่าวัสดุทดสอบชนิดเดียวกันที่มีการบังแดดประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่า การติดตั้งฉนวนภายนอกและใช้มวลสารภายในมีความเหมาะสมทั้งการใช้งานในสภาพไม่ปรับอากาศและปรับอากาศ อาคารที่ไม่ปรับอากาศควรมีผนังที่มีการติดตั้งฉนวนภายนอกและใช้มวลสารปริมาณมากภายในอาคาร เพื่อให้อุณหภูมิอากาศภายในเข้าใกล้สภาวะน่าสบายในช่วงเวลากลางวัน อาคารที่มีการปรับอากาศควรใช้การติดตั้งฉนวนภายนอกอาคารและใช้มวลสารปริมาณน้อยภายในอาคาร เพื่อให้เครื่องปรับอากาศไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการลดความร้อนสะสมในมวลสารเมื่อเพิ่มเปิดเครื่องปรับอากาศ

ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย. (2544) งานวิจัยนี้ได้ศึกษา 2 ประการการนำ คือ การศึกษาการนำความร้อน และการศึกษาการนำความร้อน และการพาความร้อนไปพร้อมกัน งานส่วนที่หนึ่ง คือ การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบทัดกับท่อที่มีอุณหภูมิคงที่ จำนวน 2 อันซึ่งมีการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน สำหรับงานในส่วนนี้เป็นการศึกษาปัจจัยทางด้านรูปทรงของท่อ และระยะห่างระหว่างท่อ ซึ่งรูปทรงของท่อประกอบด้วย ท่อรูปทรงแบน, ท่อรูปทรงวงรี และท่อรูปทรงหยดน้ำ ส่วนปัจจัยทางด้านระยะห่างระหว่างท่อ คือ 0.5 เซนติเมตร และ 1.0 เซนติเมตร ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างท่อมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในครีบทัดมากกว่ารูปทรงของท่อ และงานส่วนที่สอง คือ การศึกษาลักษณะการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่ระหว่างครีบทัด และท่อที่มีอุณหภูมิคงที่ จำนวน 2 อันซึ่งมีการจัดเรียงตัวในแนวเดียวกัน โดยปัจจัยที่ศึกษาในส่วนนี้จะเหมือนกับงาน

ส่วนที่หนึ่ง และได้เพิ่มเติมปัจจัยทางด้านความเร็วขาเข้า คือ 15 เมตร/วินาที และ 20 เมตร/วินาที ผลการจำลองที่ได้แสดงให้เห็นว่ารูปทรงของท่อ และระยะห่างระหว่างท่อ มีผลต่อลักษณะการไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศ นอกจากนี้ เมื่อความเร็วเข้าของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีลักษณะที่แคบกว่า แต่ความร้อนถูกกำจัดออกได้ดีขึ้น

งานวิจัยต่างประเทศ

John S. Traynor, (1990) เนื้อหาของงานวิจัยนี้ใช้เตาอบไฟฟ้าที่มีขนาด 715 วัตต์ เตาที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพัดลมดูดอากาศติดอยู่ด้านบนของเตา อุณหภูมิขณะ Open loop 78 Celsius การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของเตา ใช้วิธีป้อนกำลังไฟฟ้า 100 % เป็นเวลา 27 นาที จากนั้นจึงหา ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของเตา ตัวควบคุมใช้แบบการป้อนกลับโดยสเทท โดยใช้โครงสร้างแบบ Butterworth ผลการทดลอง ระบบสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบ Ramp ได้ทั้งขาขึ้นและขาลงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Jiin-Yun Jang, Mu-Cheng Wu และ Wen-Jeng Chang (1996) ทำการทดลองเป็น 2 รูปแบบคือ การทดลอง (Experimental) เป็นการศึกษาโดยมี รูปแบบของท่อเป็นรูปทรงกลม และใช้รูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใน 3 รูปแบบ โดยมีความแตกต่างกันที่ค่าของ จำนวนครีป ซึ่งมีค่าดังนี้ คือ 8, 10, 12 (ครีปต่อความยาว 1 นิ้ว) เป็นต้น และ ด้าน Numerical ใช้ชุดจำลองจำนวน 2 รูปแบบที่ ประกอบด้วยจำนวนของท่อรูปทรงกลม จำนวน 4 อัน โดยเรียงกันเป็น 4 แถว และค่าของจำนวนครีปที่ 8 ครีป ต่อนิ้วทั้ง 2 รูปแบบจะต่างกันที่รูปแบบการเรียงตัวของ tube คือ แบบแนวเดียวกัน และแบบเรียงเหลื่อมกัน ผลงานวิจัยที่ได้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความดันลดยของระบบที่มีการจัดเรียงตัวท่อแบบแนวเดียวกัน ประมาณ 15-27 % และ 20-25 % ตามลำดับ ส่วนค่า Nucleate Number จะมีค่าที่ลดลงเมื่อจำนวนแถวของท่อเพิ่มขึ้น และจำนวนแถวจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยลงเมื่อจำนวนแถวของท่อมีมากกว่า 4 แถวโดยผลจากทั้งสองวิธีจะมีความใกล้เคียงกัน

Shoji Yamauchi, (1997) เนื้อหาของงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค และแบบป้อนกลับโดยสเททในการออกแบบดังกล่าว ได้ใช้โปรแกรม Wclass และ Wcstate ช่วยในการออกแบบกระบวนการที่เป็นน้ำที่ไหลผ่านท่อ ลาดเอียงโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก

Shoji Yamauchi, (1998) เนื้อหาของงานวิจัยนี้คือการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของน้ำที่ไหลผ่านท่อโดยใช้สมการสมดุลความร้อน (Heat balance equation) และไม่นำเอาไส้ความร้อน มาคิดเป็นตัวแปร สเทท การออกแบบระบบควบคุมจะใช้การควบคุมแบบดิจิตอล โดยตัวควบคุมจะออกแบบทั้งแบบฟีดแบ็ค และแบบป้อนกลับโดยสเทท สำหรับตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยสเททนั้นจะใช้แบบ Augmented system with integral compensate ประกอบกับ การออกแบบตัวประมาณค่าสเทท ผลการทดลองตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยสเททมี Setting time สั้นกว่าแบบฟีดแบ็ค

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาเป็นข้อมูล ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว โดยได้ศึกษาถึง ประโยชน์ ทฤษฎีการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ ปัญหาจากการควบคุมอุณหภูมิ ปัญหาโครงสร้าง และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่จะต้องใช้พัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว โดยทำให้ทราบถึงวิธีการควบคุมอุณหภูมิ การใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ และแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นควบคุมเกี่ยวกับอุณหภูมิ

เมื่อได้ศึกษางานวิจัยการควบคุมอุณหภูมิ ด้านต่างๆ ทำให้ทราบแนวคิด วิธีการและข้อ
พร่องต่างๆ โดยได้นำมาปรับปรุงและพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เพื่อให้มี
ประสิทธิภาพโดยสามารถควบคุมการแปรปรวนของอุณหภูมิไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ในระยะเวลา 30 นาที
และมีลักษณะทางกายภาพในด้านความปลอดภัย ด้านกายภาพ ด้านการใช้งาน และ ด้านการ
บำรุงรักษา อยู่ในเกณฑ์ดี

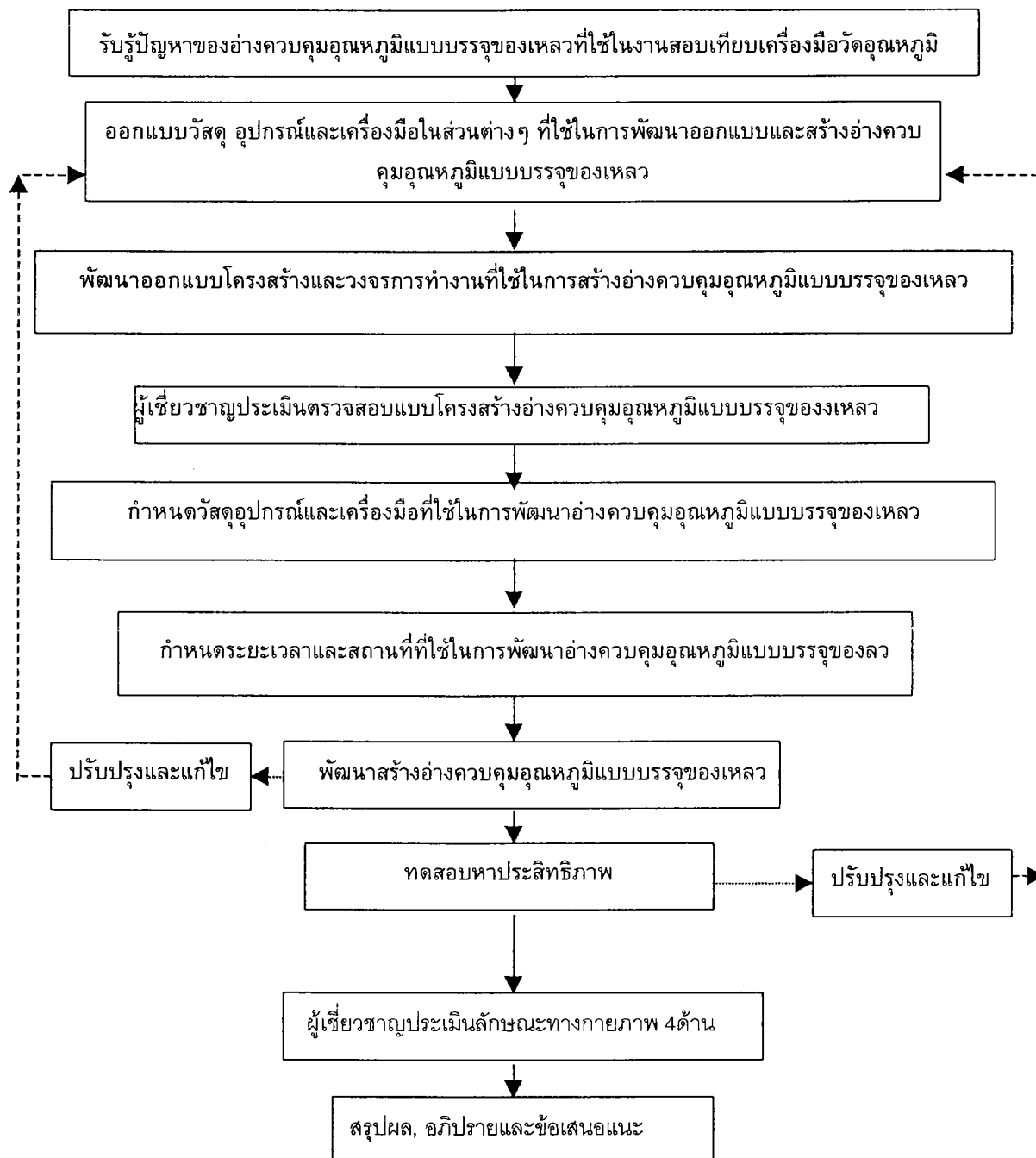
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการศึกษา ข้อมูลพื้นฐาน เกณฑ์ข้อกำหนด การพัฒนาองค์ความรู้
อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมโดยจะ
ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ระบุปัญหาขององค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม
2. ออกแบบวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาองค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
3. พัฒนาออกแบบโครงสร้างและวงจรการทำงานที่ใช้ในการสร้างองค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
4. ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินตรวจสอบแบบโครงสร้างและวงจรการทำงานขององค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
5. กำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาองค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
6. กำหนดระยะเวลาและสถานที่ที่ใช้ในการพัฒนาองค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
7. พัฒนาสร้างองค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลวตามแบบที่ได้ออกแบบไว้
8. ทดสอบ ปรับปรุงและ แก้ไข การทำงานขององค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
9. ทดสอบหาประสิทธิภาพและประเมินลักษณะทางกายภาพขององค์ความรู้อุตสาหกรรมแบบบรรจุของเหลว
10. การวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย
ในการทำวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 50 แสดงขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

1 รับรู้ปัญหาของการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เนื่องจากผู้วิจัยมีหน้าที่ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ซึ่งจะต้องเดินทางไปสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิซึ่งมีเป็นจำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรมจึงทำให้สามารถทำงานได้ทันตามความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆได้ ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนไม่สามารถรอเวลาการสอบเทียบได้ จึงได้ทำการสอบเทียบภายในโรงงานอุตสาหกรรมของตนเองแต่ก็ไม่สามารถทำได้ทั้งหมดโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็ก เป็นเพราะว่าเครื่องมือสอบเทียบอุณหภูมิมีราคาสูงมากไม่คุ้มการลงทุนโดยเฉพาะเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะพัฒนาเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานหรืออ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิเพื่อทดแทนการนำเข้าเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานจากต่างประเทศเพื่อลดปัญหาค่าใช้จ่าย

2 ออกแบบวัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

2.1 ศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างเครื่องมือชนิดต่างๆ

2.2 ศึกษาอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวและระบบวงจรการทำงาน

2.2.1.เป็น การศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ในการการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

2.2.2.เป็น การศึกษาเครื่อง ควบคุมอุณหภูมิ แบบอัตโนมัติที่ใช้ใน การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยมีความละเอียดไม่เกิน $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

2.2.3.เป็น การศึกษาถึงอุปกรณ์เครื่องวัดอุณหภูมิหรือ ตัวรับสัญญาณ เข้ามาที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิเรียกว่า SENSOR ซึ่งจะสามารถบอกสถานะของอุณหภูมิว่ามีสภาพเป็นอย่างไรจึงจะส่งสัญญาณให้กับตัวควบคุมอุณหภูมิ

2.2.4.เป็น การศึกษาอุปกรณ์โซลิดสเตตสรีเลย์ ซึ่งใช้ในการรับสัญญาณเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อสั่งให้ขดลวดความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิทำงาน

2.2.5.เป็น การศึกษาอุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวช่วยกวนให้ของเหลวในอ่างควบคุมอุณหภูมิกับความร้อนจากขดลวดความร้อนให้ความร้อนกระจายทั่วของเหลว

2.2.6.เป็น การศึกษาอุปกรณ์ ขดลวดความร้อน ซึ่งมีขดลวดความร้อนอยู่ หลายชนิดฉะนั้นจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้

2.2.7.คำนวณกันความร้อนใช้สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อนของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

2.2.8.สายไฟฟ้าใช้สำหรับเดินวงจรไฟฟ้า

2.2.9.สแตนเลสใช้สำหรับทำโครงสร้างเพื่อให้ของเหลวไหลเวียนในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

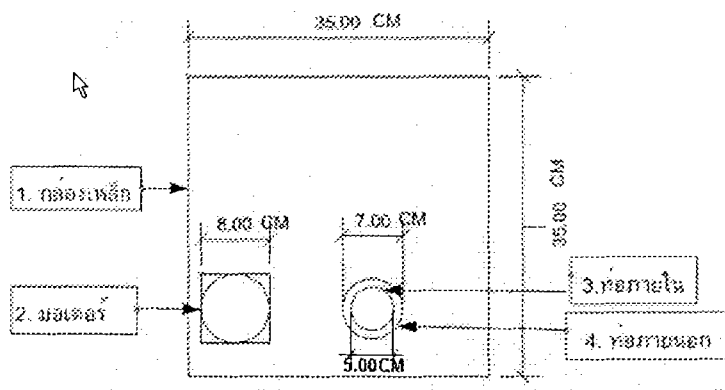
2.2.10.ซิลิโคนเหลวเป็นตัวนำความร้อนจากขดลวดความร้อนมาสู่เครื่องวัดอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการสอบเทียบ สามารถทนความร้อนได้ถึง 250°C

3 การพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการสร้างส่วน ประกอบต่าง ๆ โดยมีลำดับขั้นดังนี้

โดยการกำหนดโครงสร้างการทำงานขนาดความจุอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวได้ทำการศึกษารูปแบบโครงสร้างและหลักทำงานจากเอกสารสินค้าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศประมาณ 3 ประเทศ (ดูจากภาคผนวก ค)และนำมาเป็นแนวคิดในการพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวโดยทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างการทำงานให้เหมาะสมกับสภาพปัญหาที่เกิดขึ้นคือการกำหนดขนาดความจุของของเหลวประมาณ 1.2 ลิตรได้กำหนดจากข้อมูลขนาดเครื่องสร้างอุณหภูมิที่มีอยู่ในท้องตลาดและจากผลการทดลองในบทที่ 4 แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเพื่อสร้างอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

3.1 รายการประกอบแบบโครงสร้าง

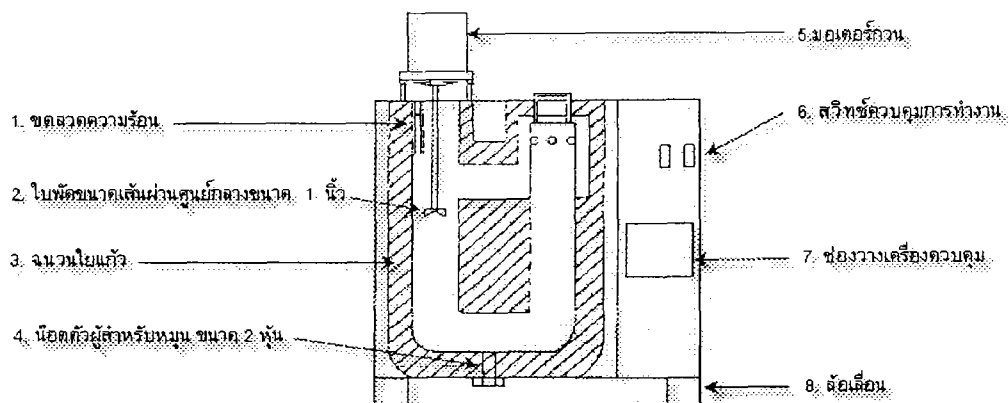
1. กล่องเหล็กขนาด 35 ซม. X 35 ซม. x 35 ซม.
2. มอเตอร์กวน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 ซม
3. ท่อ ภายในขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม.
4. ท่อ ภายนอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 ซม.



ภาพประกอบ 51 แสดงส่วนประกอบอย่างควบคุมอุณหภูมิของผู้วิจัย

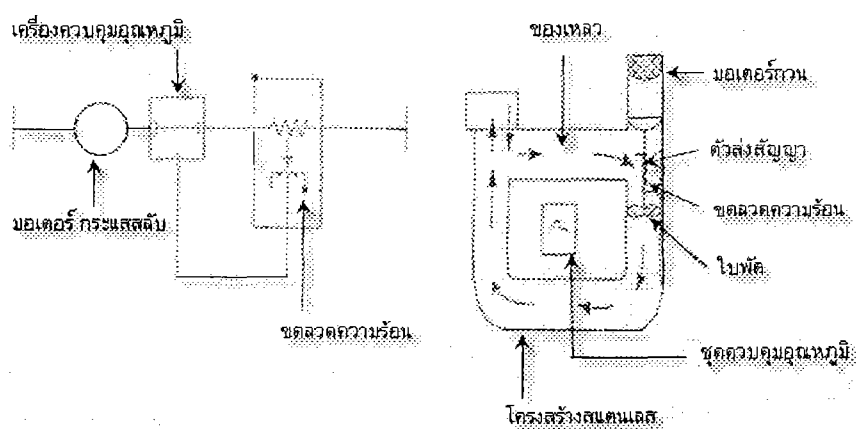
3.2 รายการวัสดุและอุปกรณ์ ประกอบแบบ

1. ขดลวดความร้อน
2. ใบพัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว
3. ฉนวนใยแก้ว
4. น็อตตัวผู้สำหรับหมุน ขนาด 2 ฟัน
5. มอเตอร์กวน
6. สวิตช์ควบคุมการทำงาน
7. ช่องว่างเครื่องควบคุม
8. ล้อเลื่อน



ภาพประกอบ 52 แสดงรูปตัดอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

3.3 พัฒนาแบบวงจรในส่วนต่างๆของอุปกรณ์



ภาพประกอบ 53 แสดงรูปวงจรไฟฟ้าส่วนต่างๆของอุปกรณ์

3.4 การคำนวณ ออกแบบอุปกรณ์ในส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ในการพัฒนาอ่างควบคุม

อุณหภูมิตามแบบบรรจุของเหลว

จากข้อมูลปริมาตรของอ่างควบคุมอุณหภูมิตามแบบบรรจุของเหลวของประเทศต่าง ๆ มีดังนี้

ประเทศจีนมีขนาดประมาณ 0.06 m^3 0.12 m^3 และ 0.18 m^3 (ดูที่ภาคผนวก ค)

ประเทศอเมริกามีขนาดประมาณ 0.27 m^3 0.42 m^3 (ดูที่ภาคผนวก ค)

ประเทศอังกฤษมีขนาดประมาณ 0.05 m^3 0.07 m^3 และ 0.15 m^3 (ดูที่ภาคผนวก ค)

จากข้อมูลขนาดของเครื่องสร้างอุณหภูมิตามอ่างควบคุมอุณหภูมิตามแบบบรรจุของเหลวของประเทศต่าง ๆ มีขนาดต่าง ๆ (ดูที่ภาคผนวก ค) บ้างเครื่องไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปสอบเทียบนอกสถานที่บ้างเครื่องสามารถเคลื่อนย้ายไปสอบเทียบนอกสถานที่แต่ไม่สามารถใช้กับงานที่ละเอียดกว่า $\pm 0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ด้วยเหตุนี้ต้องใช้ขนาดให้เหมาะสมและพัฒนาคุณภาพความละเอียดให้ดีกว่า และใช้เวลาในการสอบเทียบได้อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้สะดวกการใช้งานและลดปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิในโรงงานอุตสาหกรรม

3.4.1 หาปริมาณของอ่างควบคุมอุณหภูมิตามแบบบรรจุของเหลว

จากสูตร ปริมาณ (V)

$$= \frac{\pi \times DT^2}{4} \times Ht$$

แทนค่า

$$= \frac{3.14 \times 0.04^2}{4} \times 0.7$$

$$= 0.0012 \text{ m}^3$$

V : แทนปริมาณของของเหลว (m^3)

DT : แทนเส้นผ่านศูนย์กลางถึง (m)

HT: แทนความยาวของถึง (m)

Q : แทนอัตราการสูบ ($\text{m}^3/\text{นาที}$)

Tm : เวลาที่จับ (0.5 m)

2 หาอัตราการสูบ จากสูตร (Q)

$$Q = \frac{V}{Tm}$$

แทนค่า

$$Q = \frac{0.0012}{0.05}$$

$$= 0.024 \text{ (m}^3/\text{ นาที)}$$

3.4.2 หาจำนวนรอบของมอเตอร์ $N = 120f/P$

N = ความเร็วรอบของมอเตอร์ รอบ / นาที

f = ความถี่

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จะได้เท่ากับ $f = 50 \text{ Hz}$, $P = 4$ ขั้ว

$(120 \times 50) / 4 = 1,500$ รอบ / นาที ความเร็วรอบที่ใช้เท่ากับ 1,500 รอบ / นาที

3.4.3 หาความเร็วจำเพาะ (N_s)

จากสูตรความเร็วจำเพาะ (N_s)

$$N_s = \frac{N \times \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

$$N_s = \frac{1500 \times 0.489}{1.04}$$

แทนค่า

$$= 1009.51$$

โดยที่

N : ความเร็วรอบของมอเตอร์ = 1500 รอบ / นาที

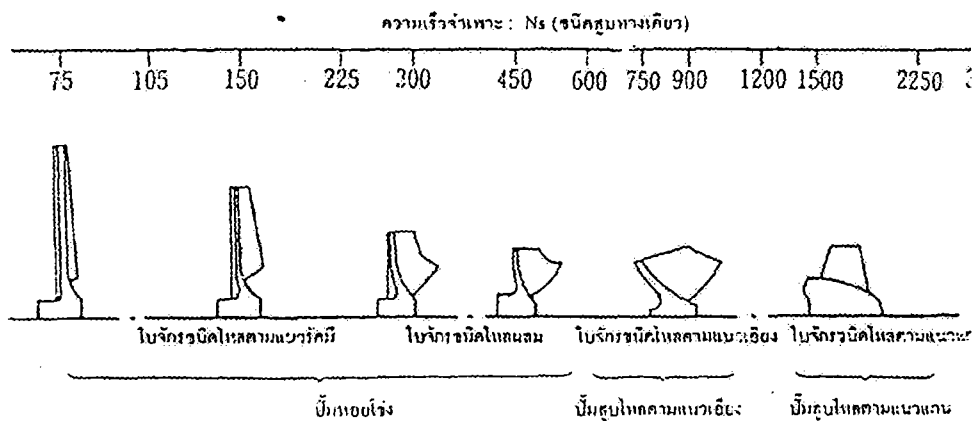
V : ปริมาณของเหลว = 0.012 m^3

Q : อัตราการสูบ = $0.24 \text{ m}^3 / \text{นาที}$

H : เฮด = 0.7 เมตร (m) จากความยาวของท่อทั้งหมด

N_s : ความเร็วจำเพาะ = 1009.5

การเลือกใบพัดคือมีใบพัดชนิดไหลตามแนวแกนดังรูปที่ 52



ภาพประกอบ 54 แสดงการสร้างใบพัด - ความเร็วจำเพาะ

(ฉัตรชัย มานะดี 2542:4)

3.4.4 หาขนาดของขดลวดความร้อน

จากสูตร ปริมาณความร้อน (Q) = MST

$$\text{แทนค่า} = 1 \times 4 \times (250-30)$$

$$= 440 \text{ kcal}$$

$$8.6000 \times 10^{-1} \text{ kcal} = 1 \text{ Watts}$$

$$440 \text{ kcal} = \frac{440 \times 1}{0.86}$$

$$\text{ขนาดของขดลวดความร้อน} = 511.62 \text{ Watts}$$

M = ปริมาณของสารเท่ากับ 1kg

S = ความร้อนจำเพาะเท่ากับ 4 kcal/kg. °C

 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิ

3.4.5 ขนาดของมอเตอร์

กำหนดให้ เส้นผ่านศูนย์กลางของอ่าง เท่ากับ 0.05 เมตร (m)

ความสูงของใบจากกันถึง 0.15 เมตร (m)

รอบหมุน (n) 1500 รอบ/นาที

เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด 1/2 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของอ่าง 0.03 เมตร (m)

น้ำหนักของของเหลว 2 kg

ความหนาแน่น 954 kg / m³

ความสูงของของเหลว 0.30 เมตร (m)

ดังนั้น

$$\left(\frac{Ht}{Di} \right) = \frac{0.3}{0.03} = 10$$

$$\left(\frac{Hi}{Di} \right) = \frac{0.15}{0.03} = 5$$

$$\left(\frac{Dt}{Di} \right) = \frac{0.05}{0.03} = 1.6$$

$$Nre = \frac{nDi^2 \rho}{\mu} = \frac{1500 \times 0.03 \times 954}{60 \times 0.001} = 723000$$

จากอัตราส่วนของขนาดเหล่านี้จะเห็นได้ว่าใกล้เคียงกับกรณีของเส้นโค้งหมายเลข 5 โดยที่ $Nre = 7.23 \times 10^5$ นั้น $Np = 4.8$ ดังนั้นกำลังขับของการกวนจะคำนวณได้จากนิยามของ Np ได้ดังนี้

$$P = \frac{\sigma n^3 D^5 \rho}{g c} = \frac{954 \times (10)^3 \times 0.03^5 \times 4.8}{9.81}$$

$$= 8.4 \text{ Watts}$$

แต่เนื่องจากสัดส่วนต่างๆของอ่างแตกต่างจากสัดส่วนของเส้นโค้งหมายเลข 5 ต้องชดเชยความคลาดเคลื่อนโดยอาศัยสูตรดังต่อไปนี้

$$fc = \frac{\left(\frac{D}{Di} t\right) * \left(\frac{Ht}{Hi}\right)}{\left(\frac{D}{Di} t\right) * \left(\frac{Ht}{Hi}\right)} * = \frac{10 * 1.6}{3 * 3} = 1.7$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้นกำลังขับไบนวสำหรับอ่างนี้} &= 8.4 \times 1.7 \\ &= 14.93 \quad \text{watts} \end{aligned}$$

3.4.6 การหาความหนาของฉนวนใยแก้ว

โดย กำหนดอุณหภูมิภายนอก เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิภายใน เท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

$$\begin{aligned} \text{สภาพการนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย} &= (\text{อุณหภูมิใช้งาน} + \text{อุณหภูมิบรรยากาศ}) / 2 \\ &= (250 + 30) / 2 \\ &= 140 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\text{ค่าสภาพการนำความร้อนความหนาจำเพาะ} = 0.036 \text{ w/m-k}$$

$$\text{ความต่างของของอุณหภูมิ (} \Delta t \text{)} = t_o - t_{av} = 250 - 140 = 110 \text{ }^{\circ}\text{C} = 110 + 273.15 = 383.15 \text{ K}$$

ให้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{การแผ่รังสี ณ อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ } 24^{\circ}\text{C} &= \sigma T^4 = 5.64 \times 10^{-8} (304 + 273.15)^4 \\ &= 1652.01 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

สภาพการดูดซึมรังสี (ปัจจัยสภาพแผ่รังสีของพื้นที่ผิว). $\epsilon = 0.5$

$$\text{ดังนั้นการแผ่รังสีจริงมีค่าเท่ากับ} \quad 1652.0 \times 0.5 = 826 \text{ W/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{สภาพต้านทานความร้อน,} \quad R &= \Delta t / q \\ &= (110 - 30) / 826 \\ &= 0.098 \text{ m} \end{aligned}$$

สรุปจากการพัฒนาจะได้อ่างควบคุมอุณหภูมิโดยมีคุณสมบัติดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ 14.9 วัตต์
2. จำนวนรอบมอเตอร์ 1500 รอบ ต่อ นาที
3. ปริมาณของของเหลวในอ่างควบคุมอุณหภูมิจำนวน 1.2 ลิตร
4. ขนาดของขดลวดความร้อน 511.62 Watts
5. ขนาดของใบพัด 0.03 เมตร (m)
6. ฉนวนใยแก้วมีความหนา 0.09 เมตร (m)

4 ผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบแบบโครงสร้างและวงจรการทำงาน

หลังจากพัฒนาออกแบบเรียบร้อยแล้วนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญทางด้านอุณหภูมิ 1 ท่านผู้เชี่ยวชาญทางด้านเครื่องกล 1 ท่าน ผู้เชี่ยวชาญทางด้านฟิสิกส์ 1 ท่านโดยมีวุฒิไม่ต่ำกว่าปริญญาโทซึ่งปฏิบัติงานที่สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยตรวจสอบเพื่อหาข้อบกพร่องและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไข(ดูที่ภาคผนวก ข)

5. การกำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในส่วนต่าง ๆ ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลว

- 5.1 แตนชลสถานขนาด 2 นิ้ว
- 5.2 สายไฟฟ้า 20 เมตร
- 5.3 ตะกั่วบัดกรี
- 5.4 เทปพันสายไฟ
- 5.5 เครื่องมือวัดทางอุณหภูมิ
- 5.6 ไขควง 1 ชุด
- 5.7 หัวแรงไฟฟ้า
- 5.8 ตะไบโลหะ 1 ชุด
- 5.9 คีม 1 ชุด
- 5.10 มัลติมิเตอร์แบบดิจิตอลและอนาล็อก อย่างละ 1 ตัว
- 5.11 ขนาดของมอเตอร์ 20 Watts
- 5.12 ขนาดของขดลวดความร้อน 500 Watts
- 5.13 ปริมาณของของเหลวในอ่าง 1.2 ลิตร

6 กำหนดระยะเวลาและสถานที่ ที่ใช้ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลว

6.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการพัฒนาออกแบบและสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลวแบบและสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลวเริ่มตั้งแต่วันที่ 31 ตุลาคม 2546 ถึงวันที่ ธันวาคม 2546

6.2 สถานที่ที่ใช้การพัฒนาออกแบบและสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลวคือสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

7 พัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลวเพื่อการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ โดยมีลำดับขั้นดังนี้

- 7.1 นำข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญมาปรับปรุงแก้ไข
- 7.2 สั่งซื้ออุปกรณ์ตามรายละเอียดที่ออกแบบไว้
- 7.3 สร้างโครงสร้างตามที่ออกแบบไว้
- 7.4 ต่อวงจรไฟฟ้าตามที่ออกแบบวงจรของอุปกรณ์
- 7.5 นำข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญมาปรับปรุงแก้ไข
- 7.6 สร้างและติดตั้งระบบ (ดูภาพผนวก ง)

8 ทดสอบหาประสิทธิภาพ อ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลว และปรับปรุงหลังจากพัฒนาสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวแบบบรรจุของเหลวแล้วจึงดำเนินการหาประสิทธิภาพและสมรรถนะต่อโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

8.1 ผู้วิจัยศึกษาการทดสอบหาประสิทธิภาพการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิจากของเหลวตามมาตรฐาน EA-10/13 ซึ่งมีจำนวนรายการทดสอบ 4 รายการได้แก่

- 8.1.1 การทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน
- 8.1.2 การทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวแกนตั้ง

8.1.3 อิทธิพลที่มีต่อความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิเนื่องมาจากการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน

8.1.4 ความคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา

8.2 ผู้วิจัยออกแบบ แบบตารางบันทึกผลการประเมินหาประสิทธิภาพการทดสอบการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิตามมาตรฐาน EA-10/13 (ตารางที่ 16)

8.3 ผู้วิจัยหาประสิทธิภาพการทดสอบการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิตามมาตรฐาน EA-10/13 โดยจัดหาเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐาน 2 ตัว เพื่อหาค่าการแปรปรวนของอุณหภูมิภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิ แบบบรรจุของเหลว 3 ช่วงอุณหภูมิ อุณหภูมิช่วงที่ 1 50°C อุณหภูมิช่วงที่ 2 100°C อุณหภูมิช่วงที่ 3 150°C และ อุณหภูมิ ช่วงที่ 4 200°C ต่อจากนั้นคำนวณหาค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิภายในอ่าง โดยจะต้องมีค่าความแปรปรวนต้องไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะต้องปฏิบัติตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

8.3.1 การทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน

8.3.1.1 ใช้ Standard แบบความต้านทาน 2 ตัว จุ่มลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ความลึกประมาณ 20 เซนติเมตรเท่ากันทั้งสองตัวโดยให้ทั้งสองตัวมีระยะห่างจากผนังของอ่างสอบเทียบข้างละ

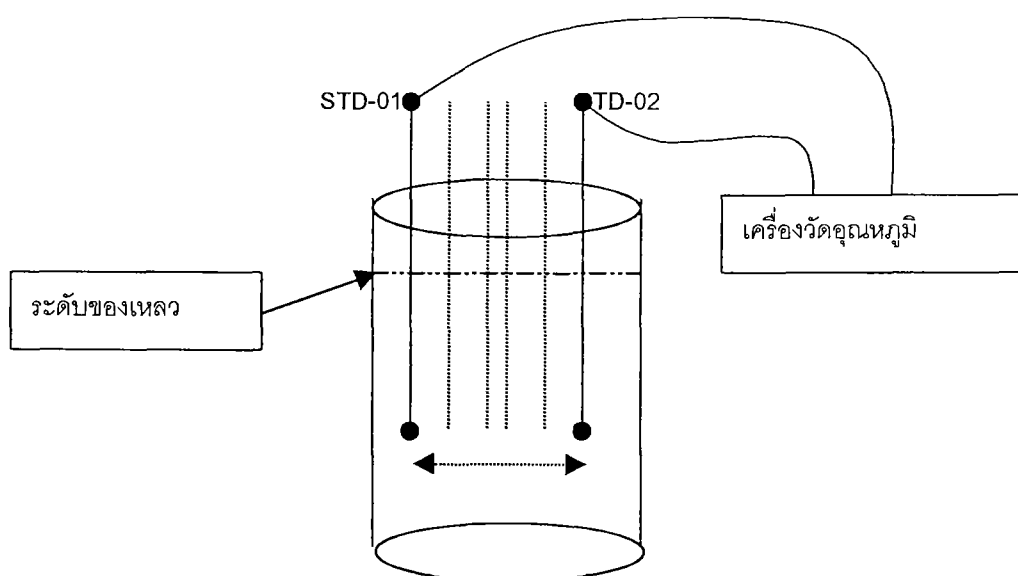
1 เซนติเมตร โดยวางห่างกันประมาณ 2 เซนติเมตรใช้อุปกรณ์จับยึด

8.3.1.2 ท่อสาย Standard แบบความต้านทานทั้ง 2 ตัวเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ ตามรูปที่ 53

8.3.1.3 ปรับตั้งค่าเครื่องควบคุมอุณหภูมิของอ่างไปที่จุดทดสอบโดยเริ่มทดสอบจากอุณหภูมิต่ำไปอุณหภูมิสูง เช่น 50, 100, 150 และ 200°C ตามลำดับ

8.3.1.4 เมื่ออุณหภูมิของอ่างสอบเทียบคงที่ ที่ 50°C แล้วประมาณ 45 นาที ทำการบันทึกข้อมูลเป็นเวลา 30 นาทีเวลาที่ใช้ในการอ่านแต่ละครั้งห่างกันประมาณ 1 นาที ผลที่ได้จาก Standard 2 ตัว ลงในตารางบันทึกผลการสอบเทียบ...(ตารางที่ 16)

8.3.1.5 เมื่อได้ข้อมูลแล้วนำมาพิจารณาหาค่า Maximum Temp. และ Minimum Temp. ของอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบซึ่งผลที่ได้คือประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอ่างว่ามีค่าแตกต่างกันเท่าไร



ภาพประกอบ 55 รูปการการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน

8.3.1.6 ทำการทดสอบซ้ำจากข้อ 8.3.1.3-8.3.1.5 แต่เปลี่ยนค่าอุณหภูมิไปยังจุดต่อไปจนครบตามอุณหภูมิที่จะทดสอบ ตามข้อ 8.3.1.3

8.3.2 การทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง

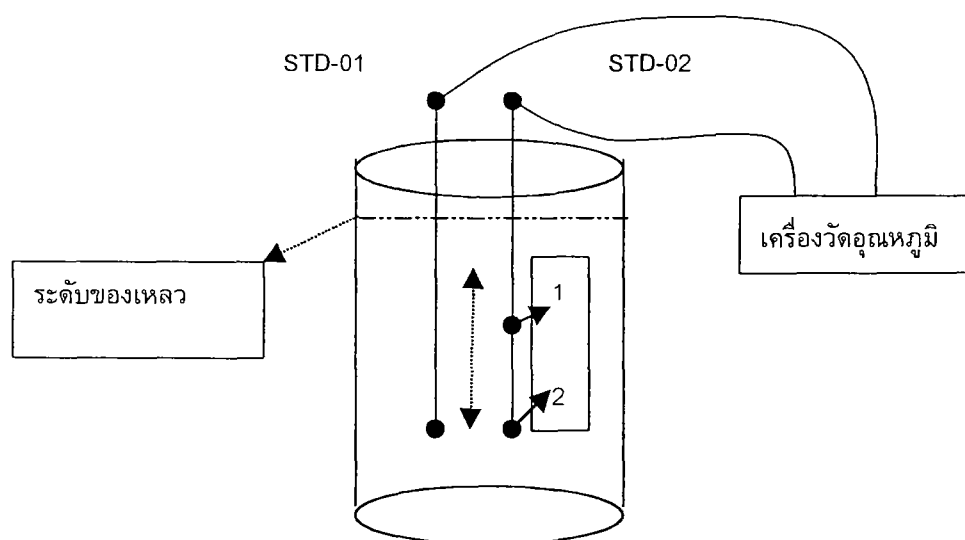
8.3.2.1 ใช้ Standard 2 ตัวจุ่มลงในอ่างสอบเทียบ ความลึกในการจุ่มประมาณ 30 เซนติเมตรเท่ากันโดยทั้งสองตัวจะยึดติดกันตามรูปที่ 54 วางอยู่ในตำแหน่งที่ 1 และ เทียบ ความลึกในการจุ่มประมาณ

30 เซนติเมตรเท่ากันโดยทั้งสองตัวจะยึดติดกันตามรูปที่ 54 วางอยู่ในตำแหน่ง 1 และ ตำแหน่ง 2

8.3.2.2 ปรับตั้งค่าเครื่องควบคุมอุณหภูมิไปยังจุดที่จะทดสอบ เช่น 50°C , 100°C , 150°C , และ 200°C ตามลำดับ

8.3.2.3 เมื่ออุณหภูมิของอ่างคงที่เป็นเวลา 45 นาที จึงทำการอ่านค่าอุณหภูมิจาก Standard ทั้ง 2 ตัวและบันทึกเป็นเวลา 30 นาที โดยเวลาที่ใช้ในการอ่านแต่ละครั้งห่างกันประมาณ 1 นาที ลงใน ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ(ตารางที่ 16)

8.3.2.4 ทำการทดสอบซ้ำจากข้อ 8.3.2.1 - 8.3.2.3 แต่เปลี่ยนค่าอุณหภูมิไปยังจุดต่อไปจนครบตามอุณหภูมิตามข้อ 8.3.2.2



ภาพประกอบ 56 แสดงรูปการการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง

8.3.2.8 การวิเคราะห์ข้อมูล นำแบบการประเมินหาประสิทธิภาพมาสรุปผลของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว จากการทดสอบด้วยวิธีสถิติดังนี้

$$\text{ความแปรปรวน} (+/-^{\circ}\text{C}) = \frac{\text{อุณหภูมิของเครื่องวัด ตัวที่มีค่าสูงสุด} - \text{อุณหภูมิของเครื่องวัด ตัวที่มีค่าต่ำสุด}}{2}$$

ตาราง18 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวตามแนวแกนตั้งและแกนนอน

เวลา	อุณหภูมิ	อุณหภูมิของ	อุณหภูมิของ	ระยะห่างจุด	ความแปรปรวน
	ที่ทดสอบ	STD-01($^{\circ}\text{C}$)	STD-02($^{\circ}\text{C}$)	ของ STD	+/-($^{\circ}\text{C}$)
	($^{\circ}\text{C}$)			01&02 (cm)	แกนตั้ง/ แกนนอน

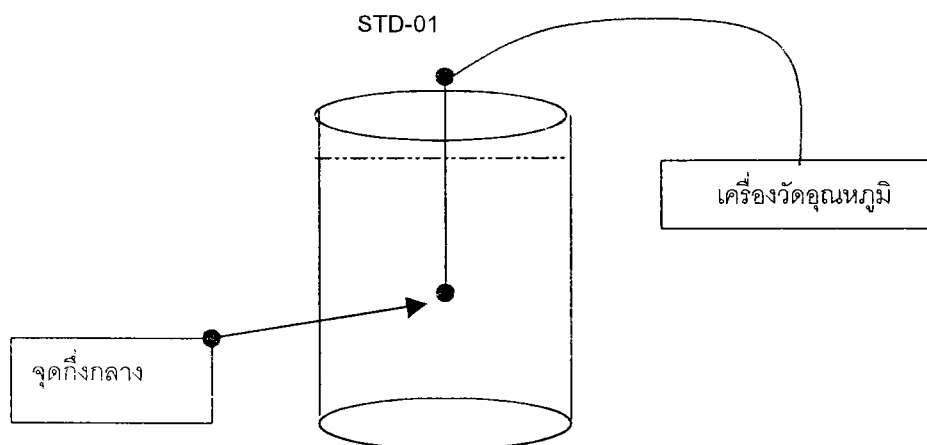
8.3.3 อิทธิพลที่มีต่อความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิเนื่องมาจากภาวะความร้อนที่ต่างกันรายการนี้ไม่ต้องทำเพราะว่าตัวกลางเป็นของเหลวซึ่งทำให้ภาวะความร้อนที่ต่างกัน ไม่มีอิทธิพลที่มีต่อความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวตามข้อกำหนดมาตรฐานการสอบเทียบเครื่องสร้างอุณหภูมิของยุโรป(EA -10/13)

8.3.4 ความคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กับเวลาภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาทีโดยเวลาที่ใช้ในการอ่านแต่ละครั้งห่างกันประมาณ 1 นาทีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิ ในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวจะต้องไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$

วิธีการทดสอบประสิทธิภาพความคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาของอ่างควบคุมอุณหภูมิ

ใช้เทอร์โมมิเตอร์ หมายเลข STD-01 ใส่ลงในอ่างอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวไว้ในตำแหน่งตรงกลางของเหลวภายในอ่างตาม รูป55 เมื่ออุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวคงที่แล้วเป็นเวลา 45 นาทีก็ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาทีที่อุณหภูมิ 50°C , 100°C , 150°C และ 200°C ตามลำดับ



ภาพประกอบ 57 แสดงรูปการทดสอบความคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา

$$\text{คำนวณค่าความแปรปรวน(} +/ - ^\circ\text{C)} = \frac{\text{อุณหภูมิ ที่มีค่าสูงสุด} - \text{อุณหภูมิที่มีค่าต่ำสุด}}{2}$$

9. ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินลักษณะทางกายภาพ 4 ด้านของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

10. สร้างแบบประเมินเพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินดังนี้

แบบประเมินเรื่องการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ แบบประเมินชุดนี้เป็นแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นมาเรื่องความเหมาะสมการใช้งาน

คำชี้แจงแบบประเมินชุดนี้แบ่งเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 4 ด้านดังนี้

- 1 ด้านความปลอดภัย
- 2 ด้านโครงสร้าง
- 3 ด้านการใช้งาน
- 4 ด้านการบำรุงรักษา

1. วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

แบบประเมินชุดนี้สร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือประกอบในการวิจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิมีความเหมาะสมในด้านต่างๆ เพียงใด

2 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบ

เทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 4 ด้าน กรุณาเขียนเครื่องหมาย X ลงในช่องมาตราส่วนการประเมินค่า 5 ระดับตามความคิดเห็นของท่านหลังจากทดสอบอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ได้มีคะแนนกำหนดไว้ดังนี้

1. ระดับที่ 5 หมายถึง ผลประเมินระดับดีมาก
2. ระดับที่ 4 หมายถึง ผลประเมินระดับดี
3. ระดับที่ 3 หมายถึง ผลประเมินระดับปานกลาง
4. ระดับที่ 2 หมายถึง ผลประเมินระดับน้อย
5. ระดับที่ 1 หมายถึง ผลประเมินระดับน้อยมาก

ตาราง 19 แบบตรวจประเมินความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญการพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

ข้อที่	รายละเอียดการประเมิน	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยมาก
	ด้านความปลอดภัย					
1	มีระบบป้องกันถ้าเกิดระบบไฟฟ้าผิดปกติ					
2	มีระบบป้องกันอันตรายจากการใช้ไฟฟ้า					
3	มีการป้องกันอันตรายจากการสัมผัส					
	ด้านโครงสร้าง					
4	สามารถถอดและแยกประกอบอุปกรณ์ของเครื่องได้					
5	ความแข็งแรงของโครงสร้าง					
6	การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม					
7	เครื่องมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสม					
8	มีรูปทรงสวยงาม					
	ด้านการใช้งาน					
9	ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องเหมาะสม					
10	ใช้เวลาในการตรวจสอบเหมาะสม					
11	ความสะดวกในการใช้งานของเครื่อง					
12	ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายของเครื่อง					
13	สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเป็น อุตสาหกรรมได้					
	ด้านบำรุงรักษา					
14	เป็นอุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก					
15	การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย					
16	ความสะดวกในการถอดแยกชิ้นส่วนอุปกรณ์					
17	มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ น้อย					

4. ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

2.15 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำแบบการประเมินผลการหาประสิทธิภาพมาสรุปผลและการหาลักษณะทางกายภาพ

4 ด้าน จากการทดสอบผู้เชี่ยวชาญ 5 คน มาคำนวณด้วยสถิติ ดังนี้
การหาค่าเฉลี่ยของเลขคณิต

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของเลขคณิต $\sum x$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

N คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$SD = \sqrt{\frac{N\sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N-1)}}$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

X คือ ข้อมูลแต่ละจำนวน

N คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง

กำหนดเกณฑ์การแปลความลักษณะทางกายภาพดังต่อไปนี้

- | | |
|-----------------|--------------------------------|
| 1. ระดับดีมาก | คะแนนเฉลี่ย 4.5-5.00 คะแนน |
| 2. ระดับดี | คะแนนเฉลี่ย 3.5-4.49 คะแนน |
| 3. ระดับปานกลาง | คะแนนเฉลี่ย 2.5-3.49 คะแนน |
| 4. ระดับน้อย | คะแนนเฉลี่ย 1.50-2.49 คะแนน |
| 5. ระดับน้อยมาก | คะแนนเฉลี่ย ต่ำกว่า 1.49 คะแนน |

กำหนดเกณฑ์ในการแปลความด้านการหาประสิทธิภาพ ดังนี้

สภาวะของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมี ค่าความแปรปรวนไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$
แปลความว่าผ่านเกณฑ์

การนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลจัดทำเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. เสนอเป็นลักษณะการบรรยายประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว โดยแปลความหมายจากตาราง หาประสิทธิภาพซึ่งประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน
2. เสนอเป็นลักษณะการบรรยายเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพ 4 ด้าน ด้านความปลอดภัย ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งาน และด้านการบำรุงรักษาโดยการแปลความจากตารางข้อมูลที่ได้จากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ
3. ส่วนข้อมูลจากคำถามปลายเปิดแสดงความคิดเห็นอิสระ ผู้วิจัยนำคำตอบและข้อเสนอแนะมารวบรวมเรียงลำดับเสนอเป็นข้อ ๆ จากข้อที่มีความถี่ของผู้ตอบมากที่สุดไปจนถึงน้อยที่สุดตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ ซึ่งมีรายละเอียด ต่างๆที่ใช้ในการพัฒนาออกแบบอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อไว้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิโดยได้ออกแบบวงจรและกำหนดวัสดุเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างตามรายละเอียดที่ได้ศึกษาค้นคว้าไว้ และกำหนดระยะเวลาในการพัฒนาทดลองปรับปรุงและแก้ไขการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ซึ่งผลการพัฒนาสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เพื่อใช้ในการสอบเทียบ มีดังนี้

1.พัฒนา ออกแบบระบบการไหลเวียนของของเหลว การควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบแบบสัดส่วนและการคายความร้อนของขดลวดขนาดเล็กในอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ซึ่งมีผลทำให้ความแปรปรวนในของเหลวอ่างมีค่าไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ เป็นไปตามความมุ่งหมายของการวิจัย

2.ทำการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวของยุโรป(European Co-operation for Accreditation Guidelines on the Calibration of Temperature Block Calibrators, EA-10/13,) ได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อย่างสม่ำเสมอเร็วกว่าอ่างขนาดใหญ่ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของงานวิจัย

3 ผลการพัฒนอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวได้อ่างที่มีโครงสร้างภายนอกขนาด 35x35x35 เซนติเมตร(กว้าง x ยาว x สูง)และขนาดภายในมีความจุ1.2 ลิตร (ดูจากภาคผนวก ง)โดยส่วนประกอบดังนี้

3.1 ตัวอ่างมีการพัฒนาจากถังสี่เหลี่ยมมาเป็นท่อยึดด้วยและมียระบบป้องกันของเหลวในตัวท่อนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง250 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ความจุ1.2 ลิตรทำจากสเตสเลสทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้วัสดุและลดการใช้ของเหลว

3.2 มอเตอร์ไฟฟ้าพัฒนามาจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 200 โวลต์ 3 เฟส 40วัตต์ ความเร็วรอบ 1200/นาที มีระบบการระบายความร้อนในตัวมอเตอร์ไฟฟ้าเองเพราะความร้อนสูงเมื่อใช้ทำงานที่ อุณหภูมิ 200°C

3.3 ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตรทำจากสเตสเลสหนา 1.5มิลลิเมตรมี 3ใบพัดทำมุมเอียง 30 องศาทำหน้าที่กวนของเหลว

3.4 ขดลวดให้ความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรทำจากโลหะผสมสามารถทนความร้อนได้สูง ขนาดกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์

3.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิได้พัฒนามาจากเครื่องควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินของผู้เชี่ยวชาญมี 4 ด้านดังนี้

ด้านความปลอดภัย ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งานและ ด้านการบำรุงรักษาของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวผลปรากฏว่าอยู่ในเกณฑ์ดี ทั้ง 4 ด้าน

4 ผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ใน

งานสอบเทียบอุณหภูมิ

การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล การทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เพื่อใช้ในการงานสอบเทียบ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยเครื่องมือที่หน่วยงานของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นหน่วยงานที่ผู้วิจัยได้ทำงานอยู่

เครื่องมือที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิ เพื่อใช้ในการสอบเทียบ นั้นได้ทำการสอบเทียบมาแล้ว จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ตามข้อกำหนดของมาตรการทดสอบ EA10/13 แล้วนำผลที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลและนำเสนอ ดังนี้

4.1 เปิดเครื่องที่ อุณหภูมิ 50 °C 100°C 150°C และ 200 °C เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมง นำตัวมาตรฐาน 2 ตัวมาวางตามรูป 55 และ ดำเนินการบันทึกผลบันทึกผล

4.2 ผลการทดลองอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เพื่อใช้ในการงานสอบเทียบอุณหภูมิโดยการตรวจสอบหาความแตกต่างของอุณหภูมิตามแนวนอน

ตาราง 20 แสดงผลการทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอนที่ 50°C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
13/4/2004 16:42	1	50.170	50.16	2
13/4/2004 16:43	2	50.170	50.155	2
13/4/2004 16:44	3	50.175	50.16	2
13/4/2004 16:45	4	50.180	50.165	2
13/4/2004 16:46	5	50.170	50.17	2
13/4/2004 16:47	6	50.155	50.145	2
13/4/2004 16:48	7	50.175	50.165	2
13/4/2004 16:49	8	50.160	50.15	2
13/4/2004 16:50	9	50.170	50.155	2
13/4/2004 16:51	10	50.165	50.16	2
13/4/2004 16:52	11	50.165	50.165	2
13/4/2004 16:53	12	50.170	50.17	2
13/4/2004 16:54	13	50.170	50.17	2
13/4/2004 16:55	14	50.180	50.17	2

ตาราง 20(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
13/4/2004 16:56	15	50.170	50.16	2
13/4/2004 16:57	15	50.175	50.165	2
13/4/2004 16:58	17	50.175	50.175	2
13/4/2004 16:59	18	50.175	50.16	2
13/4/2004 17:00	19	50.175	50.165	2
13/4/2004 17:01	20	50.170	50.16	2
13/4/2004 17:02	21	50.180	50.17	2
13/4/2004 17:03	22	50.185	50.18	2
13/4/2004 17:04	23	50.185	50.18	2
13/4/2004 17:05	24	50.160	50.155	2
13/4/2004 17:06	25	50.155	50.15	2
13/4/2004 17:07	26	50.165	50.155	2
13/4/2004 17:08	27	50.165	50.16	2
13/4/2004 17:09	28	50.160	50.16	2
13/4/2004 17:10	29	50.165	50.155	2
13/4/2004 17:11	30	50.155	50.155	2
ค่าเฉลี่ย		50.170	50.162	

ตาราง 21 สรุปผลอุณหภูมิในแนวนอนที่ 50°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แกนนอน
30 นาที	30 ครั้ง	50.170	50.162	-0.004

จากตาราง 21 ได้ทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว ซึ่งวางห่างกัน 2 cm ทำการเก็บข้อมูล 30 ครั้งอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาที เป็นเวลา 30 นาที และคำนวณหา

ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่1 มีค่าเท่ากับ 50.170 °C อุณหภูมิตำแหน่งที่2 มีค่าเท่ากับ 50.162 °C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.004 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 22 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอนที่ 100 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
9/4/2004 19:20	1	99.655	99.645	2
9/4/2004 19:21	2	99.655	99.645	2
9/4/2004 19:22	3	99.645	99.645	2
9/4/2004 19:23	4	99.640	99.625	2
9/4/2004 19:24	5	99.640	99.620	2
9/4/2004 19:25	6	99.650	99.630	2
9/4/2004 19:26	7	99.645	99.620	2
9/4/2004 19:27	8	99.635	99.610	2
9/4/2004 19:28	9	99.625	99.615	2
9/4/2004 19:29	10	99.645	99.615	2
9/4/2004 19:30	11	99.675	99.630	2
9/4/2004 19:31	12	99.680	99.635	2
9/4/2004 19:32	13	99.675	99.635	2
9/4/2004 19:33	14	99.670	99.625	2
9/4/2004 19:34	15	99.675	99.610	2
9/4/2004 19:35	16	99.685	99.630	2
9/4/2004 19:36	17	99.660	99.620	2
9/4/2004 19:37	18	99.650	99.615	2
9/4/2004 19:38	19	99.650	99.605	2
9/4/2004 19:39	20	99.660	99.615	2
9/4/2004 19:40	21	99.675	99.635	2
9/4/2004 19:41	22	99.675	99.630	2
9/4/2004 19:42	23	99.650	99.605	2

ตาราง 22(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
9/4/2004 19:43	24	99.655	99.605	2
9/4/2004 19:44	25	99.680	99.640	2
9/4/2004 19:45	26	99.69	99.640	2
9/4/2004 19:46	27	99.675	99.640	2
9/4/2004 19:47	28	99.650	99.620	2
9/4/2004 19:48	29	99.655	99.620	2
9/4/2004 19:49	30	99.665	99.630	2
ค่าเฉลี่ย		99.660	99.625	

ตาราง 23 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 100°C

เวลา	จำนวนครั้งการ วัด	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แกนนอน
30 นาที	30 ครั้ง	99.660	99.625	0.017

จากตาราง 23 ได้ทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว ซึ่งวางห่างกัน 2 cm ทำการเก็บข้อมูล 30 ครั้งอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาที เป็นเวลา 30 นาที และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 99.660 °C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 99.625°C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.006 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 24 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน ที่ 150 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
10/4/2004 18:30	1	149.135	149.175	2
10/4/2004 18:31	2	149.130	149.170	2
10/4/2004 18:32	3	149.130	149.175	2
10/4/2004 18:33	4	149.145	149.190	2
10/4/2004 18:34	5	149.150	149.190	2
10/4/2004 18:35	6	149.145	149.195	2
10/4/2004 18:36	7	149.105	149.175	2
10/4/2004 18:37	8	149.125	149.180	2
10/4/2004 18:38	9	149.120	149.170	2
10/4/2004 18:39	10	149.125	149.155	2
10/4/2004 18:40	11	149.095	149.165	2
10/4/2004 18:41	12	149.095	149.135	2
10/4/2004 18:42	13	149.105	149.125	2
10/4/2004 18:43	14	149.105	149.125	2
10/4/2004 18:44	15	149.115	149.165	2
10/4/2004 18:45	16	149.145	149.170	2
10/4/2004 18:46	17	149.125	149.180	2
10/4/2004 18:47	18	149.140	149.185	2
10/4/2004 18:48	19	149.125	149.180	2
10/4/2004 18:49	20	149.125	149.165	2
10/4/2004 18:50	21	149.125	149.175	2
10/4/2004 18:51	22	149.135	149.170	2
10/4/2004 18:52	23	149.130	149.160	2
10/4/2004 18:53	24	149.125	149.160	2
10/4/2004 18:54	25	149.120	149.170	2
10/4/2004 18:55	26	149.135	149.170	2
10/4/2004 18:56	27	149.130	149.185	2
10/4/2004 18:57	28	149.150	149.205	2

ตาราง 24(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
10/4/2004 18:58	29	149.145	149.185	2
10/4/2004 18:59	30	149.125	149.180	2
ค่าเฉลี่ย		149.127	149.171	

ตาราง 25 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 150°C

เวลา	จำนวนครั้ง การวัด	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แกนนอน
30 นาที	30 ครั้ง	149.127	149.171	-0.022

จากตาราง 25 ได้ทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว ซึ่งวางห่างกัน 2 cm ทำการเก็บข้อมูล 30 ครั้งอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาที เป็นเวลา 30 นาที และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 149.127 °C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 149.171 °C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.022 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 26 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน ที่ 200 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
11/4/2004 8:51	1	199.115	199.170	2
11/4/2004 8:52	2	199.135	199.210	2
11/4/2004 8:53	3	199.135	199.170	2
11/4/2004 8:54	4	199.130	199.185	2
11/4/2004 8:55	5	199.160	199.175	2
11/4/2004 8:56	6	199.105	199.190	2
11/4/2004 8:57	7	199.110	199.160	2
11/4/2004 8:58	8	199.130	199.120	2
11/4/2004 8:59	9	199.125	199.170	2
11/4/2004 9:00	10	199.110	199.185	2
11/4/2004 9:01	11	199.130	199.180	2
11/4/2004 9:02	12	199.085	199.150	2
11/4/2004 9:03	13	199.105	199.155	2
11/4/2004 9:04	14	199.135	199.205	2
11/4/2004 9:05	15	199.145	199.195	2
11/4/2004 9:06	16	199.150	199.185	2
11/4/2004 9:07	17	199.100	199.160	2
11/4/2004 9:08	18	199.140	199.175	2
11/4/2004 9:09	19	199.145	199.190	2
11/4/2004 9:10	20	199.115	199.195	2
11/4/2004 9:11	21	199.105	199.205	2
11/4/2004 9:12	22	199.115	199.195	2
11/4/2004 9:13	23	199.155	199.130	2
11/4/2004 9:14	24	199.090	199.185	2
11/4/2004 9:15	25	199.085	199.130	2
11/4/2004 9:16	26	199.085	199.160	2

ตาราง 26(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
11/4/2004 9:17	27	199.125	199.155	2
11/4/2004 9:18	28	199.125	199.160	2
11/4/2004 9:19	29	199.155	199.165	2
11/4/2004 9:20	30	199.175	199.210	2
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ		199.124	199.174	

ตาราง 27 สรุปผล อุณหภูมิในแนวนอนที่ 200 °C

เวลา	จำนวนครั้งการ วัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-02(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แกนนอน
30 นาที	30 ครั้ง	199.04	198.95	0.045

จากตาราง 26 ได้ทำการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่ง โดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว ซึ่งวางห่างกัน 2 cm ทำการเก็บข้อมูล 30 ครั้งอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาที เป็นเวลา 30 นาที และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 199.124 °C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 199.174 °C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีความแปรปรวนเท่ากับ 0.045 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

4.3 เปิดเครื่องที่ อุณหภูมิ 50 °C 100°C 150°C และ 200 °C เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมงนำตัวมาตรฐาน 2 ตัวมาวางระยะห่างของ STD 0 1&02 เป็น 10 (CM) ในแนวตั้งตามรูป 56 และ ดำเนินการบันทึกผลบันทึกผล

4.4 ผลการทดลองอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เพื่อใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิ โดยการตรวจสอบหาความแตกต่างของอุณหภูมิตามแนวตั้ง

ตาราง 28 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง ที่ 50 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
13/4/2004 15:07	1	50.17	50.2	10
13/4/2004 15:08	2	50.19	50.22	10
13/4/2004 15:09	3	50.19	50.22	10
13/4/2004 15:10	4	50.18	50.23	10
13/4/2004 15:11	5	50.16	50.22	10
13/4/2004 15:12	6	50.16	50.22	10
13/4/2004 15:13	7	50.19	50.22	10
13/4/2004 15:14	8	50.21	50.24	10
13/4/2004 15:15	9	50.19	50.23	10
13/4/2004 15:16	10	50.18	50.2	10
13/4/2004 15:17	11	50.16	50.21	10
13/4/2004 15:18	12	50.17	50.21	10
13/4/2004 15:19	13	50.17	50.23	10
13/4/2004 15:20	14	50.19	50.23	10
13/4/2004 15:21	15	50.17	50.2	10
13/4/2004 15:22	16	50.17	50.21	10
13/4/2004 15:23	17	50.18	50.23	10
13/4/2004 15:24	18	50.18	50.22	10
13/4/2004 15:25	19	50.17	50.23	10
13/4/2004 15:26	20	50.17	50.23	10
13/4/2004 15:27	21	50.16	50.21	10
13/4/2004 15:28	22	50.18	50.22	10
13/4/2004 15:29	23	50.19	50.23	10
13/4/2004 15:30	24	50.21	50.21	10
13/4/2004 15:31	25	50.2	50.21	10
13/4/2004 15:32	26	50.2	50.2	10

ตาราง28(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
13/4/2004 15:33	27	50.2	50.23	10
13/4/2004 15:34	28	50.2	50.22	10
13/4/2004 15:35	29	50.2	50.2	10
13/4/2004 15:36	30	50.19	50.2	10
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ		50.183	50.218	

ตาราง 29 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 50°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แนวตั้ง
30 นาที	30 ครั้ง	50.183	50.218	0.018

จากตาราง 29 ใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน2 ตัว บันทึกอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ1นาทีเป็นเวลา30นาทีและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่1มีค่าเท่ากับ 50.183 °C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 50.218°C อุณหภูมิทั้ง2ตำแหน่งมีความแปรปรวนเท่ากับ 0.018 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 30 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวดิ่ง ที่ 100 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
9/4/2004 19:20	1	99.53	99.56	10
9/4/2004 19:21	2	99.52	99.57	10
9/4/2004 19:22	3	99.51	99.58	10
9/4/2004 19:23	4	99.52	99.55	10
9/4/2004 19:24	5	99.52	99.54	10
9/4/2004 19:25	6	99.52	99.55	10
9/4/2004 19:26	7	99.49	99.56	10
9/4/2004 19:27	8	99.48	99.56	10
9/4/2004 19:28	9	99.48	99.56	10
9/4/2004 19:29	10	99.5	99.55	10
9/4/2004 19:30	11	99.53	99.55	10
9/4/2004 19:31	12	99.51	99.57	10
9/4/2004 19:32	13	99.51	99.58	10
9/4/2004 19:33	14	99.51	99.56	10
9/4/2004 19:34	15	99.52	99.53	10
9/4/2004 19:35	16	99.52	99.56	10
9/4/2004 19:36	17	99.48	99.58	10
9/4/2004 19:37	18	99.48	99.57	10
9/4/2004 19:38	19	99.49	99.54	10
9/4/2004 19:39	20	99.51	99.54	10
9/4/2004 19:40	21	99.54	99.54	10
9/4/2004 19:41	22	99.51	99.57	10
9/4/2004 19:42	23	99.49	99.54	10
9/4/2004 19:43	24	99.5	99.52	10
9/4/2004 19:44	25	99.55	99.54	10

ตาราง30(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
9/4/2004 19:45	26	99.54	99.56	10
9/4/2004 19:46	27	99.52	99.58	10
9/4/2004 19:47	28	99.5	99.56	10
9/4/2004 19:48	29	99.51	99.55	10
9/4/2004 19:49	30	99.52	99.55	10
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ		99.510	99.556	

ตาราง 31 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 100°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แนวตั้ง
30 นาที	30 ครั้ง	99.510	99.556	0.017

จากตาราง 30 เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว บันทึกอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาทีเป็นเวลา 30 นาทีและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 99.510°C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 99.556°C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.023 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 32 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง ที่ 150 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
9/4/2004 18:30	1	149.135	149.175	10
10/4/2004 18:31	2	149.130	149.170	10
10/4/2004 18:32	3	149.130	149.175	10
10/4/2004 18:33	4	149.145	149.190	10
10/4/2004 18:34	5	149.150	149.190	10
10/4/2004 18:35	6	149.145	149.195	10
10/4/2004 18:36	7	149.105	149.175	10
10/4/2004 18:37	8	149.125	149.180	10
10/4/2004 18:38	9	149.120	149.170	10
10/4/2004 18:39	10	149.125	149.155	10
10/4/2004 18:40	11	149.095	149.165	10
10/4/2004 18:41	12	149.095	149.135	10
10/4/2004 18:42	13	149.105	149.125	10
10/4/2004 18:43	14	149.105	149.125	10
10/4/2004 18:44	15	149.115	149.165	10
10/4/2004 18:45	16	149.145	149.170	10
10/4/2004 18:46	17	149.125	149.180	10
10/4/2004 18:47	18	149.140	149.185	10
10/4/2004 18:48	19	149.125	149.180	10
10/4/2004 18:49	20	149.125	149.165	10
10/4/2004 18:50	21	149.125	149.175	10
10/4/2004 18:51	22	149.135	149.170	10
10/4/2004 18:52	23	149.130	149.160	10
10/4/2004 18:53	24	149.125	149.160	10
10/4/2004 18:54	25	149.120	149.170	10

ตาราง(ต่อ) 32

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
10/4/2004 18:55	26	149.135	149.170	10
10/4/2004 18:56	27	149.130	149.185	10
10/4/2004 18:57	28	149.150	149.205	10
10/4/2004 18:58	29	149.145	149.185	10
10/4/2004 18:59	30	149.125	149.180	10
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ		149.127	149.171	

ตาราง 33 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 150°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แนวตั้ง
30 นาที	30 ครั้ง	149.127	149.171	0.039

จากตาราง 33 เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว บันทึกอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาทีเป็นเวลา 30 นาทีและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 149.127°C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 149.171 °C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.039 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 34 แสดงผลทดสอบความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง ที่ 200 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่าง ของ STD01&02(cm)
11/4/2004 8:51	1	199.115	199.170	10
11/4/2004 8:52	2	199.135	199.210	10
11/4/2004 8:53	3	199.135	199.170	10
11/4/2004 8:54	4	199.130	199.185	10
11/4/2004 8:55	5	199.160	199.175	10
11/4/2004 8:56	6	199.105	199.190	10
11/4/2004 8:57	7	199.110	199.160	10
11/4/2004 8:58	8	199.130	199.120	10
11/4/2004 8:59	9	199.125	199.170	10
11/4/2004 9:00	10	199.110	199.185	10
11/4/2004 9:01	11	199.130	199.180	10
11/4/2004 9:02	12	199.085	199.150	10
11/4/2004 9:03	13	199.105	199.155	10
11/4/2004 9:04	14	199.135	199.205	10
11/4/2004 9:05	15	199.145	199.195	10
11/4/2004 9:06	16	199.150	199.185	10
11/4/2004 9:07	17	199.100	199.160	10
11/4/2004 9:08	18	199.140	199.175	10
11/4/2004 9:09	19	199.145	199.190	10
11/4/2004 9:10	20	199.115	199.195	10
11/4/2004 9:11	21	199.105	199.205	10
11/4/2004 9:12	22	199.115	199.195	10
11/4/2004 9:13	23	199.155	199.130	10
11/4/2004 9:14	24	199.090	199.185	10
11/4/2004 9:15	25	199.085	199.130	10
11/4/2004 9:16	26	199.085	199.160	10
11/4/2004 9:17	27	199.125	199.155	10
11/4/2004 9:18	28	199.125	199.160	10

ตาราง 34(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ระยะห่างจุด ของ STD 01&02(cm)
11/4/2004 9:19	29	199.155	199.165	10
11/4/2004 9:20	30	199.175	199.210	10
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ		199.124	199.174	

ตาราง 35 สรุปผล อุณหภูมิในแนวตั้งที่ 200°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิเฉลี่ยของ STD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) แนวตั้ง
30 นาที	30 ครั้ง	199.124	199.174	0.025

จากตาราง 35 เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิพร้อมตัวมาตรฐาน 2 ตัว บันทึกอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ 1 นาทีเป็นเวลา 30 นาทีและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 149.124°C อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 149.174 °C อุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.025 °C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ (ค่าเฉลี่ยสูงสุด-ค่าเฉลี่ยต่ำสุด)หารด้วย 2 ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนในแนวนอนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

4.5 เปิดเครื่องที่ อุณหภูมิ 50 °C 100°C 150°C และ 200 °C เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมงนำตัวมาตรฐาน 1 ตัวมาวางกึ่งกลางอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ตามรูป 57 และ ดำเนินการบันทึกผลบันทึกผล

4.6 ผลการทดลองอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เพื่อใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิ โดยการตรวจสอบหาค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา

ตาราง 36 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 50°C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C)
13/4/2004 16:42	1	50.170
13/4/2004 16:43	2	50.170
13/4/2004 16:44	3	50.175
13/4/2004 16:45	4	50.180
13/4/2004 16:46	5	50.170
13/4/2004 16:47	6	50.155
13/4/2004 16:48	7	50.175
13/4/2004 16:49	8	50.160
13/4/2004 16:50	9	50.170
13/4/2004 16:51	10	50.165
13/4/2004 16:52	11	50.165
13/4/2004 16:53	12	50.170
13/4/2004 16:54	13	50.170
13/4/2004 16:55	14	50.180
13/4/2004 16:56	15	50.170
13/4/2004 16:57	16	50.175
13/4/2004 16:58	17	50.175
13/4/2004 16:59	18	50.175
13/4/2004 17:00	19	50.175
13/4/2004 17:01	20	50.170
13/4/2004 17:02	21	50.180
13/4/2004 17:03	22	50.185
13/4/2004 17:04	23	50.185
13/4/2004 17:05	24	50.160
13/4/2004 17:06	25	50.155
13/4/2004 17:07	26	50.165
13/4/2004 17:08	27	50.165
13/4/2004 17:09	28	50.160
13/4/2004 17:10	29	50.165
13/4/2004 17:11	30	50.155

ตาราง 37 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 50°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ MAX ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิ MIN ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่1	ความแปรปรวน (+/-°C) ตำแหน่งที่ 01 °C
30 นาที	30 ครั้ง	50.185	50.155	0.015

จากตาราง 37 เก็บข้อมูลโดยการ Set อุณหภูมิที่ 50°C และเก็บอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ1นาที่เป็นเวลา30นาทีและคำนวณหาค่าอุณหภูมิตำแหน่งที่1มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 50.185 °C ค่าต่ำสุดเท่ากับ 50.155°Cผลต่างของ อุณหภูมิทั้ง2ค่า มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.015°C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ(ค่าสูงสุด-ค่าต่ำสุด)หาร2ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิในเวลา30นาที อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 38 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา 100 °C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C)
9/4/2004 19:20	1	99.655
9/4/2004 19:21	2	99.655
9/4/2004 19:22	3	99.645
9/4/2004 19:23	4	99.640
9/4/2004 19:24	5	99.640
9/4/2004 19:25	6	99.650
9/4/2004 19:26	7	99.645
9/4/2004 19:27	8	99.635
9/4/2004 19:28	9	99.625
9/4/2004 19:29	10	99.645
9/4/2004 19:30	11	99.675
9/4/2004 19:31	12	99.680
9/4/2004 19:32	13	99.675

ตาราง 38 (ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C)
9/4/2004 19:33	14	99.670
9/4/2004 19:34	15	99.675
9/4/2004 19:35	16	99.685
9/4/2004 19:36	17	99.660
9/4/2004 19:37	18	99.650
9/4/2004 19:38	19	99.650
9/4/2004 19:39	20	99.660
9/4/2004 19:40	21	99.675
9/4/2004 19:41	22	99.675
9/4/2004 19:42	23	99.650
9/4/2004 19:43	24	99.655
9/4/2004 19:44	25	99.680
9/4/2004 19:45	26	99.690
9/4/2004 19:46	27	99.675
9/4/2004 19:47	28	99.650
9/4/2004 19:48	29	99.655
9/4/2004 19:49	30	99.665

ตาราง 39 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 100°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ MAX ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิ MIN ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่1	ความแปรปรวน (+/-°C) ตำแหน่งที่ 01 °C
30 นาที	30 ครั้ง	99.690	99.625	0.032

จากตาราง 39 เก็บข้อมูลโดยการ Set อุณหภูมิที่ 100°C และเก็บอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ1นาทืเป็นเวลา30นาทืและคำนวณหาค่าอุณหภูมิตำแหน่งที่1มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 99.690°C ค่าต่ำสุดเท่ากับ 99.625 °Cผลต่างของ อุณหภูมิทั้ง2ค่า มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.032°C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ(ค่าสูงสุด-ค่าต่ำสุด)หาร2ซึ่ง

หมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิในเวลา 30 นาที อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 40 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 150°C

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C)
10/4/2004 18:30	1	149.135
10/4/2004 18:31	2	149.130
10/4/2004 18:32	3	149.130
10/4/2004 18:33	4	149.145
10/4/2004 18:34	5	149.150
10/4/2004 18:35	6	149.145
10/4/2004 18:36	7	149.105
10/4/2004 18:37	8	149.125
10/4/2004 18:38	9	149.120
10/4/2004 18:39	10	149.125
10/4/2004 18:40	11	149.095
10/4/2004 18:41	12	149.095
10/4/2004 18:42	13	149.105
10/4/2004 18:43	14	149.105
10/4/2004 18:44	15	149.115
10/4/2004 18:45	16	149.145
10/4/2004 18:46	17	149.125
10/4/2004 18:47	18	149.140
10/4/2004 18:48	19	149.125
10/4/2004 18:49	20	149.125
10/4/2004 18:50	21	149.125
10/4/2004 18:51	22	149.135
10/4/2004 18:52	23	149.130
10/4/2004 18:53	24	149.125
10/4/2004 18:54	25	149.120

ตาราง 40(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C)
10/4/2004 18:55	26	149.135
10/4/2004 18:56	27	149.130
10/4/2004 18:57	28	149.150
10/4/2004 18:58	29	149.145
10/4/2004 18:59	30	149.125

ตาราง 41 สรุปผล การทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 150°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ MAX ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิ MIN ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) ตำแหน่งที่ 01 °C
30 นาที	30 ครั้ง	149.150	149.095	0.028

จากตาราง 41 เก็บข้อมูลโดยการ Set อุณหภูมิที่ 150°C และเก็บอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ1นาทีเป็นเวลา30นาทีและคำนวณหาค่าอุณหภูมิตำแหน่งที่1มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 149.150°C ค่าต่ำสุดเท่ากับ 149.095°C ผลต่างของ อุณหภูมิทั้ง2ค่า มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.028°C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ(ค่าสูงสุด-ค่าต่ำสุด)หาร 2ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิในเวลา30นาที อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 42 แสดงผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่200 °C

เวลา	ลำดับครั้งการวัด	อุณหภูมิของSTD-01(°C)
11/4/2004 8:51	1	199.115
11/4/2004 8:52	2	199.135
11/4/2004 8:53	3	199.135
11/4/2004 8:54	4	199.130

ตาราง 42(ต่อ)

เวลา	ลำดับครั้ง การวัด	อุณหภูมิของ STD-01(°C)
11/4/2004 8:55	5	199.160
11/4/2004 8:56	6	199.105
11/4/2004 8:57	7	199.110
11/4/2004 8:58	8	199.130
11/4/2004 8:59	9	199.125
11/4/2004 9:00	10	199.110
11/4/2004 9:01	11	199.130
11/4/2004 9:02	12	199.085
11/4/2004 9:03	13	199.105
11/4/2004 9:04	14	199.135
11/4/2004 9:05	15	199.145
11/4/2004 9:06	16	199.150
11/4/2004 9:07	17	199.100
11/4/2004 9:08	18	199.140
11/4/2004 9:09	19	199.145
11/4/2004 9:10	20	199.115
11/4/2004 9:11	21	199.105
11/4/2004 9:12	22	199.115
11/4/2004 9:13	23	199.155
11/4/2004 9:14	24	199.090
11/4/2004 9:15	25	199.085
11/4/2004 9:16	26	199.085
11/4/2004 9:17	27	199.125
11/4/2004 9:18	28	199.125
11/4/2004 9:19	29	199.155
11/4/2004 9:20	30	199.175

ตาราง 43 สรุปผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลาที่ 200°C

เวลา	จำนวนครั้งการวัด	อุณหภูมิ MAX ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่1	อุณหภูมิ MIN ของSTD-01(°C) ตำแหน่งที่2	ความแปรปรวน (+/-°C) ตำแหน่งที่ 01 °C
30 นาที	30 ครั้ง	199.175	199.085	0.045

จากตาราง 42 เก็บข้อมูลโดยการ Set อุณหภูมิที่ 200°C และเก็บอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ครั้งละ1นาที่เป็นเวลา30นาทีและคำนวณหาค่าอุณหภูมิตำแหน่งที่1มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 199.175°C ค่าต่ำสุดเท่ากับ 199.085°C ผลต่างของ อุณหภูมิทั้ง2ค่า มีความแปรปรวนเท่ากับ 0.045°C จากสูตรความแปรปรวนเท่ากับ(ค่าสูงสุด-ค่าต่ำสุด)หาร 2ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของเหลวในอ่างมีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิในเวลา30นาที อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

ตาราง 44 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว ที่อุณหภูมิ50°C ถึง 200°C

อุณหภูมิที่ ทดสอบ(°C)	รายการที่ทดสอบ	ความ แปรปรวน ± (°C)	แปลผล
50	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน	0.004	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
50	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง	0.018	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
50	ผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา	0.015	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	เฉลี่ย	0.012	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
100	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน	0.017	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
100	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง	0.023	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
100	ผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา	0.032	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	เฉลี่ย	0.024	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
150	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน	0.022	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
150	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง	0.039	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
150	ผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา	0.028	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	เฉลี่ย	0.029	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
200	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวนอน	0.025	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
200	ความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิในแนวตั้ง	0.045	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
200	ผลการทดสอบค่าคงที่ของอุณหภูมิกับเวลา	0.045	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
	เฉลี่ย	0.038	อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

จากตาราง 44 สรุปว่าประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลวในรายการความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุทกภัยในแนวนอนมีค่าความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ดีที่ต่ำกว่าอีก 2 รายการ ได้แก่ แนวตั้ง และ รายการทดสอบค่าคงที่ของอุทกภัยกับเวลา และ อุทกภัยมีผลกับค่าความแปรปรวนคืออุทกภัยมีค่าความแปรปรวนน้อยกว่าอุทกภัยสูงแต่อย่างไรก็ตามค่าความแปรปรวนทั้ง 3 รายการรวมแล้วยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินของผู้เชี่ยวชาญมี 4 ด้านดังนี้

ตาราง 45 ประเมินความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญการพัฒนาอ่างควบคุมอุทกภัยแบบบรรจุของเหลว (N=5)

ข้อที่	รายละเอียดการประเมิน	$\bar{X}$	SD	แปลผลรวม
ด้านความปลอดภัย				
1	มีระบบป้องกันถ้าเกิดระบบไฟฟ้าผิดปกติ	3.40	0.89	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
2	มีระบบป้องกันอันตรายจากการใช้ไฟฟ้า	3.60	0.55	อยู่ในเกณฑ์ดี
3	มีการป้องกันอันตรายจากการสัมผัส	3.40	0.55	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
เฉลี่ย		3.47	0.66	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
ด้านโครงสร้าง				
4	สามารถถอดและแยกประกอบอุปกรณ์ของเครื่องได้	3.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
5	ความแข็งแรงของโครงสร้าง	3.00	0.71	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
6	การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม	2.80	0.45	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
7	เครื่องมือขนาดกระทัดรัดเหมาะสม	3.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
8	มีรูปทรงสวยงาม	3.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
เฉลี่ย		3.08	0.50	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
ด้านการใช้งาน				
9	ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องเหมาะสม	4.00	0.00	อยู่ในเกณฑ์ดี
10	ใช้เวลาในการตรวจสอบเหมาะสม	3.80	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
11	ความสะดวกในการใช้งานของเครื่อง	3.80	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
12	ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายของเครื่อง	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
13	สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเป็น อุตสาหกรรมได้	4.40	0.55	อยู่ในเกณฑ์ดี
เฉลี่ย		4.04	0.38	อยู่ในเกณฑ์ดี

ตาราง(ต่อ) 45

	ด้านการบำรุงรักษา	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
14	เป็นอุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
15	การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
16	ความสะดวกในการถอดแยกชิ้นส่วนอุปกรณ์	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
17	มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ น้อย	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
	รวม	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี

ตาราง 46สรุปประเมินความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญการพัฒนางานอำนวยการควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวทางด้านกายภาพดังนี้

ข้อ	ด้านกายภาพ	$\bar{X}$	SD	แปลความ
1	ด้านความปลอดภัย	3.47	0.66	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
2	ด้านโครงสร้าง	3.08	0.50	อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง
2	ด้านการใช้งาน	4.40	0.55	อยู่ในเกณฑ์ดี
3	ด้านการบำรุงรักษา	4.20	0.45	อยู่ในเกณฑ์ดี
	รวม	3.78	0.54	อยู่ในเกณฑ์ดี

จากตาราง 46 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบประเมินของผู้เชี่ยวชาญมี 4 ด้านดังนี้

1 ด้านความปลอดภัยในการใช้งานของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวโดยมีระบบป้องกันความปลอดภัย โดยมีอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรโดยใช้ฟิวส์ อยู่ในเกณฑ์ดี ระดับคะแนนเฉลี่ย 3.47

2 ด้านโครงสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวอยู่ในเกณฑ์ดีโดยมีโครงสร้างแข็งแรงทนต่อการใช้งานและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ระดับคะแนนเฉลี่ย 3.08

3 ด้านการใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว โดยมีความสะดวก เช่น การปรับอุณหภูมิโดยการกดปุ่มและตัวเลขแสดงเป็นดิจิตอลสามารถมองเห็นได้ง่ายอยู่ในเกณฑ์ดี ระดับคะแนนเฉลี่ย 4.04

4 การบำรุงรักษาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวสามารถหาอุปกรณ์ได้ในตลาดทั่วไป และมีจุดบกพร่องน้อยมากอยู่ในเกณฑ์ดี ระดับคะแนนเฉลี่ย 4.20

สรุปได้ว่าลักษณะทางกายภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวในทั้ง 4 ด้าน อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัย

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

การพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

ความสำคัญของการวิจัย

1. สามารถนำไปใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามเกณฑ์มาตรฐานการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ
2. สามารถทดแทนการนำเข้าของเครื่องสร้างอุณหภูมิแบบมาตรฐานจากต่างประเทศ

สมมติฐานในการวิจัย

อย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐานการสอบเทียบเครื่องสร้างอุณหภูมิของยุโรป (EA-10/13) และมีลักษณะทางการภาพอยู่ในเกณฑ์ดี

การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยการพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบ ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. รับรู้ปัญหาของการใช้อย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบ

เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ซึ่งการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิได้นั้น ต้องอาศัยอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว เป็นตัวสร้างอุณหภูมิให้คงที่ โดยให้มีขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนที่ไปสอบเทียบที่โรงงานได้ และยังสามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูง ผู้วิจัยซึ่งมีแนวความคิดที่จะพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบอุณหภูมิ มาทดแทนของที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

2. ออกแบบวัสดุ อุปกรณ์ ของเครื่องมือต่าง ๆ ที่จะใช้ในการพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

2.1 ศึกษาค้นคว้าจากเอกสารตำรา คู่มือ และงานวิจัยเชิงทดลอง ที่เกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบและสร้างอย่างควบคุมอุณหภูมิ ของอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ และงานวิจัยเชิงทดลองทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

- 2.2 ศึกษาถึงอุปกรณ์ที่สร้างความร้อน เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบต่าง ๆ

- 2.3 ศึกษาวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้าง เช่น โลหะชนิดต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเป็นอย่างควบคุมแบบ

บรรจุของเหลว

3. พัฒนาออกแบบโครงสร้างและวงจรการทำงานที่ใช้ในการสร้างอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของ

เหลว

3.1 ออกแบบโครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของอ่างควบคุมอุณหภูมิให้ดีกว่า และประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งมีการพัฒนาระบบการทำงานของเครื่องให้สามารถทำงานได้รวดเร็วและคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

3.2 ออกแบบวงจรการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว พร้อมแบบวงจรแสดงผลการทำงานของเครื่อง

4. ให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินตรวจสอบแบบโครงสร้างและวงจรการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

กำหนดวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

5. กำหนดระยะเวลาและสถานที่ที่ใช้ในการพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

6. พัฒนาร่างอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

7. ทดสอบ ปรับปรุงและ แก้ไข การทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

9. ทดสอบหาประสิทธิภาพและประเมินลักษณะทางกายภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

10. การวิเคราะห์ข้อมูล

สรุปผลการวิจัย

1. การพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบอุณหภูมิ โดยการพัฒนาส่วนต่าง ๆ ดังนี้คือ โครงสร้างทำจาก สเตเลสและเหล็กซึ่งมีขนาด สูง 40 เซนติเมตร กว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตรและท่อรูปตัวยูมีปริมาตรความจุ 1.2 ลิตร พร้อมทั้งจับอุปกรณ์เพื่อทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ส่วนอุปกรณ์ทางไฟฟ้าประกอบดังนี้คือ มอเตอร์ 20 วัตต์พร้อมติดใบพัดกวนของเหลวให้ไหลเวียนในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ขดลวดความร้อนความร้อนขนาด 500 วัตต์, และเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบสัดส่วนความละเอียด 0.1 °C สามารถปรับได้อุณหภูมิ 50 °C ถึง 200 °C โดยมีค่าความแปรปรวนไม่เกินกว่า ± 0.05 °C ภายใน 30 นาที ที่ซึ่งประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องสร้างอุณหภูมิที่นำเข้าจากต่างประเทศโดยใช้มาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพของยุโรป(EA10/13)เป็นการเกณฑ์การเปรียบเทียบ

2. ผลจากการทดสอบทดสอบประสิทธิภาพอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว โดยใช้เครื่องมือวัดที่ได้รับการสอบเทียบสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติโดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางอุณหภูมิของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยจากผลการทดสอบประสิทธิภาพความสามารถในการสร้างอุณหภูมิสามารถสร้างอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 50 °C ถึง 200 °C และ ทำการทดสอบประสิทธิภาพความสามารถในการควบคุมความแปรปรวนของอุณหภูมิของของเหลวภายในอ่างจำนวน 3 รายการได้แก่ความแปรปรวนในแนวนอน แนวตั้ง และความแปรปรวนเนื่องจากเวลาเปลี่ยนไป 30 นาที จากผลการทดสอบอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวสามารถควบคุมความแปรปรวนของของเหลวทั้ง 3 รายการวัดได้ไม่เกิน ± 0.05 °C โดยใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที โดยมีผลนำผลที่ได้จากทดสอบมาคำนวณหาความแปรปรวนของของเหลวในอ่างควบคุมอุณหภูมิได้ดังนี้

ทดสอบค่าความแปรปรวนที่อุณหภูมิ ที่ 50 °C มีค่าความแปร ปรวน ± 0.012 °C, ที่ 100 °C มีค่าความแปรปรวน ± 0.024 °C, ที่ 150 °C มีค่าความแปรปรวน ± 0.029 °C, และ ที่ 200 °C มีค่าความแปรปรวน ± 0.038 °C

3. จากการประเมินผลของผู้เชี่ยวชาญ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ดังนี้

3.1 ด้านความปลอดภัย

3.1.1 มีระบบป้องกันถ้าเกิดระบบไฟฟ้าผิดปกติซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลางมีค่าเฉลี่ยที่ 3.40

3.1.2 มีระบบป้องกันอันตรายจากการใช้ไฟฟ้าซึ่งผลอยู่ในเกณฑ์ ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 3.60

3.1.3 มีการป้องกันอันตรายจากการสัมผัสซึ่งผลอยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลางมีค่าเฉลี่ยที่ 3.4

3.2 ด้านโครงสร้าง

3.2.1 สามารถถอดและแยกประกอบอุปกรณ์ของเครื่องได้ซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.2

3.2.2 ความแข็งแรงของโครงสร้างซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลางมีค่าเฉลี่ยที่ 3.0

3.2.3การจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้เหมาะสมซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 2.80

3.2.4 เครื่องมือมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสมซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ ระดับปานกลางมีค่าเฉลี่ยที่ 3.20

3.2.5 มีรูปทรงสวยงามซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ ระดับ ปานกลาง มีค่าเฉลี่ยที่ 3.2

3.3 ด้านการใช้งาน

3.3.1 ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องเหมาะสมซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.0

3.3.2 ใช้เวลาในการตรวจสอบเหมาะสมซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 3.80

3.3.3 ความสะดวกในการใช้งานของเครื่องซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 3.80

3.3.4 ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายของเครื่องซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดี มีค่าเฉลี่ยที่ 4.20

3.3.5 สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมได้ซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมีค่าเฉลี่ยที่ 4.4

3.4 ด้านการบำรุงรักษา

3.4.1 เป็นอุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่าย ราคาถูกซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมีค่าเฉลี่ยที่ 4.20

3.4.2 การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่ายซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมีค่าเฉลี่ยที่ 4.20

3.4.3 ความสะดวกในการถอดแยกชิ้นส่วนอุปกรณ์ซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมีค่าเฉลี่ยที่ 4.20

3.4.4 มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่าง ๆ น้อยซึ่งผลจากการประเมนอยู่ในเกณฑ์ระดับดีมีค่าเฉลี่ยที่ 4.20

อภิปรายผล

1 การพัฒนาอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบสามารถสร้างอุณหภูมิของของเหลว ได้ตั้งแต่ 50°C ถึง 200°C โดยมีค่าความแปรปรวนไม่เกินกว่า $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ภายใน 30 นาที และสามารถนำไปใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามมาตรฐานสากลซึ่งเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของงานวิจัยเพราะโครงสร้างพัฒนาจาก สเตเลสและเหล็กที่มีขนาด สูง 40 เซนติเมตร กว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตรและท่อโค้งรูปตัวยู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตรหนา 1 มิลลิเมตร มีปริมาตรความจุ 1.2 ลิตร และอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าได้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 20 วัตต์, เครื่องควบคุมแบบสัดส่วนที่มีความละเอียด 0.1°C , ขดลวดความร้อนและใบพัดกวนของเหลวให้ไหลเวียนในท่อ ผ่านขดลวดความร้อนที่มีขนาด 500 วัตต์ ซึ่งได้เป็นไปตามทฤษฎีการควบคุมอุณหภูมิ ทฤษฎีความร้อนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ John S. Traynor, (1990) ได้ศึกษาข้อมูลเนื้อหาของงานวิจัยเรื่องการสร้างเตาอบไฟฟ้าที่มีขนาด 715 วัตต์ เตาที่มีขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร โดยมีพัดลมดูดอากาศติดอยู่ด้านบนของเตา ได้ค้นพบวิธีออกแบบโครงสร้างการไหลเวียนของอากาศและการควบคุมอุณหภูมิของภาชนะโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ (PID Controller)

2. ผลการวัดประสิทธิภาพความแปรปรวนของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบจำนวน 3 รายการได้แก่ความแปรปรวนในแนวนอน แนวตั้ง และความแปรปรวนเนื่องจากเวลาเปลี่ยนไป 30 นาทีจากผลการทดสอบที่อุณหภูมิ ที่ 50°C มีค่าความแปรปรวน $\pm 0.004^{\circ}\text{C}$, ที่ 100°C มีค่าความแปรปรวน $\pm 0.017^{\circ}\text{C}$, ที่ 150°C มีค่าความแปรปรวน $\pm 0.022^{\circ}\text{C}$, และ ที่ 200°C มีค่าความแปรปรวน $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$ สรุปผลที่ได้จากการทดสอบคือค่าความแปรปรวนมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และ ผลจากการทดสอบหาค่าความแปรปรวนเนื่องจากรายการทดสอบที่ต่างกันแต่ทดสอบที่อุณหภูมิเดียวกันผลจากการทดสอบมีดังนี้ ในแนวนอนที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าความแปรปรวน $\pm 0.017^{\circ}\text{C}$ ค่าความแปรปรวนในแนวตั้งที่อุณหภูมิมีค่าความแปรปรวน $\pm 0.023^{\circ}\text{C}$ และค่าความแปรปรวนเนื่องจากเวลาเปลี่ยนไป 30 นาทีที่อุณหภูมิ มีค่าความแปรปรวน $\pm 0.032^{\circ}\text{C}$ นาที ผลที่ได้จากการทดสอบค่าความแปรปรวนเนื่องจากเวลาเปลี่ยนไป 30 นาที มีค่าความแปรปรวนมากที่สุด ซึ่งสามารถสรุปผลที่ได้จากการทดสอบคือเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลมีผลต่อค่าความแปรปรวนคือถ้าเวลาในการวัดใช้ในเวลาเดียวกันจะมีค่าแปรปรวนน้อยกว่าการวัดต่างเวลากันซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีความร้อน และ มาตรฐานการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (ASTM E220) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย (2544 : บทคัดย่อ). ที่ศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่ระหว่างครีปแผ่นและท่อด้วยเทคนิคซีเฟตีได้ค้นพบรูปทรงของท่อ และระยะห่างระหว่างท่อ มีผลต่อลักษณะการไหล และการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศ นอกจากนี้ เมื่อความเร็วเข้าของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมียลักษณะที่แคบกว่า แต่ความร้อนถูกกำจัดออกได้ดีขึ้น

3. ใช้ผู้เชี่ยวชาญประเมินสมรรถนะทางด้านกายภาพ 4 ด้าน ดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์ด้านความปลอดภัย มีความเหมาะสมปานกลาง

ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าระบบป้องกันเครื่องเสียหายในกรณีไฟฟ้าผิดปกติและมีระบบป้องกันอันตรายให้กับคนใช้งานในกรณีเกิดจากไฟฟ้าดูดแต่อุปกรณ์ป้องกันทั้ง 2 ไม่เป็นตามข้อกำหนดทางด้านความปลอดภัยของมาตรฐานอุตสาหกรรมเพราะอุปกรณ์ที่นำใช้ในการติดตั้งมายังไม่ได้ผ่านการรับรองมาตรฐานอุตสาหกรรม(สมอ)ถ้านำมาใช้อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานและเสียหายต่อเครื่องได้

3.2 ลักษณะทางด้านโครงสร้าง มีความเหมาะสมปานกลาง

ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่ามีความแข็งแรงและปลอดภัยเนื่องจากอ่างควบคุมอุณหภูมิทำการออกแบบและสร้างโดยใช้คนเป็นผู้สร้างซึ่งใช้เครื่องมือที่ต้องอาศัยทักษะฝีมือการสร้างทำให้รู้ลักษณะขีดความสามารถที่แตกต่างกับเครื่องสร้างอุณหภูมิใช้ในงานสอบเทียบอุณหภูมิของต่างประเทศ(ดูภาคผนวก ค) ที่ออกแบบและสร้างโดยใช้เทคโนโลยีระดับสูงและเครื่องจักรที่ทันสมัยที่มีสามารถทำให้รู้ลักษณะสลายงาสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ในการทำวิจัยทำการผลิตเครื่องเพียง 1 เครื่องและก็เป็นงานวิจัยเท่านั้นทำให้ไม่คุ้มการลงทุนแต่เครื่องของต่างประเทศทำการผลิตครั้งละหลายเครื่องและจำหน่ายทั่วโลกก็สามารถลงทุนได้

3.3 ลักษณะทางด้านการใช้งานมีความเหมาะสมดี

ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าในการใช้งานอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวใช้งานได้สะดวกสามารถอ่านค่าได้เป็นตัวเลข เพราะแสดงผลบนจอ LCD และสามารถปรับอุณหภูมิขึ้นลงได้สะดวก สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกกว่าอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่มีขนาดมากกว่า 6 ลิตร ที่ใช้ในงานสอบเทียบอุณหภูมิและยังสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามความต้องการของการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศาสตราจารย์ พชรพล (2542: บทคัดย่อ) การศึกษาการใช้งานของเตาไฟฟ้าวงจรไฟฟ้าควบคุมเฟส และเกนป้อนกลับของเครื่องวัดอุณหภูมิ จากนั้นจึงออกแบบสร้างวงจรควบคุม ทั้งสองแบบ ผลการทดลองปรากฏว่าตัวควบคุมแบบ พีไอ สามารถสร้างและทำงานได้ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้สำหรับตัวควบคุมแบบใช้โครงสร้างแบบสองพารามิเตอร์

3.4 ลักษณะทางกายภาพด้านการบำรุงรักษามีความเหมาะสมดี

ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวมีจุดที่ต้องบำรุงรักษาน้อยสามารถถอดเปลี่ยนเป็นชุดได้ทำให้สะดวกในการซ่อมบำรุงรักษาเพราะว่าโครงสร้าง วงจรการทำงานและอุปกรณ์ต่างๆสร้างขึ้นและจัดหาภายในประเทศทำให้ไม่มีปัญหาเนื่องจากใช้อุปกรณ์ไม่มีหรือไม่ได้ผลิตเพราะผู้วิจัยใช้อุปกรณ์ แบบมาตรฐานที่มีขนาดและการทำงานเหมือนกันสามารถใช้งานแทนกันได้ ซึ่งสอดคล้องกับกับคู่มือบำรุงรักษามัคชันทนทานต่อการ กัดกร่อนของ โคโคจิ โอนิชิ และ ฉัตรชัย มานะดี. (2542): ส่วนวารสารวิชาการสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).ที่ได้แสดงรูปภาพของบีมไฟฟ้าและขั้นตอนวิธีปฏิบัติงานในการตรวจสอบระบบการทำงานบีมไฟฟ้าชนิดทนทานต่อการกัดกร่อนของที่กำหนดโดยมาตรฐานวิธีการใช้งานและการบำรุงรักษาของผู้ผลิตบีมไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ

1. ผลจากการวิจัย ผู้วิจัยได้เสนอแนะเพื่อให้เกิดแนวคิดใหม่ ๆ ในการศึกษาการค้นคว้าในอนาคตดังนี้
 - 1.1 ควรจัดหาตัวกลางใหม่ที่เป็นของเหลวที่สามารถทนต่อความร้อนสูงกว่า 250°C และไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
 - 1.2 ในการติดตั้งเครื่องระบบไฟฟ้าของสถานที่จะต้องต่อสายดินตลอดเพราะว่าถ้ามีไฟฟ้าจากการรั่วไหลของขดลวดความร้อนทำให้มีผลต่อการวัดหรือการสอบเทียบ
 - 1.3 โครงสร้างในการทำงานควรมีระบบควบคุมการไหลเวียนของเหลวเช่นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์
2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป
 - 2.1 ควรจะทำการศึกษาการทำงานของอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีความร้อนและเย็นอยู่ในเครื่องเดียวกัน
 - 2.2 ในการจัดหาเครื่องอ่านอุณหภูมิที่มีความละเอียด 0.01°C เพื่อสามารถควบคุมการแปรปรวนของอุณหภูมิภายในอ่างได้อย่างละเอียด

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- โคคิจิ โอนิชิ; และ ฉัตรชัย มานะดี. (2542). *คู่มือการใช้งานปั๊มชนิดทันทันต่อการกัดกร่อน*. กรุงเทพฯ: ส่วนวารสารวิชาการสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- ณรงค์ ชอนตะวัน. (2530). *มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ*. กรุงเทพฯ: เอราวิชั่นการพิมพ์.
- เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ จำกัด. บริษัท (2545). *เทคโนโลยีอุปกรณ์วัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม*. กรุงเทพฯ: พัฒนาการ.
- ชาลี อินทรชัย. (2543). *การทดลองใช้ไมโครไฟฟ้าพลังงานความร้อนในตู้เย็นขนาด 53 ลิตร*. ปรินูณานิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา) กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- ประเสริฐ ภูั่นทพงษ์. (2533). *การเลือกวัสดุทนความร้อน*. กรุงเทพฯ: เทคนิค.
- ปรีชา ดิษเสถียร; และ สุระ น้อยพันธ์. (2538). *คู่มือการฝึกอบรมทางวิชาการ เรื่องการสอบเทียบทางอุณหภูมิ*. กรุงเทพฯ: สมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย.
- ปัญญา รุ่งอรุณแสงชัย. (2544) *การศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่ระหว่างครีบนแผ่นและท่อด้วยเทคนิคซีพีดี* วิทยานิพนธ์ (วิศวกรรมศาสตร) กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ถ่ายเอกสาร.
- ไพศิษฎ์ ไชยานุพงศ์. (2538). *คู่มือการฝึกอบรมทางวิชาการการสอบเทียบทางไฟฟ้า*. กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- มาตรวิทยาแห่งประเทศไทย, สมาคม. (2542). *รายงานการประชุมสามัญประจำปี*. กรุงเทพฯ: สมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย.
- รุ่งโรจน์ วงศ์มหาศิริ. (2543). *อิทธิพลของการห่อหุ้มเหนียวความร้อนจากการผสมมวลสารและฉนวนเข้าด้วยกัน*. วิทยานิพนธ์ (สถาปัตยกรรม) กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ถ่ายเอกสาร.
- เอก ไชยสวัสดิ์. (2542). *การวัดและเครื่องวัดอุณหภูมิ*. กรุงเทพฯ: ฤทธิศรีการพิมพ์.
- เอกสารประกอบการสัมมนา. (2532). *ประหยัดพลังงานวิธีการแบบญี่ปุ่น*. กรุงเทพฯ: ศูนย์อนุรักษ์พลังงานแห่งประเทศไทย.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2529) *การรายงานการวิจัยการศึกษาขีดความสามารถทางเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย*. กรุงเทพฯ.
- สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) (2543) *บทบาทมาตรวิทยาต่อการพัฒนาคุณภาพสู่สหัสวรรษใหม่* กรุงเทพฯ.
- อนุภาพ ดิรลาบ. (2536). *ความไม่สมดุลของการพัฒนาเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมไทย* กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

บรรณานุกรม(ต่อ)

ศาสตราจารย์ พลราช. (2542). การควบคุมอุณหภูมิแบบติดตามสำหรับเตาอบไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (ไฟฟ้า)
ขอนแก่น. : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.ถ่ายเอกสาร.

European Co-operation for Accreditation (2000). *EA Guidelines on the Calibration of
Temperature Block Calibrators. (EA-10/13)*

Jiin-Yun Jang and Mu-Cheng Wu and Wen-Jeng Chang. (1996) *Journal of Heat Mass
Transfer. Vol.39.No.14 Numerical and Experiment studies of Three-Dimensional Plate-Fin and
Tube Heat Exchangers. Int.*

John S. Traynor, Chi-Tsong Chen and Richard D. Kjafter. (1990) , '*State feedback Control of
Temperature in*

Jame, C.T. (1995). *Hart Scientific Calibration Equipment. U.S.A.: Pleasant Grove Utah.*

Shoji Yamauchi, Arkom Maneeakanto. (1997). "*How to Design Your Control System*", JICA Textbook.

Shoji Yamauchi, Arkom Maneeakanto. (1998). "*How to Design Your Control System*", Vol.II JICA
Textbook.

Tavener, J.P. (1995). *Jupiter Operation Manual. England: Isothermal Technology Limited.*

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

หนังสือรับรองผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย



ที่ ทว 5201/ 1982

19 เมษายน 2547

เรื่อง อนุญาตให้พนักงานเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมิน

เรียน คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

อ้างถึง หนังสือมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ ศธ 0519.12/7274 ลงวันที่ 7 พฤศจิกายน 2546

ตามหนังสือที่อ้างถึง ขอความอนุเคราะห์สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (ทว.) พิจารณาอนุญาตให้ นางลักษมี ปลั่งแสงมาศ รักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา, นางอภิญญา หล้าเตจา นักวิชาการ 6, นายกำชัย สิงหาภิวัฒน์ นักวิชาการ 6, นางสาวสิริรัตน์ ถาวรรัตน์ นักวิชาการ 7 และ นางสาวกัณหา เหลืองหิรัญ นักวิชาการ 6 เป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมินลักษณะทางกายภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ ให้แก่นายธีระพงษ์ สมประจบ นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา ความละเอียดทราบแล้ว นั้น

ทว. พิจารณาแล้วยินยอมอนุญาตให้พนักงานดังกล่าวข้างต้น มาเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจแบบประเมิน

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(นางลักษมี ปลั่งแสงมาศ)

ผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการมาตรฐานทางแสงและอุณหภูมิ
รักษาการในตำแหน่งผู้อำนวยการศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา

ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา

โทร. 0 2579 1121-30 ต่อ 5217 (สุมาลี)

โทรสาร 0 2579 8592

E-mail : sumalee@tistr.or.th

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

๓๕ หมู่ ๓ เทศบาลเมือง ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ๑๒๑๒๐

โทร (๒๒) ๐ ๒๕๗๙ ๙๐๐๐ โทรสาร ๐ ๒๕๗๙ ๙๐๐๙

E-mail : tistr@tistr.or.th Website : www.tistr.or.th

ภาคผนวก ข
ประวัติผู้เชี่ยวชาญ

ประวัติผู้เชี่ยวชาญกรอกแบบสอบถาม

1. ชื่อ ดร.ลักษมี ปลั่งแสงมาศ
ตำแหน่ง รักษาการผู้อำนวยการศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา
วุฒิทางการศึกษา Ps.D.(University of Florida Materials Science)
ประสบการณ์การทำงาน 22 ปี
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
เชี่ยวชาญด้าน มาตรฐาน,มาตรวิทยาและโพลีเมอร์
2. ชื่อ คุณกำชัย สิงหาภิวัฒน์
ตำแหน่ง นักวิชาการ 6
วุฒิทางการศึกษา วท.ม. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยมหิดล
ประสบการณ์การทำงาน 15 ปี
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
เชี่ยวชาญด้าน อุณหภูมิต่ำ แสงและความชื้น
3. ชื่อ คุณอภิญา หล้าเตจา
ตำแหน่ง นักวิชาการ 6
วุฒิทางการศึกษา วท.ม.(เทคโนโลยีอุณหภาพ) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ประสบการณ์การทำงาน 12 ปี
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
เชี่ยวชาญด้าน อุณหภูมิต่ำ แสงและความชื้น
4. ชื่อ คุณสิริรัตน์ ถาวรรัตน์
ตำแหน่ง นักวิชาการ 7
วุฒิทางการศึกษา วส.ม.(อุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประสบการณ์การทำงาน 15 ปี
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
เชี่ยวชาญด้าน การสอบเทียบทางกล มวล และมีติ
5. ชื่อ คุณกัณหา เหลืองหิรัญ
ตำแหน่ง นักวิชาการ 6
วุฒิทางการศึกษา Master's Degree of Newsouthwales, Australia (Technology management)
ประสบการณ์การทำงาน 7 ปี
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
เชี่ยวชาญด้าน การสอบเทียบทางกล มวล และมีติ

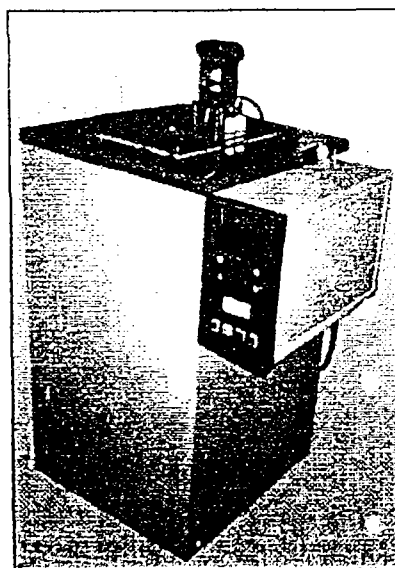
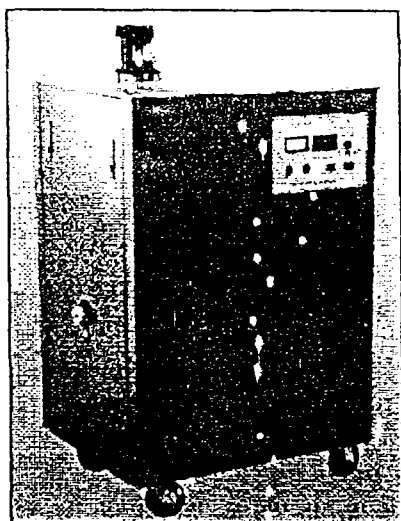
ภาคผนวก ค.

รายละเอียดเกี่ยวกับอ่างควบคุมอุทกภัยที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องวัด
อุทกภัยจากต่างประเทศ

Hot Liquid Bath

Range from: R.T.+10 to 300°C

Specifications	HTS-95	HTS-300	HTS-300A	HTS-95I	HTS-300I
Range	R.T.+10 - 95°C	R.T.+10 - 300°C		R.T.+10 - 95°C	R.T.+10 - 300°C
Display	0.01°C	0.1°C		0.01°C	0.1°C
Setting	0.01°C	0.1°C		0.01°C	0.1°C
Stability	< 0.01°C/30min			±0.01°C/30min	
Uniformity	±0.005 - 0.01°C			±0.01°C	
Heating Rate	0.8..1.1°C/min				
Cooling Rate	0.8..1.1°C/min				
Working Area	Dia 140 x 480	Dia 150 x 480 mm.			
Dimension	750 x 550 x 1300 mm.			650 x 550 x 1200 mm.	
Volume	23Litr				
Weight	95Kg.		120Kg	90Kg	
Power	1.5KW	3KW		2.8KW	1.5KW



Distributor:

Water Baths - GP Series

NESLAB's Water Baths offer the performance required for sophisticated clinical and analytical applications at an economical price.

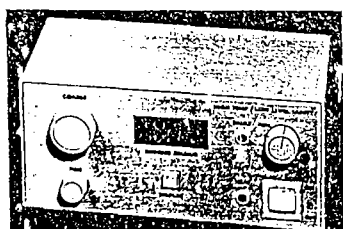
Built-in stirrer and state of the art controller provide excellent uniformity and stability, especially at the common working temperatures of 37°C and 56°C. You can get genuine, repeatable temperature that you can count on day in and day out. The built-in digital temperature controller allows coarse and fine adjustment over a temperature range of ambient to 150°C. A high temperature/low liquid level safety monitors temperature and bath fluid levels. In

case of temperature overrun or low liquid level, the safety will disable the bath to prevent damage to the bath or your application.

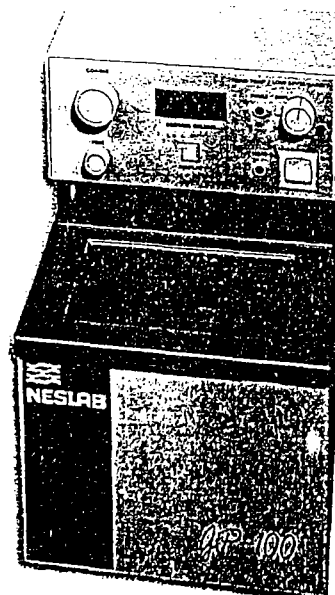
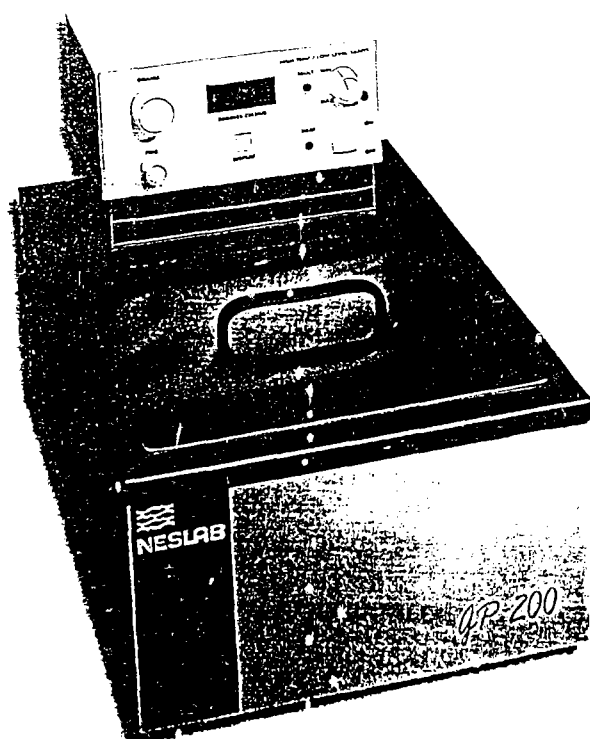
A built-in tap water cooling coil provides quick cool down and helps maintain near ambient temperatures. These high quality and high value Water Baths are available in five sizes: compact 5 liter, 12 liter, and large volume 20 liter, 21 liter, and 42 liter models.

Also, we offer an optional force-only pump to provide circulation to your external apparatus. Use the pump in conjunction with an accessory FlowThru Cooler for producing below ambient temperatures.

Temperature Control:
The GP series offers a digital temperature controller. The digital controller pictured here provides continuous readout of bath temperature.



Stability:
A built-in stirrer and state of the art controller provide excellent uniformity and stability, especially at the common working temperatures of 37°C and 56°C.



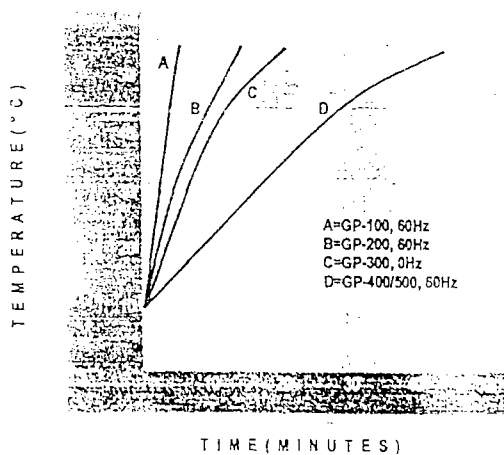
Safety Control:
A high temperature/low liquid level safety monitors temperature and bath fluid levels.

er Bath Specifications

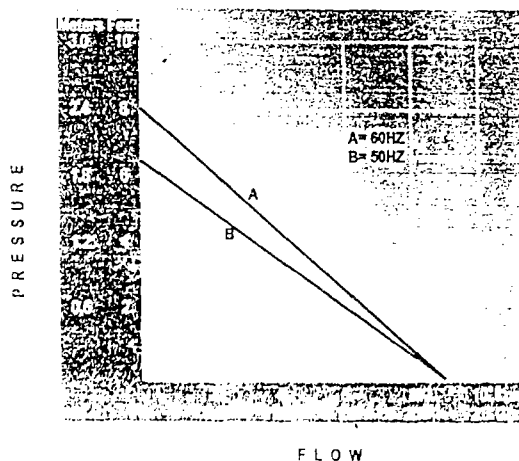
	GP-100	GP-200	GP-300	GP-400	GP-500
ATURE RANGE	15°C above ambient to +150°C	15°C above ambient to +150°C	15°C above ambient to +150°C	15°C above ambient to +150°C	15°C above ambient to +150°C
ATURE Y	±0.03°C at 37°C	±0.03°C at 37°C	±0.03°C at 37°C	±0.03°C at 37°C	±0.03°C at 37°C
	1200 Watt	1200 Watt	1200 Watt	1200 Watt	1200 Watt
3 CAPACITY (an option) dels	9 Lpm at 0' head Max Head 8' (2.4 M) 9 Lpm at 0' head Max Head 6.5' (2.0 M)	9 Lpm at 0' head Max Head 8' (2.4 M) 9 Lpm at 0' head Max Head 6.5' (2.0 M)	9 Lpm at 0' head Max Head 8' (2.4 M) 9 Lpm at 0' head Max Head 6.5' (2.0 M)	9 Lpm at 0' head Max Head 8' (2.4 M) 9 Lpm at 0' head Max Head 6.5' (2.0 M)	9 Lpm at 0' head Max Head 8' (2.4 M) 9 Lpm at 0' head Max Head 6.5' (2.0 M)
REA (L x W x D) In. Cm.	5 x 6 x 5 ³ / ₄ 12.7 x 15.2 x 14.6	10 x 10 ³ / ₈ x 5 ³ / ₄ 25.4 x 26.4 x 14.6	10 x 10 ³ / ₈ x 8 ¹ / ₂ 25.4 x 26.4 x 21.59	20 x 10 ³ / ₈ x 5 ³ / ₄ 50.8 x 26.4 x 14.6	17 x 10 ³ / ₈ x 11 ¹ / ₂ 43.2 x 26.4 x 29.2
LUME Gallons/Liters:	1.3/4.9	3.2/12.1	5.3/20	5.5/20.8	11/41.6
ONS (H x W x D) In. Cm.	14 ¹ / ₄ x 8 ³ / ₄ x 13 36.2 x 22.2 x 33	14 ¹ / ₄ x 12 ¹ / ₂ x 18 ¹ / ₂ 36.2 x 31.7 x 47	17 ⁵ / ₈ x 12 ¹ / ₂ x 18 ¹ / ₂ 44.8 x 31.7 x 47.0	14 ¹ / ₄ x 12 ¹ / ₂ x 28 ¹ / ₄ 36.2 x 31.7 x 71.8	20 ¹ / ₂ x 12 ¹ / ₂ x 25 ¹ / ₂ 52.1 x 31.7 x 64.8
REQUIREMENTS dels:	115V, 60 Hz, 12 Amps 220-240V, 50 Hz, 7 Amps	115V, 60 Hz, 12 Amps 220-240V, 50 Hz, 7 Amps	115V, 60 Hz, 12 Amps 220-240V, 50 Hz, 7 Amps	115V, 60 Hz, 12 Amps 220-240V, 50 Hz, 7 Amps	115V, 60 Hz, 12 Amps 220-240V, 50 Hz, 7 Amps
3 WEIGHT	25 Lbs/11.3 Kgs	32 Lbs/14.5 Kgs	37 Lbs/16.8 Kgs	40 Lbs/18.1 Kgs	51 Lbs/23.1 Kgs

ons listed for standard units circulating water at 20°C, at 20°C ambient. Performance specifications will be affected by changes in temperature, ambient, or coolant.
ons subject to change.

Time to Temperature



Pumping Capacity



APPLICATIONS

- Enzyme Assays
- Fecal Coliform Testing
- DNA Incubation
- Microbiology
- Cell Culture
- Molecular Weight Studies
- Environmental Analysis
- Serum Heat Inactivation

ACCESSORIES

- Flat Cover
- Gabled Cover
- FlowThru Cooler

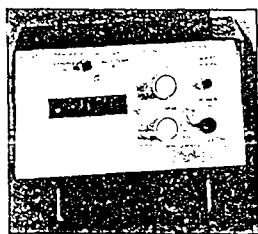


High Temperature Bath/Circulators Series

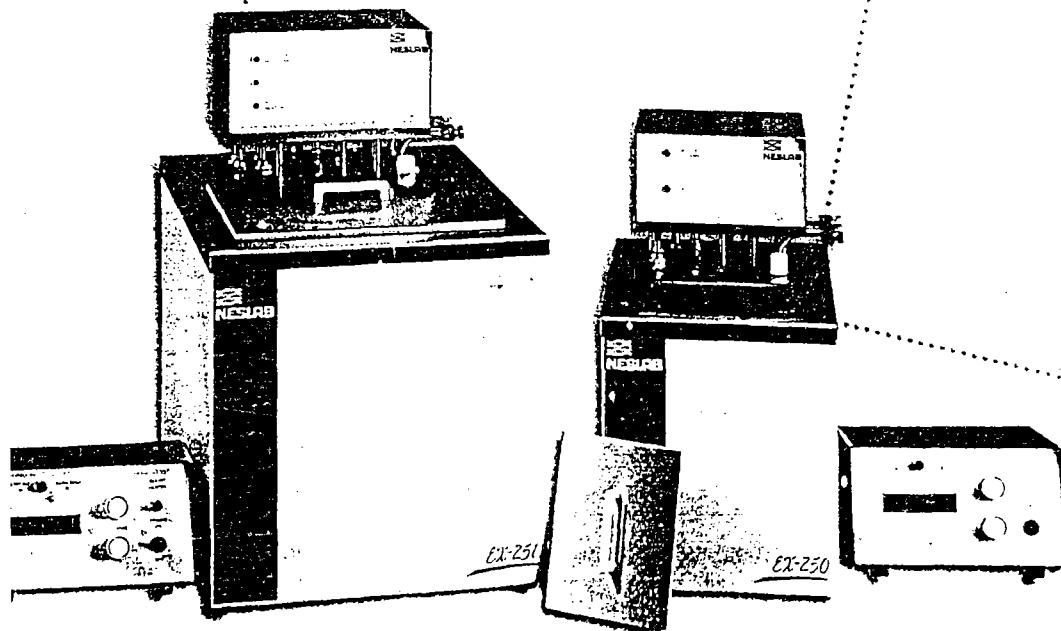
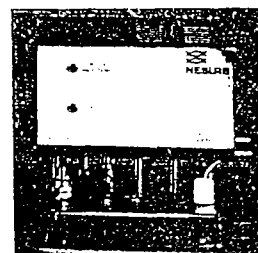
EX-250HT and the EX-251HT are specifically designed for applications requiring precise temperature control up to 250°C. The controller features an automatic reset that ensures temperature stability under load and voltage changes. A built-in low/high temperature cutout protects the unit from temperature overrun. The LED digital setpoint and readout are coupled to a state controller and RTD sensor. The digital temperature controller is tethered for remote operation away from the high temperatures of the bath. We have incorporated our industrial grade circulating pump with stainless steel threaded fittings. The pump motor can operate continuously under extremes of temperature and viscosity. It also provides excellent agitation in the bath

area for optimum temperature uniformity. The pump motor housing is raised above the bath in order to minimize the high heat effect and ensure continuous operation. An external tap water cooling coil is provided for rapid cool down below 100°C. Several features have been incorporated to make these units both convenient and safe for high temperature operation. A full 1 1/2 inches (3.8cm) of high temperature fiberglass insulation surrounds the entire stainless steel tank. The circulating pump inlet/outlet lines have stainless steel caps to contain any accidental pumping of hot bath fluid. We also use Teflon® for the flow control knob, the bath lid handle, and lid insulation to protect you during high temperature operation. These Bath/Circulators provide excellent temperature control for high temperature calibration procedures, melting point, viscosity measurements and petroleum testing.

Stability
Featuring stability of $\pm 0.01^\circ\text{C}$ and digital setpoint and readout, NESLAB High Temperature Bath/Circulators provide the accuracy required for calibration applications



Fluid Compatibility
These High Temperature Bath/Circulators are equipped with stainless steel work areas for fluid compatibility



Safety
A full 1 1/2 inches (3.8cm) of high temperature insulation surrounding the tank, and Teflon® handles, knobs and lid insulation to protect you during high temperature operations

1 Temperature Bath/Circulator Specifications

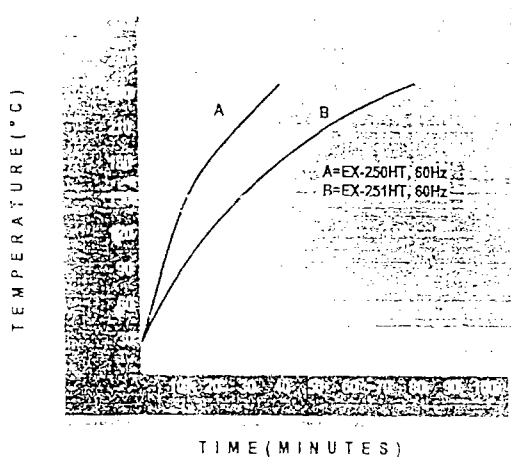
	EX-250	EX-251
TEMPERATURE RANGE	+40°C to +250°C	+30°C to +250°C
Refrigeratory cooling	+5°C to +250°C	+5°C to +250°C
TEMPERATURE STABILITY	±0.01°C at 60°C, ±0.02°C at 250°C	±0.01°C at 60°C, ±0.03°C at 250°C
	1000 Watt	800 Watt/800 Watt Boost
CAPACITY	0-13 Lpm at 0' head max head 16' (4.9 M)	0-13 Lpm at 0' head max head 16' (4.9 M)
Models	0-11 Lpm at 0' head max head 11' (3.3 M)	0-11 Lpm at 0' head max head 11' (3.3 M)
AREA (L x W x D) In.	41/2 x 6 x 9	8 x 10 x 12
Cm.	11.4 x 15.2 x 22.9	20.3 x 25.4 x 30.5
VOLUME Gallons/Liters:	2/7.5	6.5/25
DIMENSIONS (H x W x D) In.	16 3/4 x 9 1/2 x 13 1/4	20 1/2 x 13 1/2 x 17
Cm.	42.5 x 24.1 x 33.7	52.1 x 34.3 x 43.2
REQUIREMENTS	115V, 60 Hz, 9 Amps	115V, 60 Hz, 16 Amps
Models:	220-240V, 50 Hz, 5 Amps	220-240V, 50 Hz, 8 Amps
WEIGHT	40 Lbs/18.1 Kgs	60 Lbs/27.2 Kgs

Temperature data determined using bath fluid with specific heat of .35 for 60Hz, 50Hz may vary. Temperature specification determined using water, 60°C stability specification determined using water, 250°C stability specification determined using silicone oil. Specifications subject to change.

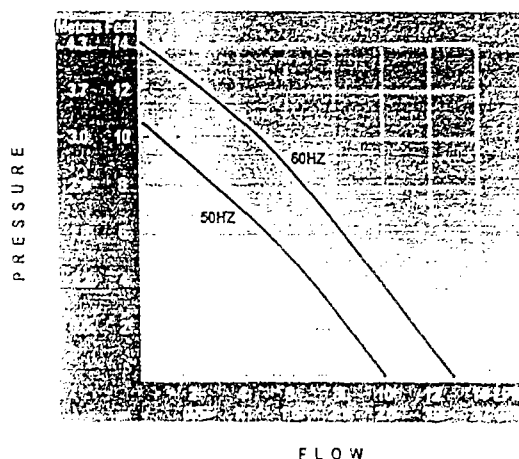
APPLICATIONS

- Calibration Process
- Melting Point
- Denaturation
- Temperature Aging
- Viscosity Measurements
- Petroleum Testing

Time to Temperature



Pumping Capacity



ACCESSORIES

- NEScom Software



Model 9107

How Low Do They Really Go?

Manufacturer	HART	TECHNE	JOFRA/AMETEK
Model Number	9107	TECAL 140S	D40 C-140
Operating Range	-45°C to 140°C	-22°C to 140°C	-40°C to 123°C -30°C to 140°C
Range at Ambient	SAME	-22°C to 140°C	-15°C to 123°C -14°C to 140°C
What You Need to Really Low Temperatures	Nothing extra.	Requires 5°C chilled water circulating through unit to reach -40°C. Circulator bath not included.	Requires unit to be used in a room temperature of 5°C (41°F) to reach published range. Gloves and earmuffs not included.

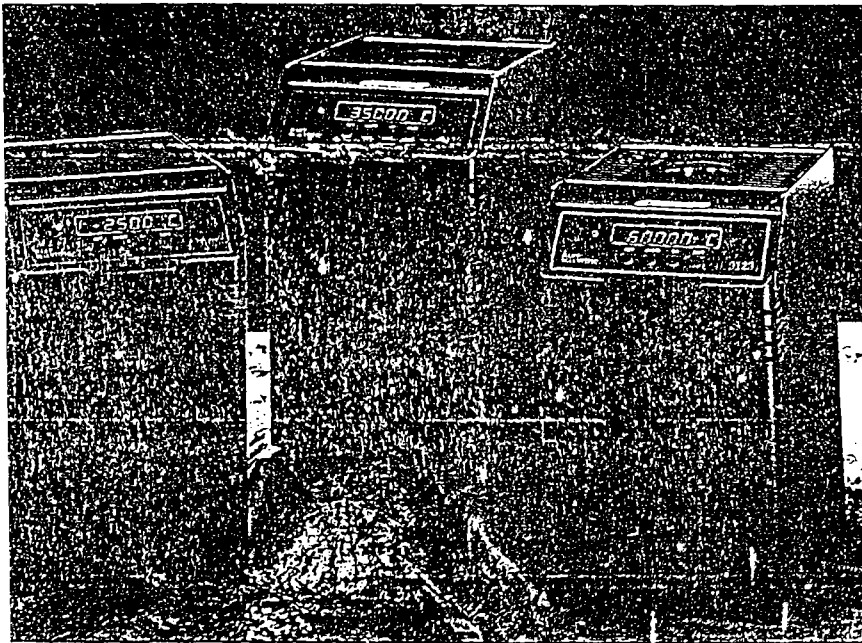
Editor specs taken from their published materials at the time of this printing.

... you can take the last reading in less than 60 minutes from the time you turn the unit on.

... you're testing thermal switches, Model 9107 includes binding posts for connecting your switch and display for recording the actuation tem-

perature. The included Interface-*it* software even includes a routine for automating switch tests.

No other company offers you all these features. Buy from the company that delivers what it promises. Buy from Hart Scientific.



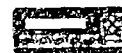
Other models round out Hart's line of "Super Dry-Well's." The Model 9105 uses the same block as the Model 9107, but covers the range -25°C to 140°C. Models 9122 and 9123 both operate from 50°C to 600°C. The 9122 uses a nine-well, high-capacity block while the 9123 uses a one-well, high-speed block. (Custom inserts are available.) Each Super Dry-Well features display accuracy of $\pm 0.1^\circ\text{C}$ at set-points below 400°C.

Specifications

Range	-45 to 140°C (at 23°C ambient)
Accuracy	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Stability	$\pm 0.02^\circ\text{C}$
Uniformity	$\pm 0.05^\circ\text{C}$ between drilled wells
Well Depth	6" (15 cm)
Communications	RS-232
Heating Time	Ambient to 140°C: 15 min.
Cooling Time	Ambient to -30°C: 15 min.
Stabilization Time	7 minutes
Test Wells	5 wells: two at 1/4" (6.35 mm), one at 3/16" (4.8 mm), one at 1/8" (3.2 mm), and one interchangeable
Resolution	0.01°
Display	LED, °C or °F, switchable
Size	12.5" H x 8" W x 10.5" D (31.8 x 20.3 x 26.7 cm)
Weight	30 lb. (13.6 kg)
Power	115/230 VAC ($\pm 10\%$) switchable 50/60 Hz
Certification	5-point, NIST-traceable certificate of calibration included

Ordering Information

9107	Ultracold Dry-Well, includes one 1/4-inch insert unless a different size is specified at time of order.
2125	IEEE-488 Option
2168	Blank insert
2169	1/16" insert (1.6 mm)
2170	1/8" insert (3.2 mm)
2171	5/32" insert (4 mm)
2172	3/16" insert (4.8 mm)
2173	1/4" insert (6.35 mm)
2174	5/16" insert (7.9 mm)
2175	3/8" insert (9.5 mm)
2176	1/2" insert (12.7 mm)
2177	5/8" insert (15.9 mm)
2181	1 User-Specified Hole
2182	2 User-Specified Holes
9304	Carrying Case
9932	Calibrate- <i>it</i> Software



Have you considered an external reference? See page 8.

ภาคผนวก ง.

คู่มือการใช้และภาพประกอบขั้นตอนการพัฒนาสร้างอ่างควบคุมอุทกภัยแบบ
บรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องวัดอุทกภัย

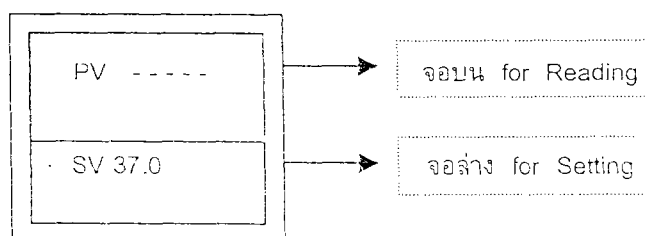
คู่มือการใช้งานและการดูแลรักษาเครื่อง อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบอุณหภูมิ

SPECIFICATIONS

1. เป็นอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ใช้งานสอบเทียบอุณหภูมิชนิดต่างๆ ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ PID Microprocesso แสดงค่าอุณหภูมิภายในอ่างเป็นตัวเลขไฟฟ้า (Digital display) แบบ LED โดยแสดงค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้และค่าจริงขณะใช้งาน ภายในอ่างที่เป็นของเหลว
2. ควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วงอุณหภูมิห้อง 50°C ถึง 200°C ค่าความผิดพลาด (Variation) ไม่เกิน $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$
3. ตัวอ่างภายนอกทำด้วยเหล็กเคลือบสี ภายในทำด้วยสแตนเลส ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ที่ ความสะอาดง่าย
4. ขนาดอ่างภายนอกไม่น้อยกว่า กว้าง X ลึก x สูง (360 mm x 360 mm x 700 mm)
5. ปริมาตรภายในไม่น้อยกว่า 1.2 ลิตร
6. มีระบบแพร่กระจายความร้อน ให้อุณหภูมิสม่ำเสมอทั้งอ่าง (มอเตอร์กวน)
7. มีระบบความปลอดภัย (Safety) ประกอบด้วย
 - 7.1 ระบบ Safety ป้องกันอุณหภูมิสูงเกิน ตั้งและปรับได้เพื่อป้องกันตัวเครื่องและผู้ใช้งาน
8. ใช้ไฟฟ้า 220 โวลท์ 50 เฮิรท์ 1 เฟส

ขั้นตอนการปรับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

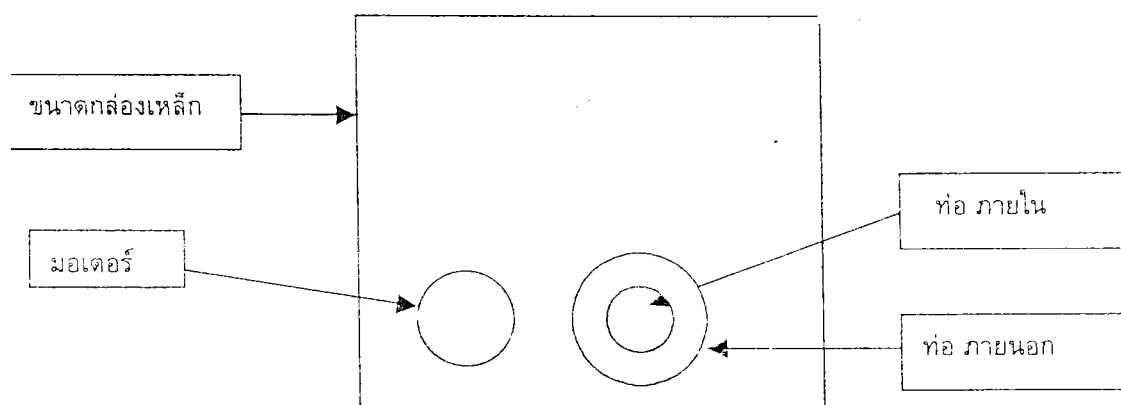
1. เสียบปลั๊กไฟฟ้า 220 V
 2. เปิดสวิตช์ Power
 3. ตั้งค่าอุณหภูมิโดยกดปุ่ม  ไปตามตัวเลขอุณหภูมิ และปรับค่าอุณหภูมิ
 4. กดปุ่ม   ที่ตัวเลขอุณหภูมิ ตามความต้องการ
 5. เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิได้แล้ว ให้กดปุ่ม 
- เช่น ถ้าต้องการ อุณหภูมิ 37°C ขั้นแรก สิ่งกดหน้าจอก็จะมี 2 ช่อง ข้างบนและข้างล่าง



6. เราจะต้อง Set จอล่าง ให้มีอุณหภูมิ 37°C โดยการกด  ไปตามตัวเลขที่ต้องการจะเปลี่ยน โดยการเลื่อนไปตามแนวราบ ต้องการเปลี่ยนตัวไหนให้หยุดที่ตัวนั้น และทำการเปลี่ยนค่าตัวนั้นโดยใช้ลูกศร   ที่ตัวเลขนั้นจนกระทั่งจอล่างแสดงอุณหภูมิตามที่ต้องการ แล้วทำการกด 

รายการประกอบแบบโครงสร้างภาพตัดด้านบน

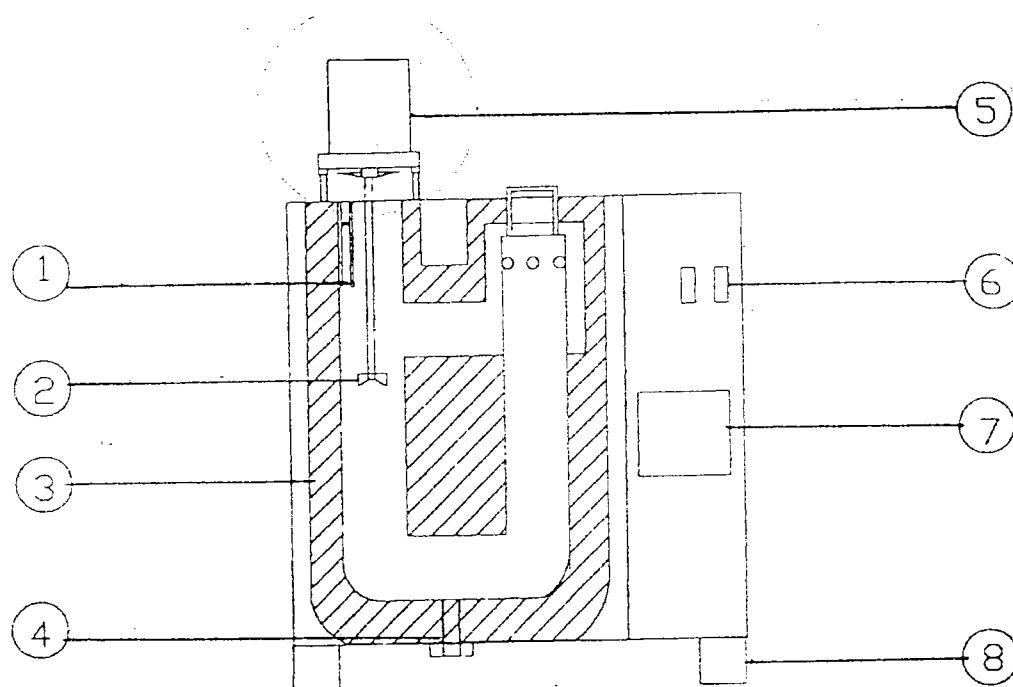
1. กล่องเหล็กขนาด 35 ซม. X 35 ซม.x 35 ซม.
2. มอเตอร์กววน
3. ท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว
4. ท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว



ภาพประกอบ 1 แปลนด้านบนอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

รายการประกอบแบบภาพโครงสร้างตัดด้านข้าง

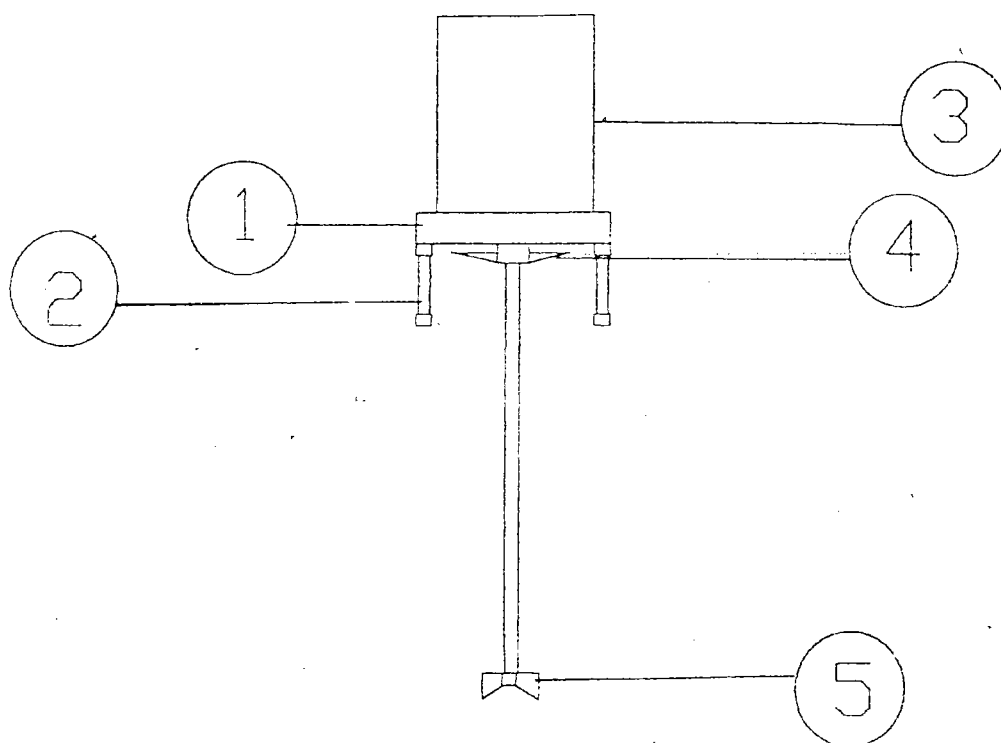
1. ขดลวดความร้อน
2. ใบพัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว
3. ฉนวนใยแก้ว
4. น็อตตัวผู้สำหรับหมุน ขนาด 2 หุน
5. มอเตอร์กวน
6. สวิตช์ควบคุมการทำงาน
7. ช่องว่างเครื่องควบคุม
8. ล้อเลื่อน



ภาพประกอบ 2 ตัดแปลนด้านข้างอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

รายการภาพประกอบแบบโครงสร้างมอเตอร์พร้อมใบกวนของเหลว

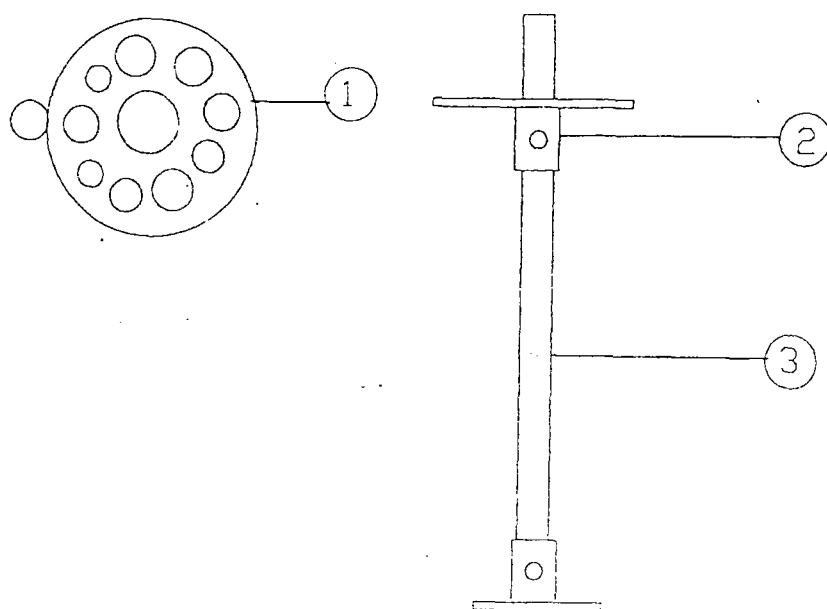
1. แผ่นรองมอเตอร์
2. น็อตยึดมอเตอร์ใบพัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว
3. มอเตอร์ไฟฟ้า
4. แผ่นรองกันความร้อน
5. ใบกวนของเหลว



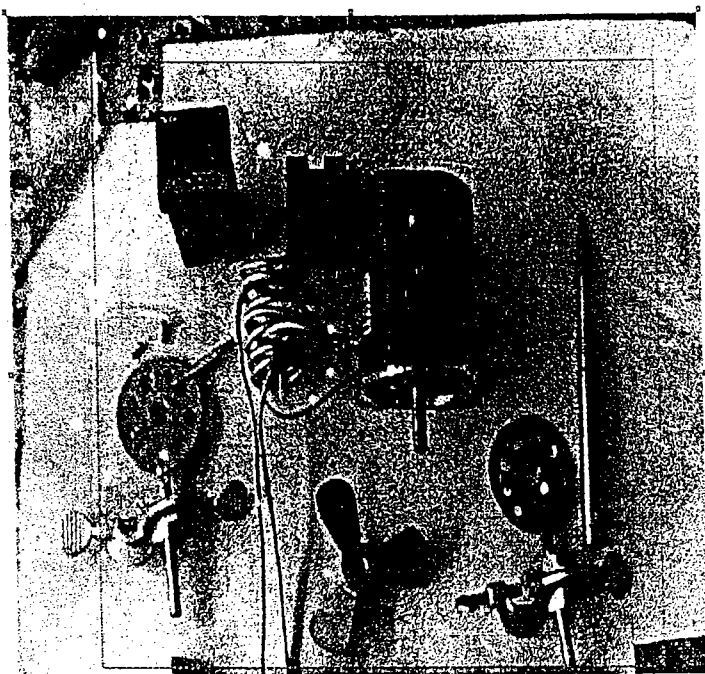
ภาพประกอบ : 3 รูปมอเตอร์พร้อมใบกวนของเหลว

รายการประกอบแบบขาตั้งที่ใช้วางตัวทดสอบ(Sensor)

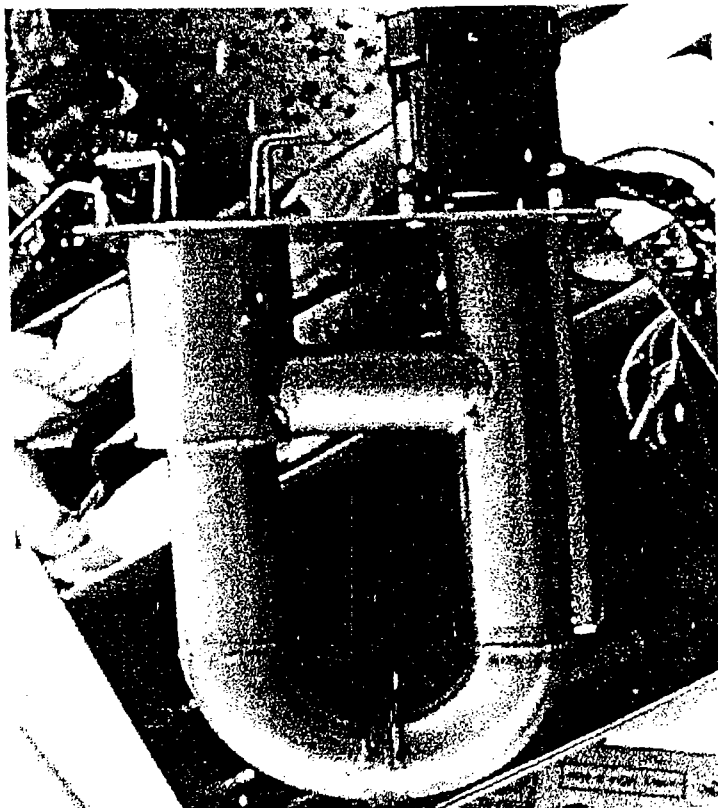
- 1 แผ่นสแตนเลสวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 เซนติเมตร
- 2 ตัวยึดเสาปรับระดับได้
- 3..แท่งสแตนเลส



ภาพประกอบ . 4 ขาตั้งที่ใช้วางตัวทดสอบ(Sensor)



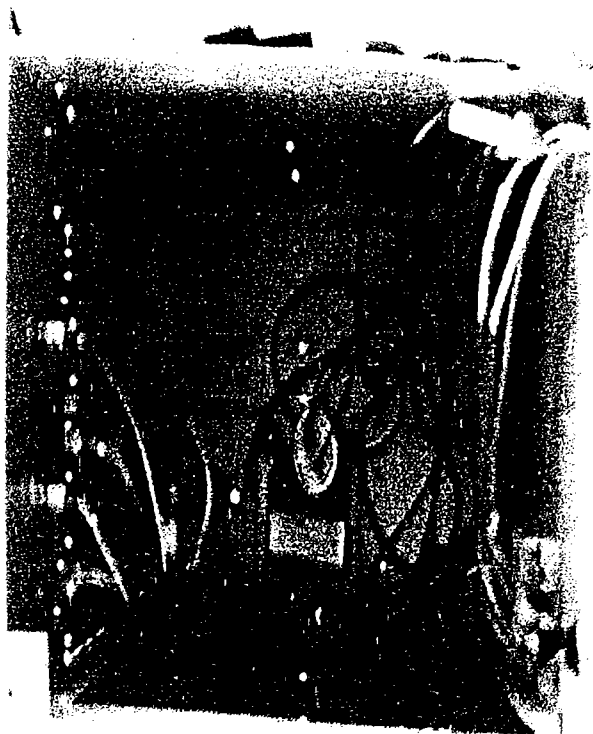
ภาพประกอบ 5 ส่วนประกอบต่าง ๆ



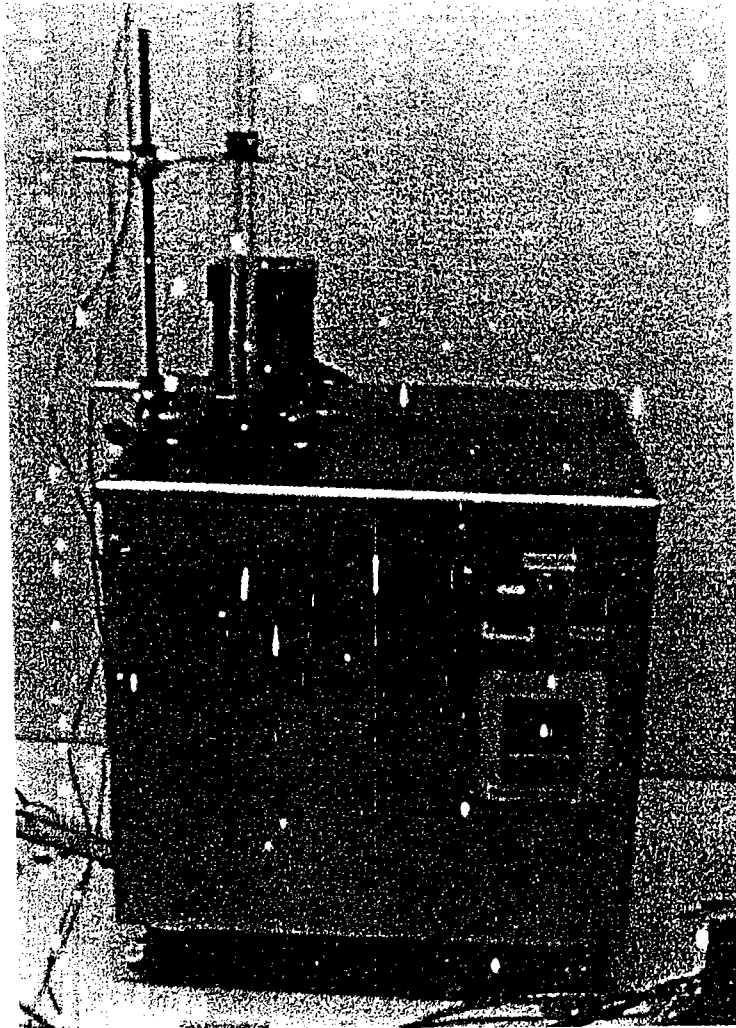
ภาพประกอบ 6 โครงสร้างภายใน



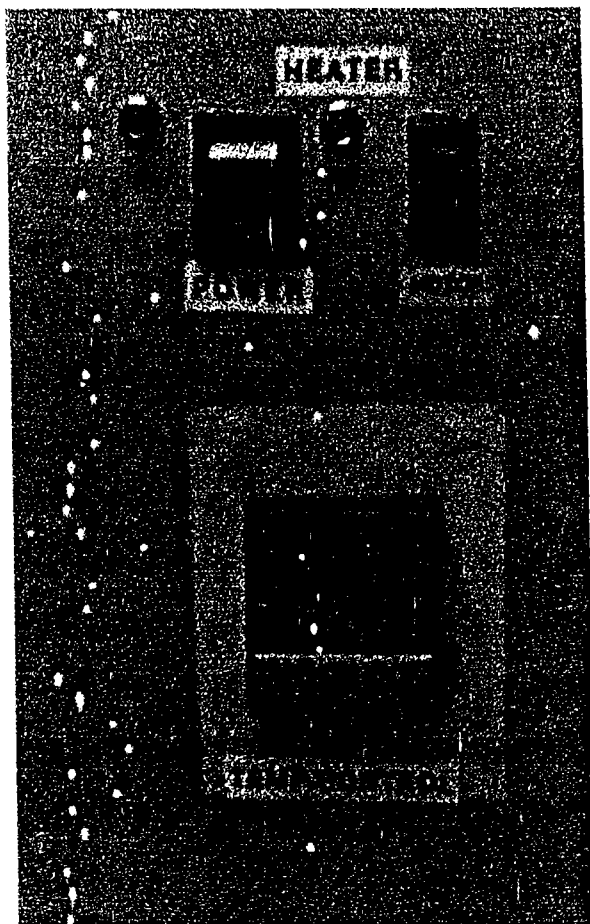
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างด้านบน



ภาพประกอบ 8 การเดินสายภายในโครงสร้างด้านใน



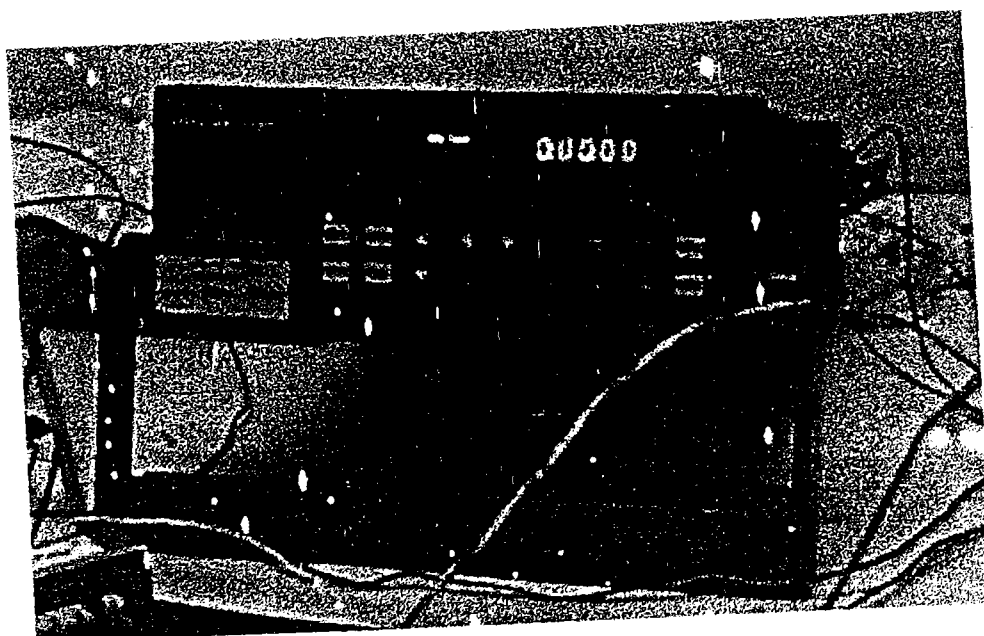
ภาพประกอบ 3 อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวเพื่อใช้ในการสอบเทียบ



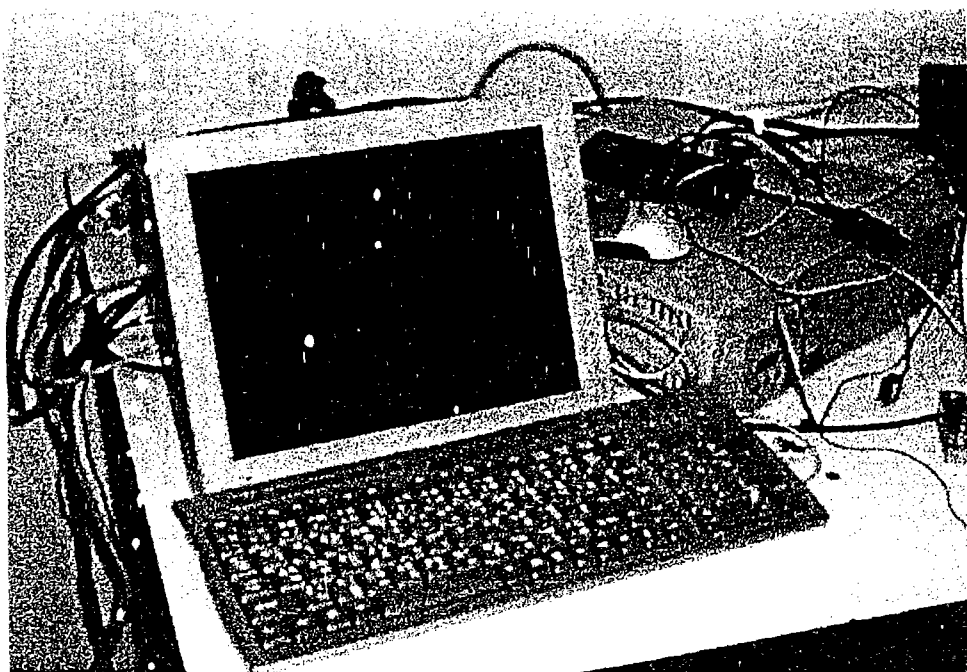
ภาพประกอบ , 10 ระบบควบคุมอุณหภูมิของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

ภาคผนวก จ.

เครื่องมือและเอกสารมาตรฐานการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่
ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของอ่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ใน
งานสอบเทียบ



ภาพประกอบ . 11 เครื่องบันทึกอุณหภูมิอัตโนมัติ(Data Logger)



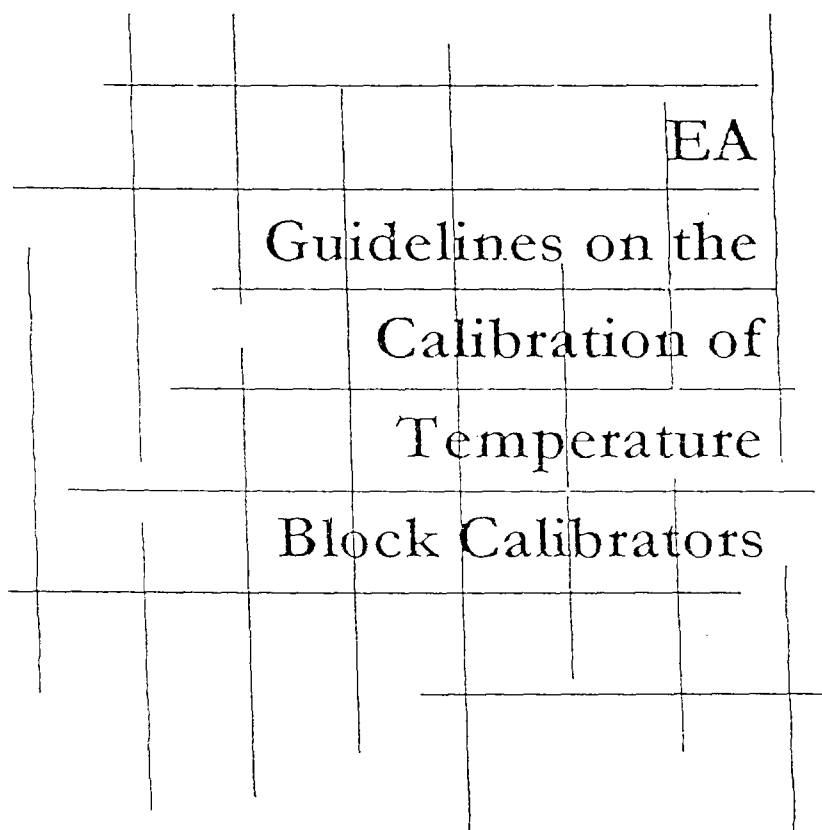
ภาพประกอบ . 12 คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูล



European
co-operation for
Accreditation

*Publication
Reference*

EA-10/13



PURPOSE

This document has been produced by EA to improve the harmonisation in the calibration of temperature block calibrators. It provides guidance to national accreditation bodies to set up minimum requirements for the calibration of temperature block calibrators and gives advice to calibration laboratories to establish practical procedures and the evaluation of uncertainties. This document was approved by the EA General Assembly in November 1999.

3.0.9 The following investigations are to be carried out in particular:

3.1 Axial temperature homogeneity along the boring in the measurement zone

- 3.1.1 The greatest temperature difference occurring in the measurement zone is to be determined. For this purpose, the temperature is determined at the lower end, in the middle and at the upper end of the measurement zone, using a thermometer with a sensor length not exceeding 5 mm. The thermometer may be provided with a protective tube (outside diameter: $d \leq 6$ mm). It is recommended to use Pt resistance thermometers in the temperature range from -80 °C to $+660$ °C and noble metal thermocouples (including Pt-Pd thermocouples) in the temperature range from $+660$ °C to $+1300$ °C. Base metal thermocouples are unsuitable for these measurements.

Example: The following measurements are required for a temperature block calibrator with a measurement zone 40 mm in length at the lower end of the boring:

- 1) thermometer touching the ground;
- 2) thermometer pulled out 20 mm;
- 3) thermometer pulled out 40 mm; and
- 4) thermometer touching the ground.

- 3.1.2 The measurement is to be performed in the central boring or in a particularly marked boring.

- 3.1.3 **Initial calibration:** Measurements are to be carried out at the highest and at the lowest temperature of the measuring range. If one of these measurement points is at room temperature, the temperature for this measurement point is to be increased or decreased by 20 °C.

- 3.1.4 **Repeat calibration:** Measurements are to be performed at that temperature of the measurement range whose difference to room temperature is greatest.

3.2 Temperature differences between the borings

- 3.2.1 The greatest temperature difference occurring between the borings is to be determined. To eliminate the influence of temperature variations with time, the temperature differences with respect to an additional test thermometer in the temperature block calibrator are determined.

- 3.2.2 **Initial calibration:** The temperatures are determined in at least three borings distributed as uniformly as possible on the greatest reference circle of the temperature block. If the calibrator is provided with less than 4 borings, the temperature differences are determined by measurements in the borings and cyclic exchange of the thermometers, or they are determined directly with calibrated thermometers.

- 3.2.3 **Repeat calibration:** The temperature difference is determined between those two borings which had shown the greatest temperature difference upon initial calibration.

3.3 Influence upon the temperature in the measurement zone due to different loading

3.3.1 **Initial calibration:** These measurements are carried out to determine the change of the temperature difference between the reference thermometer and a test thermometer, which occurs when further borings are loaded with thermometers or suitable sheaths. The sheaths or thermometers shall protrude from the respective boring by at least 200 mm. Maximum possible loading with thermometers/bushings of 6 mm or smaller in diameter shall be ensured. The measurements are to be carried out at the temperature of the measurement range which shows the greatest temperature difference with respect to room temperature.

3.3.2 **Repeat calibration:** A repeat measurement is not required.

3.4 Stability with time

3.4.1 The maximum range of temperatures indicated by a sensor in the measurement zone over a 30 minute period, when the system has reached equilibrium, shall be determined.

3.4.2 Initial calibration and repeat calibration: Measurements are to be performed at three different test temperatures: at the highest test temperature, at the lowest test temperature and at room temperature. If the highest or lowest test temperature corresponds to room temperature, the third test temperature shall be selected in the middle of the temperature range tested.

3.5 Temperature deviation due to heat conduction

3.5.1 In agreement with the client, the temperature error due to heat conduction is to be determined for such thermometers which are to be calibrated at the client's. This deviation is not part of the temperature block calibrator's measurement uncertainty, but is to be taken into account separately when the temperature block calibrator is used. Temperature deviations due to heat conduction need not be taken into account for thermometers with outside diameters of $d \leq 6$ mm.

3.6 Determination of the deviation of the indication of the built-in controlling thermometer from the temperature in the measurement zone

3.6.0.1 The temperature in the measurement zone of the temperature block calibrator is determined with a standard thermometer, which is traceable to national standards. The same measurements are to be performed for initial and repeat calibration.

3.6.0.2 In the case of temperature block calibrators where the built-in controlling thermometer is introduced into a boring from which it can be removed, calibration of this thermometer according to a different calibration guideline is recommended.

3.6.1 Measurements

3.6.1.1 The determination of the deviation of the temperature given by the indicator of the block calibrator from the temperature in the measurement zone is performed in the central boring or in a particularly marked boring. Measurement at a minimum of three different temperatures (calibration points) are to be carried out, which are distributed as uniformly as possible over the required temperature range. At each calibration point two measurement series are carried out, in which for a period of at least 10 minutes the average for the deviation of the indication of the built-in controlling thermometer from the temperature in the measurement zone is determined. The ad-

justment of the temperature at the calibration point is done for one measurement series at increasing temperatures and at the other at decreasing temperatures. Results obtained in tests carried out to determine the stability with time may be used without repeat measurement, provided a calibrated thermometer had been used. Measurements at increasing and decreasing temperatures are not required for the highest and the lowest calibration point if the temperature coincides with the highest or lowest operating temperatures specified by the manufacturer. However, at least two measurement series are to be recorded, between which the operating temperature of the calibrator was changed.

3.6.2 Evaluation

- 3.6.2.1 The values measured in the series at increasing and decreasing temperatures are averaged for each calibration point. The calibration result (deviation of the temperature measured with the standard thermometer from the indication of the calibrator) is documented in mathematical, graphical, or in tabular form.

4 UNCERTAINTY OF MEASUREMENT

- 4.0.1 The uncertainty to be stated as the uncertainty of the calibration of the temperature block calibrator is the measurement uncertainty with which the temperature in a boring of the calibrator can be stated. If the temperature deviation due to heat conduction may be neglected, this measurement uncertainty is to be equated with the measurement uncertainty a user can expect for a thermometer when he calibrates this thermometer with the temperature block calibrator and conscientiously complies with the operating instructions and the provisions in this Calibration Guideline.

- 4.0.2 An example of the calculation of the measurement uncertainty is given in the Annex.

- 4.0.3 The following contributions to the uncertainty of measurement shall be taken into account:

4.1 Deviation of the temperature shown by the indicator of the block calibrator from the temperature in the measurement zone

- 4.1.1 The contributions are essentially to be attributed to the calibration of the standard thermometer, the measurement performed with the standard thermometer, the resolution of the digital display unit and differences between the measurements at decreasing and increasing temperature (hysteresis). The measurement uncertainties are determined by analogy with the procedure used for the calibration of a thermometer.

4.2 Temperature distribution in the block

- 4.2.1 Additional deviations of the indication of the built-in controlling thermometer from the temperature in the measurement zone used by the client (which might be different from the zone used for the measurements described in 3.6) are caused by the not exactly known temperature distribution in the block, the loading of the block, and the stability with time. These additional deviations are not correlated. The resulting contributions to the measurement uncertainty can be estimated from the measurements according to 3.1 to 3.4. The contributions u_i to the uncertainty of measurement are derived from the greatest temperature difference ($t_{\max} - t_{\min}$) measured:

$$u_i^2(t) = (t_{\max} - t_{\min})^2 / 12.$$

- 4.2.2 The contributions to the uncertainties according to sections 3.1 to 3.4 are to be linearly interpolated between the calibration points. Near room temperature, however, the contribution to the uncertainty in a temperature range which symmetrically extends around ambient temperature can be assumed to be constant.

Example: Upon initial calibration of a temperature block calibrator in the temperature range $-30\text{ °C} < t < +200\text{ °C}$, carried out at an ambient temperature of 20 °C , the following is found as the greatest temperature differences in the homogeneous zone: $0,3\text{ °C}$ at $t = -30\text{ °C}$ and $0,6\text{ °C}$ at $t = +200\text{ °C}$. In the temperature range of $20\text{ °C} \pm 50\text{ °C}$, i.e. from -30 °C to $+70\text{ °C}$, the greatest temperature difference occurring can be assumed to be $0,3\text{ °C}$; in the temperature range from $+70\text{ °C}$ to $+200\text{ °C}$, linear interpolation between $0,3\text{ °C}$ and $0,6\text{ °C}$ is to be carried out.

4.3 Uncertainty as a result of the temperature deviation due to heat conduction

- 4.3.1 Uncertainty contributions which are the result of temperature deviations due to heat conduction of thermometers with outside diameters $d \leq 6\text{ mm}$ can be neglected. If thermometers with $d > 6\text{ mm}$ are used, this contribution to uncertainty shall be separately analysed.

5 REPORTING RESULTS

- 5.1 The calibration certificate in which the results of measurements are reported should be set out with due regard to the ease of assimilation by the user's mind to avoid the possibility of misuse or misunderstanding.
- 5.2 The certificate shall meet the requirements of EA Publication EA-4/01 (previously EAL-R1).
- 5.3 It is recommended to enclose with each calibration certificate the "Recommendations of the EA Expert Group 'Temperature and Humidity' for use of temperature block calibrators" (see Annex B).
- 5.4 The results of the investigations carried out under points 3.1 to 3.4 are to be documented in the calibration certificate.

ภาคผนวก จ.

ใบประกาศนียบัตรรับรองของเครื่องมือทดสอบประสิทธิภาพอ่างควบคุม
อุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบ
จากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติและมาตรฐานสากล



NIMT

National Institute of Metrology (Thailand)

75/7 Rama VI Road, Thungphyathai, Rajthevi, Bangkok 10400 Tel. 248-2181 Fax. 248-4484

Certificate of Calibration

Issued by : Temperature Laboratory, Thermometry Department

Date of Issue : 31 May 2002

Serial Number : TL-0063/02

Page : 1 of 11 Pages

For : Thailand Institute of Scientific and Technological Research
196 Phahonyothin Rd., Chatuchak,
Bangkok 10900

Description : Standard Platinum Resistance Thermometer

Model : 5681

Serial No. : 61079

Manufacturer : HART SCIENTIFIC, INC.

The reported uncertainty is based upon a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%

Reference : CSR No. 0096/02

Checked by :

Signed : (Authorised Signatory)

Name : Bunjob Suktat for the Director

This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the Director of National Institute of Metrology (Thailand).



National Institute of Metrology (Thailand)

Continuation of Calibration Report on serial number TL-0069-02

Page 2 of 11 pages

Thailand Institute of Scientific and Technological Research

Description: Standard Platinum Resistance Thermometer

Model: 5681

Serial No.: 61079

Manufacturer: HART SCIENTIFIC, INC.

Date of Received: 8 March 2002

Measurement Period: 1 to 13 May 2002

ENVIRONMENTAL CONDITIONS:

The measurement was carried out in an ambient temperature of $(23.0 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$ and the relative humidity of $(\pm 10) \%$.

MEASUREMENT METHOD:

The Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT) was calibrated with a DC bridge using continuous currents of 1.0 mA. In accordance with the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) adopted by BIPM, the sub-range from 234.3156 K to 302.9146 K and from 273.16 K to 933.473 K, with the following fixed points, were used to calibrate the thermometer.

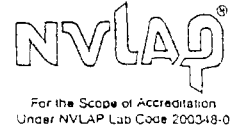
Fixed Points		Temperature	
		T_{90} (K)	t_{90} ($^\circ\text{C}$)
Hg	MP	234.3156	-38.8344
H ₂ O	TP	273.16	0.01
Ga	MP	302.9146	29.7646
Sn	FP	505.078	231.928
Zn	FP	692.677	419.527
Al	FP	933.473	660.323

DISCUSSION OF RESULTS:

On page 3 of 11, there are the coefficients of the pertinent deviation functions of the ITS-90, the resistance ratios, measured at the fixed points, and their associated measurement uncertainties.



Calibration Laboratory
799 E Utah Valley Drive
American Fork, Utah 84003-9775



REPORT OF CALIBRATION
INTERNATIONAL TEMPERATURE SCALE OF 1990

Platinum Resistance Thermometer
Model No: 5628
Serial No: 0229

Submitted By:
Measuretronix Ltd
Bangkok 10240, THAILAND

This Platinum Resistance Thermometer (PRT) was calibrated by comparison to a laboratory standard SPRT via a Precision DC Thermometer at a constant current of 1.0 mA. The procedure followed is based on the technical information contained in NIST Technical Note 1265, "Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)" pertaining to secondary PRT's. The following comparison points and their uncertainties ($k=2$) were used to calibrate the thermometer. This calibration is traceable to NIST or natural physical constants and is in compliance with ANSI/NCSL Z540 - 1. This calibration certificate applies only to the item described and shall not be reproduced other than in full, without written approval of Hart Scientific. It shall not be used to claim product endorsement by NVLAP or any agency of the U.S. Government. Calibration certificates without signatures are not valid.

COMPARISON POINT		MEASURED	MEASUREMENT
NOMINAL	ACTUAL	RESISTANCE	UNCERTAINTY
-197.000 °C	-197.000°C	4.67730	0.010°C
-100.000 °C	-100.000°C	15.21700	0.010°C
-38.834 °C	-38.834°C	21.60490	0.008°C
0.010 °C	0.010°C	25.59370	0.005°C
156.599 °C	156.599°C	41.19880	0.008°C
231.928 °C	231.928°C	48.44070	0.009°C
419.527 °C	419.527°C	65.74290	0.011°C
660.323 °C	660.323°C	86.39590	0.015°C

The calibration data were fitted by the method of least squares to obtain the following values for the resistance at the triple point of water (RTPW) and the coefficients of the pertinent deviation functions of the ITS-90. The attached interpolation tables were generated using these values.

ITS=90 Coefficients: Rtpw = 25.5937001 ohms a4 = -3.2208687 E-05 b4 = 2.9929485 E-05
 a7' = -1.4379251 E-04 b7 = 2.5080288 E-05
 c7 = -1.0286169 E-05

STANDARDS USED				
Description	Manufacturer	Model No.	Serial No.	Due Date
Thermometer, "Super Thermometer," 1 ppm	Hart Scientific	1590	8C031	11/15/2001
SPFT, Glass Sheath	Hart Scientific	5681	1247	04/20/2002

Laboratory Environment:

Temperature: 23°C

Humidity: 34%

Procedure: HSC106 Rev 2

Calibration Date: 10/19/2001

Calibration Due: 10/19/2002

PO Number: 01385

Report Number: A1A1902

Page: 1 of 5

Calibration: Performed by:

Monty Cook

• Mike Coleman
(801) 763-1600

Approved by:

John W. Smith

Thomas J. Wiandt
(801) 763-1600

ภาคผนวก ข

แบบประเมินอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบ
เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

แบบประเมินผู้เชี่ยวชาญประเมิน

แบบประเมินเรื่องการพัฒนาอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ แบบประเมินชุดนี้เป็นแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นมาเรื่องความเหมาะสมการใช้งาน

คำชี้แจงแบบประเมินชุดนี้แบ่งเป็น 2 ตอนคือ

ตอนที่ 1 วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

ตอนที่ 2 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 4 ด้านดังนี้

- 1 ด้านความปลอดภัย
- 2 ด้านโครงสร้าง
- 3 ด้านการใช้งาน
- 4 ด้านการบำรุงรักษา

1. วัตถุประสงค์ของแบบประเมิน

แบบประเมินชุดนี้สร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือประกอบในการวิจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิมีความเหมาะสมในด้านต่างๆ เพียงใด

2 ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 4 ด้าน กรุณาเขียนเครื่องหมาย X ลงในช่องมาตราส่วนการประเมินค่า 5 ระดับตามความคิดเห็นของท่านหลังจากทดสอบอ่วงควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลวที่ใช้ในงานสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ได้มีคะแนนกำหนดไว้ดังนี้

1. ระดับที่ 5 หมายถึง ผลประเมินระดับดีมาก
2. ระดับที่ 4 หมายถึง ผลประเมินระดับดี
3. ระดับที่ 3 หมายถึง ผลประเมินระดับปานกลาง
4. ระดับที่ 2 หมายถึง ผลประเมินระดับน้อย
5. ระดับที่ 1 หมายถึง ผลประเมินระดับน้อยมาก

แบบตรวจประเมินความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญการพัฒนาอย่างควบคุมอุณหภูมิแบบบรรจุของเหลว

ข้อที่	รายละเอียดการประเมิน	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	น้อย	น้อยมาก
ด้านความปลอดภัย						
1	มีระบบป้องกันถ้าเกิดระบบไฟฟ้าผิดปกติ					
2	มีระบบป้องกันอันตรายจากการใช้ไฟฟ้า					
3	มีการป้องกันอันตรายจากการสัมผัส					
ด้านโครงสร้าง						
4	สามารถถอดและแยกประกอบอุปกรณ์ของเครื่องได้					
5	ความแข็งแรงของโครงสร้าง					
6	การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม					
7	เครื่องมีขนาดกระทัดรัดเหมาะสม					
8	มีรูปทรงสวยงาม					
ด้านการใช้งาน						
9	ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องเหมาะสม					
10	ใช้เวลาในการตรวจสอบเหมาะสม					
11	ความสะดวกในการใช้งานของเครื่อง					
12	ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายของเครื่อง					
13	สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาเป็น อุตสาหกรรมได้					
ด้านการบำรุงรักษา						
14	เป็นอุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก					
15	การตรวจสอบและบำรุงรักษาเครื่องทำได้ง่าย					
16	ความสะดวกในการถอดแยกชิ้นส่วนอุปกรณ์					
17	มีจุดตรวจและซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ น้อย					

4. ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญ

.....

.....

.....

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล	นายธีระพงษ์ สมประจบ
วัน เดือน ปีเกิด	6 เมษายน 2507
สถานที่เกิด	24 ข 11 ถ.ประชาราษฎร์ สาย 1 ซ.อาทรอุปถัมภ์ แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ
ตำแหน่งที่ทำงานในปัจจุบัน	นักวิชาการ 6
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง ประเทศไทย เลขที่ 196 ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทร. 0-25791121-30 ต่อ 5216
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2527	ประกาศนียบัตรวิชาชีพช่างไฟฟ้ากำลังจากโรงเรียนไทยเทคโนโลยี
พ.ศ. 2530	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงไฟฟ้ากำลัง
พ.ศ. 2533	ปริญญาตรีคณะครุศาสตร์ไฟฟ้าจากสถาบันราชภัฏพระนคร
พ.ศ. 2547	กศ.ม.อุตสาหกรรมศึกษามหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ