



ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุผง
Design and Development of Thermal Conductivity Apparatus for Food Powder



โดย

นางสาว นารี คำจินะ

นางสาว ปิทยา นามวงศ์

วัน เดือน ปี.....	-4 คค 2541
เลขทะเบียน.....	038636
เลขเรียกหนังสือ.....	T 49052-47

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

๒๖

๒ ๖๗๗

๑ ๒๒๒
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038636

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

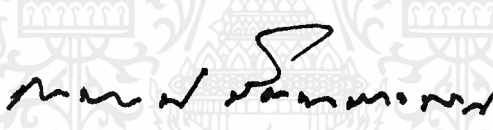
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุผง

Design and Development of Thermal Conductivity Apparatus for Food Powder

ผู้จัดทำ

1. นางสาว นารี คำจិនะ
2. นางสาว ปิติยา นามวงศ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาทิป รัตนภาสกร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารผง

โดย

นางสาว ปิศิยา นามวงศ์

นางสาว นารี คำจិនะ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาทิป รัตนภาสกร

บทคัดย่อ

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารผง โดยพัฒนาจากหลักการของ Metal surface guarded hot plate ซึ่งรายละเอียดวิธีเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM standard (1970) อุปกรณ์วัดประกอบด้วย

- 1) ชุดให้ความร้อนส่วนกลางทำด้วยฉนวนแผ่นไมก้า พื้นด้วยขดลวดไฟฟ้า แล้วประกอบด้วยแผ่นทองแดงขนาด 30 x 30 ตารางเซนติเมตร
- 2) ช่องใส่วัสดุผงทำด้วยอลูมิเนียมอยู่ด้านบนนอกวางห่างจากชุดให้ความร้อนส่วนกลางทั้ง 2 ด้าน ระยะห่างเป็น 15 เซนติเมตร
- 3) ชุดเทอร์โมคัปเปิล วัดอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างวัสดุผง ด้านที่ติดกับชุดให้ความร้อนส่วนกลาง และชุดระบายความร้อน
- 4) ชุดระบายความร้อนทำด้วยท่อทองแดงพันอยู่ด้านบนของช่องอาหารและมีปั๊มน้ำเย็นจากถังน้ำเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิ

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของข้าวเปลือกมีค่าเฉลี่ย 2.3-4.5 W/m^oC ในช่วงความชื้น 13.3%-35.0% สำหรับแป้งสาลีมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.1624-0.1729 W/m^oC ที่ความชื้น 10% ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาก ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมากตาม โดยที่ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากการทดลองมีค่าต่างจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มาจากการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทดลองในช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากการทดลองมีค่าต่างจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มาจากการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพิ่มมากตามด้วย

Design and Development of Thermal Conductivity Apparatus for Food powder

By

Miss Pitiya Namwong

Miss Naree Komjina

Adviser

Assi.Prof. Satip Ratanapasgorn

Abstract

Thermal conductivity apparatus for food powder was designed and developed from the principle of metal surface guarded hot plate. The detail was according to ASTM standard (1970). The instrument consists of

1. a heater made of mica , mounted by electric coil with $30*30 \text{ cm}^2$ copper plate ,
2. sample place having 15 c.m. spacing beside the heater ,
3. thermocouples located both side of sample place used to measure difference temperature and
4. cooling set composed of cooling tube, pump and water container.

The experiment found that thermal conductivity of paddy was average range 2.3-4.5 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ at average range 13.3%-35.0% moisture content. For wheat , thermal conductivity was average range 0.162-0.173 $\text{W/m}^\circ\text{C}$ at 10% moisture content . The test results shown that the values of thermal conductivity were increasing with increase in moisture content . Also , the results of thermal conductivity were calculated from mathematic models and compared with the tests . There were slightly difference at lower moistuer content. However , the difference was larger at higher moisture content.

(ก)
สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(ก)
สารบัญรูปภาพ	(ข)
สารบัญตาราง	(ค)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	3
การถ่ายเทความร้อน	3
ทฤษฎีทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน	4
การวัดค่าการนำความร้อน	9
การนำความร้อนในวัสดุอาหาร	11
ทฤษฎี Metal Surface Guarded Hot Plate	16
การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	19
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างเครื่อง	20
หลักการของชุดทดสอบ Metal Surface Guarded Hot Plate	20
ส่วนประกอบ	22
วิธีการทำงาน	27
การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	28
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	34
การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในอาหารผง	34
วัสดุอุปกรณ์	34
วิธีการทดลอง	34
ผลการทดลอง	35
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	

(ข)
สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	การนำความร้อนผ่านของแข็งหรือของเหลวตามกฎของฟูรีเยร์	3
2-2	การพาความร้อนจากบริเวณผิวไปยังของไหลที่เคลื่อนที่	4
2-3	แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบปิด	4
2-4	แสดงการไหลของความร้อนแบบการนำความร้อนใน 3 มิติผ่านปริมาตร เล็ก ๆ ของวัสดุแข็ง	6
2-5	แสดงการนำความร้อนผ่านแผ่นวัสดุ	8
2-6	แสดงลักษณะทั่วไปของ Metal Surface Guarded Hot Plate	9
2-7	คุณสมบัติทางความร้อนของอาหาร	12
2-8	เครื่องวัดค่าการนำความร้อนในผักและผลไม้	14
2-9	เครื่องวัดค่าการนำความร้อนในนมวัว	15
2-10	เครื่องวัดค่าการนำความร้อนในอาหารผง	16
2-11	แสดงลักษณะทั่วไปของการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	17
2-12	แสดงลักษณะของแผ่นให้ความร้อนตามแบบ Metal Surface Guarded Hot Plate	18
3-1	แสดงลักษณะทั่วไปของ Metal Surface Guarded Hot Plate	20
3-2	ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง	24
3-3	ชุดระบายความร้อน	25
3-4	แผนภาพเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	26
3-5	ฟังก์ควมคุม	27
3-6	โครงสร้างของเครื่องมือ	30
3-7	ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง	30
3-8	แผ่นระบายความร้อน	31
3-9	แสดงการหุ้มฉนวน	31
3-10	แสดงการหุ้มฉนวน	32

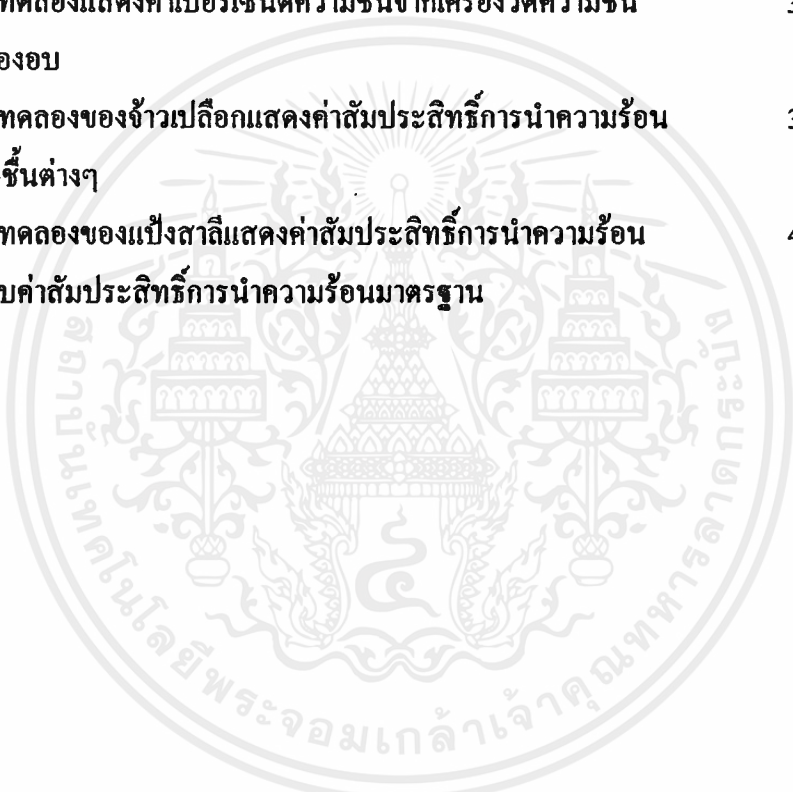
3-11	เครื่องมือวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	32
3-12	เครื่องวัดความชื้น	33
3-13	เครื่องอบแห้ง	33
กราฟรูปที่		
4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากเครื่องวัดความชื้น กับตุ๋อบของข้าวเปลือก	37
4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ของข้าวเปลือก	39
4-3	ความสัมพันธ์ของความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแป้งสาลี	41



(ค)

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	คุณสมบัติของวัสดุทดสอบ	13
4-1	ผลการทดลองแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากเครื่องวัดความชื้น กับเครื่องอบ	36
4-2	ผลการทดลองของจ้าวเปลือกแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ที่ความชื้นต่างๆ	38
4-3	ผลการทดลองของแป้งสาลีแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาตรฐาน	40



บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาระบบที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน นับว่ามีความสำคัญอย่างมากในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งในการศึกษาระบบดังกล่าวมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ คุณสมบัติของวัสดุซึ่งเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่มีผลต่อการกำหนดคุณสมบัติของระบบว่าเป็นระบบที่สามารถเก็บพลังงานความร้อน หรือเป็นระบบที่สามารถถ่ายเทพลังงานความร้อน ได้มากน้อยเพียงใด

เห็นได้ว่าวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในขบวนการผลิตมีค่าคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันไป ค่าการนำความร้อนเป็นข้อมูลพื้นฐานในวัสดุทั่วไป ดังนั้นการศึกษาดังกล่าว การนำความร้อนที่อาศัยการส่งถ่ายพลังงาน ที่มีผลสืบเนื่องมาจากการแตกต่างอุณหภูมิเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยรูปแบบของการนำความร้อน จะใช้สำหรับขบวนการถ่ายเทความร้อนในตัวกลางที่อยู่กับที่ โดยอาจเป็นของแข็งหรือของไหล

โครงการนี้การศึกษา และพิจารณาออกแบบสร้างเครื่องมือเพื่อใช้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุผงหรือวัสดุเม็ดเล็กๆ ที่ใช้วิธีให้ความร้อนบริเวณส่วนกลาง แล้วหาอุณหภูมิความแตกต่าง จากนั้นนำไปหาสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุผงและวัสดุเม็ดเล็กๆที่มีการนำความร้อนต่ำ

วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 3 ประการคือ

1. ศึกษาและออกแบบสร้างชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในวัสดุผง เช่น แป้ง นมผง และวัสดุเม็ดเล็กๆ เช่น ข้าวเปลือก
2. เพื่อใช้เป็นเครื่องมือทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุตัวอย่าง
3. เป็นการประยุกต์ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนมาใช้งานจริง

ขอบเขตของโครงการ

ขอบเขตของโครงการที่จัดทำขึ้น ประกอบด้วย

1. การสร้างชุดทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุผงและวัสดุเม็ดเล็ก ๆ
2. ทดสอบหาค่าการนำความร้อนของวัสดุผงและวัสดุเม็ดเล็ก ๆ
3. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

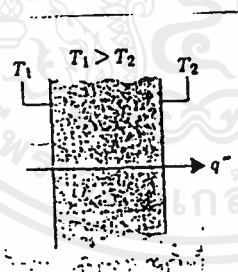
บทที่ 2

การพาความร้อน

2.1 การถ่ายเทความร้อน คือการส่งถ่ายพลังงานซึ่งมีผลเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อนระหว่างจุด 2 จุด สามารถเกิดขึ้นได้ ณ จุด 2 จุดนั้นมีอุณหภูมิต่างกัน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ

1. การนำความร้อน (conduction)
2. การพาความร้อน (convection)
3. การแผ่รังสี (radiation)

2.1.1 การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนในตัวกลางที่อยู่กับที่ ซึ่งอาจเป็นของไหล หรือของแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อนในตัวกลาง x จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในทิศทาง x ค่า k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยค่าของมันขึ้นอยู่กับวัสดุที่ไร้ทำผนัง เครื่องหมายลบในสมการเป็นเพราะความร้อนจะต้องถ่ายเทในทิศทางที่อุณหภูมิลดลงเสมอ ตามกฎของฟูเรียร์ คือ $Q_k = -kadt/dx$



รูปที่ 2-1 การนำความร้อนผ่านของแข็งหรือของเหลว

2.1.2 การพาความร้อน

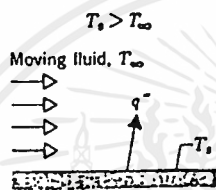
เป็นการถ่ายเทความร้อนซึ่งมักจะเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของของไหลกับวัสดุ สามารถแบ่งประเภทการพาความร้อนได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

1) การพาความร้อนแบบบังคับ (forced Convection) เมื่อการไหลมีสาเหตุมาจากการกระทำภายนอก เช่น พัดลม

2) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural หรือ Free Convection) การเคลื่อนที่ของของไหลมีสาเหตุเนื่องมาจากแรงลอยตัวของไหล เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นซึ่งเกิดเนื่องจากมีความแตกต่างอุณหภูมิในของไหล

อัตราการพาความร้อน (Q_c) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงที่ผิวสัมผัส (A) และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ (T_s) กับอุณหภูมิที่ผิวของของไหล (T_f) และมีค่าคงที่ (h_c) เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัสดุ ดังสมการของนิวตัน

$$Q_c = h_c A (T_s - T_f)$$



รูปที่ 2-2 การพาความร้อนจากบริเวณผิว ไปยังของไหลที่เคลื่อนที่

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

สามารถเกิดขึ้นได้ไม่ว่าสารจะมีสถานะใดก็ตาม เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ

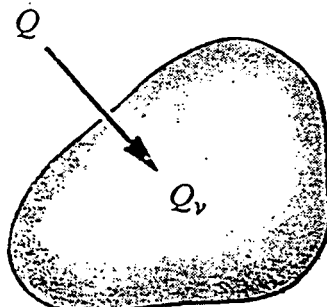
อิเลคตรอนในอะตอมของสาร หลังงานของการแผ่รังสี จะถูกส่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุทั่วไป (Q_r) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของการแผ่รังสี (A) และอุณหภูมิสมบูรณ์ยกกำลัง 4 ของอุณหภูมิระหว่างวัตถุทั้ง 2 ที่แลกเปลี่ยนความร้อนกัน โดยมีค่าคงที่เป็น ค่าคงที่ของสเตฟาน-บอลท์แมน (σ) และค่าการแผ่รังสีของวัตถุเทา (ϵ_r) ดังสมการ

$$Q_r = \sigma \epsilon_r A (T_1^4 - T_2^4)$$

2.2 ทฤษฎีทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน

2.2.1 ทฤษฎีทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์

ขอบเขตระบบ



รูปที่ 2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบปิด คือระบบที่ไม่มีการถ่ายเทมวลผ่านเข้าหรือออกจากระบบ มีเพียงการถ่ายเทพลังงานในรูปของความร้อนและงานเท่านั้น หรือสมมติให้ระบบไม่เกิดผลกระทบเนื่องจากแรงดึงดูด หรือการเคลื่อนที่ใดๆ ดังนั้นจึงพิจารณาระบบ โดยไม่คิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ของระบบ

รูปที่ 2-3 พิจารณาระบบเป็นระบบปิด ซึ่งเป็นวัตถุแข็ง ที่มีปริมาตร $V[m^3]$ และความหนาแน่น $\rho[kg/m^3]$ มีความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ระบบด้วยอัตรา $Q [W]$ และมีการผลิตความร้อนภายในระบบด้วยอัตรา $Q_v [W]$ และถือว่าวัตถุแข็งนี้เป็นสารที่อัดตัวไม่ได้ จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิก

$$\left| \begin{array}{l} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{พลังงานภายในของระบบ} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{อัตราการถ่ายเทความร้อน} \\ \text{ผ่านระบบ} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{อัตราการผลิต} \\ \text{ความร้อนภายในระบบ} \end{array} \right|$$

$$dU/dt = Q + Q_v \quad (2.1)$$

โดย

$$dU = m \cdot du = \rho V \cdot du$$

เมื่อ u คือ พลังงานภายในจำเพาะสำหรับสารที่อัดตัวไม่ได้

$$du = C_v \cdot dT$$

$$C_v = C_p = C$$

เมื่อ C คือ ความร้อนจำเพาะ

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของระบบที่มีความดันคงที่

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของระบบที่มีปริมาตรคงที่
ดังนั้นจะได้

$$\rho V C \cdot dT/dt = Q + Q_v \quad (2.2)$$

2.2.1 ทฤษฎีด้านการถ่ายเทความร้อน

การนำความร้อน (Heat Conduction)

การนำความร้อนเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนวิธีหนึ่ง โดยพลังงานความร้อน จะเกิดการแลกเปลี่ยนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

กฎเกี่ยวกับการนำความร้อนมีอยู่ว่า “อัตราการไหลของความร้อนแบบการนำความร้อน จะแปรผันตรงกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในทิศทางนั้น “ ดังสมการ

$$Q_x = -kA \cdot dT/dx$$

$$q_x = Q_x/A = -k \cdot dT/dx \quad (2.3)$$

โดย Q_x คือ อัตราการไหลของความร้อนในทิศทาง $+x$ หน่วย W

q_x คือ อัตราการไหลของความร้อนต่อพื้นที่ในทิศทาง $+x$ หน่วย W/m^2

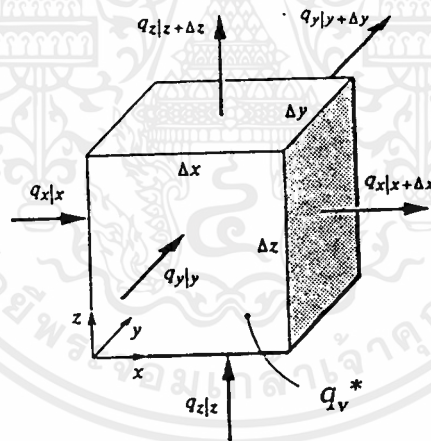
k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หน่วย $W/m \cdot K$

A คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน หน่วย m^2

dT/dx คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน ซึ่งมีค่าเป็น

ลบเสมอ หน่วย K/m

จะเห็นได้ว่า Q_x ในสมการที่ 2 - 3 ก็คือ Q_x ที่อธิบายไว้ในบทนำนั่นเอง แต่เป็นอัตราการนำความร้อนในทิศทางการไหล x สมการนำความร้อน



รูปที่ 2 - 4 แสดงการไหลของความร้อนแบบการนำความร้อนใน 3 มิติ ผ่านปริมาตรเล็ก ๆ ของวัสดุแข็ง

พิจารณารูปที่ 2-4 แสดงอัตราการไหลของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ผ่านปริมาตรเล็ก ๆ ที่มีขนาดเท่ากับ $\Delta x \Delta y \Delta z$ ซึ่ง อัตราการไหลของความร้อน ไหลผ่านปริมาตรเล็ก ๆ นี้ทั้ง 3 มิติคือ แกน X แกน Y แกน Z

เราสามารถหาสมการอนุรักษ์พลังงานของปริมาตรเล็ก ๆ นี้ได้ จากสมการที่ 2-2

$$\rho V C \cdot dT/dt = Q + Q_v$$

$$\text{จะได้} \quad \rho(\Delta x \Delta y \Delta z) C \cdot dT/dt = Q + Q_v \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาทอม Q ซึ่งก็คืออัตราการนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็ก ๆ นี้ โดยมีการนำความร้อนทั้ง 3 มิติ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น อัตราการนำความร้อนผ่านเข้าและอัตราการนำความร้อนออกจากปริมาตรเล็ก ๆ นี้

เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่าย จะขออธิบายอักษรห้อยในรูปที่ 2-2 คือ $q_{x/x}$ หมายถึง อัตราการนำความร้อนในทิศทาง X ผ่านพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ซึ่งก็คือ $\Delta y \Delta z$ ณ ตำแหน่ง X ส่วน $q_{x/x+\Delta x}$ ก็คืออัตราการนำความร้อนแบบเดียวกัน แต่ ณ ตำแหน่ง $X+\Delta x$ อัตราการนำความร้อนผ่านเข้าสู่ปริมาตรเล็ก ๆ ได้แก่

$$\begin{aligned} Q_{x/x} &= q_{x/x}(\Delta y \Delta z) \\ Q_{y/y} &= q_{y/y}(\Delta z \Delta x) \\ Q_{z/z} &= q_{z/z}(\Delta x \Delta y) \end{aligned} \quad (2.5)$$

อัตราการนำความร้อนจากปริมาตรเล็ก ๆ สามารถหาได้จากการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ โดยตัดส่วนอนุพันธ์กำลังสูงทิ้ง ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{x/x+\Delta x} &= q_{x/x} + \Delta x(\Delta y \Delta z) = (q_{x/x} + \partial q_x / \partial x \cdot \Delta x) \Delta y \Delta z \\ Q_{y/y+\Delta y} &= q_{y/y} + \Delta y(\Delta z \Delta x) = (q_{y/y} + \partial q_y / \partial y \cdot \Delta y) \Delta z \Delta x \\ Q_{z/z+\Delta z} &= q_{z/z} + \Delta z(\Delta x \Delta y) = (q_{z/z} + \partial q_z / \partial z \cdot \Delta z) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะสามารถหาอัตราการนำความร้อนสุทธิที่ไหลผ่านปริมาตรเล็ก ๆ นี้ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_x &= Q_{x/x} - Q_{x/x+\Delta x} = -\partial q_x / \partial x \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \\ Q_y &= Q_{y/y} - Q_{y/y+\Delta y} = -\partial q_y / \partial y \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \\ Q_z &= Q_{z/z} - Q_{z/z+\Delta z} = -\partial q_z / \partial z \cdot \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการ 2-7 เราสามารถหาสมการของการนำความร้อนที่ไหลผ่านปริมาตรเล็ก ๆ นี้ใน 3 มิติได้ โดยแทนอัตราการนำความร้อนผ่านปริมาตรเล็ก ๆ ในแต่ละแกนลงไป จะได้

$$\rho(\Delta x \Delta y \Delta z) C \cdot dT/dt = (-\partial q_x / \partial x - \partial q_y / \partial y - \partial q_z / \partial z) \Delta x \Delta y \Delta z + Q_v \quad (2.8)$$

หารสมการ 2-8 ตลอดด้วย $\Delta x \Delta y \Delta z$ และให้ q_v^* แทนอัตราการผลิตความร้อนภายในปริมาตรต่อ 1 หน่วยปริมาตรจะได้

$$\rho C \cdot dT/dt = -\partial q_x / \partial x - \partial q_y / \partial y - \partial q_z / \partial z + q_v^* \quad (2.9)$$

จากสมการของฟูเรียร์ จะได้อัตราการนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในแต่ละแนวดังนี้

$$\begin{aligned} q_x &= -k \cdot dT/dx \\ q_y &= -k \cdot dT/dy \\ q_z &= -k \cdot dT/dz \end{aligned} \quad (2.10)$$

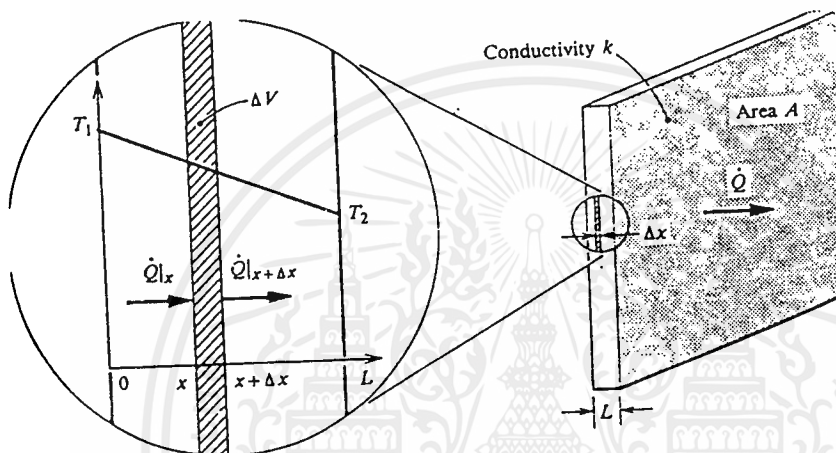
แทนสมการ 2-10 ลงในสมการ 2-9 จะได้

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + qv^* \quad (2.11)$$

กำหนดให้ $\alpha = k/\rho C_p$ มีหน่วย m^2/s ดังนั้นจะได้สมการของการนำความร้อนใน 3 มิติคือ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + qv^*/k = 1/\alpha \cdot dT/dt \quad (2.12)$$

การนำความร้อนผ่านแผ่นวัตถุแข็งมิติเดียวในสภาวะคงตัว



รูปที่ 2-5 แสดงการนำความร้อนผ่านแผ่นวัตถุ

พิจารณาให้มีการไหลของความร้อนแบบการนำความร้อนในทิศทาง X เท่านั้น และอุณหภูมิภายในวัตถุแข็งไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาหรือถือว่าเป็นสภาวะคงตัว และไม่มีการผลิตความร้อนภายในวัตถุนี้ด้วย จากสมการที่ 2-12 จะได้

$$d^2T(x)/dx^2 = 0$$

$$dT(x)/dx = C_1$$

$$T(x) = C_1x + C_2$$

และมีเงื่อนไขที่ขอบเป็น

$$T(0) = T_1$$

$$T(L) = T_2$$

แทนเงื่อนไขที่ขอบจะได้

$$T_1 = C_1(0) + C_2$$

$$C_2 = T_1$$

และ

$$T_2 = C_1(L) + C_2$$

$$C_1 = (T_2 - T_1)/L$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$T(x) = (T_2 - T_1)x/L + T_1 \quad (2.13)$$

เราสามารถหาอัตราการนำความร้อนได้จากสมการของฟูเรียร์

$$Q = -kA \cdot dT/dx$$

โดยการแทนการกระจายของอุณหภูมิตามสมการที่ 2-13 จะได้

$$Q = -kA \cdot d[(T_2 - T_1)x/L + T_1] / dx$$

$$Q = -kA(T_2 - T_1)/L \quad (2-14)$$

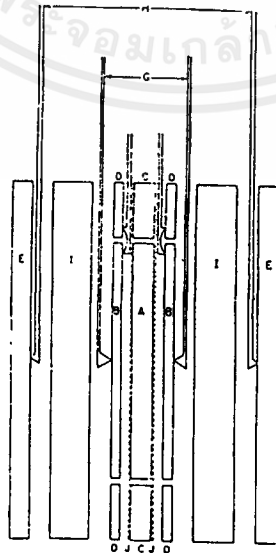
เราสามารถใส่สมการ 2-14 ในการหาอัตราการนำความร้อนผ่านแผ่นวัตถุแข็งในมิติเดียว

2.3 การวัดค่าการนำความร้อน

วิธีการวัดค่าการนำความร้อนสามารถวัดได้ในช่วงสภาวะ 2 สภาวะกว้าง ๆ คือ สภาวะคงตัว (STEADY-STATE CONDITION) และสภาวะไม่คงที่ (TRANSIENT STATE)

วิธีการวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุอาหารภายใต้ 2 สภาวะนี้ แบ่งได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะในช่วงสภาวะคงตัว

2.3.1 วิธี Steady-State Longitudinal Heat Flow Guarded Hot Plate วิธีนี้ถือว่าเป็นวิธีวัดค่าการนำความร้อนที่ถูกต้องและนิยมใช้มากที่สุดในการวัดวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งรายละเอียดวิธีการเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM Standard C-177(1970) ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รูปที่ 2-6 ลักษณะทั่วไปของ Metal Surface Guarded Hot Plate ที่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย

- A คือ ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง
 B คือ ส่วนของวัสดุที่ใช้เป็นผิวหน้าของชุดให้ความร้อนส่วนกลาง
 C คือ ชุดให้ความร้อนส่วนนอก
 D คือ ส่วนของวัสดุที่ใช้เป็นผิวหน้าของชุดให้ความร้อนในส่วนนอก
 E คือ ชุดระบายความร้อน
 ES คือ ส่วนของวัสดุที่ใช้เป็นผิวหน้าของชุดระบายความร้อน
 G คือ ชุดของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิของผิวหน้าของชุดให้ความร้อน
 H คือ ชุดของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิของผิวหน้าของชุดระบายความร้อน
 I คือ ชั้นของวัสดุที่ใช้ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
 สามารถคำนวณค่าการนำความร้อนได้ดังนี้
- $$K = qd/2.A.\Delta t \quad (2-15)$$
- d คือ ความหนาของวัสดุทดสอบ
 q คือ อัตราความร้อนที่ใช้
 A คือ พื้นที่ของวัสดุทดสอบ
 Δt คือ อุณหภูมิที่แตกต่างกันของวัสดุทดสอบระหว่างผิวหน้าที่ความร้อนไหล

ผ่าน

2.3.2 วิธี Steady - State Radial Heat Flow

Cylinder Without End Guards อุปกรณ์มีลักษณะเป็นท่อยาวโดยสมมติว่ามีความยาวไม่จำกัด ค่าความสูญเสียเนื่องจากความยาวไม่นำมาคิด แหล่งให้ความร้อนบริเวณกลางของอุปกรณ์วัดจะให้ความร้อนผ่านวัสดุทดสอบและ ค่าการนำความร้อนคำนวณได้จาก

$$K = \frac{p \cdot \ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot L \cdot (t_1 - t_2)}$$

P คือ กำลังความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนบริเวณกลางของอุปกรณ์วัด

L คือ ความยาวของอุปกรณ์วัด

t_1 คือ อุณหภูมิที่ r_1

t_2 คือ อุณหภูมิที่ r_2

วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีค่าความผิดพลาดซึ่งเป็นผลจากความร้อนรอบแกนน้อยมาก ตามมาตรฐาน ASTM C - 355 (1970) มีวิธีการหาค่าการนำความร้อนของท่อที่มีฉนวนกันความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้เหมือนกับวิธี Cylinder without End Guards.

ในกรณีนี้วัสดุทดสอบล้อมรอบแหล่งให้ความร้อนอย่างสมบูรณ์ ทำให้ไม่เกิดค่าความสูญเสียความร้อน (the end losses) เลข สมมติว่าพื้นที่ผิวของแหล่งให้ความร้อนตรงกลางมีระยะทาง r_1 และพื้นที่ผิวภายนอกของวัสดุทดสอบคือ r_2 ณ อุณหภูมิเดียวกัน หลังจากเกิดสภาวะคงที่ (Steady State) ความร้อนจะส่งผ่านรอบ สามารถคำนวณค่าการนำความร้อนได้ดังนี้

$$K = \frac{p(1/r_1 - 1/r_2)}{4\pi(t_1 - t_2)} \quad (2-16)$$

2.3.3 วิธี Steady - State Heat of Vaporization

วิธีนี้ใช้วัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อยวางระหว่างแผ่นเงิน 2 แผ่น โดยแผ่นหนึ่งเชื่อมติดกับของเหลวที่ร้อน ณ จุด A ขณะที่อีกแผ่นต่อกับของเหลว ณ จุด B ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุด A ความร้อนไหลผ่านจากจุด A ไปยังจุด B ค่าการนำความร้อนคำนวณได้จาก

$$K = \frac{Q}{\theta} (t_A - t_B) \frac{L}{A} \quad (2-17)$$

Q คือ ค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยของเหลว ณ จุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า

θ คือ เวลาที่ใช้ในการระเหยของเหลว B

t_A, t_B คือ อุณหภูมิ ณ จุด A และ B

L คือ ความหนาของวัสดุทดสอบ

A คือ พื้นที่ของวัสดุทดสอบ

2.4 การนำความร้อนในวัสดุอาหาร

2.4.1 รัญพิช ในการเก็บรักษารัญพิชความชื้นสูง นักวิจัยวัดค่าการนำความร้อนของรัญพิช โดยใช้สภาวะคงตัวและอุปกรณ์แบบท่อ 2 ท่อซ้อนกัน อุปกรณ์วัดค่าบรรจุวัสดุทดสอบระหว่างท่อทั้งสองน้ำแข็งถูกบรรจุภายในท่อ นำท่อวางในอ่างน้ำร้อน วิธีนี้ใช้หาค่าการนำความร้อนของวัสดุที่เป็นฉนวน

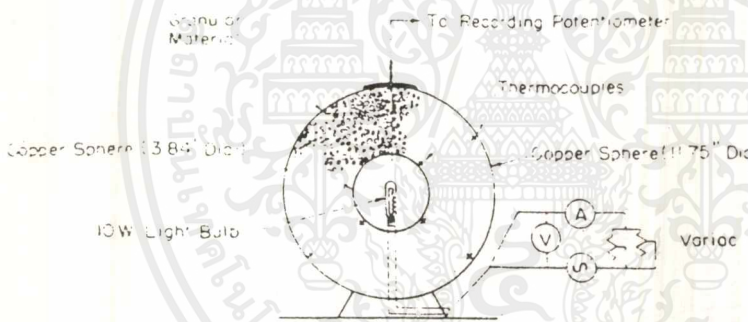
การวัดปริมาณน้ำแข็งที่ละลายระหว่างการศึกษาและความร้อนที่แพร่
ในน้ำแข็ง ค่าอัตราความร้อน (q , heat flow) ถูกวัดสำหรับช่วงเวลาหนึ่ง (θ) ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิว (t) ความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ (X) และพื้นที่ผิวของวัสดุ
ทดสอบ (A) เป็นไปตามสมการ

$$q = kA \cdot dt/dx$$

เพื่อหาค่า k

$$k = \frac{qdx}{A dt} \quad (2-18)$$

ต่อมาได้มีการปรับปรุงโดยใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะกลม 2 อันซ้อนกัน แหล่งความร้อนวาง
ภายในอุปกรณ์กลมอันเล็ก ใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิภายนอกของอุปกรณ์อันเล็กและ
ภายในอุปกรณ์กลมอันใหญ่ วัสดุทดสอบถูกวางภายในที่ระหว่างท่อทั้งสอง ดังรูป



รูปที่ 2-7 คุณสมบัติทางความร้อนของอาหาร

สามารถคำนวณค่าการนำความร้อนได้จาก

$$q = -k \cdot A \cdot dt/dx$$

สำหรับทรงกลม

$$q = -k \cdot A \cdot dt/dr$$

$$= -k(4\pi r^2) \cdot dt/dr$$

จัดรูปสมการเพื่อหาค่า K จะได้ว่า

$$K = \frac{q \cdot (r_2 - r_1)}{4\pi (r_2 r_1) (t_1 - t_2)} \quad (2-14)$$

2.2.4 ผัก ผลไม้ การหาค่าการนำความร้อนในผักและผลไม้ โดยนักวิจัย Gane (1937) โดยใช้ทดลองกับวัสดุทดสอบที่ค่อนข้างกลม ใช้เทอร์โมคัปเปิล 2 อัน อันหนึ่งวัดที่ผิวนอกและอีกอันใช้วัดที่ตรงกลางของวัสดุทดสอบ

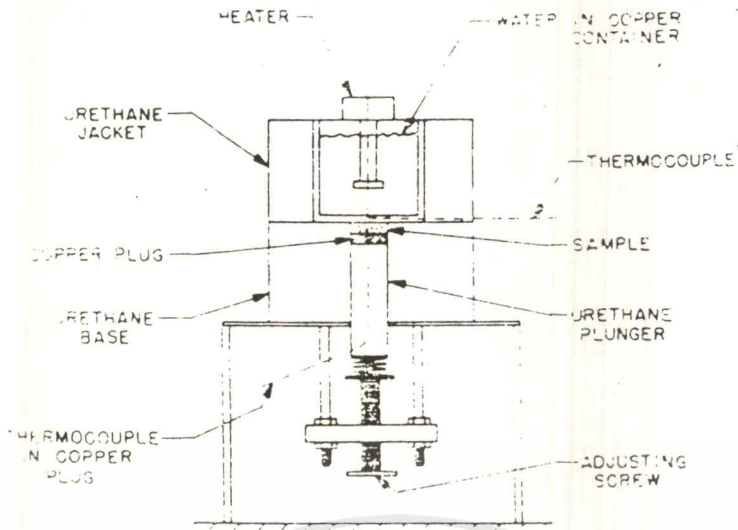
เริ่มแรก นำวัสดุทดสอบเก็บที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปทำให้เย็นอาจจะโดยวิธีใช้อากาศอาศัยกระแสลมเท่านั้น หรือวิธีจุ่มลงในอ่างที่ใส่พาราฟินอย่างรวดเร็ว ได้ผลดังตาราง

วัสดุทดสอบ	ค่าการกระจายความร้อน thermal diffusivity m / hr	ค่าการนำความร้อน thermal conductivity W/m ^o C
แอปเปิล	0.00149	0.42
ส้ม	0.00149	0.42
องุ่น	0.00143	0.40
ผลไม้จำพวกแดง 1	0.00155	0.50
2	0.00122	0.47
3	0.00131	0.52
4	0.00122	0.50

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของวัสดุทดสอบ

โดยใช้ค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.9 วัดค่าความหนาแน่นสามารถคำนวณค่าการนำความร้อน จากค่าการกระจายความร้อน

เมื่อมีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีของการวัดค่าการนำความร้อนในผักและผลไม้มากขึ้น Bennett et al. (1962) ได้เสนอรูปแบบที่ได้รับการปรับปรุงของอุปกรณ์วัดดังกล่าว



รูปที่ 2-8 เครื่องวัดค่าการนำความร้อนในผักและผลไม้

วัสดุทดสอบวางไว้ระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและ ส่วนระบายความร้อน แหล่งกำเนิดความร้อนประกอบด้วยจุกทองแดงที่ถูกทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ โดยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ด้วยหน่วยควบคุมอุณหภูมิที่ไม่ได้แสดงไว้ ณ ที่นี้ น้ำถูกกวนด้วยส่วนมีวงกลมเล็ก ๆ ซึ่งใช้ความร้อนแล้วบริเวณด้านล่างของตู้ทองแดงจะรักษาอุณหภูมิให้คงที่ t_1 , t_2

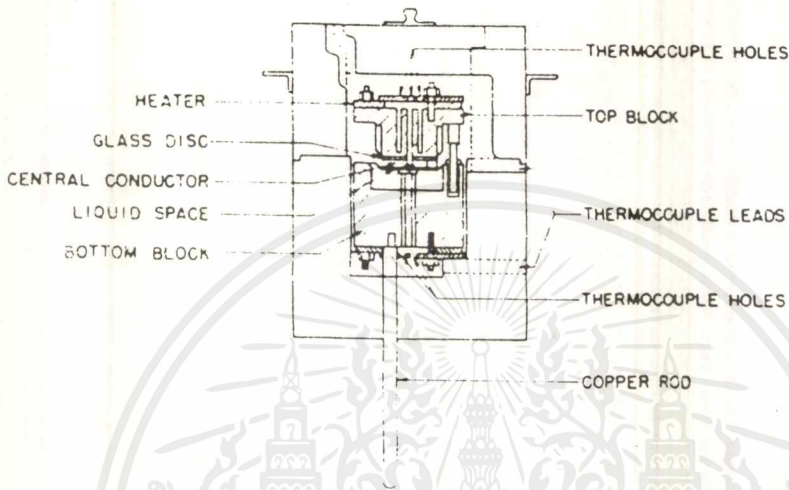
ซึ่งถูกวัดโดยเทอร์โมคัปเปิล สามารถหาค่าการนำความร้อนได้จาก

$$\frac{kA}{L} (t_A - t_B) = wC \frac{dt}{d\theta} \quad (2-20)$$

- K คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุทดสอบ
A คือ พื้นที่วัสดุทดสอบ
 t_A คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อน
 t_B คือ อุณหภูมิตรงกลางของจุกทองแดง (copper plug)
L คือ ความหนาของวัสดุทดสอบ
w คือ น้ำหนักของจุกทองแดง
C คือ ความร้อนจำเพาะของจุกทองแดง
 $d\theta$ คือ ความแตกต่างของของเหลว
dt คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิ
 θ คือ เวลา

2.4.3 นม

Spells (1960) รายงานการวัดค่าการนำความร้อนของนมวัว ซึ่งวิธีของเขาประกอบด้วย การหาค่าสัดส่วนของความแตกต่างอุณหภูมิของงานแก้วและผิวหน้าของของเหลว เมื่อความร้อนไหลผ่านภายใต้สภาวะ steady state ดังรูป



รูปที่ 2-9 เครื่องวัดค่าการนำความร้อนในนมวัว

แสดงส่วนประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์วัด ใช้ความร้อน 400 วัตต์ ซึ่งจะไหลผ่านจากแหล่งกำเนิดความร้อนสู่ท่อทองแดง เราสามารถคำนวณหาค่าการนำความร้อนได้จาก

$$k = \frac{A \cdot B}{R \cdot I} \quad (2-21)$$

A, B คือ ค่าคงที่

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อน

R คือ อัตราส่วน $(t_1 - t_3)/(t_1 - t_2)$

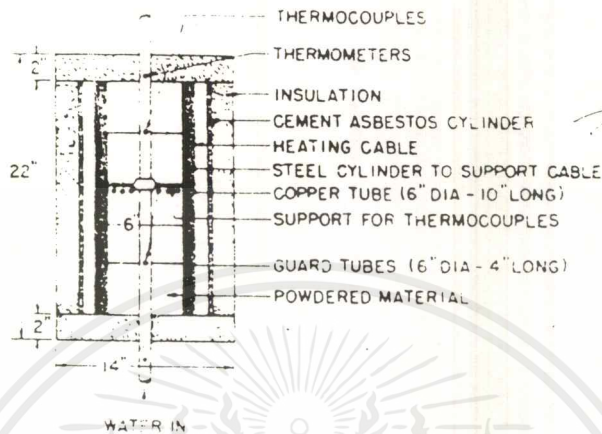
t_1 คือ อุณหภูมิของ Top Block

t_2 คือ อุณหภูมิของ Control Conductor

t_3 คือ อุณหภูมิของ Bottom Block

2.2.4 วัสดุผง

ในส่วนที่ต้องการศึกษา คือ การวัดค่าการนำความร้อนในอาหารผง ค่าการนำความร้อนของอาหารผงชนิดต่าง ๆ ที่รู้ค่าความชื้นจำเพาะและส่วนประกอบ จะถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่องดังรูป



รูปที่ 2-10 เครื่องวัดค่าการนำความร้อนในอาหารผง

เพื่อที่จะลดเวลาที่ต้องการให้เข้าสู่สภาวะ steady state ขดลวดความร้อนต้องผลิตความร้อนสูงที่เพียงพอ หลังจากนั้น 2 - 3 ชั่วโมง เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จึงทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านท่อคอนดักชันและคอนเพลกซ์รวมถึงวัฏจักรการไหลของน้ำด้วย ความร้อนจะส่งผ่านจากที่อุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นำความรู้ทางด้านเรขาคณิตของระบบ และใช้กำลังงานไฟฟ้ามาสร้างเครื่องทำความร้อนบริเวณส่วนกลาง อาจใช้ขดลวดสร้างความร้อนโดยตรง หรืออาจใช้ขดลวดผ่านน้ำให้เป็นน้ำร้อนก็ได้ โดยคิดเมื่ออยู่ในสภาวะยคงตัว ความร้อนไหลทางรัศมีในท่อยาว และไม่มีฉนวนกันความร้อนบริเวณส่วนท้าย

2.5 ทฤษฎีของ Metal Surface Guarded Hot Plate

การคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนของวัสดุใด ๆ นั้น ฟูเรียร์ (Fourier) แสดงความสัมพันธ์ไว้เป็นสูตร ดังนี้

$$Q = -kA \cdot \partial T / \partial X \quad (2-22)$$

สมการของฟูเรียร์นี้สามารถนำมาใช้ในการหาอัตราการนำความร้อนผ่านในมิติเดียวได้ ซึ่งสามารถเขียนใหม่ โดยให้ T_1 เป็นอุณหภูมิของผิววัสดุด้านร้อน (T_h) และให้ T_2 เป็นอุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านเย็น (T_c) ดังนี้

$$Q = kA \cdot (T_h - T_c) / L \quad (2-23)$$

เมื่อ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน, วัตต์

A = พื้นที่ผิววัสดุ, ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_h = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านร้อน, องศาเซลเซียส หรือเคลวิน

T_c = อุณหภูมิที่ผิววัสดุด้านเย็น, องศาเซลเซียส หรือเคลวิน

L = ความหนาวัสดุ, เมตร

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ, วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุหนึ่ง ๆ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง คือ ความดันที่วัสดุได้รับ และอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ เมื่อความดันอยู่ในขั้นปานกลาง ผลของความดันต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีน้อยจนตัดทิ้งได้ แต่สำหรับอุณหภูมินั้นมีผลมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

กฎของฟูเรียร์นั้นใช้เมื่อการนำความร้อนดำเนินไปในทิศทางเดียว คือ ตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของวัสดุ นั่นคือ มีสมมุติฐานว่าพื้นที่ผิวของวัสดุนั้นใหญ่จนไม่มีผลจากสภาพด้านข้างของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อนำกฎของฟูเรียร์มาใช้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงมีความผิดพลาดเล็กน้อย แต่เพื่อความสะดวกในการทดลองจึงมักใช้กฎของฟูเรียร์หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดย

$$k = \frac{QL}{A(T_h - T_c)} \quad (2-24)$$

ในการทดลองนั้นสามารถหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ทดลองได้เนื่องจากสภาพด้านข้างของวัสดุได้หลายวิธี วิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายให้ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อนที่ถูกต้องและเหมาะสมในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน คือ วิธี Metal Surface Guarded Hot Plate

2.5.1 วิธีการของ Metal Surface Guarded Hot Plate

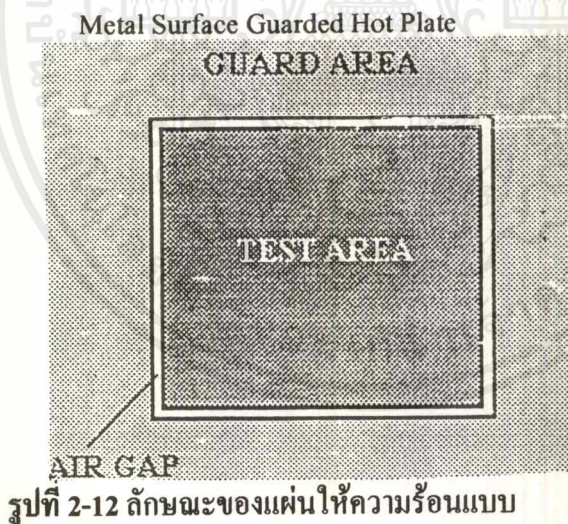
C		H		C
O		O		O
L	S	T	S	L
D	P		P	D
	E		E	
P	C	P	C	P
L	I	L	I	L
A	M	A	M	A
T	E	T	E	T
E	N	E	N	E

รูปที่ 2-11 แสดงลักษณะทั่วไปของการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำ

ความร้อน

ลักษณะทั่วไปของการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแสดงไว้ในรูปประกอบด้วยแผ่นให้ความร้อนทำด้วยโลหะซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เช่น ทองแดง หรืออลูมิเนียม ภายในแผ่นให้ความร้อนเป็นขดลวดความร้อนควบคุมอุณหภูมิได้ โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด วัสดุสำหรับทดลองสองแผ่นวางประกบเข้ากับแผ่นให้ความร้อนด้านละแผ่น วัสดุทั้งสองแผ่นต้องมีลักษณะเหมือนกันมากที่สุด ทั้งความกว้าง ความยาวและความหนา ด้านนอกสุดเป็นแผ่นระบายความร้อนทำด้วยโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงเช่นเดียวกับแผ่นระบายความร้อนและถูกหล่อด้วยน้ำเย็น เพื่อให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจอบแผ่นให้ความร้อน ความร้อนส่วนใหญ่จากแผ่นให้ความร้อนจะถ่ายเทด้วยการนำความร้อนมาสู่แผ่นให้ความร้อน ความร้อนบางส่วนจะถ่ายเทออกทางด้านข้างของแผ่นให้ความร้อนและด้านข้างของวัสดุ

การถ่ายเทความร้อนทางด้านข้างนี้ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิมระหว่งแผ่นให้ความร้อนและแผ่นระบายความร้อนต่ำกว่าที่ควร ดังนั้นเมื่อใช้สมการ ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงเกินกว่าความเป็นจริง เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับความจริงยิ่งขึ้น ต้องลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกทางด้านข้างนี้ วิธีง่าย ๆ วิธีหนึ่งก็คือการใช้ฉนวนหุ้ม



Metal Surface Guarded Hot Plate

Metal Surface Guarded Hot Plate Method มีลักษณะการทดลองทั่วไปเช่นเดียวกับรูปข้างบน แสดงแผ่นให้ความร้อนแบบ Metal Surface Guarded Hot Plate ซึ่งมีแผ่นให้ความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิ โดยการควบคุมอุณหภูมิให้ ความร้อนทั้งหมดผ่านวัสดุส่วนใน ไปสู่แผ่นระบายความร้อน ดังนั้นโดยการแทนค่าพื้นที่ของแผ่นให้ความร้อนชุดใน อุณหภูมิแตกต่างของผิวทั้งสองของวัสดุส่วนใน และอัตราความร้อนของแผ่นให้ความร้อนลงในสมการ ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.6 การคำนวณค่าการนำความร้อนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
Miles et al. (1983) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้คำนวณ
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุอาหารดังนี้

2.6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแบบขนาน

มีสมการดังนี้

$$k = V_s k_s + V_w k_w \quad (2-25)$$

V_s คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

V_w คือ อัตราส่วนเชิงปริมาตรของน้ำ

k_s คือ ค่าคงที่ของของแข็ง มีค่าเท่ากับ 0.26

k_w คือ ค่าคงที่ของน้ำ มีค่าเท่ากับ 0.6

2.6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแบบอนุกรม

มีสมการดังนี้

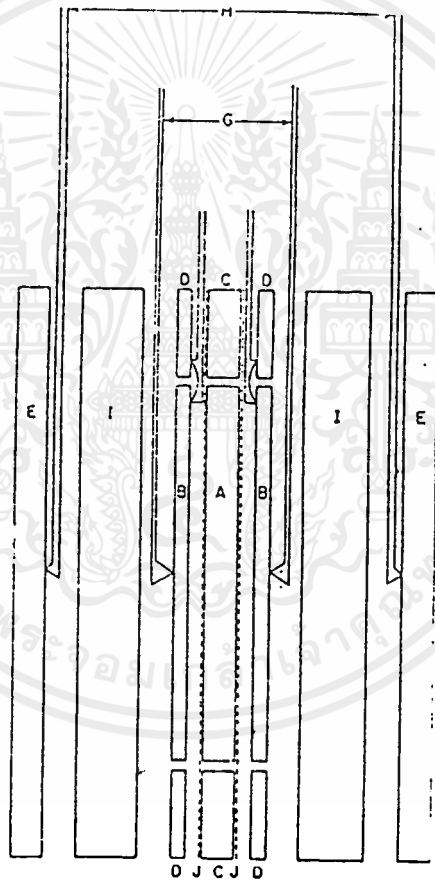
$$\frac{1}{k} = \frac{V_s}{k_s} + \frac{V_w}{k_w} \quad (2-26)$$

บทที่ 3

การออกแบบและสร้างเครื่อง

3.1 หลักการของชุดทดสอบ Metal surface Guarded Hot Plate

เป็นชุดทดสอบที่ใช้เพื่อวัดและทดสอบ วัสดุในด้านความร้อนและการระบายความร้อน



รูปที่ 3-1 แสดงลักษณะทั่วไปของ Metal Surface Guarded Hot Plate

อุปกรณ์ดังแสดงในรูป ในชุดให้ความร้อนส่วนกลาง โดยปกติแล้วทำด้วยขดลวดความต้านทานพันอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นไมก้า แล้วประกอบด้วยแผ่นโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียมเรียบทั้ง 2 ด้าน โดยที่ระหว่างขดลวดความต้านทานกับแผ่นโลหะทองแดง (หรืออลูมิเนียม) นี้จะคั่นไม่ให้สัมผัสกันด้วยแผ่นฉนวนไมก้า โดยที่แผ่นโลหะ

ควรมีความหนาอย่างน้อย 0.6 ซม. และถ้าจะให้ดีควรหนา 1.2 ซม. และช่องว่างระหว่าง ส่วนกลางในระนาบ ผิวสัมผัสของแผ่น ไม่ควรเกิน 6% ของพื้นที่ให้ความร้อนส่วนกลาง การยึดส่วนกลาง และส่วนด้านนอกที่ล้อมรอบ ควรให้มีน้อยที่สุดเพื่อให้มีการสูญเสีย ความร้อนน้อยที่สุด อาจทำได้โดยใช้ แผ่นที่ฟลอนบาง ๆ ใต้วีได้ชุดให้ความร้อนได้แผ่น โลหะ วิธีการนี้จะเพิ่มความแข็งแรงของชุดอุปกรณ์ในขณะที่ยังคงค่าสัมประสิทธิ์การนำ ความร้อน และมีการสูญเสียความร้อนทางด้านการนำความร้อนต่ำ

แผ่นโลหะแต่ละแผ่นจะมีเทอร์โมคัปเปิลอย่างน้อย 1 ชุด โดยติดเทอร์โมคัปเปิลทั้งที่ แผ่นให้ความร้อนส่วนกลาง และที่แผ่นระบายความร้อน โดยฝังไว้ในร่องเล็ก ๆ ภายใน แผ่นโลหะโดยชุดให้ความร้อน เทอร์โมคัปเปิล ฉนวนกันความร้อนแผ่นบางและแผ่น โลหะจะถูกยึดเข้าทั้งสองด้าน โดยให้เป็นชุดเดียวกันและมีความเรียบแน่นคล้ายกัน

ที่สภาวะอุณหภูมิคงตัวของชุดทดสอบจะสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับกำลังงาน ให้กับชุดให้ความร้อน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้สามารถหาค่า k หรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้

ที่สภาวะคงตัว สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน จากความสัมพันธ์ที่ได้ จากสมการของฟูเรียร์ โดยที่ q คือปริมาณความร้อนรวม, l คือ ความหนารวมของชิ้นงาน ทั้ง 2 และ t คือผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงาน

ความสูญเสียและการหุ้มฉนวนที่ขอบ

หลักการสำคัญของวิธี Metal Surface Guarded Hot Plate นี้ ความร้อนจะต้องให้ใน ทิศทางเดียวหรือไหลในมิติเดียวเท่านั้นและจะต้องไม่มีความร้อนที่สูญเสียไปในทิศทาง ด้านข้างหรือในแนวรัศมีของระบบเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว จึงจำเป็นที่จะต้องมีการ คิดฉนวนความร้อนเพิ่มในบริเวณด้านข้างรอบ ๆ อุปกรณ์ทำการทดลอง เพื่อให้สูญเสีย ความร้อนในแนวรัศมีมีค่าน้อยที่สุด

โดยที่อุณหภูมิประมาณ 300k หรือมากกว่าเล็กน้อย ความร้อนสูญเสียที่สูญเสียให้ กับอากาศภายนอกจะน้อย เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ย ขณะทำการทดสอบ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องคิดฉนวนกับความร้อนด้านข้างอย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิที่ทำการทดสอบมีค่าสูงกว่า 400k หรือน้อยกว่า 250k จะต้องมีการคิดฉนวน เพิ่มเติม ในบริเวณด้านข้างของอุปกรณ์การทดสอบ

3.2 ส่วนประกอบ

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องมือวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบ่งได้เป็น 5 ส่วนคือ

1. แผ่นให้ความร้อน
2. แผ่นระบายความร้อน
3. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนและแผ่นระบายความร้อน
4. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน
5. แผงควบคุม

3.2.1 แผ่นให้ความร้อน (Hot Plate)

แผ่นให้ความร้อน หมายถึง ส่วนที่มีหน้าที่ในการผลิตความร้อน โดยประกอบด้วย ส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- 1 ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง
- 2 แผ่นไมก้า
- 3 แผ่นทองแดง
- 4 เทอร์โมคัปเปิล

3.2.1.1 ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง

มีหน้าที่ผลิตปริมาณความร้อน ให้แก่วัสดุทดสอบโดยถือว่าเป็นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่วัสดุทดสอบได้รับ มีวิธีการสร้างดังนี้

- 1) ตัดแผ่นไมก้าหนา 5 ม.ม. เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 157 x 157 ม.ม. แล้วตะไบขอบทั้ง 4 ด้านให้เรียบ
- 2) นำขดลวดอัลนิโครมแบบแบนที่มีความต้านทาน 3 โอห์ม ต่อเมตร พันรอบแผ่นไมก้าในข้อ 1 โดยพันในแนวใดแนวหนึ่งก็ได้ แต่ต้องไม่ให้ขดลวดที่พันสัมผัสหรือทับกัน
- 3) ติดเทปกันความร้อนเพื่อยึดขดลวดกับแผ่นไมก้าไว้ด้วยกันเป็นการป้องกันไม่ให้ขดลวดสัมผัสกันขณะเคลื่อนย้ายหรือใช้งาน

- 4) ทำการวัดค่าความต้านทานรวมของขดลวดที่พันทั้งหมด

3.2.1.2 แผ่นไมก้า

แผ่นไมก้ามีหน้าที่เป็นตัวกระจายความร้อนจากชุดให้ความร้อน ไปยังแผ่นทองแดงเนื่องจากความร้อนจากขดลวดความร้อนที่พันมีความไม่สม่ำเสมอ จึงใช้แผ่นไมก้าเป็นตัวรับความร้อนจากขดลวดความร้อนแล้วกระจายความร้อนให้แก่แผ่นทองแดง

อย่างสม่ำเสมออีกทีหนึ่ง โดยการสร้างแผ่นไมก้าทำได้โดยตัดแผ่นไมก้าหนา 0.5 มม. เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 320 x 320 มม. จำนวน 2 แผ่น

3.2.1.3 แผ่นทองแดง

ทำหน้าที่เป็นตัวนำความร้อนจากแผ่นไมก้าไปยังวัสดุทดสอบ พื้นที่ของแผ่นทองแดงแต่ละด้าน คือ พื้นที่ส่วนที่ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยถือว่าความร้อนที่พื้นที่นี้ได้รับมาจากชุดให้ความร้อนส่วนกลาง ซึ่งก็คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคำนวณเช่นกัน ในพื้นที่ส่วนนี้ได้ทำการเจาะร่องที่กึ่งกลางของพื้นที่ เพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้วัดอุณหภูมิ

การสร้างแผ่นทองแดงมีขั้นตอนดังนี้

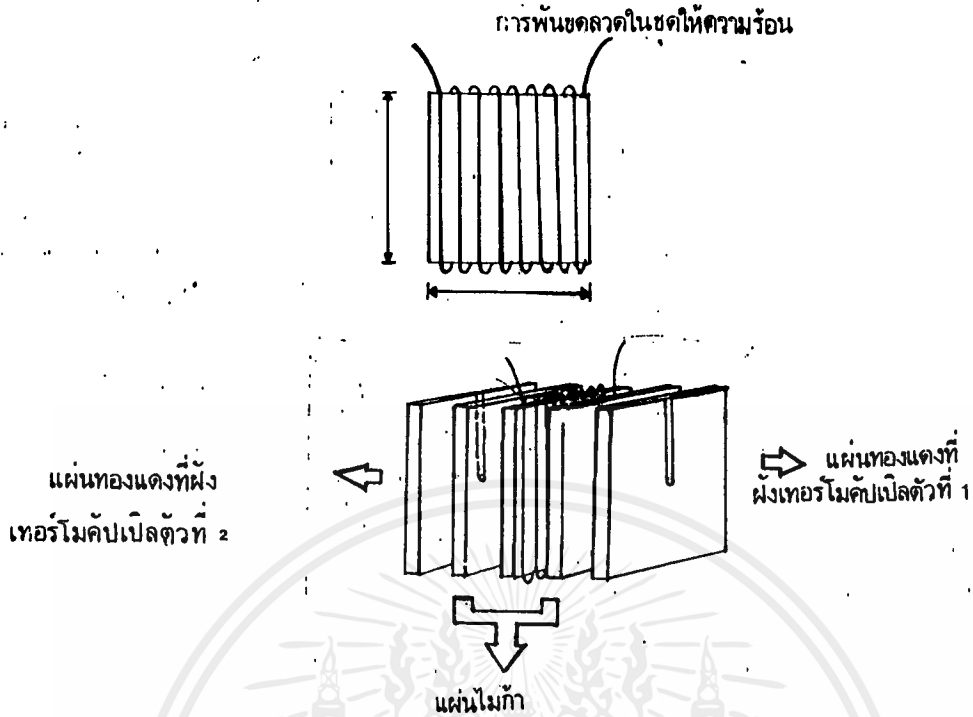
- 1) ตัดแผ่นทองแดงหนา 3.2 มม. เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 320 x 320 มม. จำนวน 2 แผ่น
- 2) เจาะรูเพื่อฝังหัวเทอร์โมคัปเปิลเพื่อใช้สำหรับวัดอุณหภูมิลงไป (แผ่นทองแดงที่จะนำมาสร้างควรมีความเรียบอย่างมาก เพื่อให้เกิดการสัมผัสที่ดีระหว่างผิวหน้าของแผ่นให้ความร้อนกับวัสดุทดสอบ)

การประกอบแผ่นให้ความร้อน

- 1) นำแผ่นไมก้าแต่ละแผ่นประกบชุดให้ความร้อน แล้วพันยึดด้วยเทปกันความร้อนให้แน่น
- 2) นำแผ่นทองแดงแต่ละแผ่นประกบแผ่นไมก้าในข้อ 1 แต่ละด้านอีกที โดยหันแผ่นทองแดงด้านที่เจาะร่องฝังเทอร์โมคัปเปิลออกด้านนอก

3.2.1.4 เทอร์โมคัปเปิล

เมื่อประกอบส่วนประกอบข้างต้นแล้ว ให้ทำการฝังเทอร์โมคัปเปิลในบริเวณที่เจาะรูเอาไว้ที่แผ่นทองแดงทั้ง 2 แผ่น การฝังทำโดยการติดกาวอีพอกซี ที่สายเทอร์โมคัปเปิล โดยตรวจสอบไม่ให้หัวและสายเทอร์โมคัปเปิลโผล่ออกมาเกินร่องที่เจาะเอาไว้ ด้วยวิธีการสร้างแผ่นให้ความร้อนดังกล่าว จะได้แผ่นให้ความร้อนที่มีผิวสัมผัสเป็นโลหะและมีส่วนป้องกันการไหลของความร้อนออกทางด้านข้าง แผ่นให้ความร้อนลักษณะนี้เรียกว่า "Metal Surface Guarded Hot Plate" ซึ่งเป็นหลักในการสร้างแผ่นให้ความร้อนทั้งหมด ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ดังที่อธิบายไว้แล้ว

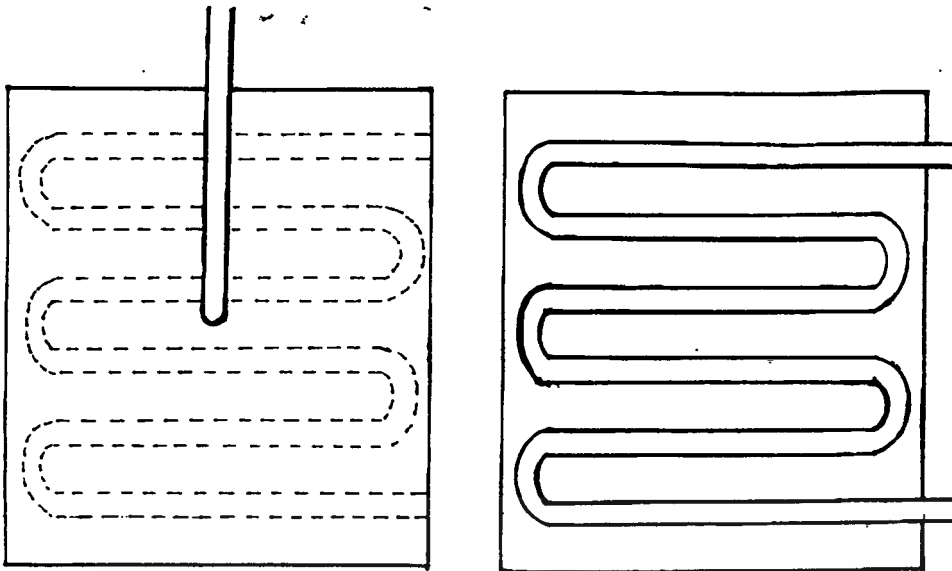


รูปที่ 3-2 ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง

3.2.2 แผ่นระบายความร้อน

วัสดุที่ใช้ในการสร้างแผ่นระบายความร้อนเป็นอลูมิเนียมทั้งหมด ซึ่งในที่นี้ใช้อลูมิเนียมหนา 6 ม.ม. มีวิธีการสร้างดังนี้

- 1) ตัดอลูมิเนียมหนา 6 ม.ม. เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 320 x 320 ม.ม. จำนวน 4 แผ่น สำหรับแผ่นระบายความร้อน 2 ชุด
- 2) นำแผ่นอลูมิเนียมในข้อ 1 จำนวน 2 แผ่น ไปเจาะร่องเพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิล โดยเริ่มเจาะร่องตั้งแต่จุดกึ่งกลางของแผ่นจนถึงขอบ และร่องควรมีขนาดเท่ากับความกว้างและความหนาของสายเทอร์โมคัปเปิล
- 3) ใช้ท่ออลูมิเนียมซึบติดกับแผ่นอลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นทางเดินของช่องทางระบายน้ำ
- 4) จากนั้นปิดทับด้วยโฟมหนา 1 นิ้วและแผ่นฉนวนกันความร้อนไหลออกแล้วทำกล่องปิดทับด้านบนอีกที
- 5) ฝังเทอร์โมคัปเปิลในลักษณะเดียวกันกับที่ฝังในแผ่นให้ความร้อน (จุดสำคัญคือต้องไม่ให้ทางน้ำภายในรั่วซึม และแผ่นอลูมิเนียมที่เจาะร่องฝังเทอร์โมคัปเปิลจะต้องมีผิวหน้าที่เรียบมาก ๆ เพื่อจะได้สัมผัสกับวัสดุทดสอบอย่างสมบูรณ์)



รูปที่ 3-3 ชุดระบายความร้อน

3.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนและแผ่นระบายความร้อน

หลักการของชุดทดสอบนี้คือต้องการให้ความร้อนไหลผ่านวัสดุทดสอบแบบนำความร้อน โดยให้ผิวด้านหนึ่งของวัสดุทดสอบสัมผัสกับแผ่นให้ความร้อนซึ่งก็คือผิวด้านที่มีอุณหภูมิสูง และอีกด้านหนึ่งสัมผัสกับแผ่นระบายความร้อนที่ได้ทำการเจาะร่องฝั่งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่แผ่นให้ความร้อน และแผ่นระบายความร้อนแล้ว การวัดอุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเปิลทั้ง 2 ที่อุณหภูมิที่วัดได้เสมือนเป็นตัวแทนของอุณหภูมิที่ผิวทั้ง 2 ด้านของวัสดุนั้นเลยโดยต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

ก. นำสายเทอร์โมคัปเปิลจากแผ่นทองแดงต่อกับปุ่มปิดเปิดค่าอุณหภูมิโดยต่อกับปุ่มปิดเปิด หมายเลข 1

ข. นำสายเทอร์โมคัปเปิลจากแผ่นระบายความร้อนที่ประกบวัสดุทดสอบชั้นเดียวกับแผ่นทองแดงในข้อ ก. ให้เป็นสายหมายเลข 2 ต่อเข้ากับปุ่มปิดเปิดค่าอุณหภูมิโดยต่อกับปุ่มปิดเปิด หมายเลข 2

ค. นำสายเทอร์โมคัปเปิลจากแผ่นทองแดง อีกแผ่นหนึ่งให้เป็นสายหมายเลข 3 ต่อกับปุ่มปิดเปิดค่าอุณหภูมิ โดยต่อกับปุ่มปิดเปิดหมายเลข 3

ง. นำสายเทอร์โมคัปเปิลจากแผ่นระบายความร้อนที่เหลือต่อกับปุ่มปิดเปิด หมายเลข 4

จ. ตรวจสอบการต่อเชื่อมทุกจุดอีกครั้ง

โดยที่ปุ่มปิดเปิดค่าอุณหภูมิจะต่อเชื่อมอยู่กับส่วนแสดงอุณหภูมิ สำหรับแสดงค่าอุณหภูมิแต่ละจุด

3.2.4 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน

มีหลักสำคัญคือ ต้องควบคุมอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของแผ่นให้ความร้อนให้คงที่ตลอดการทดสอบแผ่นให้ความร้อนประกอบด้วยแผ่นทองแดง 2 แผ่น ซึ่งต่างก็เป็นผิวสัมผัสคนละด้าน โดยด้านหนึ่งถูกเซาระร่องไว้บริเวณกึ่งกลางแผ่นเพียงจุดเดียว

ที่แผ่นทองแดงแผ่นแรกจะนำสายเทอร์โมคัปเปิล ต่อเข้ากับตัวควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตัวควบคุมอุณหภูมินี้จะถูกต่อเข้ากับโวลต์เตจ ทรานสฟอร์มเมอร์ และที่โวลต์เตจ ทรานสฟอร์มเมอร์นี้ จะต่อเข้ากับขดลวดความร้อน ของชุดให้ความร้อนอีกทีหนึ่ง การควบคุมอุณหภูมิจะมีตัวควบคุมอุณหภูมิ ไรวัคอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้ตัวควบคุมอุณหภูมิ ก็จะตัดไม่ให้โวลต์เตจ ทรานสฟอร์มเมอร์ จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับขดลวด และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิก็ตบปล่อยให้โวลต์เตจ ทรานสฟอร์มเมอร์ จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้กับขดลวด จนมีอุณหภูมิเท่ากับค่าที่ต้องการอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3-4 แผนภาพเครื่องวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การวัดปริมาณความร้อนของแผ่นให้ความร้อน

ปริมาณความร้อนของแผ่นให้ความร้อนที่จ่ายออกมา เปรียบเสมือนปริมาณความร้อนที่วัสดุคงได้รับ ถึงแม้ว่าปริมาณความร้อนดังกล่าวจะต้องสูญเสียให้กับค่าความสูญเสียต่างๆ เช่น Eddy Current Loss, Hyterisis Loss, ค่าความสูญเสียในขดลวดความร้อน และยังคงผ่านแผ่น ไมก้า และแผ่นทองแดงก่อนส่งถึงวัสดุทดสอบ วิธีที่ดีที่สุดที่จะวัดปริมาณ

ความร้อนที่แท้จริงที่วัสดุได้รับ คือ การดิฟฟัลดมิเตอร์ วัสดุที่ผิวหน้าของทองแดง แต่วิธีที่สะดวกวิธีหนึ่งก็คือการวัดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแผ่นให้ความร้อน คือค่าวัดค้ทางไฟฟ้า โดยใช้วัตต์มิเตอร์

จากที่เคยกล่าวมาแล้วว่า ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทดสอบคือปริมาณความร้อนที่ชุดให้ความร้อนส่วนกลางถ่ายเทให้กับวัสดุทดสอบซึ่งก็สอดคล้อง กับการใช้พื้นที่ส่วนกลางของแผ่นทองแดง แทนพื้นที่ของวัสดุทดสอบที่ได้รับ โดยมีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนในทิศทางเดียว ดังนั้นปริมาณความร้อนดังกล่าวก็คือปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดทดสอบนั่นเอง

3.2.5 แผงควบคุม

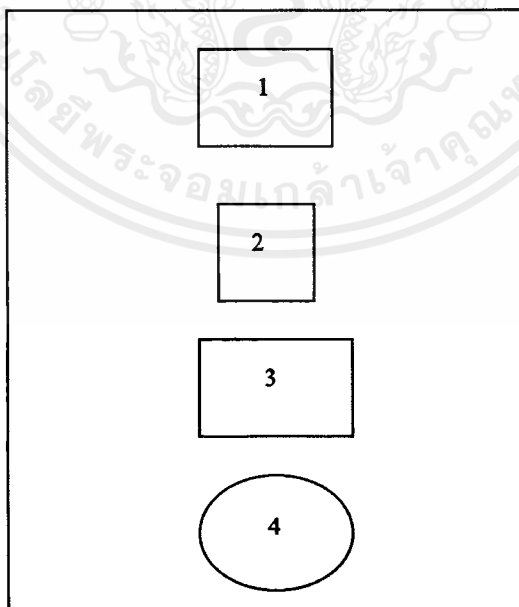
นำอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิทั้งหมดมาต่อเข้าด้วยกันเป็นแผงควบคุม

หมายเลข 1 : Switch ควบคุมการทำงานของปั้ม

หมายเลข 2 : Temperature Indicator (แสดงอุณหภูมิที่ผิววัสดุอื่น ๆ)

หมายเลข 3 : Temperature switch (ใช้เลือกแสดงอุณหภูมิที่ผิววัสดุ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ)

หมายเลข 4 : Temperature controller (ควบคุมและแสดงอุณหภูมิของชุดให้ความร้อน)



รูปที่ 3-5 แผงควบคุม

3.3 วิธีการทำงาน

- 1) ใส่วัสดุผงที่ต้องการทดสอบ กรณีนี้ใช้เป็นข้าวเปลือกเนื่องจากหาได้ง่ายและทราบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่เป็นมาตรฐาน
- 2) ปิดฝา
- 3) เปิดวาล์วก๊อกน้ำของแผ่นระบายความร้อนทั้ง 2 ข้าง เพื่อให้ น้ำ ไหลเข้าแผ่นระบายความร้อน
- 4) ตั้งค่าอุณหภูมิที่ Temperature Controller ตามต้องการ โดยเป็นอุณหภูมิใช้งานของวัสดุทดสอบแต่ละชนิด
- 5) ป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้ชุดให้ความร้อนแต่ละชุด โดยการปรับค่าที่ Dimmer แต่ละตัวตามต้องการ
- 6) รอจนกระทั่งอุณหภูมิของผิววัสดุทดสอบด้านที่ติดกับแผ่นให้ความร้อนสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ Temperature Controller เอง
- 7) ปลดปล่อยให้ความร้อนถ่ายเทจากแผ่นให้ความร้อน ไปยังวัสดุทดสอบและแผ่นระบายความร้อน จนกระทั่งอยู่ใน สภาวะคงตัว (Steady State) โดยสังเกตจากอุณหภูมิทุกจุดจะคงที่
- 8) บันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้
 - ก. แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมชุดให้ความร้อน
 - ข. กระแสไฟฟ้าในชุดให้ความร้อน
 - ค. อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นให้ความร้อน
 - ง. อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นระบายความร้อนทั้ง 2 ด้าน

3.4 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ข้อมูลที่จะใช้คำนวณมีดังนี้

- 1) พื้นที่ส่วนกลางของแผ่นทองแดง (A)
- 2) ความหนา (L) (คือระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนถึงแผ่นระบายความร้อนนั่นเอง โดยจะมีค่าคงที่)
- 3) Q คือค่าวัตต์ทางไฟฟ้าที่ได้จากวัตต์มิเตอร์
- 4) อุณหภูมิของผิววัสดุทดสอบด้านที่สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน (T_h)
- 5) อุณหภูมิของผิววัสดุทดสอบด้านที่สัมผัสกับแผ่นระบายความร้อน (T_l)

จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในบทที่ 2 สามารถหาอัตราการนำความร้อนผ่านวัสดุ

ต่าง ๆ ในมิติเดียวได้จากสมการ (2-14)
$$Q = \frac{kA (T_h - T_l)}{L}$$

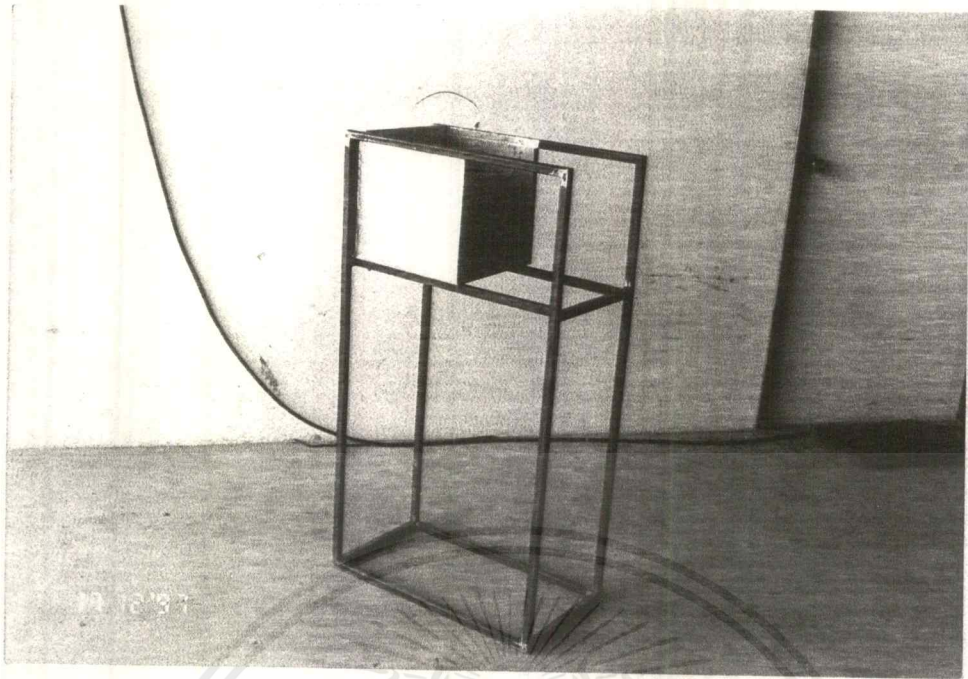
และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้จากสมการ (2 - 17)

$$K = \frac{QL}{A (T_h - T_l)}$$

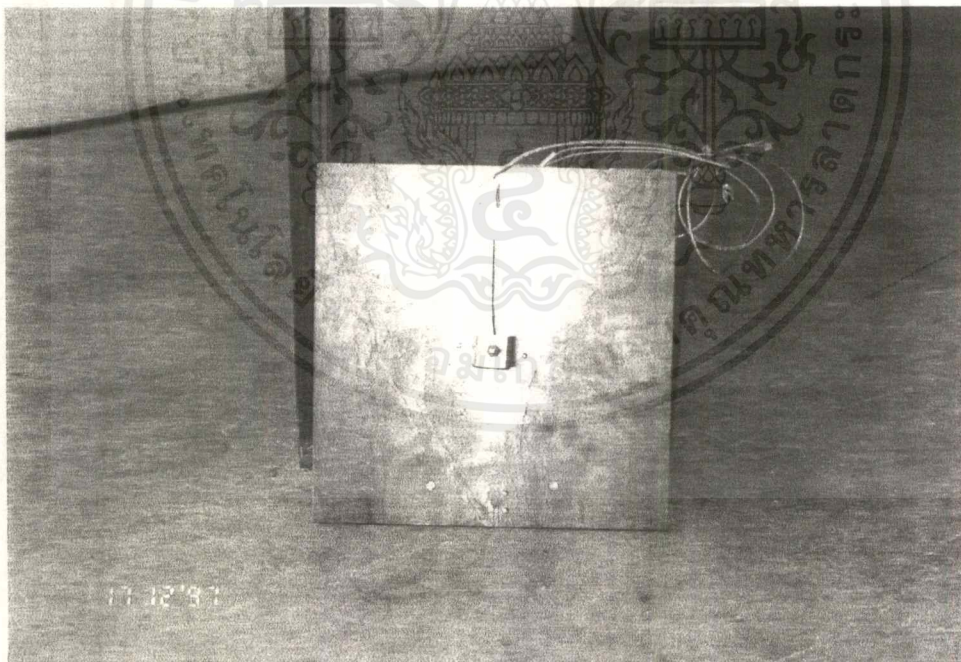
พิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เราพบว่าสามารถแบ่งข้อมูลออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ค่าคงที่ คือส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะทำการทดลองกี่ครั้งก็ตาม ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นระบายความร้อน (L); พื้นที่ส่วนกลางของแผ่นทองแดง (A)
2. ตัวแปร คือค่าที่เปลี่ยนแปลง โดยจะไม่เท่ากันในการทดลองแต่ละครั้ง ได้แก่ ปริมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตกคร่อมชุดให้ความร้อนส่วนกลาง (V), ปริมาณกระแสไฟฟ้าในชุดให้ความร้อนส่วนกลาง (A), อุณหภูมิของผิววัสดุทดสอบด้านที่สัมผัสกับแผ่นให้ความร้อน (T_h), อุณหภูมิของผิววัสดุทดสอบที่สัมผัสกับแผ่นระบายความร้อน (T_l)

ในการทดลองจริงข้อมูลที่ได้ดังกล่าวจะมีอยู่ 2 ชุด โดยแต่ละชุดคือข้อมูลของวัสดุชนิดที่ทำการทดสอบพร้อม คั้งนั้น จึงต้องนำข้อมูลแต่ละชุดมาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุทดสอบแต่ละชนิดแล้วจึงนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ย

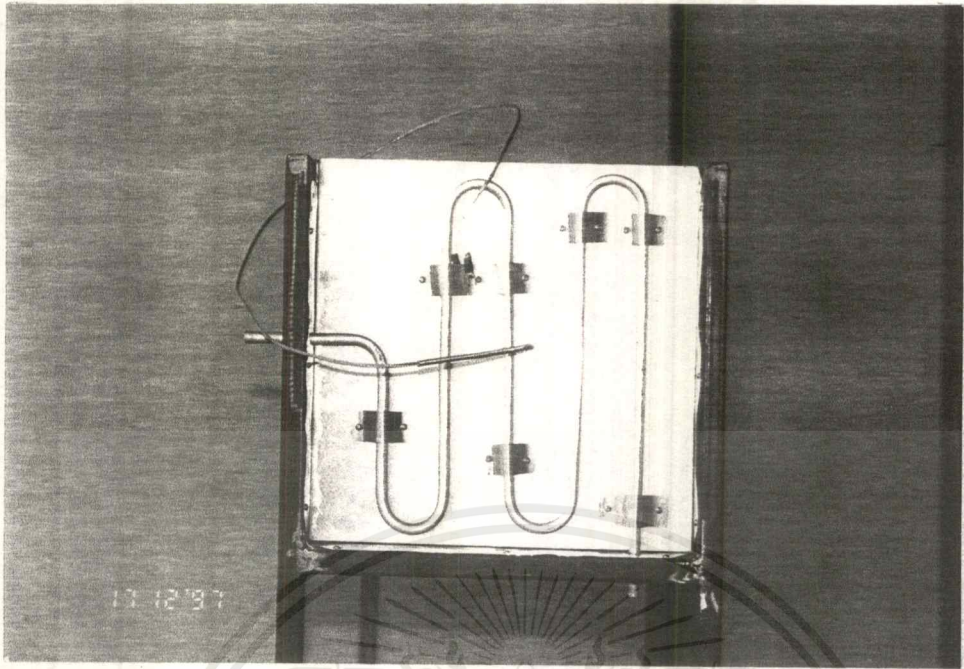


รูปที่ 3-6 โครงสร้างของเครื่องมือ

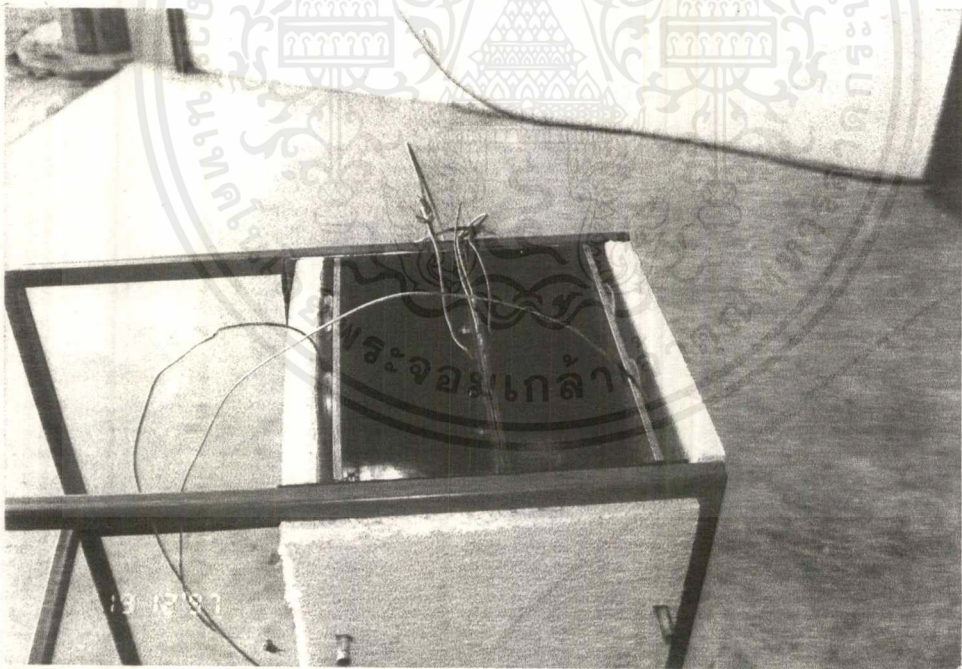


รูปที่ 3-7 ชุดให้ความร้อนส่วนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

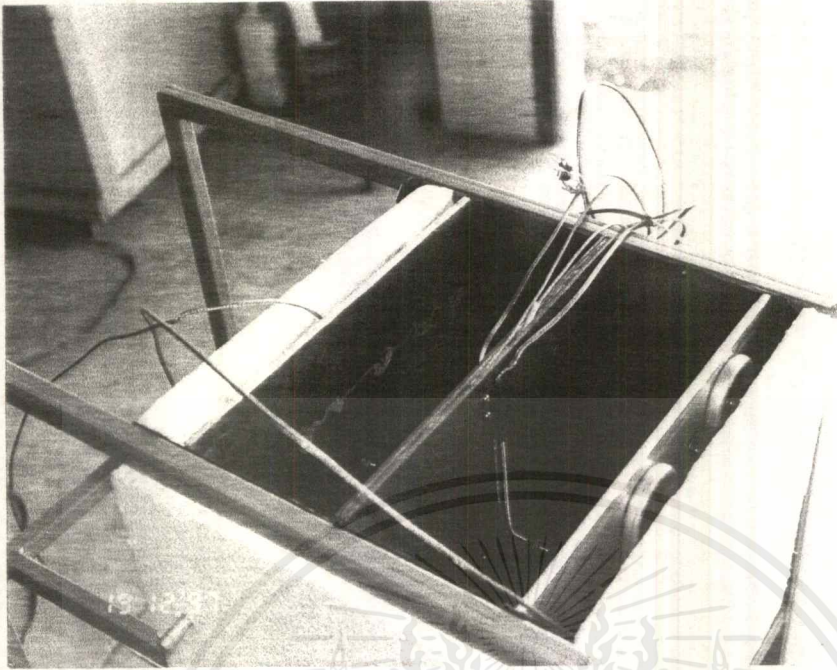


รูปที่ 3-8 แผ่นระบายความร้อน

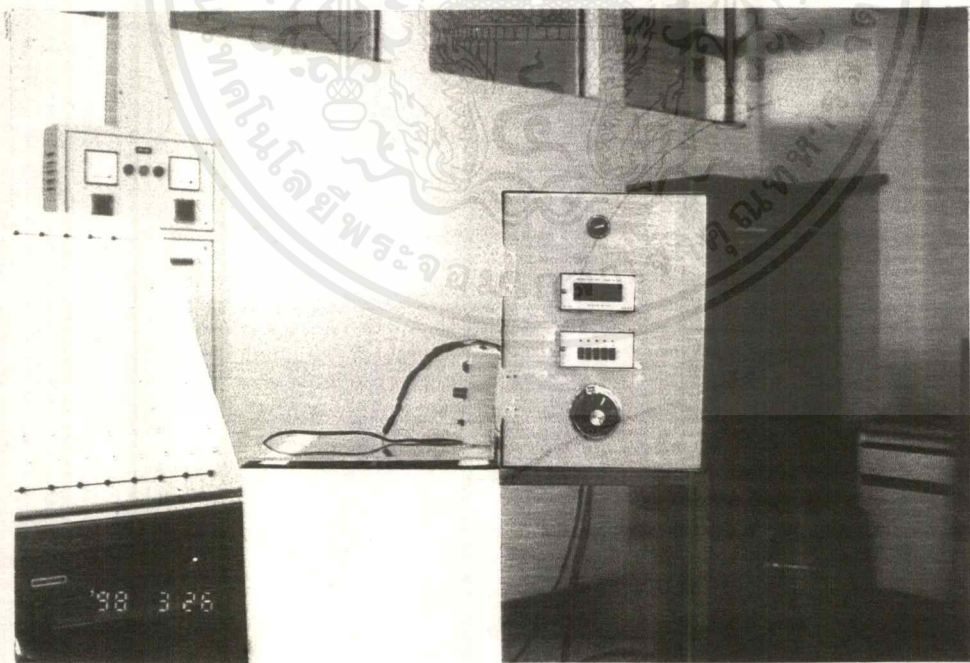


รูปที่ 3-9 แสดงการหุ้มฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

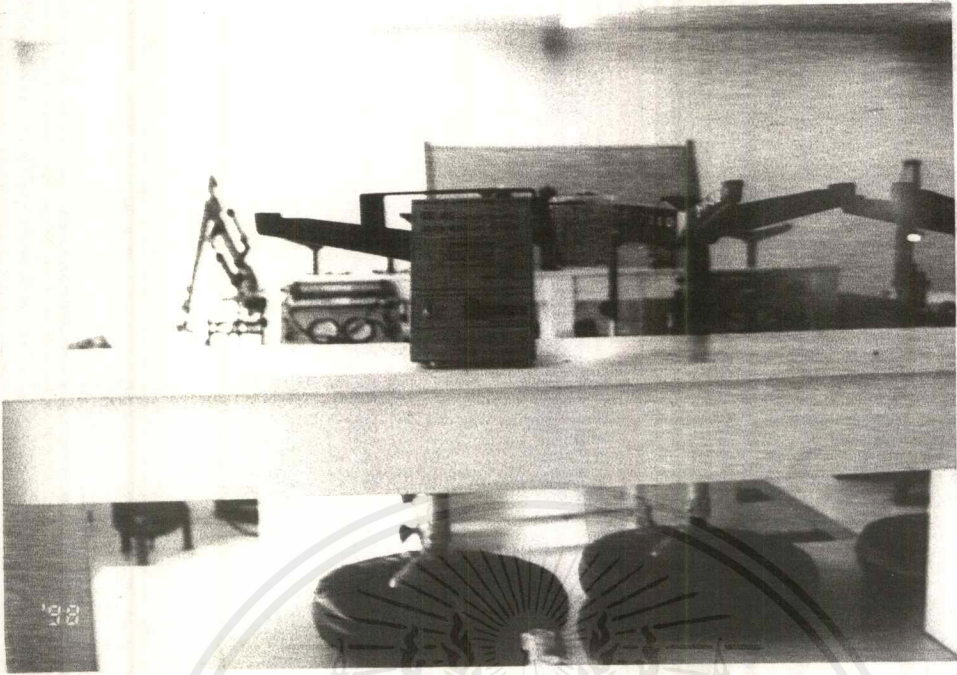


รูปที่ 3-10 แสดงการหุ้มฉนวน



รูปที่ 3-11 เครื่องมือวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-12 เครื่องวัดความชื้น



รูปที่ 3-13 เครื่องอบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในอาหารผง วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอาหารผงที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่แตกต่างกัน

วัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดค่าการนำความร้อน
2. วัสดุตัวอย่าง ได้แก่ ข้าวเปลือก แป้งสาลี
3. เครื่องชั่งดิจิตอล
4. เครื่องวัดความชื้น
5. คู่มือแห้ง

วิธีการทดลอง

เป็นการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพความแม่นยำของเครื่องที่ได้สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดำเนินการดังนี้

4.1 ทดสอบเทียบค่าเครื่องวัดความชื้นกับค่าจริงที่หาโดยวิธีอบในตู้อบ

4.1.1 นำข้าวเปลือกจำนวนทั้งหมด 60 กิโลกรัม ไปแช่น้ำนาน 12 ชั่วโมงขึ้นไป แล้วแบ่งขึ้นมาจำนวน 12 กิโลกรัม นำไปผึ่งลมให้ความชื้นในเมล็ดวัสดุมีความชื้นสม่ำเสมอ

4.1.2 นำไปวัดความชื้นโดยเครื่องวัดความชื้น แล้วหาความหนาแน่นของข้าวเปลือกที่ความชื้นนั้น

4.1.3 แบ่งส่วนหนึ่งเข้าสู่ตู้อบแห้งเป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง เทียบหาความชื้นที่แท้จริง เปรียบเทียบกับเครื่องวัดความชื้น

4.2 หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับอุปกรณ์การหาค่าการนำความร้อนที่สร้างโดยใช้ตัวอย่างข้าวเปลือก และแป้งที่ความชื้นต่าง ๆ

4.2.1 นำข้าวเปลือกที่เหลือทั้งหมดทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยเครื่องวัดที่สร้าง ปริมาณความร้อนที่ให้กับเครื่องดูจากวัตต์มิเตอร์ โดยที่พื้นที่หน้าตัดของ

เครื่องมีขนาด 0.09 เมตร ช่องใส่วัสดุมีขนาดกว้าง 0.109 เมตร คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามสมการ $k = QL / (A (T_h - T_l))$

4.2.2 ทำการทดลองซ้ำอีก 3 ครั้ง หาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยกัน

4.3 เปรียบเทียบค่าที่ได้จาก 4.2 กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.3.1 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามแบบขนาน และตามแบบตั้งฉาก ตามสมการ

4.3.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้ออกแบบและสร้าง

4.3.3 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของข้าวเปลือกที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่าง ๆ กัน

4.3.4 ทำการทดลองซ้ำที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่างกัน โดยทิ้งเวลาในการแช่น้ำให้นานขึ้นกว่าเดิม

4.4 เปลี่ยนจากข้าวเปลือกเป็นแป้ง แล้วทำการทดลองเหมือนเดิม

ผลการทดลอง

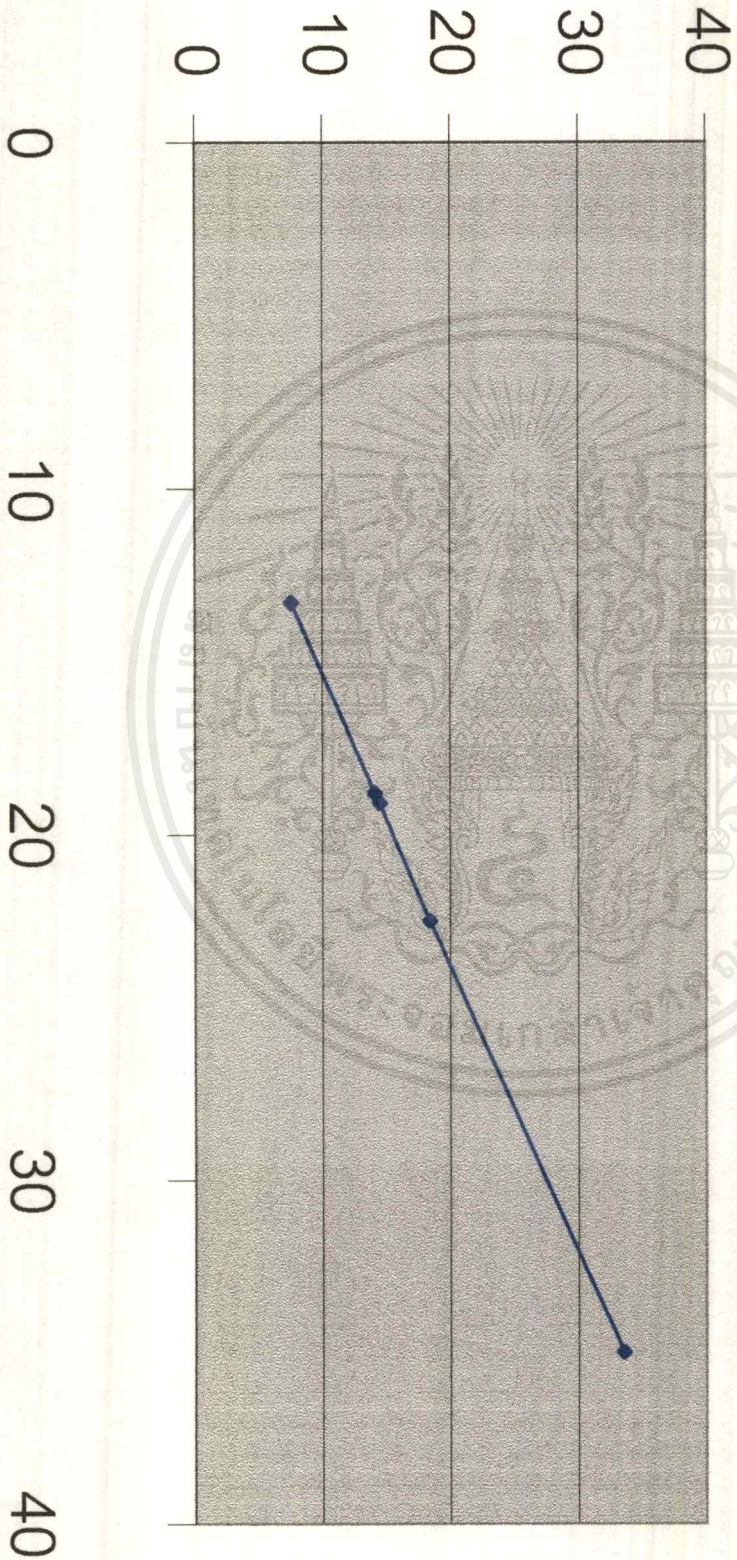
ตามการทดลองที่ 4.1 เป็นการทดสอบเปรียบเทียบหาค่าความชื้นจากเครื่องวัดความชื้นกับค่าความชื้นที่ได้จากเครื่องอบ ได้ผลดังตารางที่ 4-1 ซึ่งตารางนี้จัดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามแบบอนุกรมและตามแบบขนานที่ความชื้นต่างๆที่ทำการคำนวณไว้ด้วย หลังจากนั้นนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังกราฟที่ 4-1 โดยที่แกน X แทนค่าความชื้นจากเครื่องวัด และแกน Y แทนค่าความชื้นจากเครื่องอบ กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถเป็นสมการได้ดังนี้

$$Y = 1.22 X - 8$$

เปอร์เซ็นต์ความชื้นจาก เครื่องวัดความชื้น	ความหนาแน่น (Kg/m ³)	ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อน ที่คำนวณได้ ตามแบบขนาน (W / m ° C)	ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อน ที่คำนวณได้ ตามแบบอนุกรม (W / m ° C)	เปอร์เซ็นต์ความชื้นจาก เครื่องอบ	ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อน ที่คำนวณได้ ตามแบบอนุกรม (W / m ° C)	ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อน ที่คำนวณได้ ตามแบบอนุกรม (W / m ° C)
13.3	597.1	0.2860	0.2799	7.6	0.27588	0.26722
18.8	560.0	0.3000	0.2789	14.1	0.28992	0.27367
19.1	585.0	0.3014	0.2793	14.5	0.29081	0.27409
22.5	587.5	0.3095	0.2833	18.4	0.29979	0.27848
35.0	588.0	0.3387	0.2990	33.6	0.33507	0.27922

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากเครื่องวัดความชื้นกับเครื่องอบ

เปอร์เซ็นต์ความชื้นจากเครื่องอบ



กราฟที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากเครื่องอบกับความชื้นกับเครื่องอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

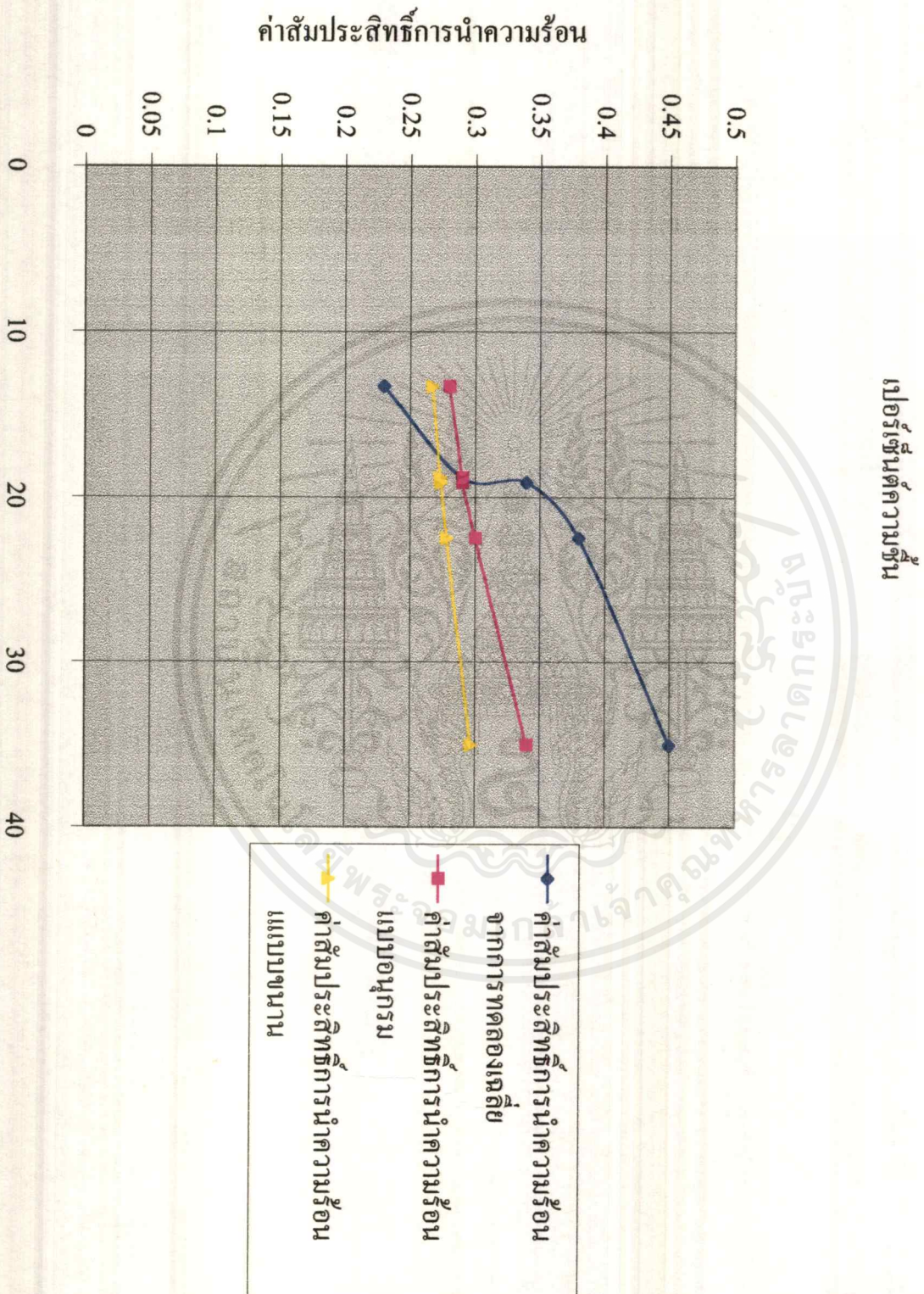
ตามการทดลองที่ 4.2 และ 4.3 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่างๆ โดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณค่ามาตรฐาน ดังตารางที่ 4-2 และนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังกราฟที่ 4-2

เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่วัด %	เวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัว (นาที)	อุณหภูมิที่บริเวณส่วนให้ความร้อน (°C)	อุณหภูมิที่บริเวณส่วนระบายความร้อน (°C)	ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้า (watts)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ย (W/m°C)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบอนุกรม (W/m°C)	%ความผิดพลาด	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแบบขนาน (W/m°C)	%ความผิดพลาด
13.3	36	68	45	23	4.75	0.25	0.23	0.28	17.7	0.267	14.78
	36	68	41	27	4.75	0.21					
	40	68	43	25	5.05	0.24					
	40	69	43	26	5.10	0.23					
18.8	34	67	45	22	5.50	0.30	0.29	0.29	2.9	0.273	8.6
	34	66	44	22	5.50	0.30					
	38	68	44	24	5.80	0.29					
	38	67	43	24	5.80	0.29					
19.1	35	67	35	18	5.60	0.38	0.34	0.29	15.9	0.274	22.9
	35	67	35	21	5.60	0.32					
	38	67	38	20	5.50	0.33					
	38	67	35	21	5.50	0.32					
22.5	35	66	35	18	5.80	0.39	0.38	0.3	25.5	0.278	35
	35	66	40	17	5.80	0.41					
	40	66	40	18	5.50	0.37					
	40	66	35	20	5.50	0.33					
35	35	71	35	19	6.05	0.38	0.45	0.34	34.89	0.297	51.51
	35	71	35	15	6.05	0.48					
	35	71	35	15	5.8	0.47					
	35	71	35	15	5.8	0.47					

ตารางที่ 4-2 ผลการทดลองของข้าวเปลือกแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การนำความร้อนที่ความชื้นต่างๆ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของขี้างเปลือก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามการทดลองที่ 4.4 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแข็ง
 สาลีเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาตรฐาน โดยทำการทดลองทั้งหมด 6 ครั้ง ได้
 ผลการทดลองดังตารางที่ 4-3 และนำมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังกราฟที่ 4-3

เวลาที่เข้าถึง สภาวะคงตัว (นาที)	กำลังไฟฟ้า (Watts)	อุณหภูมิที่บริเวณ ส่วนให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิที่บริเวณ ระบอบความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	ความแตกต่าง อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อน ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	ค่าสัมประสิทธิ์ การนำความร้อนมาตรฐาน ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด (%)
30	5.0	75	40	35	0.1729	0.1038	66.53
30	5.0	75	40	35	0.1729	0.1038	66.53
29	5.1	77	41	36	0.1714	0.1038	65.14
29	5.1	77	39	38	0.1624	0.1038	56.45
30	5.0	76	40	36	0.1681	0.1038	61.90
30	5.0	76	40	36	0.1681	0.1038	61.90

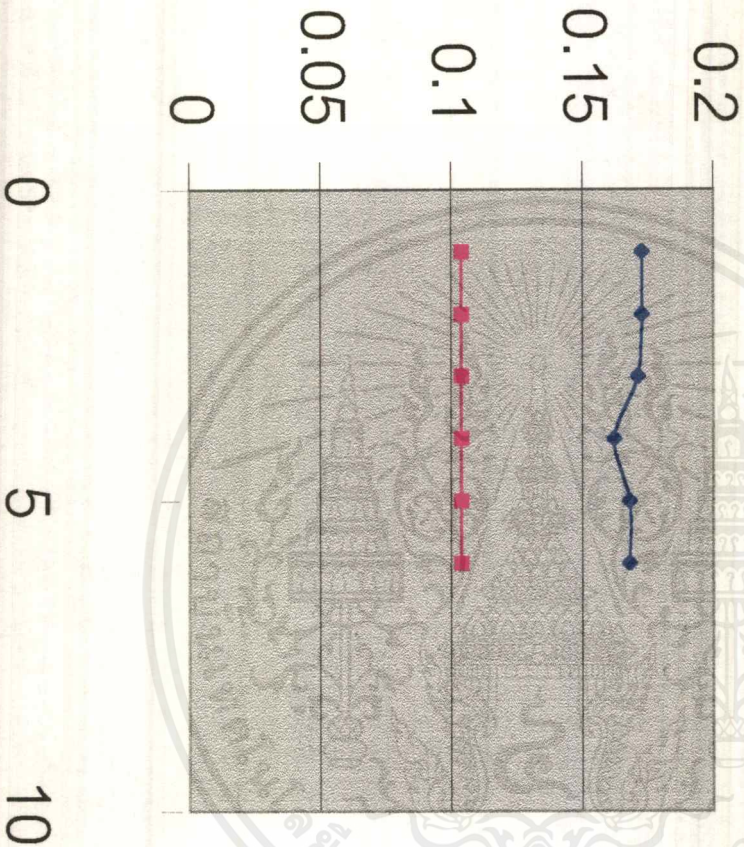
ตารางที่ 4-3 ผลการทดลองของแข็งสาลีแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน



- ◆— ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น ถ้าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมากตาม โดยที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ทดลองคือ 13.3 % มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $0.23 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ และเปอร์เซ็นต์สูงสุดของการทดลองคือ 35 % มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ $0.45 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากแบบขนาน อยู่ในช่วง 2.90%-34.89% และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากแบบอนุกรม อยู่ในช่วงระหว่าง 8.60%-51.51% ส่วนผลการทดลองของแป้งสาลีที่ความชื้นเดียวกัน สรุปได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดถึงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์

ข้อเสนอแนะและวิธีแก้ไข

จากผลการทดลองและผลสรุปที่เกิดขึ้น จะเห็นว่า การนำความร้อนในเครื่องมือทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สร้างขึ้นในส่วน of แผ่นระบายความร้อนก็มีความสำคัญกับเครื่องทดสอบนี้มาก จากการทดลองพบว่า การระบายความร้อนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ ถ้าอัตราการไหลสูงก็จะทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการติดเครื่องระบายความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านำมาเป็นสารระบายความร้อน จะทำให้สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่มีค่าต่ำได้ดียิ่งขึ้น

1. ในส่วนของแผ่นให้ความร้อน ควรที่จะเปลี่ยนหรือออกแบบชุดให้ความร้อน ซึ่งจากเดิมให้แผ่นไมก้า ไปใช้วัสดุชนิดอื่นที่สามารถทนความร้อนได้ดีกว่า และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี และสำหรับการพันขดลวดความร้อน ควรจัดระยะห่างในการพันให้เหมาะสม เพื่อป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นได้จากการสัมผัสของขดลวดความร้อน

2. ส่วนของช่องใส่วัสดุทดสอบควรจะทำให้มีขนาดเล็กกว่านี้เพื่อสะดวกในการทดสอบและการเปลี่ยนถ่ายวัสดุ และเพื่อการไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และจะช่วยให้ช่วยลดเวลาในการทดลอง

3. ส่วนของการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่แท้จริง ควรวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยการอบวัสดุตัวอย่างในตู้อบความร้อนที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นต่างๆเพิ่มขึ้น เพื่อความถูกต้องในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่อไป

4. ควรจะมีการทดลองกับวัสดุทดสอบชนิดอื่น ๆ เพิ่มขึ้นมากกว่านี้



เอกสารอ้างอิง

1. Anon ,1980,American Society for Testing and Material, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate, ANSI ASTM C177-76, Annual ASTM Part 18, page 20-34
2. Lewis,M. J.,1987,Physical Properties of Food and Food Processing System , Ellis Horwood Ltd., Chichester, England and VCH Verlagsgesellschaft mbH , Weinheim , Federal Republic of Germany , page 254 –255
3. Mohsenin,N.N , 1980,Thermal Properties of Foods And Agricultural Materials, Gordon and Breach Science Publishers Ltd. Pennsylvania U.S.A., page 84 – 85
4. Woodsid, W.,1957, Analysis of Errors due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plate, Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulation, ASTM Special Technical Publication No. 217 Philadelphia Meeting, page 49-63
5. Woodside, W. and A.G. Wilson , 1957 , Unbalance Errors In Guarded Hot Plate Measurement, Symposium on Thermal conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulation, ASTM Special Technical Publication No. 217 Philadelphia Meeting , page 32-48



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standard Test Method

"Steady-State Thermal Transmission By Mean of The Guarded Hot Plate"

From

1980 Annual Book of ASTM Standard

1. ขอบเขต (scope)

1.1 วิธีการนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady-state thermal transmission properties) ของวัตถุหรือฉนวนทดสอบที่เป็นฉนวน โดยอาศัยแผ่นป้องกันการสูญเสียความร้อน (Guarded hot plate) และการทดสอบนี้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่ 1.4 1.5 และ 1.6 ซึ่งจะกล่าวต่อไป นอกจากนี้วิธีการทดสอบนี้ถูกกำหนดให้ใช้ได้กับฉนวนทดสอบ ที่มีค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) สูงกว่า $0.017 \text{ Km}^2/\text{w}$ ในทุกทิศทาง

1.2 วิธีการนี้เป็นวิธีพื้นฐานสำหรับวัดคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อนของฉนวนทดสอบ โดยที่มีเพียง ความยาว (ความหนา) กำลังไฟฟ้า และความแตกต่างของอุณหภูมิ เท่านั้นที่ถูกวัดเพื่อใช้ในการคำนวณ

1.3 การออกแบบแผ่นป้องกันการสูญเสียความร้อน (Guarded hot plate) และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเป็นเรื่องที่อยู่นอกพหุสมควร ดังนั้นขั้นตอนและข้อกำหนดต่าง ๆ จึงควรมีการพิจารณาอย่างถี่ถ้วน ดังที่จะกล่าวในหัวข้อที่ 2.5

1.4 ในการหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) และค่าการเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal conductance) ฉนวนทดสอบต้องอยู่ภายใต้สภาวะเหล่านี้

1.4.1 ส่วนของฉนวนทดสอบทั้งหมดจะต้องอยู่เหนือพื้นที่ทดสอบทั้งหมด

1.4.2 ส่วนที่เหลือของฉนวนทดสอบโดยเฉลี่ย จะต้องไม่ทำให้การไหลของความร้อนในทิศทางนั้นผิดเพี้ยนไป

1.4.3 ความร้อนที่เกิดขึ้นตลอดฉนวนทดสอบจะต้องแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตกคร่อมฉนวนทดสอบนั้น

1.5 ในกรณีที่ต้องการหาค่าเฉลี่ยของความต้านทานความร้อนและค่าเฉลี่ยของการเหนี่ยวนำความร้อนของชั้นทดสอบ เมื่อใช้ชั้นทดสอบมากกว่า 1 ชั้น ชั้นทดสอบเหล่านั้นจะต้องอยู่ภายใต้สภาวะเหล่านี้

1.5.1 ชั้นทดสอบต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous)

1.5.2 ชั้นทดสอบจะต้องไม่มีเนื้อที่มีลักษณะเป็นชั้น (Layer) และทิศทางการไหลของความร้อนโดยรวมจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous)

1.6 ในกรณีที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อน (Thermal resistivity) และค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal conductivity) ของชั้นทดสอบ ชั้นทดสอบจะต้องอยู่ภายใต้สภาวะเหล่านี้

1.6.1 ชั้นทดสอบจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Homogeneous)

1.6.2 ต้องใช้ชั้นทดสอบมาเป็นตัวอย่างในการหาค่าดังกล่าวของวัสดุให้เพียงพอเพื่อให้ได้ผลการวัดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของวัสดุทั้งหมดได้

1.7 อุปกรณ์แผ่นป้องกันการสูญเสียความร้อน (Guarded hot plated apparatus) มี 2 ชนิดซึ่งเหมือนกันในหลักการแต่แตกต่างกันที่โครงสร้าง ดังนี้

อุปกรณ์แผ่นป้องกันการสูญเสียความร้อนแบบอุณหภูมิต่ำ (The low temperature guarded hot plate) : การสร้างจะต้องมีแผ่นผิวหน้าที่เป็นวัสดุ (Metal surface plate) และมีช่องว่างป้องกัน (Guarded gap) อุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้ในการวัดเมื่ออุณหภูมิของชุดให้ความเย็น (Cold plate) ไม่ต่ำกว่า 21 K และอุณหภูมิของชุดให้ความร้อน (Hot unit) ไม่สูงกว่า 500 K

อุปกรณ์แผ่นป้องกันการสูญเสียความร้อนแบบอุณหภูมิสูง (The high temperature guarded hot plate) : การสร้างอาจจะมีหรือไม่มีทั้งแผ่นผิวหน้าที่เป็นวัสดุหรือช่องว่างป้องกันก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้สำหรับการวัดเมื่ออุณหภูมิของชุดให้ความร้อนสูงกว่า 550 K แต่ไม่เกิน 1350 K

อุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดนี้ จะให้การกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมากพอ บนแผ่นผิวหน้า (Surface plate)

2. ความสำคัญ (Significance)

2.1 คุณสมบัติทางการส่งถ่ายความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นชั้นทดสอบ

1) อาจจะไม่แปรเปลี่ยนไปเนื่องจากความแตกต่างของส่วนประกอบของวัสดุทดสอบที่ใช้เป็นตัวอย่าง

2) อาจจะไม่เกิดผลที่ผิดเพี้ยน เนื่องจากความชื้นหรือสภาวะอื่น ๆ

3) อาจจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือเมื่ออุณหภูมิสูง ๆ

4) อาจจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของชั้นวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) อาจจะต้องเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิความร้อน
วัดทดสอบ

6) อาจจะต้องเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยของการทดสอบ

ดังนั้นจึงต้องจำไว้ว่า ในการเลือกใช้ค่าคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อน
ของวัสดุทดสอบมาใช้เป็นตัวแทนของวัสดุนั้นทั้งหมด ควรที่จะพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ดังที่
กล่าวมาด้วย และควรที่จะมีข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบที่มากพออีกด้วย

2.2 โครงสร้างและการทำงานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบนี้ จะมีความสามารถ
ในการวัดค่าคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อนได้เพียงตรง $\pm 2\%$ เมื่ออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม
ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของการทดสอบ และถ้าหากในการออกแบบอุปกรณ์ที่มีการป้องกัน
มากเพียงพอ ความเที่ยงตรงประมาณ $\pm 5\%$ ก็เป็นค่าที่ควรมีในขณะที่ทำงานเต็มที่ในทุกสภาวะ

2.3 การนำผลการทดสอบ ซึ่งก็คือค่าคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อนมาใช้นั้น จำ
เป็นที่จะต้องมีการปรับค่าที่ได้ เพื่อให้ใช้ได้ในทุกสภาวะ

2.4 การกำหนดรายละเอียด และขั้นตอนด้านโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบวิธีนี้ ให้
สามารถใช้ครอบคลุมในทุกสภาวะนั้นเป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสม เพราะการกำหนดดังกล่าวจะเป็นสิ่งที่
ยุ่งยากต่อบุคคลที่ไม่มีความรู้ทางด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้อง การไหลของความร้อน การวัดอุณหภูมิ
และการทดสอบ ดังนั้นมาตรฐานของการทดสอบวิธีนี้จึงไม่ได้จำกัดอยู่ในทางใดทางหนึ่ง แต่
สามารถให้ผู้ทดสอบพัฒนาและปรับปรุงวิธีการ ขั้นตอนต่าง ๆ ได้

2.5 เมื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์เสร็จสิ้น การทดสอบควรที่จะใช้กลุ่มของวัสดุอย่างน้อย
2 กลุ่ม ที่ทราบค่าคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อนแน่นอน มาทำการปรับเทียบ (Calibrate)
หากเป็นไปได้ การทดสอบทั้งหมดควรดำเนินการภายใน 90 วันของการปรับเทียบ ความแตกต่าง
ของผลที่ได้ควรที่จะนำมาศึกษาหาสาเหตุ และวิธีการปรับปรุงแก้ไขให้ได้ผลที่ถูกต้อง

3. Metal Surface Hot Plate Apparatus

3.1 ลักษณะทั่วไป

ลักษณะทั่วไปของ Metal-surface hot plate apparatus ซึ่งติดตั้งพร้อมชิ้นทดสอบ แสดงดัง
รูปที่ ผ-1

จากรูป ประกอบด้วยชุดให้ความร้อน (Heating unit) ชิ้นทดสอบ (Specimen) ชุดให้
ความเย็น (Cooling unit) โดยชุดให้ความร้อนและชุดให้ความเย็นควรที่จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือวง
กลม ส่วนที่เรียกว่าแผ่นป้องกันการสูญเสียความร้อน (Guarded hot plate) นั้นเป็นชื่อที่ใช้เรียกรวม
กันทั้งอุปกรณ์ ได้แก่ ชุดให้ความร้อน ชุดให้ความเย็น และการหุ้มฉนวนที่ขอบ (Edge insulation)

ชุดให้ความร้อน ประกอบด้วยชุดให้ความร้อนส่วนกลาง (Central metering section)

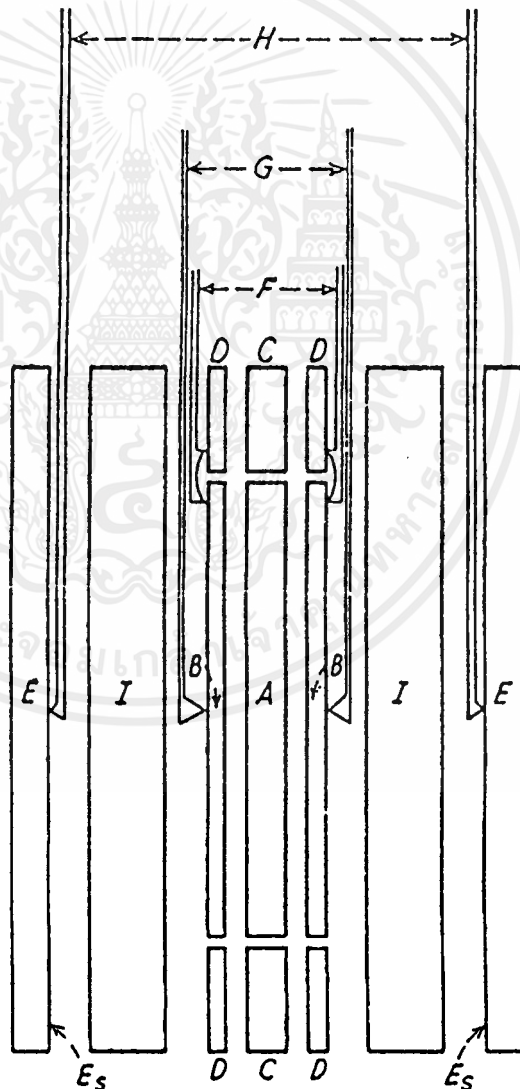
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และส่วนที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน (Guarded section)

ส่วนที่เป็นแผ่นผิวหน้า (Metal-surface) ของชุดให้ความร้อนและชุดให้ความเย็น ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นหน้าสัมผัสกับชิ้นทดสอบ จะต้องทำให้เรียบอย่างมาก

3.2 ชุดให้ความร้อน (Heating Unit)

ในการเลือกใช้วัสดุที่ใช้ทำชุดให้ความร้อน ควรที่จะพิจารณาถึงคุณลักษณะของวัสดุนั้น เมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิการใช้งานให้เหมาะสม ส่วนการออกแบบชุดให้ความร้อน ต้องออกแบบให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง Central heater กับ Guarded heater อุณหภูมิแตกต่างกันไม่เกิน 0.2°K และต้องให้ชุดให้ความร้อนทุกส่วนไม่เกิดการโค้งงอหรือผิดรูปไป



รูปที่ ๘-1 General Features of the Metal-Surface Hot Plate Apparatus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ช่องว่างและผิวหน้า (Gap and Surface)

ชุดให้ความร้อนควรที่จะมีช่องว่างระหว่างผิวหน้าที่ทำการทดสอบกับส่วน Guard ไม่เกิน 4 mm. นอกจากนั้น พื้นที่ของช่องว่างดังกล่าวในระนาบของแผ่นผิวหน้าจะต้องไม่เกิน 8% ของพื้นที่ผิวหน้าที่ทำการทดสอบ

3.4 เครื่องวัดความไม่สมดุล (Unbalance Detectors)

Thermocouple จำนวนหนึ่งถูกต่อเข้าด้วยกันในลักษณะ Thermopile จะเป็นเครื่องช่วยวัดความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวหน้าทดสอบกับ Guard โดยเป็นการวัดความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของช่องว่าง

3.5 ชุดให้ความเย็น (Cooling Unit)

ชุดให้ความเย็นควรที่จะมีพื้นที่อย่างน้อยที่สุด ต้องใหญ่เท่ากับพื้นที่ของชุดให้ความร้อนซึ่งรวมส่วน Guard ด้วย และควรที่จะมีแผ่นโลหะที่ให้การกระจายของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ และมีอุณหภูมิต่ำกว่าชุดให้ความร้อน นอกจากนั้นของเหลวที่ใช้ควรที่จะมีอุณหภูมิที่คงที่ด้วย เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ

3.6 แรงจากการอัด (Clamping Force)

การใช้ Clamp ควรมีการออกแบบให้แรงที่เกิดขึ้นจากการอัดของ Clamp มีขนาดที่คงที่เพื่อให้ได้การสัมผัสกันทางด้านความร้อนที่ดี และเพื่อรักษาความแน่นอนของช่องว่างระหว่างชุดอุปกรณ์แต่ละชุดไว้ นอกจากนั้นยังจะทำให้สามารถวัดความหนาที่แท้จริง (Effective thickness) ของชิ้นทดสอบเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ

3.7 ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ตกคร่อมชิ้นทดสอบ (Temperature Difference Across Specimen)

วิธีการที่ดีที่สุดในการวัดอุณหภูมิที่ลดลงเนื่องจากการไหลของความร้อนผ่านชิ้นทดสอบ นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นทดสอบ และการตัดสินใจของผู้ทำการทดสอบด้วย

สำหรับชิ้นทดสอบที่มีการขยายตัวเมื่อความร้อนสูง ควรที่จะมีการดูแลเป็นพิเศษ เนื่องจากวัดอุณหภูมินี้ อาจเกิดการโค้งงอหรือบิดเบี้ยวได้ และการโค้งงอนี้จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์ และอาจทำให้การสัมผัสกันที่หน้าสัมผัสไม่ดี เป็นผลให้เกิดความผิดพลาดอย่างมากในการวัด นั่นคือ สำหรับวัดจุดดังกล่าวควรมีการออกแบบอุปกรณ์อย่างพิเศษ

อย่างไรก็ตาม ค่าของความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดออกมา อาจมีความผิดพลาด เนื่องจากการไหลของความร้อนรอบ ๆ อุปกรณ์วัด (Sensor) ผิดเพี้ยน หรือเกิดจากคุณลักษณะของตัวอุปกรณ์วัดเอง แต่ควรมีน้อยกว่า 1%

3.8 การหุ้มฉนวนที่ขอบ (Edge Insulation)

การสูญเสียความร้อนบริเวณขอบนอกของ Guard และขอบนอกของชั้นทดสอบ ควรที่จะมีการป้องกัน โดยใช้การหุ้มฉนวนที่ขอบ ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน อาทิ การปรับสภาวะอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม การเพิ่ม Guard ชั้นนอกสุด การใช้ Linear Gradient guard หรืออาจใช้วิธีดังกล่าวผสมกัน

3.9 ตัวครอบอุปกรณ์ (Enclosure)

Guarded hot plate apparatus ควรที่จะติดตั้งหรือทำการทดสอบในที่ที่มีการปิดกั้นที่แน่นอน เพื่อที่จะสามารถรักษาอุณหภูมิต่าง ๆ รวมทั้งการควบคุมความชื้นของอากาศรอบ ๆ ได้

4. ชิ้นวัสดุทดสอบ (Test Specimens)

4.1 การเลือกและขนาด (Selection and Size)

ในการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางด้านการส่งถ่ายความร้อนของวัสดุใด ๆ ควรที่จะมีการเลือกชิ้นวัสดุทดสอบมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ 2 ชิ้น โดยพยายามทำให้ทั้ง 2 ชิ้นนั้นมีความเหมือนกันให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และขนาดของชิ้นทดสอบ ต้องสามารถครอบคลุมผิวหน้าของชุดให้ความร้อนได้ทั้งหมด และชิ้นทดสอบต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ 1.4 ด้วย

4.2 การเตรียมชิ้นวัสดุทดสอบ (Specimen Preparation)

ในการทดสอบวัสดุทุกชนิด ผิวหน้าของชิ้นทดสอบจะต้องมีลักษณะที่เป็นแผ่นเรียบ เพื่อให้สามารถสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดระหว่างผิวของชิ้นทดสอบกับผิวหน้าของชุดให้ความร้อนและชุดให้ความเย็น

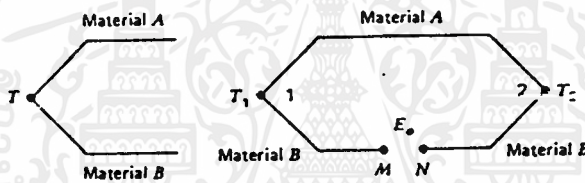
เทอร์โมคัปเปิล

Thermocouple

หลักการทํางานของเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) นับเป็นอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิที่ใช้งานได้กว้างขวางที่สุดเมื่อเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอื่น ๆ สามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่อุณหภูมิต่ำสุดใกล้ศูนย์องศาสมบูรณ์และสูงกว่า 2000 องศาเซลเซียส

ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 630 องศาเซลเซียส ถึง 1064 องศาเซลเซียส International Temperature Scale ได้จัดอันดับให้เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิที่ละเอียด ถูกต้อง และน่าเชื่อถือมากที่สุด



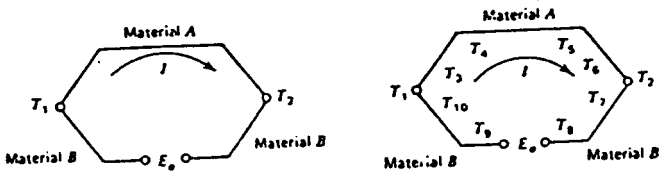
รูปที่ ๙-2 แสดงหลักการทํางานของเทอร์โมคัปเปิล

หลักการทํางานของเทอร์โมคัปเปิลแสดงได้ง่าย ๆ ดังรูปที่ ๙-1 โดหะต่างชนิดกันสองชิ้น A และ B ต่อเป็นวงจรโดยมีขั้วต่อ T_1 และ T_2 เมื่ออุณหภูมิ ณ จุด T_1 และ T_2 แดกต่างกันจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 และ T_2 โดยขึ้นกับค่าของ T_1, T_2 และชนิดของวัสดุ A และ B ด้วย ถ้าใช้มิเตอร์วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรมารอบค่าของอุณหภูมิ T_1 เมื่อทราบค่าของอุณหภูมิ T_2 โดยเปรียบเทียบค่ากับตารางมาตรฐานของคู่วัสดุ A และ B

เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเมื่อการคิดคั้งและการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลคั้งเรากวร

เข้าใจกฎพื้นฐานบางประการของเทอร์โมคัปเปิลคั้งต่อไปนี้

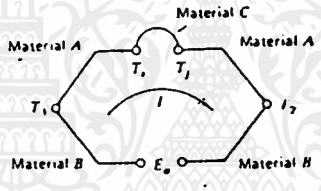
- 1) แรงเคลื่อนไฟฟ้าของ เทอร์โมคัปเปิลคั้งที่มีขั้วต่ออยู่ที่อุณหภูมิที่ T_1 และมีคุณสมบัติสมํเสมอ (Homogeneous) จากกฎข้อนี้ทำให้เรากวินสายเทอร์โมคัปเปิลคั้งผ่านถึงแวดล้อมที่อุณหภูมิใดก็ได้ในขอบเขตความปลอดคั้งของวัสดุ



รูปที่ ๓-3 แสดงการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

$$E_0 = c_{ba} (T_1 - T_2)$$

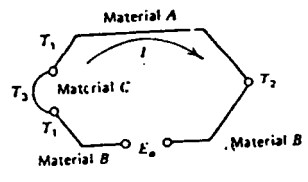
2) ถ้าต่อวัสดุตัวนำ C ซึ่งมีคุณสมบัติสม่ำเสมอเข้าระหว่างสาย A หรือ B แรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรจะไม่เปลี่ยนแปลง กฎข้อนี้ทำให้เราสามารถใส่สายต่อที่เป็นโลหะต่างชนิดติดเข้าไปในวงจรหรือต่ออุปกรณ์วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าไปในวงจรโดยไม่ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ ๓-4 การต่อวัสดุ C เข้ากับวัสดุ A,B

$$E_0 = c_{ba} (T_1 - T_2) + c_{ac} (T_1 - T_2); T_1 = T_1'$$

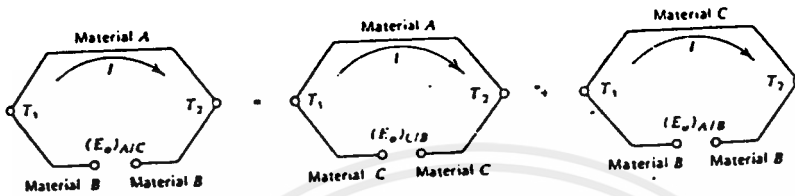
3) วัสดุ C ต่อเข้าระหว่าง A และ B ที่ขั้ว ๆ หนึ่ง อุณหภูมิ ณ จุดใด ๆ ของ C จะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าของวงจร ตรงกับขั้วต่อ AC และ BC ยังคงอยู่ที่อุณหภูมิเดิมคือ T_1 จากกฎข้อนี้ทำให้เราสามารถต่อขั้วของ A และ B เข้าด้วยกันโดยการเชื่อมหรือการบัดกรีโดยไม่มีผลใด ๆ ต่อค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า



รูปที่ ๓-5 รูปแสดงการต่อวัสดุ C เข้ากับวัสดุ A,B

$$E_0 = (c_{bc} + c_{ca}) T_1 + c_{cb} T_2; E_0 = c_{ba} (T_1 - T_2)$$

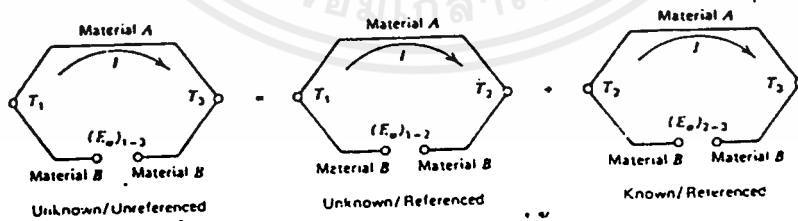
การต่อวัสดุ C เข้ากับวัสดุ A,B ของคู่สายเทอร์โมคัปเปิลประเภทต่าง ๆ โดยเทียบกับมาตรฐาน
ฐานกันเดียวกัน คือ พลาตินัม (Platinum)



รูปที่ ๕-6 การเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลประเภทต่าง ๆ กับมาตรฐาน

$$(E_0)_{ab} = (E_0)_{ac} + (E_0)_{cb}$$

- 5) ในการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ ณ จุดขั้วต่อสำหรับวัด เราจะต้องทราบอุณหภูมิ
ของขั้วต่ออีกด้านหนึ่งซึ่งเรียกว่า ขั้วบรรทัดฐาน (Reference Junction) จากการสอบ
เทียบค่า (Calibrate) เราสามารถเขียนตารางความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการวัดและ
แรงเคลื่อนไฟฟ้า ณ อุณหภูมิอ้างอิงนั้น ๆ ได้ จากกฎข้อนี้ทำให้เราสามารถหาค่า T_1 ถึง
แม้ว่าอุณหภูมิอ้างอิง T_2 จะไม่เท่ากับอุณหภูมิขณะที่เราสอบเทียบค่า (Calibrate) ไว้



รูปที่ ๕-7 แสดงการวัดอุณหภูมิที่ขั้วบรรทัดฐาน

ประเภทของเทอร์โมคัปเปิล

ตามมาตรฐานของ ANSI (American National Standards Institute) ได้แบ่งเทอร์โมคัปเปิล
เป็น 7 ประเภท ตามวัสดุของสายเทอร์โมคัปเปิลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ๕-1 ตารางการแบ่งประเภทของเทอร์โมคัปเปิลตามมาตรฐาน ANSI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภท	วัสดุค้ำบวก	วัสดุค้ำลบ	Temp. Max. (°C)
B	Platinum 30% Rhodium	Platinum-6% Rhodium	1,700
E	Nickel -10% Rhodium	Constantan*	870
J	Iron	Constantan	760
K	Nickel-10% Chromium	Nickel-5%Aluminum or Silicon	1,260
R	Platinum-13% Rhodium	Platinum	1,480
S	Platinum-10% Rhodium	Platinum	1,480
T	Copper	Constantan	370

หมายเหตุ

1) *Constantan คือ โลหะผสม 45% Nickel-55% Copper

2) อุณหภูมิสูงสุดขึ้นกับขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลด้วย อุณหภูมิสูงสุดที่แสดงในตารางนี้สำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลขนาด 8 AWG (3.25 mm.) ยกเว้นประเภท B,R เทอร์โมคัปเปิลมีท่อป้องกันหรือบรรจุอยู่ในท่อปลายปิด โดยเทอร์โมคัปเปิลมีอายุการใช้งานยาวนานพอสมควร ในการใช้งานจริงอาจมีบางขณะสั้น ๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดลักษณะการใช้งานและข้อจำกัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละประเภทอาจสรุปได้ดังนี้

ประเภท	ลักษณะสภาพของการใช้งานและข้อจำกัด
B	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานอย่างต่อเนื่องในสภาพแวดล้อม Oxidizing หรือ Inert ถึง 1760 องศาเซลเซียส - ใช้งานระยะสั้นในสูญญากาศ - ไม่ควรใช้ในสภาพแวดล้อม Reducing หรือมีไอของโลหะหรือโลหะ เวนแต่จะมีท่อป้องกันที่ไม่ใช่โลหะ
E	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานต่อเนื่องในสภาพแวดล้อม Oxidizing หรือ Inert ถึง 870 องศาเซลเซียส - ใช้งานได้ดีสำหรับอุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -250 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่มีปัญหาเรื่องการสุกร่อนจากความชื้น อย่างไรก็ตามที่ช่วงอุณหภูมินั้น ไม่มีมาตรฐานจำกัดค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับเทอร์โมคัปเปิล - ในสภาพแวดล้อม Reducing หรือสภาพแวดล้อมที่มีกำมะถันจะต้องมีท่อป้องกันที่เหมาะสม
J	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้งานต่อเนื่องในสภาพแวดล้อม Oxidizing, Reducing, Inert หรือสภาพสูญญากาศ ถึง 760 องศาเซลเซียส - สายเทอร์โมคัปเปิลเปลือยไม่ควรใช้ในสภาพที่มีกำมะถันและอุณหภูมิสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>540 องศาเซลเซียส</p> <p>- ใช้ได้ในอุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -200 องศาเซลเซียส แต่มีข้อจำกัดด้านความละเอียดถูกต้อง เช่นเดียวกับประเภท E</p>
K	<p>- ใช้งานต่อเนื่องในสภาพ Oxidizing หรือ Inert ถึง 1260 องศาเซลเซียส</p> <p>- ใช้กันมากที่สุดสำหรับช่วงอุณหภูมิเกิน 540 องศาเซลเซียส</p> <p>- ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -250 องศาเซลเซียส แต่มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับประเภท E</p>
R,S	<p>- สภาพการใช้งานโดยทั่วไปเหมือนประเภท B แต่มีอุณหภูมิต่ำกว่าประเภท B และความละเอียดถูกต้องที่อุณหภูมิสูงจะสู้ประเภท B ไม่ได้</p>
T	<p>- ใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 ถึง -250 องศาเซลเซียส ไม่มีปัญหาความสุกก่อนจากความชื้น และยังเป็นเทอร์โมคัปเปิลประเภทเดียวที่มีมาตรฐานความคลาดเคลื่อนสำหรับอุณหภูมิในช่วงนี้</p> <p>- ใช้งานต่อเนื่องในสภาพ Oxidizing, Reducing หรือ Inert ถึง 70 องศาเซลเซียส</p>

นอกจากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 ประเภทที่กล่าวมานี้ ยังมีเทอร์โมคัปเปิลที่ไม่ได้จัดเข้ามาตรฐานสำหรับใช้งานเฉพาะประเภทซึ่งมีสภาพใช้งานยุ่งยากกว่า เช่น การใช้งานต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 1400-1800 องศาเซลเซียส เทอร์โมคัปเปิล Platinum-40%Rhodium กับ Platinum-20%Rhodium จะใช้งานได้ดีเมื่อพิจารณาในแง่ความทนต่อสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตามในสภาพที่เทอร์โมคัปเปิลประเภท B สามารถจะใช้ได้ดีก็ควรใช้ประเภท B เพราะให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า (สะดวกในการวัดและวัดได้ละเอียดกว่า) และยังมีราคาถูกกว่าด้วย เทอร์โมคัปเปิลที่ไม่ได้จัดเข้ามาตรฐานที่มีขายในท้องตลาดนอกจากประเภทที่กล่าวมาแล้ว ได้แก่ Iridium-Rhodium, Platinum, Nickel-Chromium, Nickel-Molybdenum และ Tungsten-Rhenium

ข้อควรระวังในการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิล

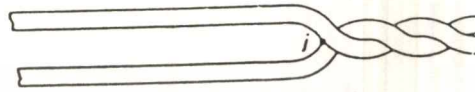
1. ในสภาวะงานที่เป็น Reducing หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่าง Oxidizing และ Reducing
2. ในสภาวะที่มีไอของซัลเฟอร์ เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิล โดยเฉพาะสายลวดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว
3. ในสภาวะงานที่เป็น Vacuum ยกเว้นในช่วงเวลาสั้น ๆ

ถ้าหากมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลกับสภาพดังกล่าวจะต้องใช้ Protection Tube

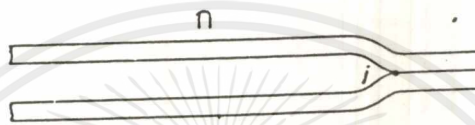
ป้องกันเสียก่อน อายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ประมาณ 20 ปี เพราะหลังจากนั้นส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนผสมจะเปลี่ยนไปโดยจะมีเหล็กเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 2% และส่วนผสมบางอย่าง เช่น แมงกานีส จะลดปริมาณลง
 ชั้นส่วนต่าง ๆ และการติดตั้ง

1) ตัวเทอร์โมคัปเปิล เราได้กล่าวถึงประเภทและสายวัสดุของเทอร์โมคัปเปิลมาแล้วในตอนต้น สิ่งที่เราควรทราบเพิ่มเติม ได้แก่ วิธีการต่อขั้วเข้าหากันของคู่สายเทอร์โมคัปเปิล



For gas, electric, and arc welding



For resistance welding, large wires



For forming noble-metal wires for electric arc welding

รูปที่ ๘-๘ รูปแสดงการต่อเทอร์โมคัปเปิล

การต่อแบบรูป (ก) ทำได้โดยพันควั่นสายทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วเชื่อมด้วยแก๊ส ไฟฟ้าหรือบักกรีให้ยึดกันแน่น ไม่หลวมหลุดหรือมีหัวสัมผัสไม่ดีระหว่างการใช้งานวิธีนี้เหมาะสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลทั่ว ๆ ไปที่ขนาดสายไม่ใหญ่นัก

การต่อแบบรูป (ข) ใช้สำหรับกรณีที่มีสายใหญ่ ไม่สะดวกต่อการพันเข้าหากันเพียงแต่เชื่อมให้ติดกันไว้เท่านั้น

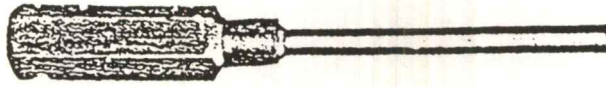
การต่อแบบรูป (ค) ใช้สำหรับเชื่อมสายโลหะมีตระกูล (พวก Platinum) โดยที่จุด j ในรูปเป็นจุดที่เราเรียกว่า Effective Junction ถือว่าเป็นจุดแน่นอนซึ่งตัวเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

2) ฉนวนหุ้มเทอร์โมคัปเปิล จุดประสงค์หลักของการหุ้มฉนวนเทอร์โมคัปเปิล คือเพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับวงจร เพราะถ้าสายเทอร์โมคัปเปิลแตะกันตรงกลางหรือเกิด short circuit อุณหภูมิที่อ่านได้จะไม่ใช่อุณหภูมิของจุดที่ต้องการวัด วัสดุฉนวนนี้จะต้องเหมาะสมกับงาน โดยปรกติจะต้องสามารถป้องกันความชื้น หักงอได้ ไม่สึกกร่อนง่าย ทนความร้อนถึงอุณหภูมิใช้งาน และทนการกัดกร่อนทางเคมี คุณสมบัติการใช้งานของฉนวนแบบต่าง ๆ ได้สรุปไว้ในตารางดังนี้ ตารางที่ ๘-๒ คุณสมบัติของฉนวนแบบต่าง ๆ

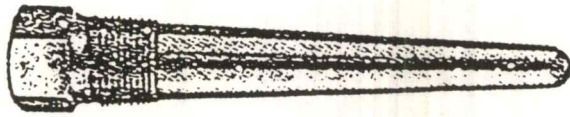
ประเภท	อุณหภูมิสูงสุด งานต่อเนื่อง °C	อุณหภูมิสูงสุด ระยะสั้น °C	ทนความร้อน	ทนการกัด กร่อน
Cotton	90	90	เลว	พอใช้
Polyvinyl	100	100	ดีมาก	ดีมาก
Enamel and Cotto	90	90	พอใช้	พอใช้
Nylon	125	125	ดี	ดี
Teflon	200	300	ดีมาก	ดีมาก
Polymide	300	400	ดีมาก	ดี
Teflon and Fiberglass	300	540	ดีมากถึง 200	ดี
Fiberglass-Vanish or Siricon Impregnation	480	540	พอใช้ถึง 200	พอใช้ถึง 200
Fiberglass Non-Impregnation	540	650	เลว	พอใช้
Asbestos and Fiberglass	480	650	ดีถึง 200	พอใช้ถึง 200
Felted Asbestos	540	650	เลว	เลว
Asbestos Over	540	650	เลว	เลว

นอกจากนี้ยังมีฉนวนที่เป็นท่อเซรามิกจำพวกมุลไลต์ อะลูมินัมออกไซด์และสเตไดต์ ในกรณีของเทอร์โมคัปเปิลพวกโลหะมีตระกูลขอแนะนำให้อายุการใช้งานแบบชิ้นเดียว ฉนวนเซรามิกมีขายในท้องตลาดมีความหนาตามมาตรฐาน 1,2,3,6,12,24,36 และ 72 นิ้ว

3) ท่อป้องกันเทอร์โมคัปเปิล ในสภาพแวดล้อมซึ่งมีการกัดกร่อนสูงหรือสภาพอื่น ๆ ที่ทำให้อายุการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลสั้นลง จะต้องมีท่อป้องกันสวม หรือเรียกว่า เทอร์โมเวลล์ (Thermowell) เป็นท่อปลายปิดสำหรับติดตั้งโดยปลายด้านปิดเสียบเข้าไปในท่อหรือ Process Vessel วิธีการติดตั้งมีทั้งแบบเกลียวและแบบหน้าแปลนดังรูป



(ก) lagging well



(ข) tapered well

รูปที่ ๘-9 รูปแสดงการติดตั้งทั้งแบบเกลียวและแบบหน้าแปลน

วัสดุของท่อป้องกันนี้ส่วนใหญ่มักเป็นโลหะ ในกรณีที่เป็นเหล็กกรรมดจะสามารใใช้ งานได้ถึง 700 องศาเซลเซียส ในสภาพแวดล้อม Oxidizing สำหรับเหล็กสแตนเลสพวก Ausstenitic (Series 300) ใช้งานได้ถึงอุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส พวก Ferritic (Series 400) ใช้ได้ถึง 1000 องศาเซลเซียสในสภาพแวดล้อม Oxidizing และ Reducting ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้เรามักใช้เทอร์โมคัปเปิลเซรามิกหรือซิลิกอนคาร์ไบด์

4) สายต่อ เป็นสายโลหะซึ่งใช้ต่อเชื่อมขั้ววัดและขั้วอ้างอิง (Reference) ของเทอร์โมคัปเปิล โดยปกติเราจะเลือกใช้สายที่มีคุณสมบัติทางเทอร์โมอิเล็กทริกใกล้เคียงกับสายของเทอร์โมคัปเปิล สายต่อเป็นสายมีฉนวนหุ้มมีทั้งแบบเส้นเค็ว เส้นคู่ สายแข็ง และสายอ่อน

ข้อดีของการใช้สายต่อ

- ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวงจรดีขึ้น เช่น ใช้สายด็ก หรือสายอ่อนจะช่วยให้การติดตั้งที่มีการโค้งงอของสายทำได้ง่าย นอกจากนี้เรายังอาจเลือกสายต่อเพื่อช่วยปรับค่าความต้านทานไฟฟ้าในวงจรได้
- ลดค่าใช้จ่ายในกรณีของสายเทอร์โมคัปเปิลเป็นโลหะราคาแพง เช่น Platinum เราสามารถใช้สายต่อเป็นโลหะชนิดอื่นที่ราคาถูกกว่าได้

ช่วงเวลาตอบสนองของการวัดอุณหภูมิ (response Time)

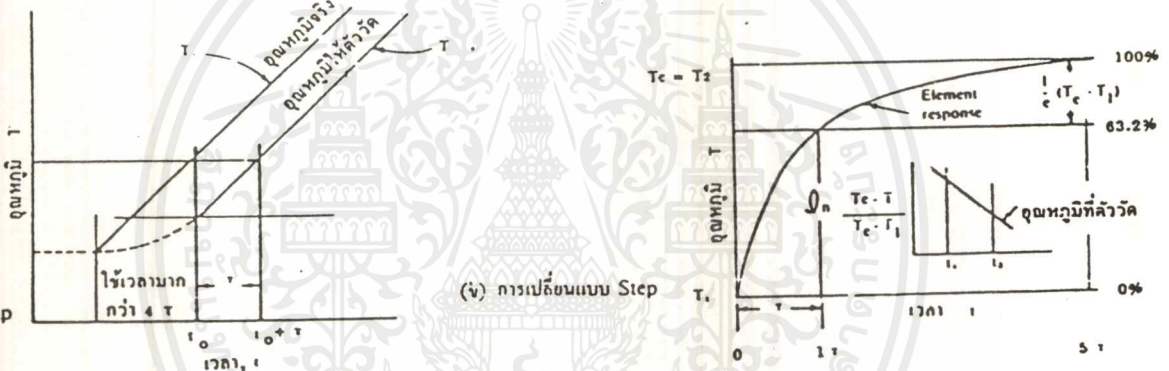
เครื่องมือวัดอุณหภูมิทุกชนิดมีช่วงเวลาหน่วง คือ อุณหภูมิที่รับอกจะช้ากว่าอุณหภูมิจริง เนื่องจากต้องรับหรือคายความร้อนผ่านตัว Protection Tube Sheath-ฉนวน ก่อนจึงจะถึงตัววัดอุณหภูมิ ความเร็วของการวัดอุณหภูมิขึ้นอยู่กับ first order Thermal Constant

$$\tau = \frac{wVc}{hA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ τ เป็นค่า Time Constant มีหน่วยเป็นวินาที, w เป็นค่านำหนักจำเพาะ, V เป็นค่าของปริมาตร, h เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และ A เป็นพื้นที่รับความร้อน

การเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิในระบบ พอลจะแบ่งแยกออกเป็น 2 อย่าง คือ แบบเปลี่ยนแปลงช้าเป็นสัดส่วนกับเวลา (Ramp) และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Step) ตามรูป ก-9 (ก) เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Ramp อุณหภูมิของตัววัดจะขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิจริงในระบบมากกว่า 4τ รูป ก-9 (ข) เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ Step อุณหภูมิของตัววัดจะขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิของตัวจริงและขึ้นในรูปของ Exponential ค่า Time Constant คือค่าเวลาที่ตัววัดใช้รับอุณหภูมิเมื่อ 63.2% ของอุณหภูมิจริงในระบบ ตัววัดจะใช้เวลามากกว่า 5τ ในการขึ้นถึงค่า 100% ของอุณหภูมิจริง



รูปที่ ๙-10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา

องค์ประกอบของ Response ของเทอร์โมคัปเปิล

Response ของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

- ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิล
- การเชื่อมจุด Measuring Junction
- Bulb or Well
- ส่วนที่เป็นช่องว่าง (Air Space)
- ความหนาแน่นของของไหล

ขนาดของสายและจุดเชื่อม (Measuring Junction)

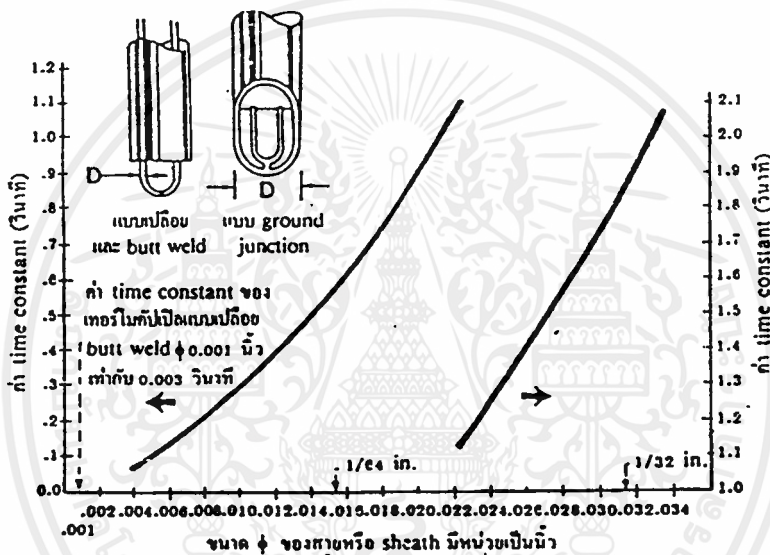
รูปที่ ๙-11 เป็นการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่า Time Constant ที่เพิ่มขึ้นตามลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ ของเทอร์โมคัปเปิล โดยคำนวณจากการให้อุณหภูมิของอากาศเปลี่ยนแบบ Step และไหลผ่านเทอร์โมคัปเปิลด้วยความเร็ว 65 ฟุตต่อวินาที

รูปที่ ๙-11 กราฟทางซ้ายแสดงว่า Time Constant ของเทอร์โมคัปเปิลแบบเปิด และจุดต่อแบบ Butt Weld ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01004 นิ้วถึง 0.022 นิ้ว ค่า time Constant สำหรับสายขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าสายขนาดใหญ่

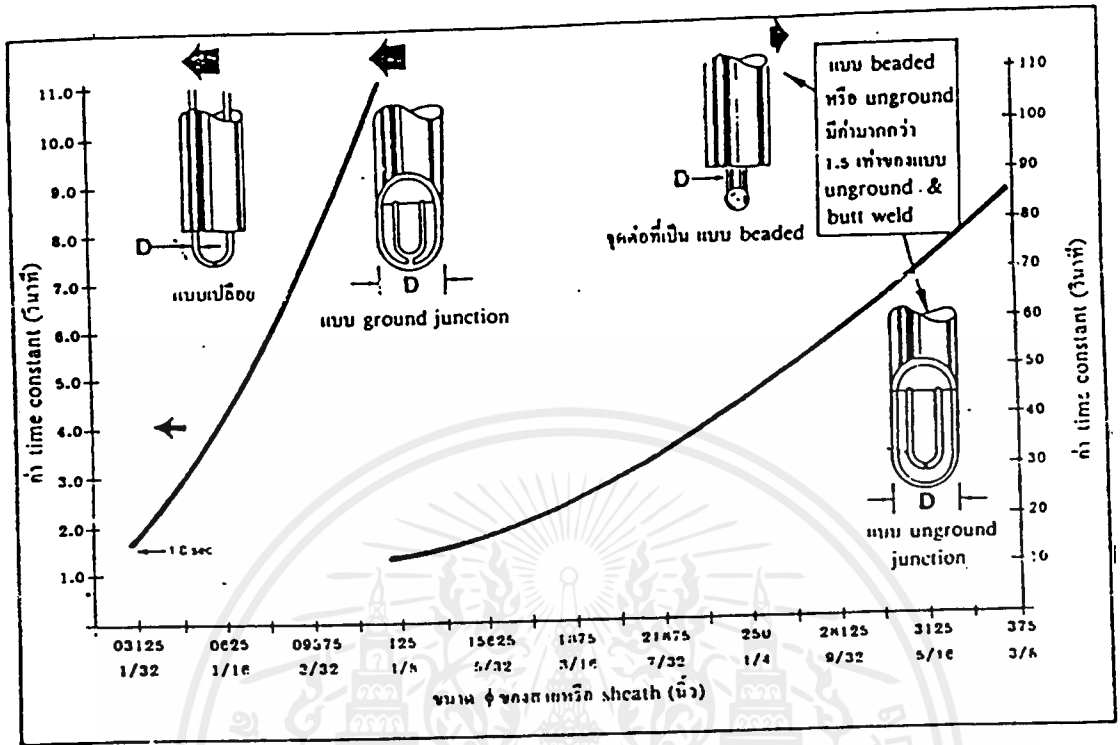
รูปที่ ๙-11 กราฟทางขวาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ Sheath ของเทอร์โมคัปเปิลแบบ Ground Junction กับค่า Constant ที่ Sheath ขนาดเล็ก 0.022 นิ้ว ค่า Time Constant ประมาณ 0.1 วินาที แต่ที่ Sheath ขนาด 0.033 นิ้ว Time Constant จะสูงขึ้นเป็น 2 วินาที



รูปที่ ๙-11 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่า Time Constant ที่เพิ่มขึ้นตามลักษณะต่างๆ ของเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ ๙-12 กราฟทางซ้ายแสดงความสัมพันธ์เหมือนรูปที่ ๙-10 แต่มีขนาดสายและ Sheath ใหญ่กว่า, ขนาดสายจาก 0.03125 นิ้วถึง 0.375 นิ้ว Time Constant จะเปลี่ยนตามขนาดสายจาก 1.8 วินาที จนถึง 85 วินาที ขนาดของ Sheath จาก 1/32 นิ้วถึง 3/8 นิ้วจะทำให้ค่า Time Constant เปลี่ยนจาก 1.8 วินาที ถึง 85 วินาที

รูปที่ ๙-12 ทางขวามือแสดงการต่อ Measuring Junction แบบ Bead และการต่อ Junction ใน Sheath แบบ unground สำหรับสายของเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองแบบคือวงกลมด้วย 1.5 ของค่า Time Constant ของเทอร์โมคัปเปิลแบบ Butt Weld และแบบ Ground Junction

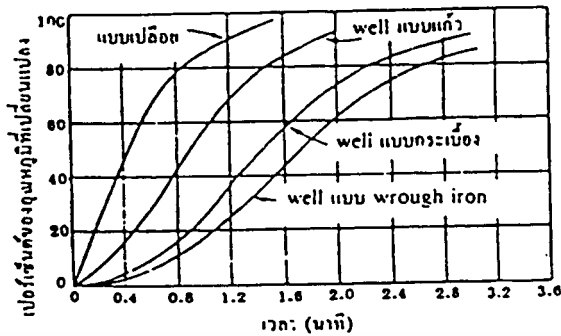


รูปที่ ม-12 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่า Time Constant ที่เพิ่มขึ้นของการต่อเทอร์โมคัปเปิล

จากรูปที่ ม-12 พอสรุปได้ว่า

- Response Time ของเทอร์โมคัปเปิลขนาดเล็กจะเร็วกว่าสายขนาดใหญ่ เนื่องจากสายขนาดใหญ่ต้องการปริมาณความร้อนมากกว่าสายขนาดเล็กในการเพิ่มอุณหภูมิที่เท่ากัน
- จุดเชื่อมต่อแบบ Butt Weld ซึ่งเป็นจุดต่อที่มีขนาดเล็กมากที่สุด จะให้ Response Time รวดเร็วที่สุด เร็วกว่าแบบ Bead และแบบฮ้าหมุด และแบบบิดเป็นเกลียว (Twist Junction) จะให้ Response ช้าที่สุด เนื่องจากมีจุดต่อขนาดใหญ่ และเมื่อใช้ร่วมกับ Protecting Tube หรือ Well จุดเชื่อมต่อของเทอร์โมคัปเปิลภายใน Well จะมีผลต่อ Time Constant โดยตรง แบบ Ground Junction จะใช้เวลาในการวัดประมาณ 2 ใน 3 ของแบบ Unground Junction เท่านั้น

การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำ Protecting Well ก็มีผลทำให้ Response Time ไม่เท่ากัน ตาม รูปที่ ค-12 เป็น Response Time ของวัสดุที่ใช้ทำ Protecting Well แบบต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ เทอร์โมคัปเปิลแบบเปิด (Bare Thermocouple) แบบแก้วจะให้ผลตอบสนองเร็วกว่าแบบกระเบื้อง (porcelain) และแบบ Wrought Iron



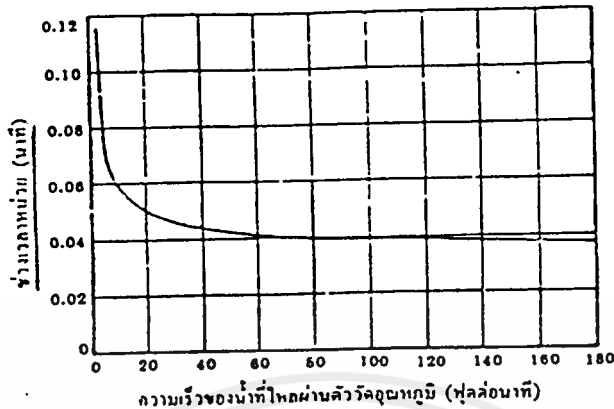
รูปที่ 13 แสดง Response Time ของวัสดุที่ใช้ทำ Protection Well
แบบต่าง ๆ เปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลแบบเปิด

Air Space

ช่องว่างระหว่าง Protecting Well กับตัวเทอร์โมคัปเปิลก็มีความเร็วในการวัดลดลงไปได้มาก เนื่องจากอากาศไม่ใช่ตัวนำความร้อนที่ดี ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องลดขนาดช่องว่าง (Clearance) ในช่วงดังกล่าวนี้ให้แคบที่สุด เทอร์โมคัปเปิลบางตัวที่ Sheath ของมันมีสปริงคั้นตัว Sheath ให้ติดกับ Protecting Well ตลอดเวลา จุดประสงค์ก็คือ ต้องการลดช่องว่างนี้เพื่อให้ได้ผลการวัดไวขึ้น และถ้าต้องการให้ได้ผลดีขึ้นควรใส่น้ำมันหรือผงกราไฟต์ลงไปในช่องปลายของเทอร์โมคัปเปิลด้วย แต่ต้องแน่ใจว่าในสถานะการใช้งานปกติอุณหภูมิจะต้องไม่สูงหรือต่ำจนทำให้น้ำมันเดือดหรือแข็งตัว และน้ำมันจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับ Protecting Well และเทอร์โมคัปเปิล ถ้าการติดตั้งอยู่ในแนวอนจะใช้น้ำมันไม่ได้ควรใช้จาระบีชนิดทนความร้อนผสมกับผงกราไฟต์ ผงกราไฟต์สามารถใช้งานกับอุณหภูมิในย่านกว้าง

ความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านตัววัด (sensor)

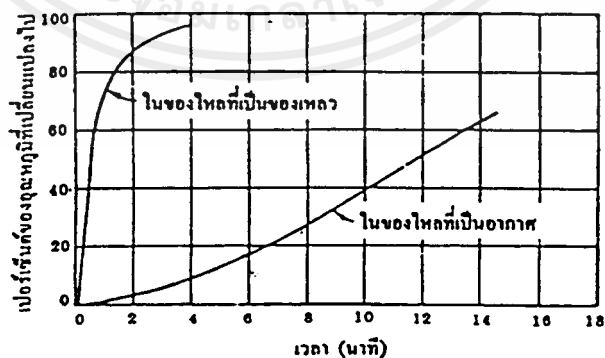
มีผลให้อุณหภูมิของตัววัดขึ้นช้าหรือเร็วได้ เพราะเมื่อความเร็วของของไหลมากขึ้นก็จะถ่ายเทความร้อนให้ตัววัดได้เร็วขึ้น ทำให้ได้ผลตอบสนองได้เร็วขึ้น ตามรูปที่ ค-13 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลของน้ำกับช่วงเวลาหน่วง (Lag Coefficient) ที่ความเร็วของน้ำไหลผ่านตัว Bulb 2 ฟุตต่อนาที ช่วงเวลาหน่วงประมาณ 0.1 วินาที แต่ที่ความเร็วน้ำ 20 ฟุตต่อนาที ช่วงเวลาหน่วงจะลดลงเหลือประมาณ 0.05 วินาที ดังนั้น เพื่อที่จะลดเวลาหน่วงให้เหลือน้อย ความเร็วในการไหลของน้ำควรมีค่าอย่างน้อย 60 ฟุตต่อนาที แต่ความเร็วในการไหลก็มีขีดจำกัด ซึ่งกำหนดขึ้นตามความแข็งแรงทนทานของตัวเทอร์โมเวลล์ (Thermowell)



รูปที่ ๑-14 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลของน้ำกับช่วงเวลาหน่วง

ความหนาแน่นของของไหล

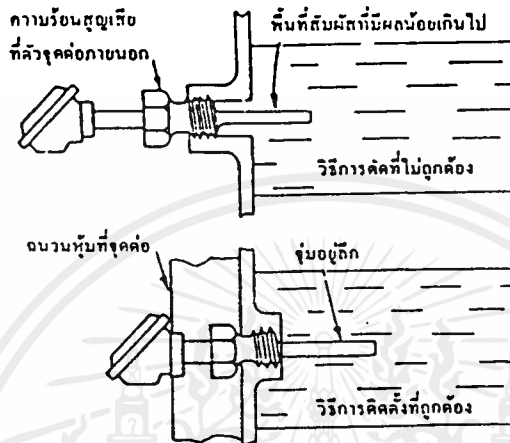
ความหนาแน่นของของไหลที่ไหลผ่านหัววัดอุณภูมิ ก็มีผลทำให้ผลการวัดเร็วหรือช้าได้ของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่าส่วนใหญ่มักจะมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าของไหลที่มีความหนาแน่นน้อย ดังนั้นการคายความร้อนให้กับตัววัดอุณภูมิก็เป็นไปได้เร็วกว่า ตามรูปที่ ๑-14 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองในการวัดอุณภูมิของของไหลที่เป็นของเหลว และอากาศที่มีความเร็วในการไหลเท่ากันจะเห็นว่าอากาศจะมีค่า Time Constant มากกว่าของไหลที่เป็นของเหลว



รูปที่ ๑-15 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองในการวัดอุณภูมิของของไหลที่เป็นของเหลวและอากาศ

การติดตั้งที่ถูกต้อง

จะต้องสอด Protecting Well เข้าในให้ลึกพอสมควรประมาณ 10 หรือ 15 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเทอร์โมเวลต์ และใช้ฉนวนความร้อนป้องกันการสูญเสียความร้อนของตัววัดอุณหภูมิด้วย ตามรูปที่ ศ-15



รูปที่ ศ-16 แสดงการติดตั้ง

Dynamic Response

ในสภาพการวัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในระบบ (system) ถ้าอุณหภูมิของของไหลเปลี่ยนแปลงแบบ cycle ช่วงเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดการวัดชั่วขณะผิดพลาดและทำให้ค่าที่วัดได้ต่ำลงไปบ้างคงรูป เพราะขณะที่ค่าอุณหภูมิที่วัดจะขึ้นถึงค่าสูงสุดนั้นค่าอุณหภูมิจริงในระบบเริ่มตกลง และทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ไม่สูงเท่าของระบบจริง ลักษณะที่เกิดขึ้นเรียกว่า การผิดพลาดแบบไดนามิก (Dynamic Error) อันเกิดจากช่วงเวลาหน่วง (Lag) ซึ่งเป็นธรรมชาติของการวัดอุณหภูมิ ดังนั้นการเลือกชนิดควรให้ไวที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดการผิดพลาดอันนี้

การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าและการหาอุณหภูมิ

จากหลักการพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล คือ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็นปฏิภาคกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างขั้ว ดังนั้น ถ้าทราบอุณหภูมิของขั้วบรรทัดฐาน (Reference Junction) เราจะสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ขั้วต่อสำหรับวัดได้จากการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจร

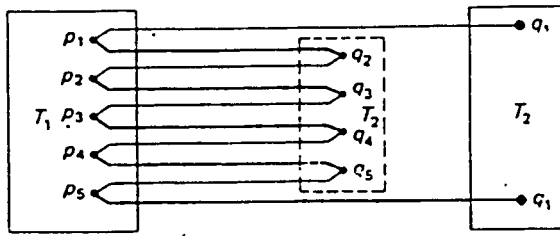
อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ คือ Potentiometer ซึ่งโวลต์มิเตอร์แบบดิจิตอลก็จัดเป็น Potentiometer ชนิดหนึ่ง ในการวัดที่ต้องการความละเอียดแน่นอน เช่น การวัดใน

ทดลองขั้วบรรทัดฐานจะต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะใช้วิธีแช่ไว้ในอ่างน้ำแข็ง ซึ่ง ออกแบบเฉพาะให้ใช้ได้สะดวกและให้ค่าใกล้เคียง 0 องศาเซลเซียสจริง ๆ

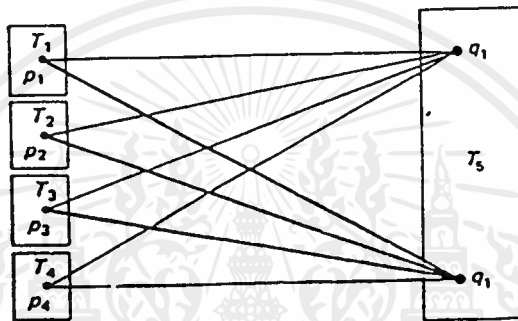
ในการใช้งานสำหรับเทอร์โมคัปเปิลในโรงงานจะเป็นการยุ่งยากที่จะใช้อ่านค่ากระเปาะน้ำ แข็งเพื่อแช่ขั้วบรรทัดฐานในเตาอบ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ค่าหนึ่งซึ่งทราบค่าจากแรงเคลื่อน ไฟฟ้าที่อ่านได้ เราสามารถคำนวณกลับไปหาอุณหภูมิ ณ จุดที่ไว้ได้ นอกจากนี้แล้วยังมีวิธีการใช้ระบบ แก้อัตโนมัตติ (Auto Compensation) ซึ่งอาจเป็นแบบไฟฟ้า หรือแบบอาศัยการขยายตัวต่างกันของ โลหะตามอุณหภูมิเข้าไปกับ Potentiometer โดยที่ขั้วบรรทัดฐาน (Reference Junction) จะถูกติดตั้ง ไว้ในบริเวณใกล้เคียง ๆ กับอุปกรณ์วัดค่านี้ นั่นคือ อยู่ที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงเพราะ ความผิดพลาดเมื่อคิด เป็นเปอร์เซ็นต์แล้วน้อยมาก มีข้อพึงสังเกตว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรและ อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลไม่ได้เป็นความสัมพันธ์เส้นตรง ดังนั้นการหาค่าอุณหภูมิถ้าใช้วิธีการ อ่านค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น ไมโครโวลต์ หรือ มิลลิโวลต์ แล้วมาหาค่าอุณหภูมิที่สอดคล้องกันจะยุ่ง ยากไม่น้อยทีเดียว เนื่องจากปัจจุบันนี้การพัฒนาทางอิเล็กทรอนิกส์และไมโครโปรเซสเซอร์ได้ก้าว หน้าไปมาก ปัญหาเหล่านี้จึงถูกขจัดออกไป เราสามารถเก็บค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟ ฟ้าและอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลประเภทที่ใช้งานอยู่เข้าไว้ในชุดไมโครโปรเซสเซอร์ จากค่าแรง เคลื่อนไฟฟ้าของวงจรเทอร์โมคัปเปิลจะถูกคำนวณเปลี่ยนเป็นค่าอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยสามารถ รวมการชดเชยค่าของอุณหภูมิที่ขั้วบรรทัดฐานของเทอร์โมคัปเปิลได้อีกด้วย

การต่อเทอร์โมคัปเปิลแบบอนุกรมและขนาน

เทอร์โมคัปเปิลหลาย ๆ ชุดสามารถต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมหรือแบบขนานดังรูป การต่อ อนุกรมกันเราเรียกว่า เทอร์โมไพล์ (Thermopile) เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มแรงเคลื่อนไฟฟ้า ถัฟธ์ของ วงจรสำหรับเทอร์โมคัปเปิล n ชุด แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่จะวัดเป็น n เท่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากเทอร์ โมคัปเปิลชุดเดียว วัตถุประสงค์ของการติดตั้งประเภทนี้ คือ เพิ่มเพิ่มความละเอียดในการวัด ตัวอย่าง เช่น การใช้ Potentiometer ที่วัด ได้ละเอียดถึง 1 V กับ เทอร์โมคัปเปิล Chromel Constantan 25 ชุด จะ สามารถวัดอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 0.001 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่การต่อแบบขนานมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อวัดอุณหภูมิที่อ่านได้จะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยจริงก็ต่อเมื่อมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้า กับอุณหภูมิเป็นเส้นตรงในช่วงที่วัดอุณหภูมินั้น ๆ



รูปที่ ผ-17 การต่อแบบอนุกรม

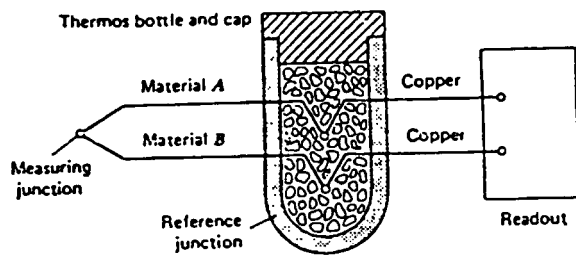


รูปที่ ผ-18 การต่อแบบขนาน

อุณหภูมิของขั้วบรรทัดฐาน (reference Junction)

เนื่องจากการทำงานของวงจรเทอร์โมคัปเปิลเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ให้คงที่ จึงจำเป็นที่เราต้องควบคุมอุณหภูมิและถูกต้องอยู่เสมอและการควบคุมอ้างอิง (Reference Temperature; T_r) ให้คงที่และถูกต้องอยู่เสมอซึ่งการควบคุมอุณหภูมิอ้างอิงโดยทั่วไปมี 4 วิธีคือ

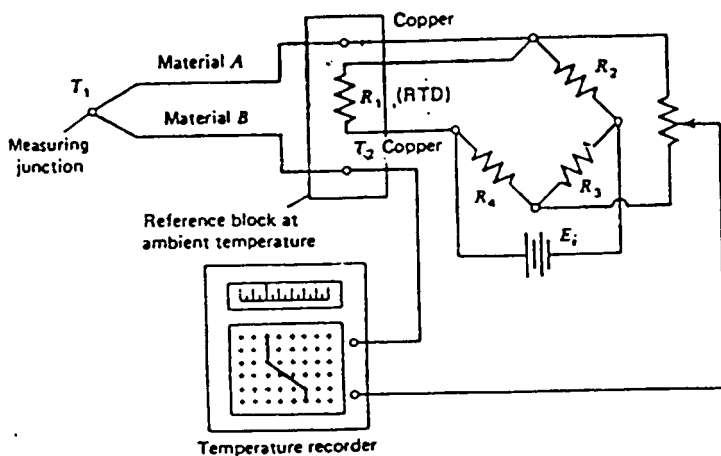
1) ใช้ขั้วบรรทัดฐานจุ่มลงในอ่างน้ำแข็ง เป็นวิธีที่ง่ายและนิยมใช้กันมากที่สุด การวัดโดยวิธีนี้ขั้วบรรทัดฐานของเทอร์โมคัปเปิลจะต้องจุ่มอยู่ในส่วนผสมของน้ำแข็งและน้ำใน Thermos Bottle ซึ่งมีฝาปิดอย่างดี และมีฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ในกรณีที่ต้องใช้เวลานาน การวัดนาน ควรต้องเอาส่วนที่ละลายออกและเติมน้ำแข็งลงไปแทนเป็นระยะ ๆ เพื่อรักษาอุณหภูมิของอ่างน้ำแข็งให้คงที่อยู่ตลอดเวลา



รูปที่ ผ-19 แสดงการใช้ขั้วบรรทัดฐานจุ่มในอ่างน้ำแข็ง

2) จุ่มขั้วบรรทัดฐานลงในอ่างที่บรรจุอากาศและของเหลวอิมมิด์โดยที่ผนังด้านนอกของอ่างจะถูกทำให้เย็น โดยอาศัยตัวทำความเย็นทางไฟฟ้า (หลักการของ Peltier Cooling Effect) จนกระทั่งน้ำเริ่มแข็งตัว ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแข็งตัวของน้ำในผนังจะทำให้ตัวจุ่มรับสัญญาณ ซึ่งต่อกับไมโครสวิตช์ชายตัว และไมโครสวิตช์จะตัดต่อการผ่านกระแสเข้าไปในตัวทำความเย็น ในวัฏจักรของการแข็งตัวและการละลายของน้ำแข็งบนผนังนี้ อุณหภูมิจะคงที่และถูกต้องที่ 0 องศาเซลเซียส (32 องศาฟาเรนไฮต์) วิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิอ้างอิงได้เป็นระยะเวลานาน ๆ และมีความถูกต้องมากที่สุดวิธีหนึ่ง

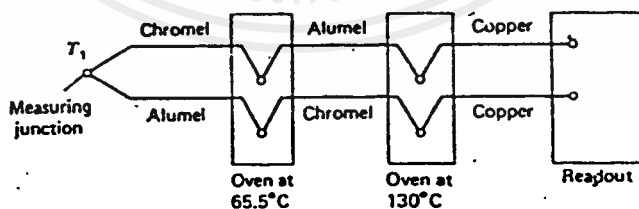
3) การต่อเป็นวงจรไฟฟ้าคังรูป มักใช้กับ Potentiometer Strip Chart และอุปกรณ์บันทึกอัตโนมัติซึ่งมีการชดเชยขั้วบรรทัดฐานตามลักษณะหรือสภาพอุณหภูมินั้น ๆ โดยต่อเป็นวงจรแบบ Wheatstone Bridge กับ Resistance Temperature Detector หรือ RTD จะปรับค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิของบรรยากาศเปลี่ยนไป โดยวงจร Bridge จะถูกออกแบบให้มีแรงดันออกมาเท่ากันแต่มีขั้วตรงกันข้ามกับแรงดันที่เกิดจากเทอร์โมคัปเปิล เมื่ออุณหภูมิอ้างอิง (T_2) เปลี่ยนไปจากเดิม คือ 32 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 0 องศาเซลเซียส ดังนั้นวิธีนี้จะชดเชยผลจากการที่อุณหภูมิของบรรยากาศเปลี่ยนแปลง วิธีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องวัดอุณหภูมิต่อเนื่องในช่วงเวลานาน ๆ ซึ่งไม่เหมาะกับวิธีอื่น ๆ



รูปที่ ผ-20 แสดงการต่อเป็นวงจรไฟฟ้า

4) วิธีอื่น ๆ นอกเหนือจากวิธีที่กล่าวมาแล้ว ทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของขั้วอ้างอิงให้สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ (บรรยากาศ) วิธีนี้เหมาะกับการใช้งานในที่ร้อน เช่น เอาขั้วบรรทัดฐานของเทอร์โมคัปเปิลไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้และต้องไว้คู่กับตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ถูกต้อง

วิธีที่นิยมใช้เพื่อกำจัดปัญหาเรื่องอุณหภูมิอ้างอิงทำได้โดยการใส่เตาอบ 2 ตัวดังรูป เพื่อปรับให้เหมือนกับมีอุณหภูมิอ้างอิงที่ 0 องศาเซลเซียส ในแต่ละขั้วของ Chromel-Alumel และ Alumel-Chromel ในเตาที่ 1 ในแรงดันออกมา 2.66 mV ที่อุณหภูมิ 65.5 องศาเซลเซียส แรงดันรวมจึงเท่ากับ 5.32 mV ซึ่งจะถูกทำให้หมดไปโดยคู่ของขั้วต่อระหว่าง Alumel-Copper และ Chromel-Copper ในเตาที่ 2 ที่ 130 องศาเซลเซียส



รูปที่ ผ-21 แสดงการต่อเพื่อกำจัดปัญหาเรื่องอุณหภูมิอ้างอิง

ผลที่ได้จากการต่อ 4 ขั้วนี้เข้ากับเตาอบ 2 ตัวจะให้ผลเหมือนกับมีขั้วบรรทัดฐานอันเดียวที่ 0 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยเส้นลวดโลหะ 2 เส้นที่มีคุณสมบัติต่างกัน ซึ่งมีโลหะหลายชนิดที่เหมาะสมจะนำมาทำเทอร์โมคัปเปิล โดยส่วนใหญ่เราจะมีวิธีเลือกใช้ดังนี้

- 1) มี Sensitivity สูงสุดในขอบเขตของการทำงาน
- 2) ต้องมีเสถียรภาพ (Stable) เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ
- 3) ต้องใช้ควบคู่กับเครื่องมือที่สามารถจัดหาได้
- 4) ราคาถูก

ความไวของโลหะต่าง ๆ เมื่อเทียบกับพลาทินัมแสดงได้ตามตาราง ผ-3

ตาราง ผ-3 ความไวของโลหะต่าง ๆ เมื่อเทียบกับพลาทินัม

Material	Sensitivity(S)	
	μV / องศาเซลเซียส	μV / องศาฟาเรนไฮด์
Bismuth	-72	-40
Constantan	-35	-19.4
Nickel	-15	-8.3
Ahumel	-13.6	-8.3
Platinum	0	0
Mercury	+0.6	+0.3
Carbon	+3	+1.7
Aluminum	+3.5	+1.9
Lasd	+4	+2.2
Silver	+6.5	+3.6
Copper	+6.5	+3.6
Gold	+6.5	+3.6
Tungstan	+7.5	+4.2
Iron	+18.5	+10.3
Chromel	+25.8	+14.3
Germanium	+300	+167
Siricon	+440	+244

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tellurium	+500	+278
Selenium	+900	+500

จากค่าต่าง ๆ ในตาราง เราสามารถหาความไว (Sensitivity) ของคู่โลหะต่าง ๆ ที่นำมาทำ เทอร์โมคัปเปิลได้ เช่น ความไวของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำจาก Chromel-Alumel หาได้โดย

$$S_{\text{chromel/Alumel}} = 25.8 - (13.6) = 39.4 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$$

นอกเหนือจากนี้เรายังต้องตระหนักว่าค่าความไวหรือ Sensitivity ของเทอร์โมคัปเปิลไม่คงที่ เพราะว่าแรงดันที่ได้ (E_0) ไม่เป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ($T_1 - T_2$) ค่าความไวของเทอร์โมคัปเปิลที่นิยมใช้กันมี 6 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ ก-4S

ตารางที่ ก-4 ค่าความไวของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่าง ๆ

อุณหภูมิ(°C)	E	J	K	R	S	T
-200	25.1	21.9	15.3	-	-	15.7
-100	45.2	41.1	30.5	-	-	28.4
0	58.7	41.1	30.5	5.3	5.4	38.7
100	67.5	50.4	41.4	7.5	7.3	46.8
200	74.0	55.5	40.0	8.8	8.5	53.1
300	77.9	55.4	40.0	9.7	9.1	58.1
400	80.0	55.1	42.2	10.4	9.6	61.8
500	80.9	56.0	42.6	10.4	9.6	61.8
600	80.7	58.5	42.5	11.3	10.2	-
700	79.8	62.2	41.9	11.8	10.5	-
800	78.4	-	41.0	12.3	10.9	-
900	76.7	-	40.0	12.8	11.2	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานของเครื่องมือวัดและการสอบเทียบค่า

เครื่องมือวัดที่ไม่ได้สอบเทียบค่า (Calibrate) ให้ถูกต้องจะเป็นอันตรายในการใช้ควบคุมเครื่องจักรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าที่ถูกต้องได้ การสอบเทียบค่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากในงานวัดและควบคุมทางด้านอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าจะเป็นงานที่ยุ่งยาก แต่เรามีความจำเป็นที่จะต้องทำให้ถูกต้องถ้าต้องการควบคุมคุณภาพของผลผลิตเพราะการสอบเทียบค่าเป็นสิ่งเดียวที่จะรับประกันได้ว่าเครื่องมือมีความถูกต้องในขอบเขต (Range) ที่ต้องการเพื่อรักษาระบบให้ทำงานได้อย่างประหยัดในสภาวะที่กำหนดไว้

การสอบเทียบค่าจะต้องทำเป็นระยะและต้องใช้เครื่องมือที่มาตรฐานเพื่อเทียบค่า ดังนั้นเราอาจกล่าวได้ว่าการสอบเทียบค่า (Calibrate) คือ การเปรียบเทียบค่า input และ output ของอุปกรณ์ชนิดหนึ่งกับตัวมาตรฐาน

คงได้กล่าวแล้วว่า การสอบเทียบค่าเป็นตัวชี้ว่าเครื่องมือจะวัดค่าได้ถูกต้องในช่วง (Range) ที่ต้องการหรือไม่ เมื่อเครื่องมือได้รับการออกแบบมาให้ทำงานอย่างถูกต้องในช่วงหนึ่ง และเราทำการเปรียบเทียบกับตัวมาตรฐานแล้วไม่ตรงกัน เราต้องปรับหรือซ่อมแซมเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง การปรับ (Adjust) หรือซ่อมแซมต้องทำโดยช่างผู้ชำนาญเท่านั้น หลังจากที่เครื่องมือได้ถูกปรับ ซ่อมแซมหรือปรับปรุงแล้วต้องทำการสอบเทียบค่าใหม่อีกครั้งหนึ่ง (Recalibrate)

สำหรับการสอบเทียบค่าเทอร์โมคัปเปิล เราต้องทำอย่างน้อย 3 จุด คือ หนึ่งช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการวัด สองช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการวัด สามช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการวัด

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

มิเตอร์แบบดิจิตอลสำหรับวัดแผงสวิทช์บอร์ด (Digital Panel Meter)

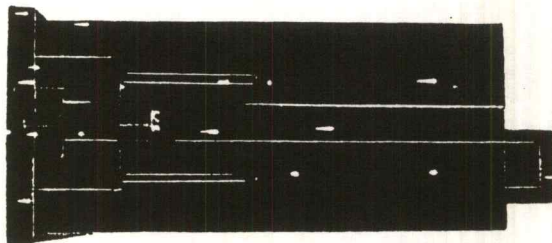
DIGICON DR99 SERIES

แสดงผลโดยใช้ LED ความสว่างสูง, ปรับผ่านการวัดโดยการไข้มเปอร์ภายในวงจร
คุณลักษณะของเครื่อง

- ตัวเลขแสดงผลโดยใช้ LED ขนาดใหญ่ 14.3 mm 3 ½ หลัก
- สามารถเปลี่ยนย่านวัดได้อย่างง่ายดาย โดยการเปลี่ยนตำแหน่งไข้มเปอร์บนแผงวงจรเท่านั้น
- ความผิดพลาด 0.5 – 0.8%
- มีขนาดหน้าปัดมาตรฐาน DIN (96x48 mm)
- การติดตั้งสามารถทำง่าย



ภาพด้านบน



ภาพด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ-22 มิเตอร์แบบดิจิตอล

คุณสมบัติ

-จอแสดงผล ใช้ LED สีแดง ความสว่างสูงขนาด 14.2 mm. 3 ½ หลัก, แสดงค่าได้สูงสุด + 1999

-รุ่นและย่านการวัด รุ่น DR99A มีย่านการวัด 199.9 DC mV ถึง 1000 DCV
รุ่น DR99ACA มีย่านการวัด 199.9 AC μ A ถึง 10 ACA

-การปรับย่านวัดและเลื่อนจุดทศนิยม สามารถทำได้ง่าย โดยใช้จัมเปอร์บนแผงวงจร

-แรงดันตกคร่อมสำหรับย่านวัดกระแสไฟมีค่า 199.9 mV, ในกรณีที่วัดค่าเต็มสเกล

-ขนาดเครื่อง (มาตรฐาน DIN) ขนาดหน้าปัทม์ : 96x48 mm.

ขนาดเครื่อง : 92x42x104 mm.

ขนาดเจาะแผงหน้าปัทม์ : 93x43 mm.

-แหล่งจ่ายไฟ ใช้ 220 V

-อุณหภูมิใช้งาน 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส

-ความแม่นยำหลังการปรับแต่ง ย่านวัด ACV, ACA : น้อยกว่า 0.8 %

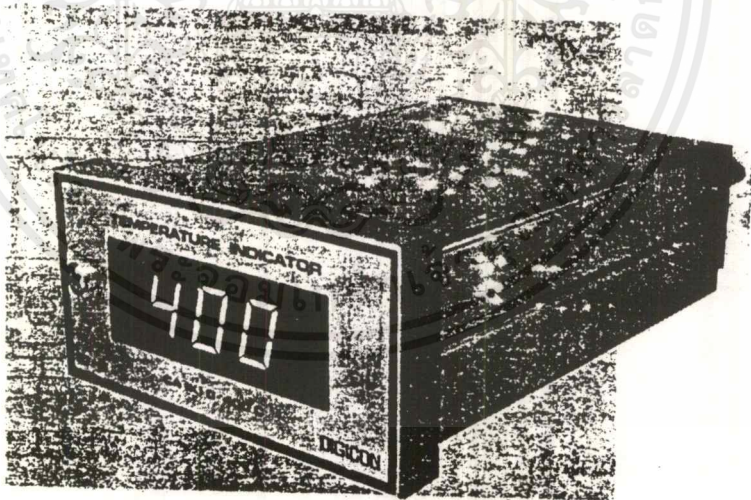
-คุณสมบัติทางความถี่ ตอบสนอง ได้ตั้งแต่ 40 ถึง 1 KHz

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Digital Temperature Indicator)

DIGICON Model ID-8

เครื่องวัดอุณหภูมิระบบดิจิทัลที่มีคุณลักษณะดังนี้

- มีแผงแสดงตัวเลขแบบ LED ขนาดใหญ่ (8x14 mm.)
- วงจรภายในได้รับการออกแบบให้ใช้ Integrated Circuit ซึ่งจะให้ค่า Input Impedance สูงมาก ทำให้วัดค่าได้อย่างเที่ยงตรง
- ขนาดรูปร่างภายนอกออกแบบตามมาตรฐาน DIN (48x96 mm.) และทำขึ้นจากอลูมิเนียม ทำให้แข็งแรงและสวยงาม
- ตัวเครื่องภายในสามารถถอดออกและเสียบเข้าทางด้านหน้าได้ (Plug In System) โดยไม่ต้องถอดสายด้านหลัง เพียงแค่คลายสกรูที่ขั้วเดียว ทำให้สะดวกในการตรวจสอบ และบำรุงรักษา



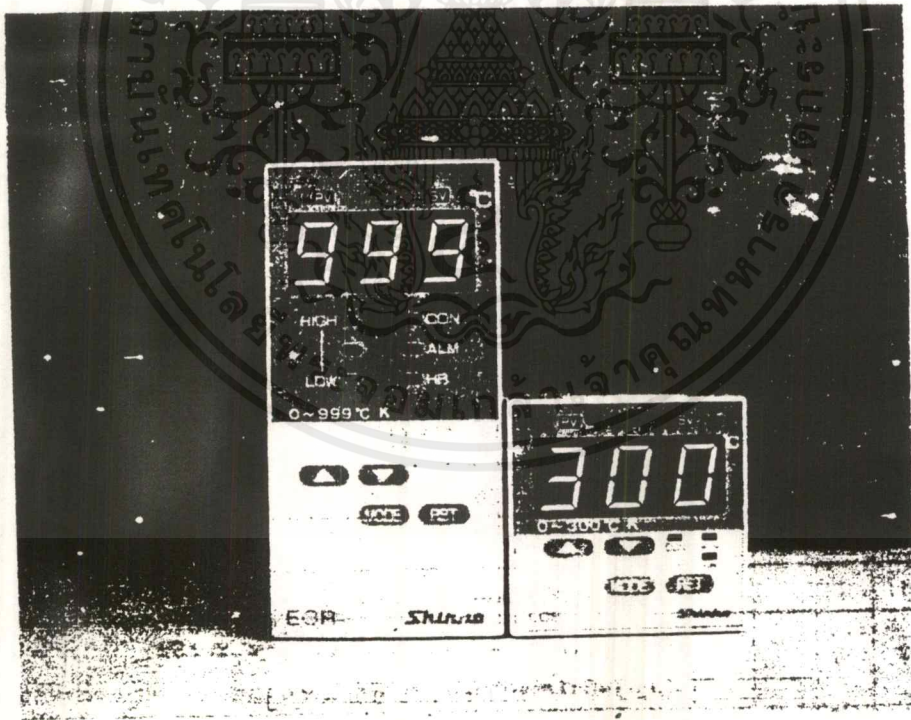
รูปที่ ผ-23 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล

คุณลักษณะ

- มีฟังก์ชัน Auto reset สามารถจะแก้ไข Offset ที่เกิดขึ้นได้โดยอัตโนมัติ โดยเพียงแต่กดปุ่ม Reset เพียงปุ่มเดียวเท่านั้น
- มีฟังก์ชัน Sensor Correction
- จอแสดงผลใช้เป็นตัวเลข LED ขนาดใหญ่ถึง 14.3x8 mm. ให้แสงสว่างมาก ง่ายต่อการอ่านค่า
- การใช้งาน ออกแบบนี้ให้สามารถติดตั้งและใช้งานได้สะดวก
- มีแบบ High/low limit ให้เลือกใช้งานด้วย และมีระบบ Alarm แบบ Stand by (Low Alarm&High Alarm Hold Circuit เมื่อเริ่มต้นเปิดเครื่อง)



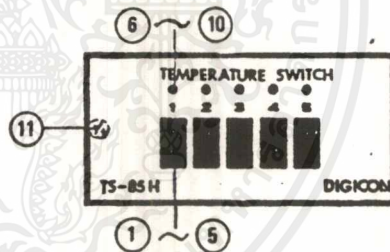
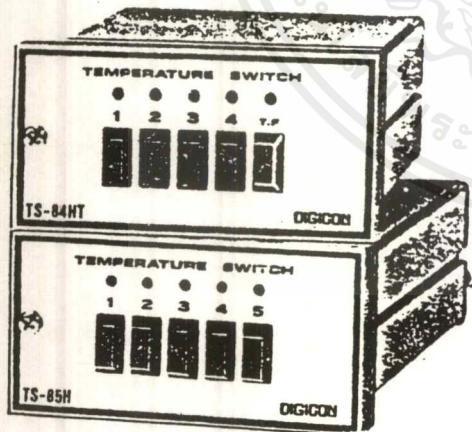
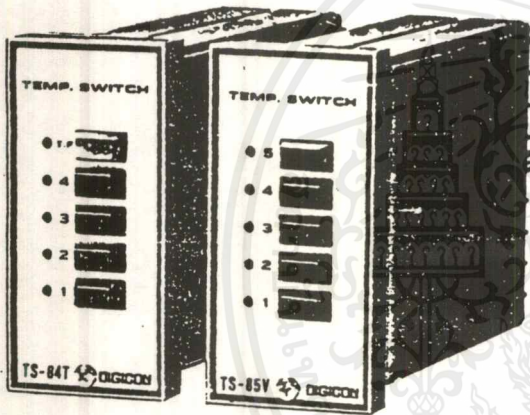
รูปที่ ผ-24 เครื่องมือวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิทช์วัดอุณหภูมิหลายจุด (Pushbutton Temperature Switch)

TS Series

สวิทช์วัดอุณหภูมิหลาย ๆ จุด คือสวิทช์ที่สามารถใช้ต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิได้ทั้งแบบเข็ม (Analog) และแบบดิจิตอล เพื่อให้วัดได้หลาย ๆ จุด เช่นมีเครื่องวัดหนึ่งเครื่อง และมีเทอร์โมคัปเปิล 5 อัน เทอร์โมคัปเปิลแต่ละอันจะต่อตามจุดต่าง ๆ เมื่อต้องการวัดอุณหภูมิได้ทันที ซึ่งเป็นการประหยัดมากโดยไม่ต้องซื้อเครื่องวัด 5 เครื่อง



- 1~5 สวิทช์เลือก CHANNEL
- 6~10 หลอด LED แสดงการเลือก CHANNEL (สีแดง)
- 11 สกรูรัล๊อคตัวเครื่อง

รูปที่ ผ-25 สวิทช์วัดอุณหภูมิหลายจุด

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้ความอนุเคราะห์ของหลาย ๆ ท่าน ที่ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทาง พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ซึ่งคณะผู้จัดทำจักขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผศ.สาทิป รัตนภาสกร

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร ได้แก่ พี่ต๋ม พี่ไก่ พี่โด่ง พี่อ้อด พี่แมน ที่ให้ความช่วยเหลือในการประกอบเครื่องและช่วยเหลือด้านแรงงาน ขอขอบคุณพี่แจ้ว ที่ช่วยพิมพ์ดีดตลอด 1 ปี ขอขอบคุณเพื่อนบ้านรุ่นรวมถึงเพื่อนๆ ทุกคน สุดท้ายขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่ชาย และน้องชาย ที่ให้กำลังใจ กำลังทรัพย์ และให้โอกาสในการศึกษาตลอดมา

ผู้จัดทำ