



การพัฒนาต่อเนื่องของเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อน  
 FURTHER DEVELOPMENT OF DEVICE FOR MEASURING THERMAL  
 CONDUCTANCE

1  
50  
1



นายบูรินทร์ ศรีธราพาณิชย์  
 นายทศนิพนธ์ ชัยณรงค์  
 นางสาวสุคนธา เอี่ยมกุลารพณ์  
 อาจารย์ที่ปรึกษา  
 อาจารย์มิ่ง โลกจินแสงทอง

วัน เดือน ปี... 31 ก.ค. 2540  
 เลขทะเบียน... 037015  
 เลขเรียกหนังสือ... T 38108 ม.บ.ค.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ปีการศึกษา 2538

ปีการศึกษา 2538

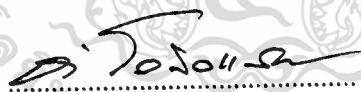
การพัฒนาต่อเนื่องของเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อน

นายปรินทร์ ศรีธราพาณิชย์

นายพุมพิงศ์ ชัยณรงค์

นางสาวสุคนธา เอี่ยมกุลวรพจน์

อาจารย์ที่ปรึกษา



(อาจารย์มิ่ง โดกิจแสงทอง)



# สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	5
2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	5
2.2 ทฤษฎีการทำความเย็น	12
บทที่ 3 การออกแบบและติดตั้ง Cold Box	23
3.1 Cold Box	23
3.2 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานส่วน Cold Box	29
3.3 การสร้างชุด Cold Box	37
บทที่ 4 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ	39
4.1 หลักการวัดอุณหภูมิ	39
4.2 Thermocouple	40
4.3 แบบของ Thermocouple	44
บทที่ 5 การทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้	58
5.1 ประสิทธิภาพและการทำงานของ Cold Box	58
5.2 การตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ	59
5.3 ผลการทดลอง	67
5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	82
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	83
ภาคผนวก ก. มาตรฐาน C 236-89, C177-85, C518-85 ของ ASTM	
ภาคผนวก ข. รูปแสดงแบบและขนาดของชุดทดสอบ	
ภาคผนวก ค. ภาพถ่ายแสดงชุดทดสอบ	
ภาคผนวก ง. ขั้นตอนการสั่งให้ระบบทำงาน	
ตารางรายการแสดงอุปกรณ์	
หนังสืออ้างอิง	

# การพัฒนาต่อเนื่องของเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อน

## FURTHER DEVELOPMENT OF DEVICE FOR MEASURING THERMAL CONDUCTANCE

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์มิ่ง โลกกิจแสงทอง

- นักศึกษา
1. นายบูรินทร์ ศรีธราพาณิชย์
  2. นายพุฒิพงษ์ ชัยณรงค์
  3. นางสาวสุคนธา เอี่ยมกุลวรพงษ์

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันค่าการนำความร้อนของวัสดุที่นำมาใช้กันทั่วไป มักได้มาจากค่าอ้างอิงจากต่างประเทศ เมื่อนำค่าการนำความร้อนดังกล่าวมาใช้ อาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้อาจมีค่าการนำความร้อนไม่ตรงกับค่าอ้างอิง เพราะเนื้อวัสดุอาจไม่เหมือนกันทั้งหมด และมีการผลิตวัสดุชนิดใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นมามากมาย ซึ่งวัสดุเหล่านี้ไม่มีข้อมูลค่าการนำความร้อนอ้างอิง โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดค่าความเป็นตัวนำความร้อนของแผ่นวัสดุเพื่อให้ได้ค่าการนำความร้อนจริงของวัสดุที่จะนำไปใช้งาน แผ่นวัสดุเหล่านี้ได้แก่ ฉนวนกันความร้อนที่ใช้ในอาคาร เป็นต้น

สำหรับการศึกษาและออกแบบเครื่องมือวัดการนำความร้อน ได้ทำการออกแบบตามมาตรฐาน AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) โดยใช้ทฤษฎีการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนเอามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ซึ่งประกอบด้วย GUARD BOX, METERING BOX และ COLD BOX โดยในส่วนของ GUARD BOX และ METERING BOX นั้นได้มีการสร้างไว้แล้ว ตามการออกแบบในโครงการของรุ่นที่ผ่านมา

ทั้งนี้ทางกลุ่มผู้ร่วมโครงการได้ทำการศึกษาออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ในส่วนของ COLD BOX เพื่อทำให้เครื่องมือเสร็จสมบูรณ์ และได้ทำการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของ THERMOCOUPLE โดยการทำการปรับแต่งเปรียบเทียบ (CALIBRATION) อุณหภูมิที่จุดทดสอบบนผิวชิ้นงาน เพื่อนำอุปกรณ์นี้ไปทดสอบกับวัสดุ และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนอ้างอิง เพื่อดูความเหมาะสมในการนำอุปกรณ์นี้ไปใช้งานจริงต่อไป

## Abstract

At present the thermal conductance of the materials which is generally used, has been based on the data from abroad. When using this value it may give some discrepancies actual thermal conductance of the materials might not be the same as the reference value obtained, owing to their non-homogeneity, and also many new materials have been produced without any data about their thermal conductances. The objective of this project is to design and develop the device for measuring thermal conductance (Guarded Hot Box method) in order to get the actual thermal conductance value of the material in question. One of the examples of this material is thermal insulators in buildings, etc.

In studying and designing this device for measuring thermal conductance the standard of American Society for Testing and Materials (ASTM) has been followed. In addition the theories of heat conduction, heat convection and heat radiation have also been applied for the design. The whole device consists of Guard Box, Metering Box and Cold Box. The Guard Box and the Metering Box have been already constructed.

This project includes the design of the Cold Box to furnish the whole device with the complete set and the reliability analysis of the thermocouple has been done by calibrating temperature on material surface at several test points. The measurement of thermal conductance for some materials was carried out and the results have been compared with some referenced values to check the precision of the constructed device.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์มิ่ง โลกจิแสงทอง ที่ให้คำปรึกษาด้านเทคนิค , อาจารย์ประจำ shop ภาคเครื่องกลทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำอุปกรณ์ , เจ้าหน้าที่ธุรการภาคเครื่องกลทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในงานด้านธุรการ , เพื่อน ๆ ภาคเครื่องกล ที่ให้ความช่วยเหลือในงานต่าง ๆ และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



# บทที่ 1

## บทนำ

คุณสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุมีความสำคัญอย่างยิ่งในการใช้คำนวณการถ่ายเทความร้อนซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ เช่น การออกแบบระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็นทั้งทางด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม การออกแบบระบบทำความร้อน การเลือกวัสดุสำหรับโครงสร้างต่าง ๆ เป็นต้น ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุชนิดต่าง ๆ สามารถหาได้จากหนังสือคู่มืออ้างอิง แต่ข้อมูลดังกล่าวก็มีจำนวนจำกัดไม่ครอบคลุมวัสดุทั้งหมดที่มีอยู่รวมทั้งวัสดุชนิดใหม่ ๆ ที่มีการผลิตขึ้นอยู่เสมอ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่เราจะต้องมีอุปกรณ์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีความถูกต้อง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) จัดว่าเป็นคุณสมบัติประเภท Transport Property ทั้งนี้เพราะแสดงถึงการถ่ายเทของพลังงานในของไหล และในของแข็งสำหรับก๊าซและของเหลว การถ่ายเทพลังงานจะเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานในของแข็งจะเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนอิสระ และการสั่นสะเทือนของโครงสร้างโมเลกุลเป็นสำคัญ

### การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) นิยามได้จากสมการ Fourier equation ดังสมการ

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1-1)$$

เมื่อ  $q_x$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, Btu/h หรือ W

A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน, ft<sup>2</sup> หรือ m<sup>2</sup>

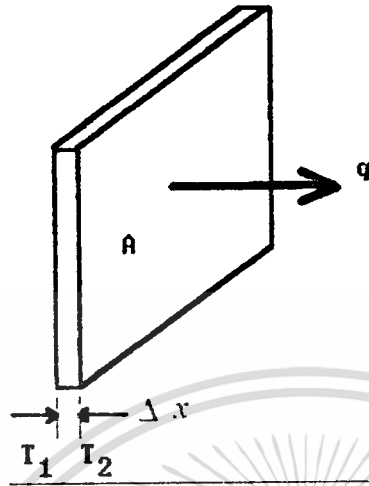
$\frac{dT}{dx}$  คือ ค่า Temperature gradient ในทิศทางที่ความร้อนถ่ายเท,

°F/ft หรือ °C/m

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity),

Btu/h - ft - °F หรือ W/m - °C

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ เราจะใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 1-1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอย่างง่าย

พิจารณาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นวัสดุที่แสดงดังรูปที่ 1-1 ถ้าเราทราบค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นวัสดุ ความหนาของวัสดุ และอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างผิวของวัสดุทั้งสองด้าน ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$k = \frac{q \Delta x}{A(T_1 - T_2)} \quad (1-2)$$

ในการทดสอบดังกล่าว ความร้อนที่ให้แก่ผนังด้านหนึ่งของแผ่นวัสดุอาจได้จาก Heater ซึ่งจะถูกถ่ายเทออกไปสู่ผนังอีกด้านหนึ่งโดยใช้เครื่องทำความเย็น

การทำความเย็น หมายถึง การทำให้อุณหภูมิในบริเวณรอบ ๆ ต่ำลงโดยดูดความร้อนในบริเวณในบริเวณนั้นหรือจากสิ่งของที่ต้องการทำให้เย็น แล้วนำความร้อนไปคายออกในแหล่งอุณหภูมิที่สูงกว่า

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์มีกระบวนการต่าง ๆ หลายกระบวนการ ที่สามารถทำให้อุณหภูมิต่ำลงได้ ดังนี้

1. การเพิ่มอุณหภูมิของสารที่เย็น

โดยการนำเอกสารที่ต้องการทำให้เย็นมาสัมผัสกับสารที่เย็นกว่า สารที่ใช้เป็นตัวนำเอาความร้อนออกจากสิ่งที่ต้องการลดอุณหภูมิ เรียกว่า สารทำความเย็น ปริมาณความร้อนที่สารทำความเย็นนำออกมาจะเป็นไปตามกระบวนการไหลสมำเสมอที่ความดันคงที่

## 2. การเปลี่ยนแปลงสถานะ

ความร้อนที่สารความเย็นต้องการเพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะ จากของแข็งเป็นของเหลว จากของเหลวเป็นไอ หรือจากของแข็งเป็นไอ จึงนำเอาประโยชน์จากการเปลี่ยนสถานะไปใช้สำหรับการทำความเย็น

การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอ เรียกว่า“การกลายเป็นไอ” ความร้อนที่สารความเย็น ได้รับความร้อนในการเปลี่ยนแปลงนี้ เรียกว่า ความร้อนแฝงของทางกลายเป็นไอ การบวนการนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางมาก และเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในเครื่องทำความเย็นชนิดอัดไอ การควบคุมความดันของสารความเย็นในการกลายเป็นไอ จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของกระบวนการ

## 3. การขยายตัวของของเหลว

การขยายตัวของของเหลว เป็นผลทำให้อุณหภูมิของเหลวลดลง อุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อยถ้าระหว่างการขยายตัวอยู่ในสถานะของเหลว แต่ถ้ากระบวนการขยายตัวอยู่ในสถานะระหว่างไอและของเหลวแล้ว จะลดอุณหภูมิลงได้มาก

## 4. การขยายตัวและไหลอย่างสม่ำเสมอของก๊าซสมบูรณ์ (Steady - flow expansion of a perfect gas)

ในกระบวนการ throttling ของก๊าซสมบูรณ์จะไม่เป็นผลในการทำงานที่อุณหภูมิต่ำ และการไหลอย่างสม่ำเสมอในการขยายตัวเมื่อได้งานแล้ว เป็นผลทำให้อุณหภูมิลดลงได้มาก

## 5. การขยายตัวของก๊าซที่แท้จริง

เมื่อก๊าซที่แท้จริงขยายตัว ค่าแอนทาลปีจะคงที่ แต่อุณหภูมิจะเปลี่ยนไป โดยอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง หรือคงที่ก็ได้

ในการทำให้อุณหภูมิลดลงจากปกติ (Ambient air temperature) ลงมาถึงอุณหภูมิต่ำที่ต้องการแต่ไม่ต่ำกว่า  $-130^{\circ}\text{C}$  นั้น อาจใช้ระบบทำความเย็นได้หลายแบบ เช่น Vapour Compression System, Air Cycle Refrigeration System, Absorption Refrigeration System และ Steam ejector System. เป็นต้น ส่วนในเรื่องอุณหภูมิต่ำมาก ๆ คือ อุณหภูมิต่ำลงมาถึงองศาศูนย์สมบูรณ์ (Absolute Zero) ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) อาจจะทำให้ได้จากการระเหยของก๊าซเหลว (Liquid gas) หรือ magnetic cooling

ในการนำเอาเครื่องทำความเย็นมาเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของโครงการนี้ เพื่อใช้เป็นตัวระบายความร้อนออกจากแผ่นวัสดุ ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งแต่ Hot Box กับ Cold Box สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

ในปฏิญยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ทหงดด้านการถ่ายเทความร้อน การทำ  
ความเย็นมาตรฐาน และการออกแบบตามมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing  
and Materials)การคำนวณต่าง ๆ วิธีการสร้างอุปกรณ์ทดสอบ สมการ และวิธีการคำนวณหาค่า  
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ รวมทั้งการทดสอบความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ด้วย



## บทที่ 2

### ทฤษฎีในการออกแบบ

#### 2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

##### 1. การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนแบบจลน์ (kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หนืดหนึ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก เป็นต้น อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสัมพันธของการนำความร้อน โดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโตร์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์-คณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง  $x$  กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad W \quad (2.1a)$$

$$\text{หรือ } q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad W/m^2 \quad (2.1b)$$

โดยที่  $q_x$  คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่  $A$  ในทิศทางบวก  $x$

$q_x''$  คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก  $x$

$k$  คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity of material) และเป็นค่าบวก

จากสมการ (2.1) ถ้าอุณหภูมิลดลงในทิศทางบวกของ  $x$  แล้ว  $dT/dx$  เป็นลบ ดังนั้น  $q_x$  (หรือ  $q_x$ ) มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายลบติดอยู่ เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า  $q_x$  (หรือ  $q_x$ ) เป็นปริมาณบวก เมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ  $x$  ในทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบ แสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบของ  $x$

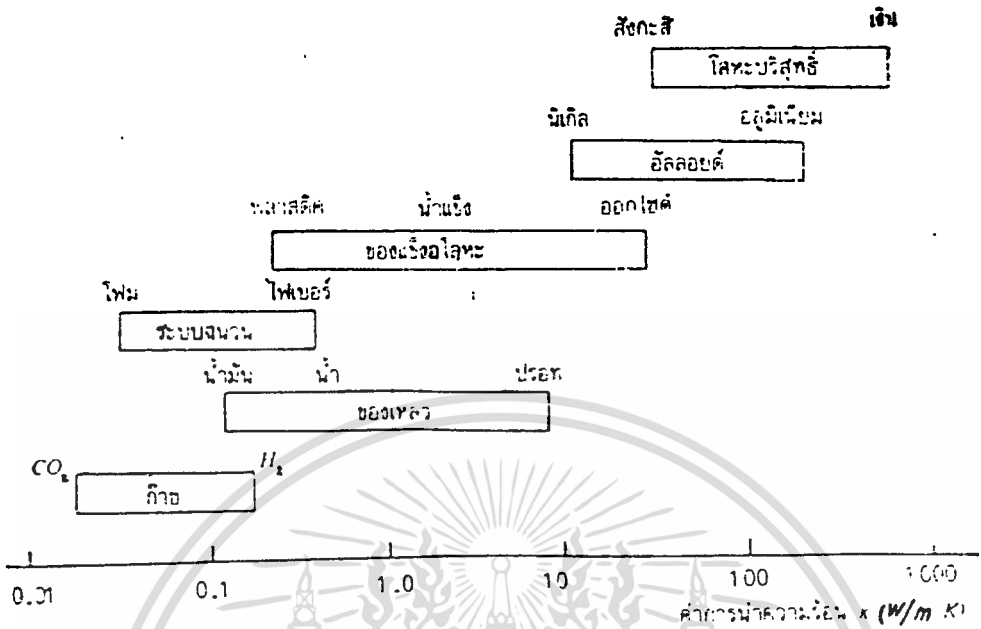
จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหา สนามอุณหภูมิ (temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือ ต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะสามารถหาฟลักซ์ความร้อนที่จุดใด ๆ ในตัวกลางนั้น จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law) การหาค่านี้ทำโดยการใช้กฎของพลังงาน (energy conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะทำให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

#### คุณสมบัติทางความร้อนของสาร

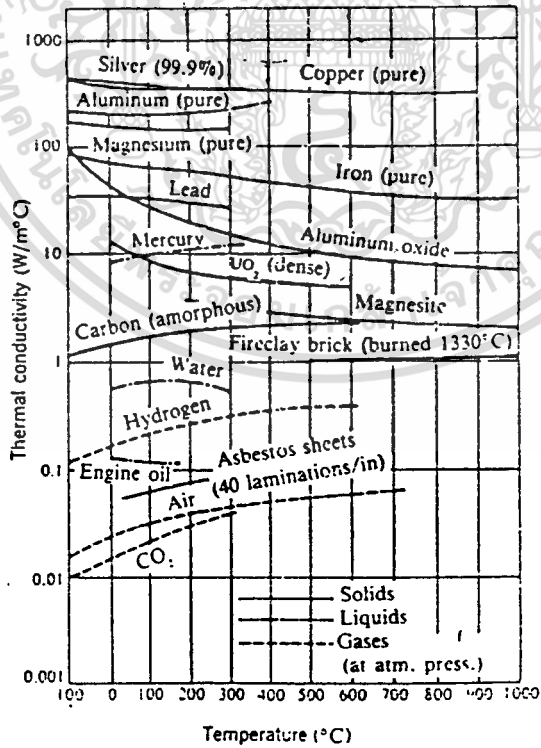
การใช้กฎของฟูริเยร์จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับค่าการนำความร้อน คุณสมบัตินี้จะเป็นการบ่งชี้ถึงอัตราที่ซึ่งพลังงานถูกถ่ายเทโดยขบวนการฟุ้งกระจาย อัตราการถ่ายเทพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางฟิสิกส์ของสาร อะตอมและโมเลกุล ซึ่งเกี่ยวกับสถานะของสาร ค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ในสมการต่าง ๆ ที่กล่าวมามีหน่วยเป็น  $W/mK$  หรือ  $J/m.s.K$  รูปที่ 2.1.1 แสดงให้เห็นถึงช่วงกว้างของความแตกต่างของค่าการนำความร้อนของสารต่าง ๆ ในทางวิศวกรรม

ในช่วงระหว่างก๊าซและโลหะที่นำความร้อนสูงเช่น ทองแดงหรือเงิน ค่า  $k$  จะแปรเปลี่ยนโดยตัวประกอบประมาณ  $10^4$  ดังนั้น ในรูปที่ 2.1.1 ค่าสูงสุดของการนำความร้อน คือโลหะบริสุทธิ์นำความร้อนสูง และค่าต่ำสุดนั้นสำหรับก๊าซและไอต่าง ๆ ซึ่งไม่รวมระบบการเป็นฉนวนโดยการทำสูญญากาศ ของแข็งพวกอโลหะและของเหลวจะมีค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่างสารเหล่านี้ ยกเว้นผลึกของโลหะเดี่ยวต่าง ๆ ซึ่งอาจมีค่าการนำความร้อนสูงมาก ๆ เช่น ผลึกทองแดง มีค่า  $8000 W/mK$  หรือสูงกว่าก็เป็นไปได้

ค่าการนำความร้อนยังแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิเช่นกัน สำหรับสารบางตัวมีการแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิน้อยจนอาจถือว่า ค่า  $k$  คงที่ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วเกือบทุกกรณีสารทุกตัวแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ  $k$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่นค่า  $k$  ของทองแดง อลูมิเนียมหรือเงินจะมีค่าจาก 50 ถึง 100 เท่าของค่า  $k$  ของมัน ที่อุณหภูมิห้อง ปกติรูปที่ 2.1.2 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของสารทางวิศวกรรมบางอย่างแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิต่างไร



รูปที่ 2.1.1 ช่วงค่าการนำความร้อนของสารต่าง ๆ



รูปที่ 2.1.2 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของสาร

## 2. การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปั๊มหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ” (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection) เช่น ปล่อยแผ่นวัตถุร้อนที่วางอยู่ในแนวตั้งไว้ในอากาศเย็นที่หุคหนึ่ง ชั้นของอากาศที่ติดกับพื้นผิวของแผ่นวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เพราะเกรเดียนอุณหภูมิในอากาศเป็นผลทำให้เกรเดียนของความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพาในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมากในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน ( $T_w$ ) และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ ( $T_f$ ) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.1.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h(T_w - T_f) \quad (2.2a)$$

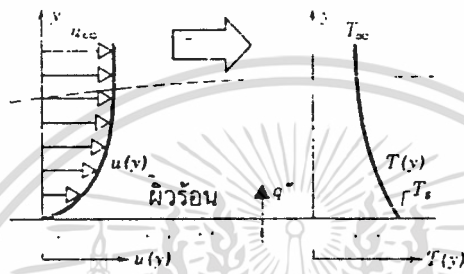
โดยที่  $q''$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็น (มีหน่วยเป็น  $W/m^2$ ) ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น จะได้ว่า

$$q'' = h(T_f - T_w) \quad (2.2b)$$

โดยที่  $q''$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปยังผนังเย็น สมการ (2.2a) เป็นสมการที่ได้มาจากกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of Cooling) โดยที่อุณหภูมิมิหน่วยเป็นเซลเซียส หรือเคลวิน และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  มีหน่วยเป็น  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h$  (Convective heat transfer coefficient or film convective coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล (เช่น ลามินาร์ หรือ เทอร์บูเลนต์) รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากปั๊ม หรือพัดลม) หรือเป็นการพาความร้อน

แบบธรรมชาติ (การเคลื่อนที่ของของไหลเนื่องจากแรงลอยตัว) ค่าของ  $h$  จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดพื้นผิว ( $h_m$ ) แทนค่า  $h$  ที่ตำแหน่งนั้น ๆ ในการพิจารณาการพาความร้อนตลอดทั้งพื้นผิว สมการ (2.2a) และ(2.2b) ค่า  $h$  จึงถูกแทนด้วยค่า  $h_m$  ดังนั้นค่า " $q$ " จึงเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยตลอดบริเวณที่พิจารณา



รูปที่ 2.1.3 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือการไหลภายในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า  $h$  สามารถหาได้จากวิธีทางการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกันกว้างมากตามแต่ละรูปแบบ

### 3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานที่ถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าเราจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือ โมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือเรียกอีกอย่างว่าโฟตอน) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริงการถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสุญญากาศ

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งกำหนดโดยกฎของสตีเฟนโบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q'' = \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

โดยที่  $T_s$  คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของผิว

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสตีเฟน-โบลซ์แมน,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

และผิวนั้นจะเรียกว่า ตัวแผ่รังสีอุดมคติหรือวัตถุดำ (black-body) พลั๊กซ์ความร้อนซึ่งถูกส่งออกโดยผิวจริงจะน้อยกว่าที่ส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (ideal radiator) กำหนดเป็น

$$q'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.4)$$

โดยที่  $\epsilon$  เป็นคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิว เรียกว่า สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (Emissivity) คุณสมบัตินี้ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผิวเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดำ

สมการ (2.4) ใช้หาอัตราการส่งพลังงานออกของผิว การคำนวณหาอัตราสุทธิซึ่งการแผ่รังสีถูกแลกเปลี่ยนระหว่างผิว โดยทั่วไปค่อนข้างยุ่งยากมาก อย่างไรก็ตามมีกรณีพิเศษซึ่งเกิดขึ้นบ่อยมากในทางปฏิบัติเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนสุทธระหว่างพื้นผิวเล็ก ๆ และผิวที่ใหญ่กว่ามากซึ่งอยู่ล้อมรอบผิวที่เล็กกว่านั่นเอง พื้นผิวและสิ่งแวดล้อมที่ถูกแยกจากกันโดยก๊าซซึ่งไม่มีอิทธิพลเกี่ยวกับการแผ่รังสีนั้น อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวและสิ่งแวดล้อมของมันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวกำหนดเป็น

$$q'' = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.5)$$

ในสมการนี้  $A$  เป็นพื้นที่ผิว และ  $\epsilon$  เป็นสัมประสิทธิ์การส่งออก ในขณะที่  $T_{sur}$  เป็นอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

มีการประยุกต์สมการนี้ในรูปอื่นเพื่อให้สะดวก คือ

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (2.6)$$

ซึ่งจากสมการ (2.5) ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ( $h_r$ ) คือ

$$h_r = \epsilon \sigma (T_s + T_{sur}) (T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (2.7)$$

จุดประสงค์ที่ทำเช่นนี้เพื่อให้มีรูปแบบเหมือนการพาความร้อน สังเกตว่า ค่า  $h_r$  ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ในขณะที่  $h$  ของการพาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามปกติ

#### 4. กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบผสม (Combined Heat Transfer Mechanism)

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เราได้แยกพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในแบบ การนำ การพา และการแผ่รังสี ในทางปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิว ๆ หนึ่งโดยมากอาจเกิดได้หลายแบบ เช่น เกิดจากการพาความร้อนโดยอากาศ และเกิดการแผ่รังสีกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าเรามีแผ่นโลหะขนาดเล็กมีพื้นที่  $A$  และค่าการส่งออก  $\epsilon$  มีอุณหภูมิคงที่  $T_w$  และยังมีการแผ่รังสีความร้อนกับสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิ  $T_s$  ดังนั้น ความร้อนที่สูญเสียไปต่อ และมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนโดยการพาของไหลอุณหภูมิ  $T_\infty$  ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h_c$  และยังมีการแผ่รังสีความร้อนกับสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิ  $T_s$  ดังนั้น ความร้อนที่สูญเสียไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของแผ่นโลหะ โดยกลไกการผสมของการพาและการแผ่รังสี จะถูกกำหนดโดย

$$q_w'' = h_c(T_w - T_\infty) + \epsilon\sigma(T_w^4 - T_s^4) \quad (2.8)$$

ถ้า  $(T_w - T_s) \ll T_w$  แล้ว เทอมที่สองจะเป็นเชิงเส้น จะได้

$$q_w'' = h_c(T_w - T_\infty) + h_r(T_w - T_s) \quad (2.9a)$$

โดยที่  $h_r = 4\epsilon\sigma_w^3 \quad (2.9b)$

## 2.2 ทฤษฎีการทำความเย็น

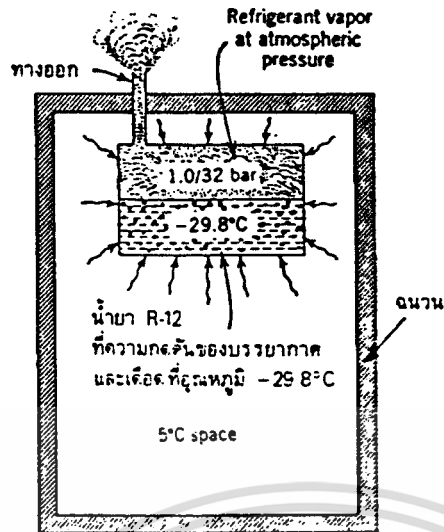
### ระบบทำความเย็นชนิดอัดไออย่างง่าย ( Simple Vapour Compression Refrigeration System)

ระบบการทำความเย็นชนิดอัดไอได้รับการออกแบบ และสร้างขึ้นโดยอาศัยหลักการพื้นฐานทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนี้

1. ของไหลดูดความร้อนในขณะที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอ และยอมให้ความร้อน เปลี่ยนแปลงจากสถานะไอเป็นของเหลว
2. ในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะอุณหภูมิจะคงที่ แต่อุณหภูมิ นี้จะเปลี่ยนแปลงกับความดันที่ความดันคงที่จุดหนึ่ง การกลายเป็นไอจะเกิดขึ้น ณ จุดที่อุณหภูมิที่มีความสัมพันธ์กันเท่านั้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของการกลายเป็นไอที่ความดันอันหนึ่งย่อมแตกต่างกันสำหรับของเหลวที่ต่างกัน
3. ความร้อนจะไหลจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังแหล่งอุณหภูมิต่ำ
4. การเลือกโลหะที่ใช้ทำเครื่องควบแน่นจะต้องเป็นโลหะที่มีการนำความร้อนสูง
5. พลังงานความร้อนและพลังงานรูปอื่น ๆ สามารถที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ โดยกฎที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

#### การกลายเป็นไอของของเหลว

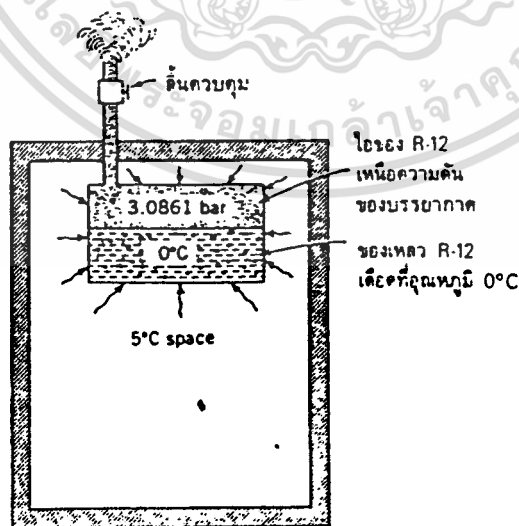
ตามรูป 2.2.1 ภาชนะใหญ่คงตัวมีฉนวนหุ้มอยู่ ภาชนะเล็กวางอยู่ในภาชนะใหญ่ บรรจุของเหลว R-12 และมีปลายเปิดสู่บรรยากาศภายนอก สารความเย็นเหลว R-12 อยู่ภายใต้ความกดดันของบรรยากาศ ( $101.325 \text{ KPa}$  หรือ  $1.03 \text{ kg/cm}^2$ ) และอุณหภูมิมิถัมตัวของสารความเย็นเหลว R-12 ที่มีความสัมพันธ์กับความดันนี้มีค่าประมาณ  $-29.8 \text{ }^\circ\text{C}$  ดังนั้นของเหลว R-12 กลายเป็นไอที่อุณหภูมิต่ำและความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอจะถูกดูดจากสถานะแวดล้อม ซึ่งแสดงดังรูป 2.2.1 ที่อุณหภูมิ  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของ R-12 มีค่าเท่ากับ  $174 \text{ KJ/kg}$  ( $133.57 \text{ KCal/kg}$ ) เพราะว่าอุณหภูมิของของเหลวคงที่ในระหว่างกระบวนการกลายเป็นไอ การทำความเย็นจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งของเหลวกลายเป็นไอหมด ภาชนะที่แสดงไว้ในรูป 2.2.1 ซึ่งของเหลวได้กลายเป็นไอ และความร้อนได้ถูกดูดเอาไว้โดยภาชนะเล็กจากพื้นที่ที่ต้องการทำให้เย็น เรียกว่าอีแวปโปเรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอันหนึ่งของระบบทำความเย็นชนิดอัดไอ



รูปที่ 2.2.1 สารความเย็น R-12 เหลวกลายเป็นไอในความกดดันของบรรยากาศ ดูดความร้อนจากบริเวณรอบ ๆ ต่ำลงถึง 5 °C และออกทางรูระบาย

การควบคุมอุณหภูมิของการกลายเป็นไอ

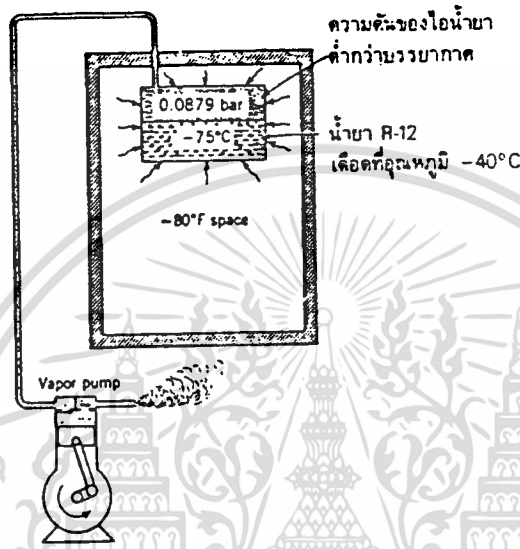
อุณหภูมิของการกลายเป็นไอของของเหลวจะขึ้นอยู่กับความดัน เพราะฉะนั้นอุณหภูมิของการกลายเป็นไอของของเหลวจะเกิดขึ้นที่ความดันใดความดันหนึ่ง ตามรูป 2.2.2 ความดันในอีแวปโปเรเตอร์เท่ากับ 308.56 Kpa โดยการควบคุมลิ้น ซึ่งจะยอมให้ไอผ่านออกไปได้ในอัตราที่จะทำให้ความดันภายในอีแวปโปเรเตอร์คงที่ ถ้าปิดลิ้นควบคุม ความดันจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิจึงตัวของเหลวในภาชนะเล็กจะเท่ากับอุณหภูมิของที่วางในภาชนะใหญ่ คือ 5 °C



รูปที่ 2.2.2 อุณหภูมิการเดือดของสารความเย็นเหลวในอีแวปโปเรเตอร์ โดยการควบคุมความดันเหนือของเหลวด้วย Throttling valve ตรงทางออก

### การกลายเป็นไอภายใต้ความกดดันของบรรยากาศ

ตามรูป 2.2.3 ไอของ R-12 จะถูกปั๊มออกจากสถานะเสถียรและอัดตัวก่อนจะปล่อยสู่บรรยากาศ อุณหภูมิของไอฟรอน 12 (R-12) ที่ปั๊มดูดสามารถที่จะควบคุมให้อยู่ที่ความดันใดความดันหนึ่ง ที่ต่ำกว่าบรรยากาศ เพื่อให้้อตราการกลายเป็นไอเหมาะสมกับสมรรถนะของปั๊มในการอัดไอและปล่อยสู่บรรยากาศ



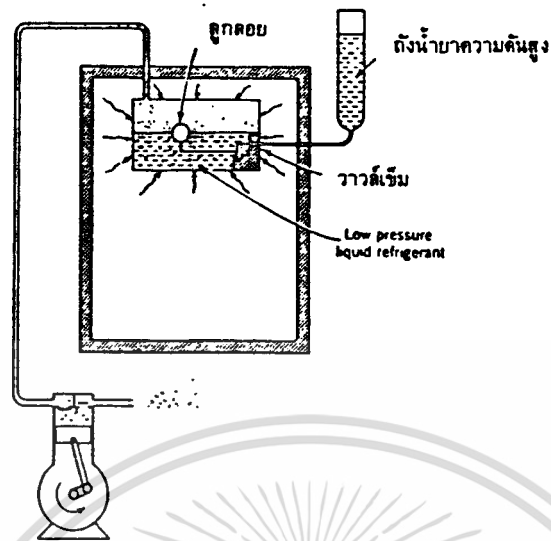
รูปที่ 2.2.3 ความดันของสารความเย็นในอีแวปโปเรเตอร์ลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศโดยใช้ปั๊มดูด

### การรักษามวลของสารความเย็นในอีแวปโปเรเตอร์ให้คงที่

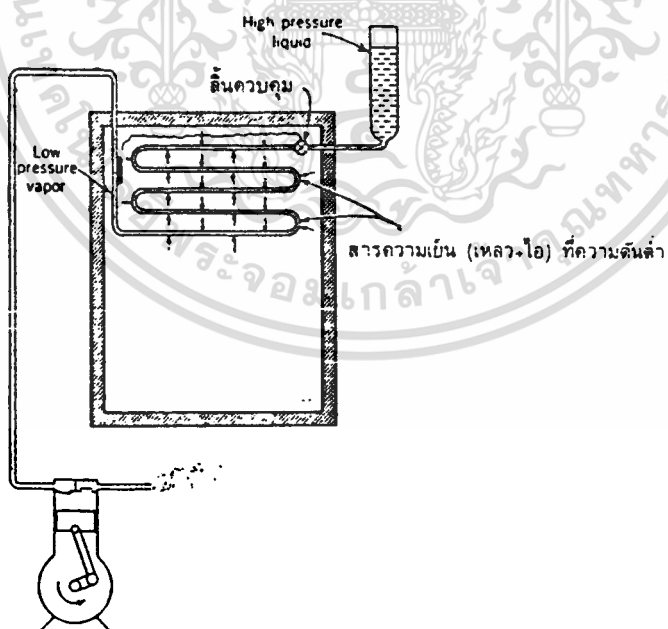
ในกรณีที่ได้อุณหภูมิแล้วสารความเย็นที่กลายเป็นไอและปล่อยสู่ภายนอก แต่ไม่มีการเติมสารความเย็นลงไปเพื่อให้การเป็นไอเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ตามรูปที่ 2.2.4 เป็นวิธีหนึ่งที่จะรักษาให้ระดับของสารความเย็นเหลวคงที่โดยการใส่ตุ้มน้ำมันและวาล์วเข็ม ดังนั้นอัตราการไหลของสารความเย็นเหลวจะเท่ากับอัตราการไหลของสารความเย็นที่กลายเป็นไอ และปั๊มออกไปภายนอก ถึงบรรจุน้ำมันมีความดันสูงจะดันสารความเย็นไหลเข้าไปในอีแวปโปเรเตอร์ โดยผ่านทางวาล์วเข็ม

อีแวปโปเรเตอร์ที่แสดงในรูป 2.2.4 ภาชนะใบเล็กสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นท่อขดอยู่ในภาชนะใหญ่ดังรูป 2.2.5 การกลายเป็นไอของสารความเย็นจะเกิดภายในท่อและจะกลายเป็นไอหมดตรงปลายท่อ และไอของสารความเย็นอาจจะกลายเป็นไอร้อนขดขึง สารความเย็นที่เข้ามาในท่อควบคุมโดยลิ้นควบคุม ซึ่งมี Thermostat เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของสารความเย็นซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการปิดเปิดของลิ้นควบคุม



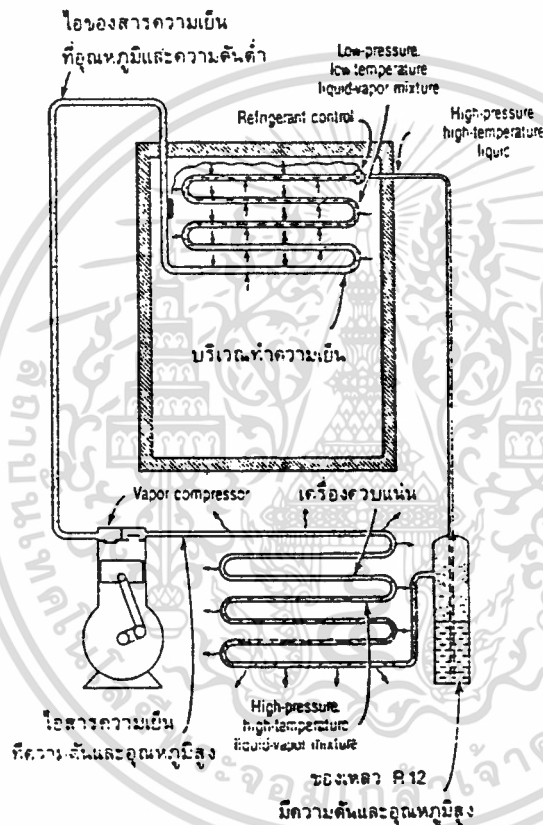
รูปที่ 2.2.4 การควบคุมระดับของสารความเย็นเหลวในอีแวปโปเรเตอร์ด้วยวาล์วลูกลอย (Float valve) ความดันของสารความเย็นลดลงขณะที่ผ่านวาล์วเข็ม (Needle valve)



รูปที่ 2.2.5 ขดท่ออีแวปโปเรเตอร์พร้อมด้วย Thermostatic expansion valve เป็นตัวควบคุมความเย็น

### การเก็บสารความเย็นหลังจากอัดตัวจากเครื่องอัด (Salvaging the refrigerant)

มันไม่เป็นการประหยัดเลยที่ไอของสารความเย็นที่บีบคุดออกมาและปล่อยทิ้งไปกับบรรยากาศภายนอก ทั้ง ๆ ที่ไอของสารความเย็นควรจะเก็บรักษาและนำกลับมาใช้ได้ อีก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเก็บไอของสารความเย็นที่ออกมาจากบีบ โดยการผ่านเข้าไปในเครื่องมือชนิดหนึ่งเรียกว่า เครื่องควบแน่น ซึ่งเครื่องควบแน่นนี้จะทำให้ไอของสารความเย็นกลายเป็นของเหลวและกลับเข้าไปในอีแวปโปเรเตอร์ โดยผ่านทางลิ้นควบคุมตามรูป 2.2.6



รูปที่ 2.2.6 การเก็บและการควบแน่นไอสารความเย็นหลังจากคูดความร้อนในอีแวปโปเรเตอร์ และคายความร้อนออกในเครื่องควบแน่น

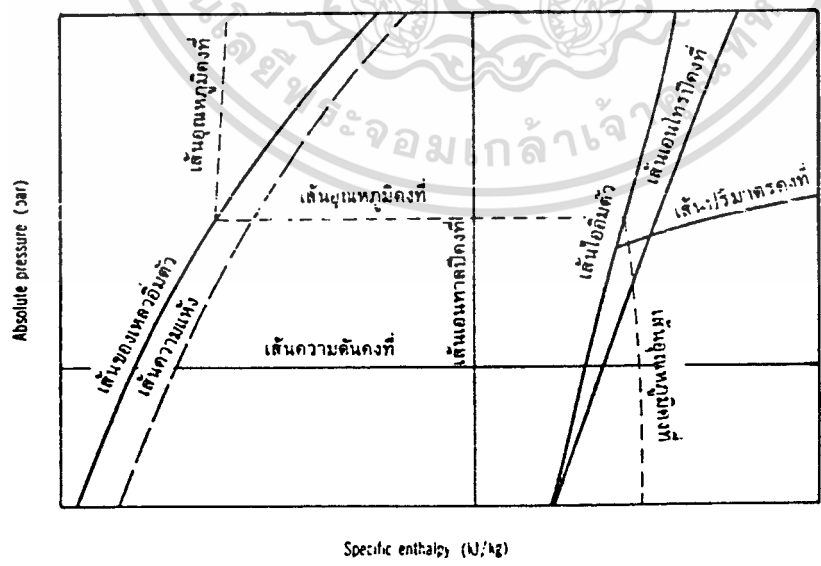
ก่อนการอัดตัวอุณหภูมิสารความเย็นจะกลายเป็นไอที่อุณหภูมิและความดันของอีแวปโปเรเตอร์ ซึ่งมีค่าต่ำในระหว่างการอัดตัวความดันของไอสารความเย็นจะเพิ่มขึ้นถึงจุด ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิอิ่มตัวที่สูงกว่าอุณหภูมิของตัวกลางหล่อเย็นในเวลาเดียวกันงานกลที่ใช้ในการอัดไอของสารความเย็นให้มีความดันสูงขึ้น พลังงานภายในของไอสารความเย็นที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับอุณหภูมิของไอสารความเย็นที่เพิ่มขึ้น

ภายหลังการอัดตัวของสารความเย็นที่มีความดันและอุณหภูมิสูงจะเข้าไปในเครื่องควบแน่น ความร้อนจะคายออกให้กับตัวกลางหล่อเย็น โดยปกติจะเป็นอากาศหรือน้ำ ไอของสารความเย็นจะควบแน่นเป็นของเหลวที่อุณหภูมิอิ่มตัวภายใต้ความดันในเครื่องควบแน่น สารความเย็นที่ควบแน่นเป็นของเหลวจะผ่านเครื่องควบแน่น และไหลเข้าไปในถังเก็บสารความเย็น เพื่อไหลผ่านลิ้นควบคุมเข้าไปในอีแวปโปเรเตอร์

จะเห็นได้ว่าสารความเย็นซึ่งเป็นของไหลทำงานจะเป็นตัวพาความร้อนจากพื้นที่ทำความเย็นซึ่งอยู่ภายนอก ของไหลทำงานจะดูดความร้อนจากพื้นที่ทำความเย็นในอีแวปโปเรเตอร์และนำไปคายให้กับตัวกลางหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น

**แผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของสารความเย็น**

เครื่องทำความเย็นชนิดอัดไอจะประกอบด้วยเครื่องอัด เครื่องควบแน่น ทรอตเท็นวาล์ว หรือ วาล์วควบคุมการไหลของสารความเย็น และอีแวปโปเรเตอร์ การไหลของสารความเย็นจะเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอผ่านอุปกรณ์เหล่านี้ แม้ว่าอุปกรณ์จะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของสารความเย็นในการเปลี่ยนความดัน และเอนทาลปี เช่น การไหลแบบสม่ำเสมอของสารความเย็นผ่านเครื่องควบแน่น และอีแวปโปเรเตอร์ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของสารความเย็นก็คือ ความร้อนที่ถ่ายเทออก เครื่องอัดสามารถจะทำให้เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอด้วยและระหว่างการอัดตัวแบบเอไดอาแบติก งานที่ให้แก่เครื่องอัดก็คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของสารความเย็นที่ไหลผ่านเครื่องอัด กระบวนการทรอทรังเป็นตัวควบคุมการไหลของสารความเย็นเป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ ดังนั้นแผนภูมิจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีโดยตรง (และความดันระหว่างกระบวนการจะเป็นการดีกว่าในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของเครื่องทำความเย็นชนิดอัดไอ)

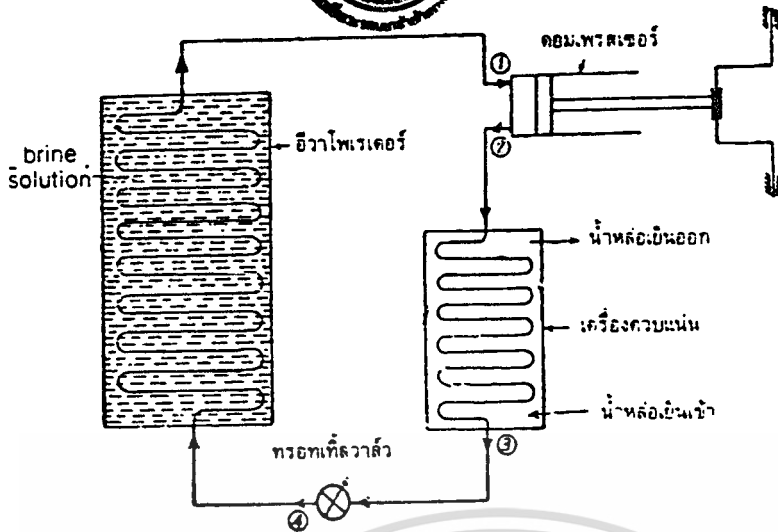


รูปที่ 2.2.7 รูปแผนภูมิความดัน-เอนทาลปีของสารความเย็น

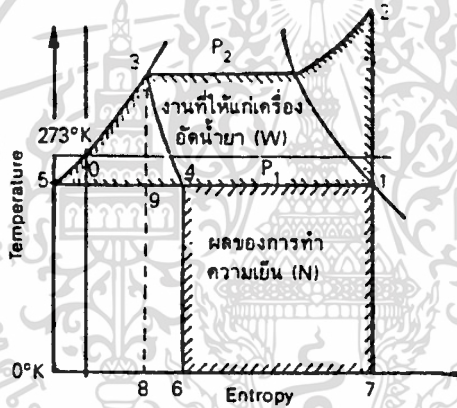
ตามรูป 2.2.7 เป็นสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ ของสารความเย็นทำความเย็นที่จุดใด ๆ สามารถที่จะแทนจุดนี้บนแผนภูมิ P-h พื้นที่บนแผนภูมิจะถูกแบ่งโดยเส้นของเหลวอิ่มตัว และเส้นไออิ่มตัว พื้นที่ทางด้านซ้ายมือของเส้นของเหลวอิ่มตัว เรียกว่า Sub-cooled liquid ในพื้นที่นี้ อุณหภูมิของของเหลวจะต่ำกว่าอุณหภูมิของเหลวอิ่มตัว ซึ่งมีความดันเดียวกัน พื้นที่ที่แสดงการด้านขวามือของไออิ่มตัว เรียกว่า ไอร้อนยวดยิ่ง อุณหภูมิในพื้นที่นี้จะสูงกว่าอุณหภูมิไออิ่มตัวในความดันเดียวกัน พื้นที่ระหว่างเส้นของเหลวอิ่มตัว และไออิ่มตัว เรียกว่า ไอเปียก ซึ่งเป็นส่วนผสมของไอและของเหลว ที่จุดปลายของเส้นอิ่มตัวและไออิ่มตัวพบกัน เรียกว่า จุดวิกฤต และจุดนี้ของเหลวอิ่มตัวจะกลายเป็นไอร้อนยวดยิ่งทันที ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอนี้ค่าเป็นศูนย์และคุณสมบัติอื่น ๆ (ความแห้ง ปริมาตรจำเพาะ เอนทาลปี เป็นต้น) ของสารความเย็นก็อ่านได้โดยตรงจากแผนภูมิ P-h ค่าทุก ๆ ค่าบนแผนภูมิ P-h ถัดจากหนึ่งหน่วยมวลของสารความเย็น

### วัฏจักรของการทำความเย็นชนิดอัดไอ

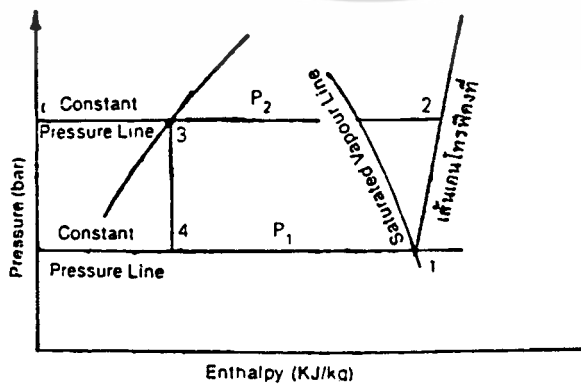
ตามรูปที่ 2.2.8 เป็นไดอะแกรมการทำความเย็นชนิดอัดไอ สารทำงานมีอยู่ในอีแวปโปเรเตอร์ และเครื่องควบแน่น สมมติทำงานตามวัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ไอของสารความเย็นที่ออกจากอีแวปโปเรเตอร์เป็นไออิ่มตัวก่อนที่จะเข้าไปในเครื่องอัด ดังแสดงด้วยจุด 1 รูป 2.2.8 แผนภูมิ T-s และ P-h รูป 2.2.9 และ 2.2.10 ที่จุดนี้ความดัน  $P_1$  และอุณหภูมิ  $T_1$  ไอของสารความเย็นจะถูกอัดด้วยแบบไอเซนโทรพิกจนความดันเป็น  $P_2$  และอุณหภูมิ  $T_2$  โดยแทนด้วยจุด 2 ซึ่งอยู่ในสภาวะไอร้อนยวดยิ่ง และเข้าไปในเครื่องควบแน่น ซึ่งมีน้ำเป็นตัวกลางหล่อเย็นจะดูดความร้อนจากไอของสารความเย็นจนอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิไออิ่มตัวที่ความดัน  $P_2$  และความร้อนยังคงคายให้กับน้ำหล่อเย็นจนกระทั่งไอสารความเย็นเป็นของเหลว แสดงด้วยจุดที่ 3 ที่จุดนี้ความดันของเหลวของสารความเย็นจะเท่ากับ  $P_2$  และของเหลวนี้อาจจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าของเหลวอิ่มตัวได้ แต่ไม่ได้แสดงไว้ในรูป สารความเย็นที่เป็นของเหลวนี้อาจจะไหลผ่านลิ้นควบคุม เรียกว่า ทรอตเท็นวาล์ว เกิดการขยายตัวความดันจะลดลงเท่ากับ  $P_1$  ซึ่งแสดงด้วยจุดที่ 4 ที่สภาวะนี้ ค่าเอนทาลปีระหว่างสภาวะ 3 และ สภาวะ 4 จะเท่ากัน เมื่อสารความเย็นผ่านลิ้นควบคุมแล้วก็จะเป็ไอเปียกเข้าไปอีแวปโปเรเตอร์ซึ่งจุ่มอยู่ใน brine หรือห้องทำความเย็นเพื่อดูดเอาความร้อนออกไปจนถึงสภาวะ 1 เป็นการทำงานครบวัฏจักรของเครื่องทำความเย็นชนิดอัดไอ



รูปที่ 2.2.8 รูปวัฏจักรการทำความเย็นชนิดอัดไอ



รูปที่ 2.2.9 แผนภูมิ T-s กราฟ



รูปที่ 2.2.10 แผนภูมิ P-h กราฟ

037015

### การวิเคราะห์วัฏจักรการทำความเย็นชนิดอัดไอ

(1) เครื่องอัด เป็นเครื่องดูดและอัดไอสารความเย็น มีการไหลสม่ำเสมอแบบเอไดอานเบติกที่ย้อนกลับได้ หรือไอเซนโทรพิก ทิศไอของสารความเย็น 1 kg งานที่ต้องใช้ในการอัดไอสารความเย็น 1 kg หาได้ดังนี้

$$W_c = (h_2 - h_1) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $W_c$  = งานที่ให้แก่เครื่องอัด (KJ/kg)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารความเย็นก่อนที่จะเข้าไปในเครื่องอัดมีหน่วยเป็น (KJ/kg)

$h_2$  = เอนทาลปีของสารความเย็นที่ออกจากเครื่องอัดมีหน่วยเป็น (KJ/kg)

บน P-h ไดอานแกรม ค่า  $h_1$  และ  $h_2$  สามารถอ่านได้โดยตรง รูป 2.13

(2) เครื่องควบแน่น เป็นกระบวนการไหลแบบสม่ำเสมอ การหล่อเย็นกระทำที่ความดันคงที่ ความร้อนที่คายให้กับเครื่องควบแน่นหาได้ดังนี้

$$q_3 = (h_3 - h_2) = -(h_2 - h_3) \quad (2.11)$$

เมื่อ  $q_3$  = ความร้อนที่ไอของสารความเย็นคายให้กับตัวกลางหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น (KJ/kg)

$h_3$  = เอนทาลปีของสารความเย็นที่ออกจากเครื่องควบแน่น (KJ/kg)

ค่า  $h_2$  และ  $h_3$  หาได้โดยตรงจาก P-h ไดอานแกรม และพื้นที่ 2-3-8-7-2 แทนการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปี หรือเป็นความร้อนที่เครื่องควบแน่นดูดไว้

(3) ทอพอเท็นวาล์ว กระบวนการขยายตัวแบบสม่ำเสมอที่ผ่านทอพอเท็นวาล์ว เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน กระบวนการนี้แทนด้วยจุด 3-4 บน P-h ไดอานแกรม เป็นเส้นในแนวตั้ง เพื่อแสดงให้เห็นว่า  $h_3 = h_4$  บน T-s ไดอานแกรม พื้นที่ 3-5-0-8 = พื้นที่ 4-5-0-6 = พื้นที่ 3-5-9 + พื้นที่ 4-9-8-6

(4) อีแวปโปเรเตอร์ ความร้อนที่สารความเย็น 1 kg ดูดเอาไว้ในขณะที่ไหลผ่านอีแวปโปเรเตอร์ จุด 4-1

$$q_e = q_1 = (h_1 - h_4) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $q_1$  = ความร้อนที่สารความเย็นดูดเอาไว้ในอีแวปโปเรเตอร์ (KJ/kg)

$h_4$  = เอนทาลปีของไอสารความเย็นก่อนที่จะเข้าไปในอีแวปโปเรเตอร์ (KJ/kg)

$h_1$  = เอนทาลปีของสารความเย็นที่ออกจากอีแวปโปเรเตอร์ (KJ/kg)

ค่าของ  $h_1$  และ  $h_4$  สามารถที่จะอ่านได้จาก P-h ไดอแกรม และพื้นที่ 4-1-7-6-4 บน T-s

ไดอแกรมแทนการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ( $h_1 - h_4$ )

ในการวิเคราะห์นี้ ไม่ได้คิดความสูญเสียความดันและเอนทาลปีที่เกิดขึ้นจากการไหลในท่อ ดังนั้นประสิทธิภาพของการทำความเย็น (C.O.P) เท่ากับ ความร้อนที่สารความเย็นดูดไว้ในขณะไหลผ่านอีแวปโปเรเตอร์ต่องานที่เครื่องอัดใช้

$$C.O.P = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.13)$$

System Capacity

ความสามารถของสารความเย็นใด ๆ คือ อัตราความสามารถในการดูดความร้อนจากบริเวณรอบ ๆ โดยทั่ว ๆ ไปจะกำหนดเป็นกิโลจูลต่อวินาที (KJ/s) หรือ (KW)

จะสังเกตเห็นว่าความสามารถของการทำความเย็น คือ อัตราการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งกำหนดในหน่วยของกำลังงาน

ความสามารถของระบบการทำความเย็นทางกลเป็นอัตราซึ่งระบบดูดความร้อนจากพื้นที่ ๆ ต้องการทำความเย็นทั้งนี้ขึ้นกับตัวประกอบ 2 ตัว คือ

1. จำนวนมวลของสารความเย็นที่ไหลวนเวียนต่อหน่วยเวลา
2. ค่าการทำความเย็นต่อมวลของสารความเย็นที่ไหลวนเวียน

$$\text{จาก } Q_c = \dot{m} (q_c)$$

$Q_c$  = ความสามารถการทำความเย็น ในหน่วย KJ/s หรือ KW

$\dot{m}$  = อัตราการไหลโดยมวล ในหน่วย kg/s

$q_c$  = ค่าการทำความเย็น ในหน่วย KJ/kg

มวลของสารความเย็นซึ่งไหลวนเวียนต่อวินาทีต่อกิโลวัตต์ของความสามารถการทำความเย็น สำหรับการทำงานที่สภาวะใด ๆ หาได้โดยการหารด้วยค่าการทำความเย็นต่อกิโลกรัม

### อัตราการไหลโดยปริมาตรของไอสารความเย็น (Volume Flow Rate of Refrigerant Vapour)

เมื่อสารความเย็น 1 kg กลายเป็นไอ ปริมาตรไออิมิตัวที่ได้จะขึ้นกับการใช้สารความเย็นและอุณหภูมิการกลายเป็นไอ สำหรับสารความเย็นอันใดอันหนึ่ง ปริมาตรของไอขึ้นกับอุณหภูมิของการกลายเป็นไอเท่านั้น และจะเพิ่มขึ้นขณะที่อุณหภูมิของการกลายเป็นไอ (และความดัน) ลดลง เมื่อรู้อุณหภูมิการกลายเป็นไอของสารความเย็น ปริมาตรของไอสารความเย็นต่อหน่วยมวล (ปริมาตรจำเพาะ) สามารถจะคำนวณได้โดยตรงจากตารางไออิมิตัว ถ้ารู้ปริมาตรจำเพาะของไอสารความเย็น ปริมาตรทั้งหมดของไอสารความเย็นที่หมุนเวียนในอีแวปโปเรเตอร์ต่อหน่วยเวลา สามารถหาได้โดยผลคูณของอัตราการไหลโดยมวลกับปริมาตรจำเพาะของไอสารความเย็น

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v$$

เมื่อ  $\dot{V}$  = จำนวนปริมาตรทั้งหมดของไอสารความเย็นที่หมุนเวียนอยู่ในอีแวปโปเรเตอร์ มีหน่วยเป็น  $\text{m}^3/\text{s}$   
 $\dot{m}$  = อัตราการไหลโดยมวลของไอสารความเย็น มีหน่วยเป็น  $\text{kg}/\text{s}$   
 $v$  = ปริมาตรจำเพาะของไอสารความเย็น มีหน่วยเป็น  $\text{m}^3/\text{kg}$

### ความสามารถของเครื่องอัด (Compressor Capacity)

ในระบบเครื่องทำความเย็นทางกลใด ๆ ความสามารถของเครื่องอัดจะต้องสามารถดูดไอสารความเย็นจากอีแวปโปเรเตอร์ในอัตราเดียวกับที่ไอของสารความเย็นที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของการเดือดของสารความเย็นเหลว ถ้าอัตราการกลายเป็นไอของสารความเย็นที่เกิดขึ้นมากกว่าความสามารถของเครื่องอัดที่ดูดออกไป ไอสารความเย็นจะตกค้างและสะสมอยู่ในอีแวปโปเรเตอร์และเป็นผลทำให้ความดันในอีแวปโปเรเตอร์เพิ่มขึ้นซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิในการเดือดของสารความเย็นเหลวเพิ่มขึ้นในทางกลับกันถ้าความสามารถในการดูดไอสารความเย็นของเครื่องอัดเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก ความดันในอีแวปโปเรเตอร์จะลดลงและมีผลทำให้อุณหภูมิในการเดือดของสารความเย็นเหลวลดลง จากกรณีทั้งสองนี้จะทำให้อุณหภูมิของอีแวปโปเรเตอร์ไม่คงที่และไม่เป็นไปตามที่กำหนด

## บทที่ 3

### การออกแบบและติดตั้ง Cold Box

#### 3.1 Cold Box

จากมาตรฐาน ASTM (1966) ได้กำหนดรูปแบบและลักษณะทั่วไปของโครงสร้าง Guarded Box เอาไว้ ในการออกแบบส่วนของกล่อง Cold Box สิ่งที่เราจะต้องพิจารณาก็คือ ภาระในการทำความเย็นของกล่องเมื่อต้องทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทมาจากชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นขั้นตอนการออกแบบของกล่อง Cold Box จึงประกอบไปด้วย

1. การออกแบบโครงสร้างของกล่อง Cold Box
2. การคำนวณหาภาระในการทำความเย็นหรือ Load ของระบบทำความเย็นในกล่อง Cold Box

3. การเลือกอุปกรณ์ทำความเย็นที่สอดคล้องกับค่าความสามารถทำความเย็นที่คำนวณได้ใน ข้อ 2 ได้แก่ อีแวปโปเรเตอร์ คอนเดนเซอร์ คอมเพรสเซอร์ และวาล์วลดความดัน

ในการออกแบบกล่อง Cold Box ซึ่งได้แก่ การกำหนดขนาดของกล่อง การเลือกวัสดุและฉนวนกันความร้อนสำหรับทำตัวกล่อง เราจะต้องออกแบบขนาดของกล่องให้มีขนาดที่สอดคล้องกับขนาดของกล่อง Guarded Box ทั้งนี้เพราะกล่อง Cold Box จะต้องดันชิ้นงานทดสอบให้ติดแน่นกับ Guarded Box เสมอ สำหรับรูปแสดงรายละเอียดและขนาดของได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข โดยวัสดุที่เลือกใช้ทำตัวกล่อง Cold Box เราเลือกใช้แผ่นสแตนเลสและเลือกใช้โพลียูรีเทนเป็นฉนวนกันความร้อน

ในการคำนวณภาระในการทำความเย็นของกล่อง Cold Box จะต้องคำนวณหาปริมาณความร้อนจากแหล่งที่ให้ความร้อนแก่กล่อง Cold Box ทั้งหมดซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{Total Load} = \text{Load จาก Hot Box} + \text{Load จากรอยซึม}$$

- Load จาก Hot Box

$$\begin{aligned}\text{Load จาก Hot Box} &= 2,800 \text{ W (จาก Heater ขนาด 700W จำนวน 4 ตัว)} \\ &= 9,553.96 \text{ Btu/hr}\end{aligned}$$

Load จากรอยซึม

เราถือว่ามีค่าน้อยมาก  $\therefore$  ประมาณให้เท่ากับศูนย์  
ดังนั้นภาระการทำความเย็นในกล่อง Cold Box ทั้งหมด คือ

$$\begin{aligned}\text{Total Load} &= 9,553.96 \text{ Btu/hr} \\ &\approx 10,000 \text{ Btu/hr}\end{aligned}$$

จากสูตรความต้องการความสามารถในการทำความเย็นใน Cold Box

$$Q = \frac{24hr}{(RT)} qt$$

โดยที่  $Q$  = ความต้องการความสามารถในการทำความเย็นในหน่วย kW หรือ Btu/hr

$RT$  = เวลาที่เครื่องขนค้ทำงานในหน่วยชั่วโมง ,(hr)

ซึ่งในเวลากการทดสอบแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมง เพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

$q_t$  = การะการทำความเย็นทั้งหมด หน่วย kW หรือ Btu/hr

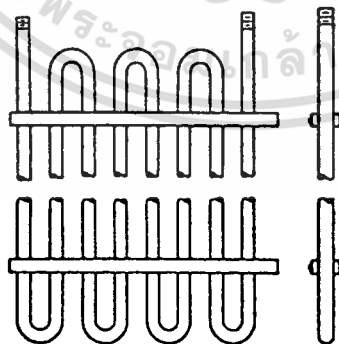
$$\begin{aligned} \therefore \text{ความสามารถของ Cold Box ในการทำความเย็น} &= \frac{24}{8} \times 10,000 \\ &= 30,000 \text{ Btu/hr} \end{aligned}$$

หรือประมาณ 2.5 ตัน

โดยที่อุปกรณ์ของระบบทำความเย็นที่เลือกใช้และรายละเอียดต่างๆ จะมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

### ฮีวเปโพเรเตอร์

เราเลือกใช้ฮีวเปโพเรเตอร์แบบท่อเปลือย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 mm. โดยใช้แบบซิกแซก เพราะเรามีใบพัดลมระบายอากาศ จึงไม่จำเป็นต้องใช้แบบครีป และแบบท่อเปลือยติดตั้งง่ายและมีราคาถูก



ท่อเปลือยแบบซิกแซก

## คอนเดนเซอร์

เราเลือกใช้คอนเดนเซอร์แบบอากาศหล่อเย็น ซึ่งมีข้อดี คือ

1. ไม่มีปัญหาการบำรุงรักษา
2. ค่าใช้จ่ายขั้นแรกต่ำ
3. การติดตั้งมีปัญหาน้อยกว่าแบบใช้น้ำหล่อเย็น เหมาะกับขนาดภาระน้อยๆ โดยทำการเลือกจากขนาดที่มีตามท้องตลาดที่สามารถรับภาระของระบบทำความเย็นที่มีความสามารถในการทำความเย็นหรือ Load ประมาณ 30,000 Btu/hr ขึ้นไป

## คอมเพรสเซอร์

เราเลือกใช้คอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเคลื่อนที่ เนื่องจากเหตุผลดังนี้

1. เป็นแบบที่นิยมใช้กับขนาดภาระการทำความเย็นน้อย ๆ ( น้อยกว่า 10 ตัน )
2. ความเร็วการหมุนต่ำ ปลอดภัยในการทำงาน
3. สามารถรักษาความดันที่ด้านส่งได้ค่อนข้างดี ซึ่งเหมาะกับการใช้คอนเดนเซอร์แบบอากาศหล่อเย็น
4. ค่าใช้จ่ายต่ำ

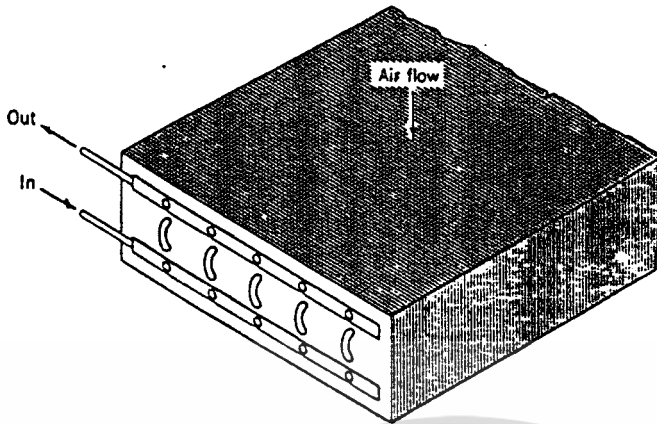
เราใช้ Compressor รวมอยู่กับ Condenser เรียกว่า condensing Unit

## จาล้วนความดัน

เราเลือกใช้จาล้วนแบบ Capillary Tube เพราะเหมาะสำหรับการใช้งานในระบบทำความเย็นที่มีภาระการทำความเย็น ในช่วง  $\frac{1}{2}$  - 3 ตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจะอยู่ในช่วง  $\frac{1}{6}$  -  $\frac{1}{8}$

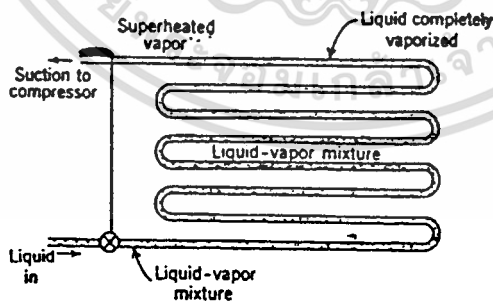
นิ้ว

รูปแบบการไหลเวียนของสารความเย็นภายในขดลวดจะทำให้มีลักษณะการไหลเวียนแบบ 2 ทาง เพราะทำให้การไหลภายในวงจรราบเรียบสม่ำเสมอ ดังรูป

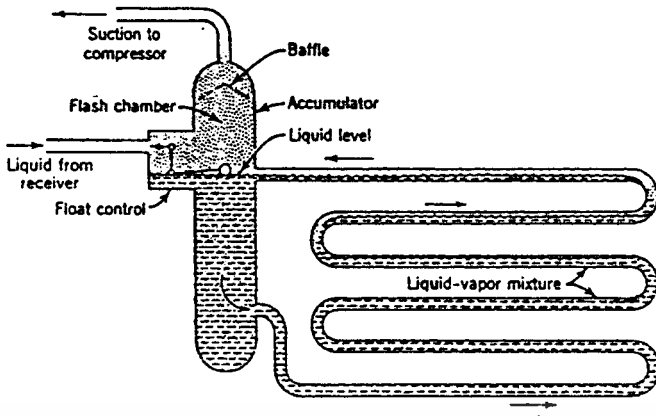


แสดงการไหลเวียนของสารความเย็น R-12

การป้อนสารความเย็นเราเลือกแบบ Direct Expansion เพราะเราไม่ต้องการให้มีความชื้นเกิดขึ้น ซึ่งถ้าเราเลือกแบบ Flooded อาจต้องใช้น้ำหล่อเย็นซึ่งอาจทำให้เกิดความชื้นที่ไม่ต้องการเข้ามาในวงจรได้ นอกจากนี้แบบ Direct Expansion ยังมีราคาถูกกว่าด้วย



อีแวปโปเรเตอร์แบบ dry expansion

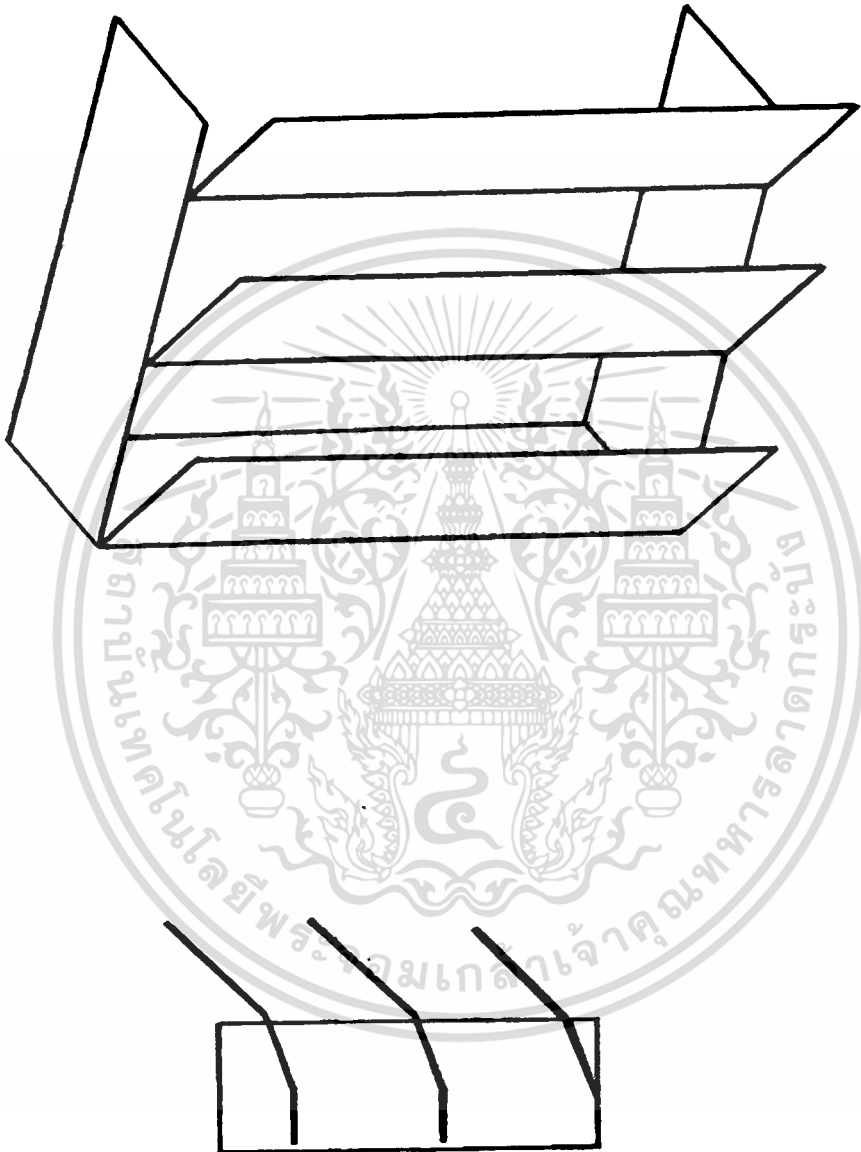


อีแวปโปเรเตอร์แบบ Flooded

**Guide Vane**

การไหลเวียนอากาศภายในกล่อง Cold Box เราจะให้อากาศไหลในแนวนานกับพื้นผิว  
 ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่พื้นผิวชิ้นงานมีค่าคงที่กว่าการให้อากาศ  
 พุ่งเข้าชนชิ้นงานทดสอบโดยตรง จึงเป็นการควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมออีกด้วย

การออกแบบ Guide Vane จึงออกแบบให้อากาศไหลเวียนขนานผิวชิ้นงาน โดยต้องให้อากาศมี  
 เวลาพอสำหรับการถ่ายเทความร้อนจึงให้อากาศไหลที่ความเร็วต่ำ



รูป guide vane

## 8.2 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานส่วน Cold Box

เนื่องจากวงจรควบคุมการทำงานของส่วน Cold Box ค่อนข้างมากจากวงจรการทำงานของส่วน Metering Box จึงต้องกล่าวถึงอุปกรณ์ในส่วน Metering Box

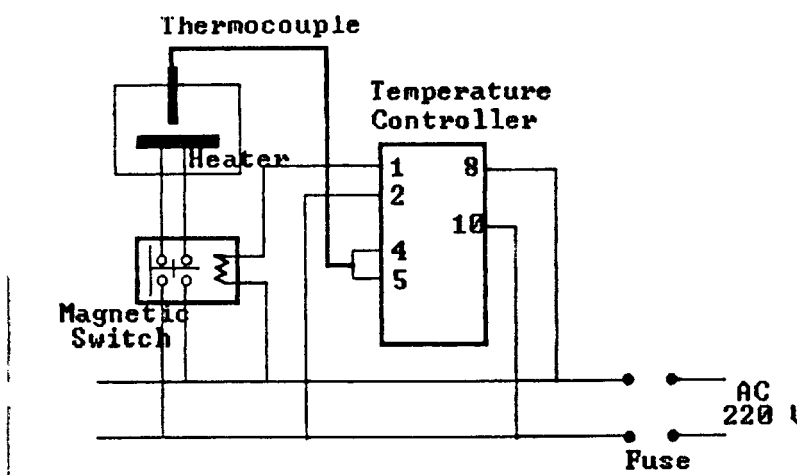
ชุดควบคุมการทำงานของ Metering Box จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในกล่อง Metering Box โดยการควบคุมการทำงานของ Heater ให้ความร้อนภายในกล่อง อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมของกล่อง Metering Box จะประกอบไปด้วย

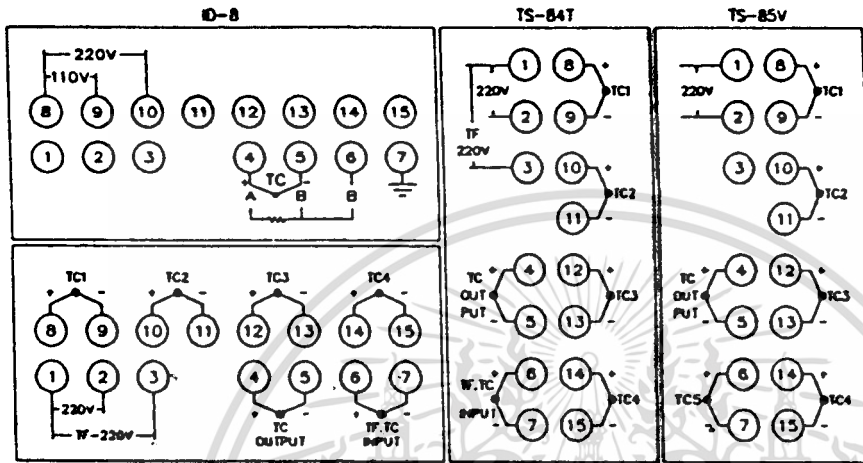
- Temperature Controller จำนวน 1 ตัว
- Magnetic Switch จำนวน 1 ตัว
- Thermocouple จำนวน 1 ตัว

ตัว Temperature Controller จะทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้มีค่าตามค่าที่กำหนดไว้ สำหรับรายละเอียดต่างๆ ของตัว Temperature Controller แสดงได้ดังนี้

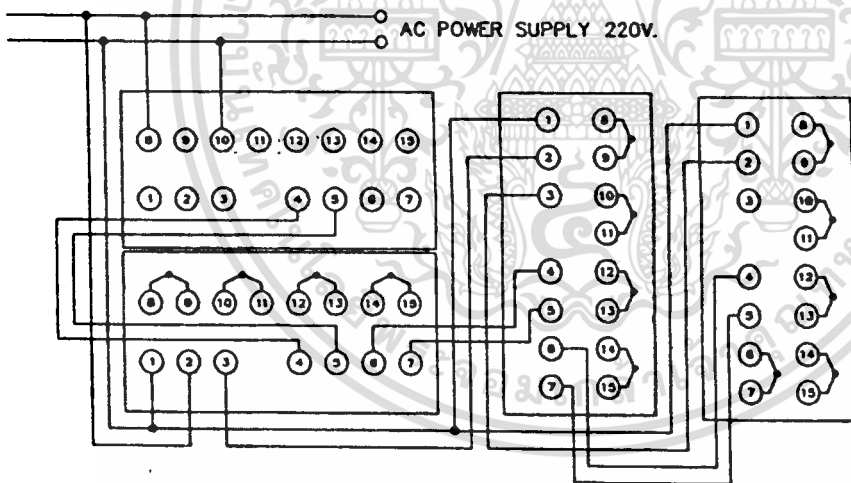
Input	Standard scale ranges
Pt-100 $\Omega$	-99 to + 99 °C
CA (K)	0 to 399 °C 0 to 599 °C 0 to 799 °C 0 to 999 °C 0 to 1199 °C
PR (R)	600 to 1599 °C

ในการทำงานของตัว Temperature Controller จำเป็นจะต้องทำงานควบคู่กันกับ Magnetic Switch ซึ่งมีวงจรการทำงานดังนี้





TS-84HT



รูปแสดงการเดินสายต่อ Temperature Controller เข้าด้วยกัน

### ชุดควบคุมการทำงานของ Cold Box

เราจะใช้ Thermostat ในการควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในกล่อง Cold Box ซึ่งอุณหภูมิภายในกล่อง Cold Box ที่กำหนดไว้จะถูกกำหนดให้มีค่าใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีความถูกต้องมากที่สุดกับสภาวะใช้งาน Thermostat จะควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นภายในกล่อง Cold Box

### อุปกรณ์สำหรับวัดค่าและอ่านค่าอุณหภูมิ

ในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวัดค่าและอ่านค่าอุณหภูมิเราได้เลือกใช้ Temperature Indicator สำหรับอ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermocouple ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้ Temperature Switch ในการเลือกตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าอุณหภูมิ รายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละตัวและวงจรแสดงการทำงานแสดงได้ดังนี้

Setting	Digital setting type
Display unit	Deviation meter
Accuracy	$\pm 1.0\%$ of full scale
Resolution	1 °C for setting
Control action	Two types of controllers are available PID and ON-OFF
PID control action	PB (proportional band) adjustable between 0.2-10% fsv I (reset) 4 min. fixed D (rate) 1 min. fixed
Cycle time	20 secs. fixed
Input impedance	$\geq 100 \text{ K}\Omega$ for TC
Maximum external resistance	No need adjustment up to 200 $\Omega$ (thermocouple type) No need adjustment up to 10 $\Omega$ /wire (R.T.D. type)
Output	Main control Relay contact 5A.220V (resistive load) Sub control Relay contact 1A.220V (resistive load)
Ambient temperature	0~50 °C
Burn out	Standard up scale.
Supply voltage	110V/220V AC 50/60 Hz Voltage variations $\pm 10\%$
Supply consumption	Approx 2W
Dimensions	See the drawings
Weight	Approx 640g. for DG-8 , 648g. for DG-8S
Housing	Aluminum case

ซึ่งอุปกรณ์ Temperature Indicator จะมีข้อกำหนดการใช้ดังนี้

Display	Although compact indicator, easy-to-read LED digital display, for large excellent accuracy & sensitivity. Zero suppression system (blanks) display of leading zeros, thus making it extremely easy to read.
Input	Thermocouple CA(K) IC(J) PR(R) R.T.D Pt-100Ω (3wire)
Setting Accuracy	±0.5% of F.S +1 digit
Accuracy maintained temperature	Ambient temperature 25 °C ±5 °C
Resolution	1 digit
Response time	Approx 1.5 sec (for step input)
Power Supply	AC 100/200V or 110/220V or 120/240V Whichever specified, 50/60Hz.
Supply variation	Less than ±10% of rated voltage
External resistance	No need adjustment up to 100Ω (Thermocouple type) No need adjustment up to 5Ω (R.T.D. type)
Ambient temperature	0~50 °C
Ambient humidity	45 to 85%
Power consumption	Less than 3VA
Net weight	Approx 620g.
Dimensions	See the drawings.
Housing	Aluminum case

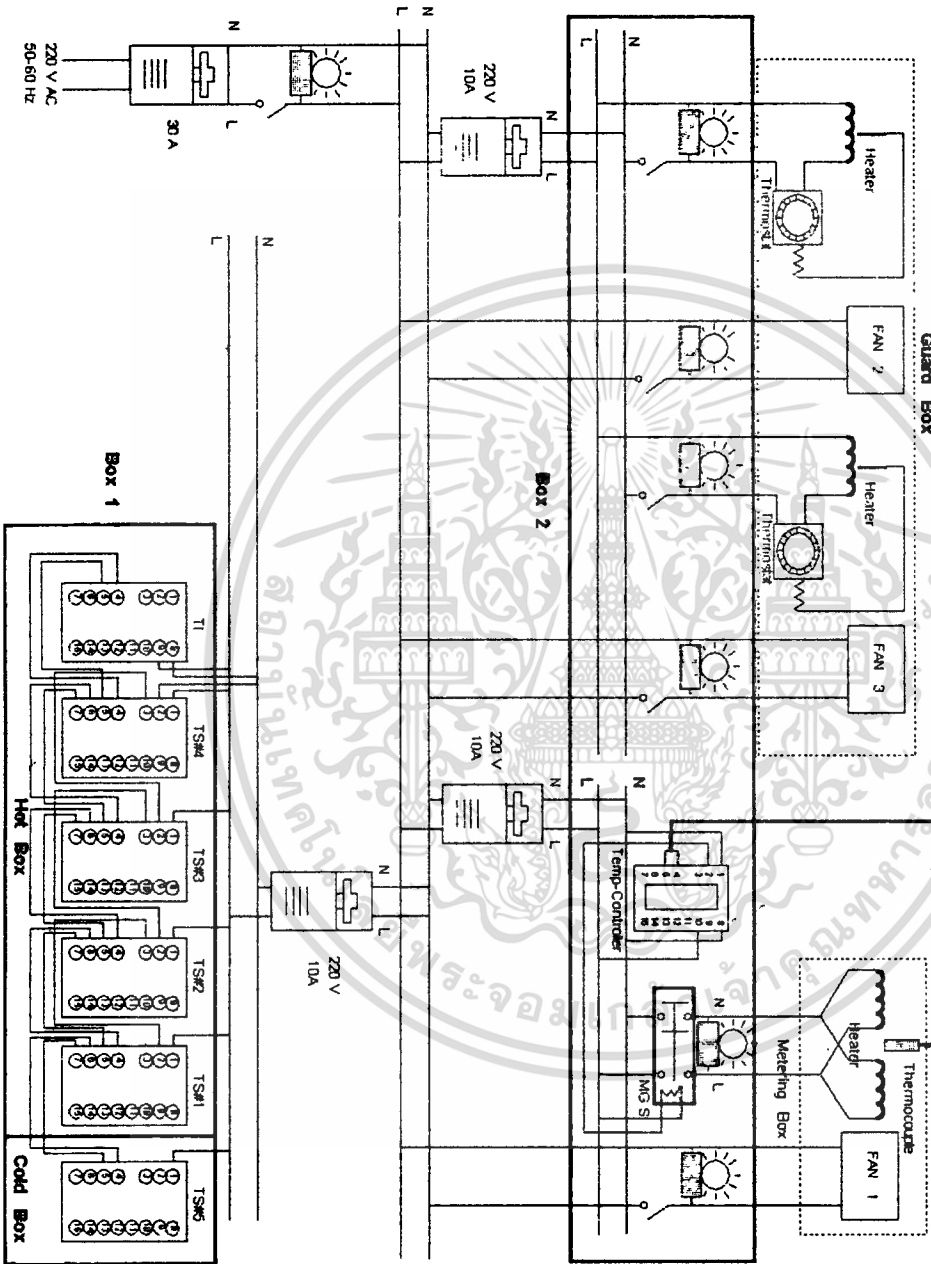
Input	Standard scale ranges
Pt-100 Ω	-100.0 to 199.9 °C 0 to 500 °C
IC (J)	0 to 400 °C 0 to 800 °C
CA (K)	0 to 400 °C 0 to 800 °C 0 to 1200 °C
PR (R)	600 to 1600 °C

หมายเหตุ เราใช้แบบ CA(K) type ย่านอุณหภูมิ 0-400 °C

สำหรับรูปแสดงการทำงานทั้งหมดพร้อมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ แสดงได้ครึ่งรูปหน้าถัดไป ซึ่งจะมีทั้ง  
 พัฒน์ สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ



# ระบบงานไฟฟ้าของเครื่อง



เมื่อ

TI = Temperature Indicator

TS = Temperature Switch

MG.S = Magnetic Switch

Fan 1 = พัดลมในกล่อง Metering Box

Fan 2 = พัดลมในกล่อง Guarded Box ส่วนบน

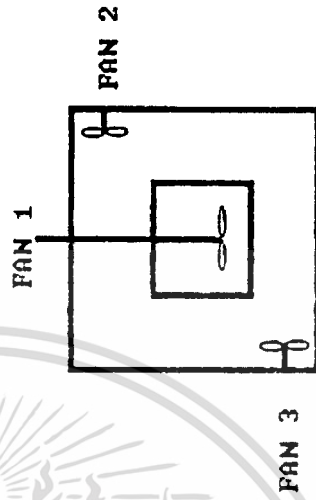
Fan 3 = พัดลมในกล่อง Guarded Box ส่วนล่าง

TS#1 = สวิตช์วัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 ถึง 4

TS#2 = สวิตช์วัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 5 ถึง 8

TS#3 = สวิตช์วัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 9 ถึง 12

TS#4 = สวิตช์วัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 13 ถึง 16



เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างกล่อง Metering Box และกล่อง Guarded Box มีค่าน้อยที่สุด ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกล่อง Metering Box และกล่อง Guarded Box จะต้องมีค่าน้อยที่สุด มาตรฐาน ASTM จึงกำหนดให้มีการตรวจสอบอุณหภูมิของอากาศทั้งสองด้านของผนังกล่อง Metering Box ทั้ง 5 ด้าน สำหรับตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านในของผนังกล่องแทน เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก แต่สำหรับการวัดอุณหภูมิของอากาศภายใน Guarded Box ตำแหน่งที่ทำการวัดควรวัดบริเวณกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างผนังของกล่องทั้ง 2 ทั้ง 5 ด้าน ดังนั้นตำแหน่งที่ต้องทำการวัดอุณหภูมิจึงมีทั้งหมด 10 ตำแหน่ง

สำหรับตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิในส่วนของ Hot Box จะมีทั้งหมด 16 ตำแหน่ง และในส่วนของ Cold Box จะมีทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

- ที่ผิวด้านในของผนังกล่อง Metering Box ทั้ง 5 ด้าน จำนวน 5 ตำแหน่ง
- ด้านนอกของกล่อง Metering Box ทั้ง 5 ด้านเพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศในกล่อง Guarded Box จำนวน 5 ตำแหน่ง

- ที่ผิวของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งมาตรฐาน ASTM C236-89 ได้กำหนดให้ทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของ ชิ้นงานทดสอบในบริเวณพื้นที่ Metering Area อย่างน้อย 1 ตำแหน่งต่อทุกๆ พื้นที่ 2 ตารางฟุต ดังนั้นจำนวนของตำแหน่งที่ต้องทำการวัดสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ตำแหน่งที่ต้องทำการวัด} &= \text{พื้นที่ Metering Area} / 2 \text{ ตารางฟุต} \\ &= (2.667\text{ft})^2 / 2\text{ft}^2 \\ &= 3.556 = 4 \text{ ตำแหน่ง} \end{aligned}$$

- ที่ผิวของชิ้นงานทดสอบในส่วนของพื้นที่ Guarded Area จำนวน 2 ตำแหน่ง ทั้งนี้เพราะมาตรฐาน ASTM กำหนดให้ทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานทดสอบในส่วนของพื้นที่ Guarded Area อย่างน้อย 2 ตำแหน่ง เพื่อตรวจสอบการกระจายของอุณหภูมิตั้งที่ผิวของชิ้นงานทดสอบ

- ที่ผิวของชิ้นงานทดสอบในด้าน Cold Box ๓ ตำแหน่งตรงกันข้ามกับตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบในด้าน Metering Box ทั้ง 4 ตำแหน่ง

### 3.3 การสร้างชุด Cold Box

ข้อมูลจากมาตรฐาน ASTM (1966) และการคำนวณตัดแปลงมาประกอบกันขึ้นเป็นชุดทดสอบ โดยจะกล่าวในส่วน Cold Box

Cold Box เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรับความร้อนจาก Guarded Box และ Metering Box ตลอดเวลาที่ทำการศึกษา ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 148 x 134 x 75 ซม. โดยจะแบ่งการสร้าง Cold Box เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนโครงสร้าง และส่วนประกอบภายใน เช่นเดียวกับ Metering Box และ Guarded Box

#### โครงสร้าง

อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนโครงสร้างของ Cold Box ประกอบด้วย

1. เหล็กฉากขนาด
2. สแตนเลสเบอร์ 20
3. โพลียูรีเทน

#### ส่วนประกอบภายใน

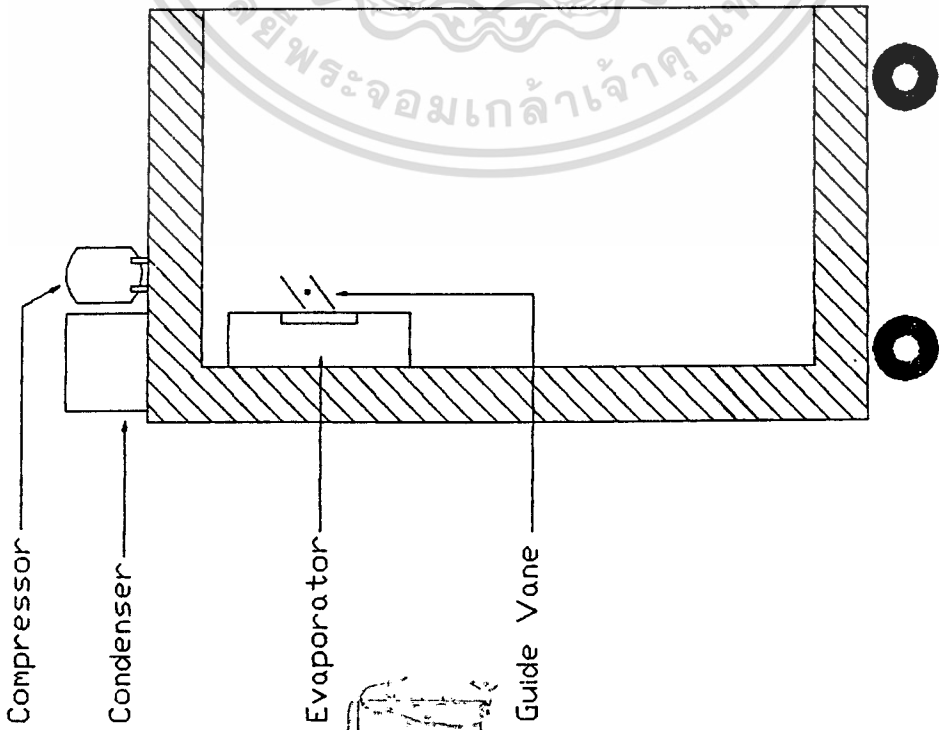
ส่วนประกอบภายใน Cold Box ประกอบด้วย

1. Thermostat
2. มอเตอร์พัดลม
3. คอนเดนเซอร์
4. คอมเพรสเซอร์
5. อีแวนโปเรเตอร์
6. วาล์วลดความดัน

ในการสร้าง Cold Box เริ่มจากการสร้างโครงสร้าง Cold Box ด้วยเหล็กฉากก่อน การบุผนังด้านในของกล่อง แล้วบุด้วยโพลียูรีเทน จากนั้นบุผนังด้านนอก ซึ่งจะต้องเปิดด้านด้านหนึ่งเอาไว้เพื่อรับความร้อนจาก Guard Box และ Metering Box

หลังจากได้โครงสร้างแล้วทำการติดตั้งอุปกรณ์ทำความเย็น ติดตั้งอีแวนโปเรเตอร์ และมอเตอร์พัดไว้ด้านในของ Cold Box ส่วนคอมเพรสเซอร์ และคอนเดนเซอร์จะติดตั้งไว้ที่ส่วนนอกของ Cold Box โดยจะมี Thermostat ซึ่งเป็นส่วนควบคุมอุณหภูมิ ติดตั้งไว้ด้านนอกของ Cold Box ด้วย เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เรียบร้อยเราจะได้ Cold Box

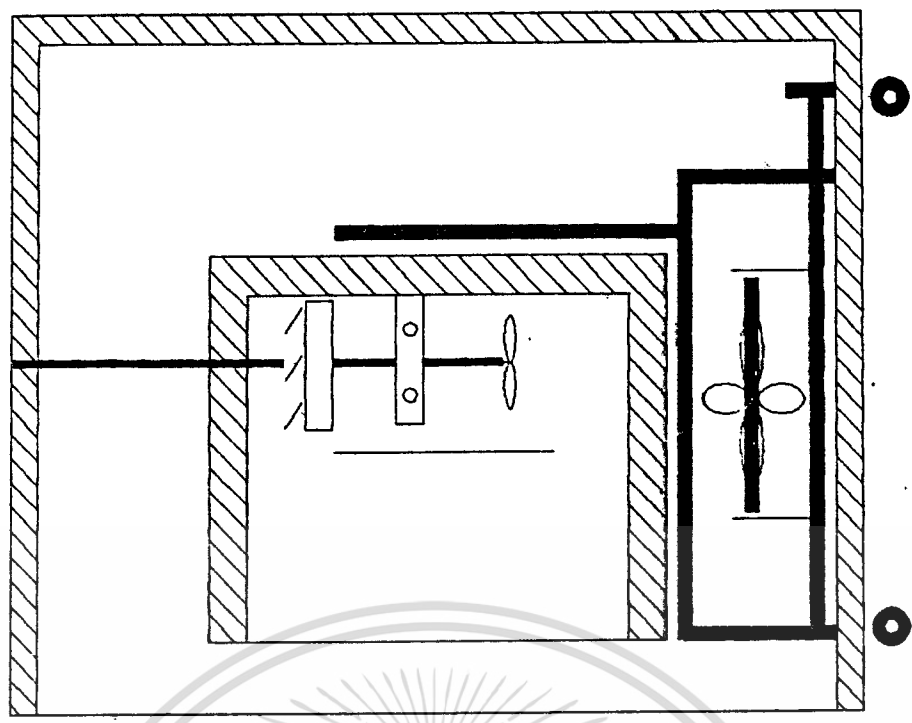
เนื่องจากเมื่อนำ Cold Box มา ประกอบกับส่วน Guard Box ยังมีร่องให้ความร้อนระบายออกมาสู่บรรยากาศจึงต้องมีการนำแผ่นประกบ (Gasket) มาเสริมระหว่าง Cold Box และ Guard Box เพื่อให้เป็นการนำความร้อนมิตีเดียว



Cold Box



Gasket



Guard Hot Box

## บทที่ 4

### เครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

#### 4.1 หลักการวัดอุณหภูมิ

เครื่องวัดอุณหภูมิมียุคหลายชนิด โดยเครื่องมือแต่ละชนิดอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะของสาร คือ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้ เมื่ออุณหภูมิที่วัดเปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงที่วัดได้จะต้องคงที่แน่นอนและพิสูจนได้

หลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยคุณสมบัติทางเชิงกล

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
ใช้ของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด (thermometer)	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์โมมิเตอร์ $\rightarrow \Delta$ การขยายตัวของของเหลว	ปรอท แอลกอฮอล์	- 130 ถึง 315°C [- 200 ถึง 600°F]
เปลี่ยนการขยายตัวเป็นความดัน (Filled Thermal)	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์โมมิเตอร์ แบบ Filled Thermal $\rightarrow \Delta$ ความดัน $\rightarrow \Delta$ ปริมาตร	ปรอท แอลกอฮอล์	- 185 ถึง 540°C [- 300 ถึง 1000°F]
แบบแถบโลหะคู่	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ ตัววัด Bimetal $\rightarrow \Delta$ ระยะทาง	INVAR-Ni + Fe + Cr.	- 60 ถึง 425°C [- 30 ถึง 800°F]

หลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
เทอร์โมคัปเปิล	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์โมคัปเปิล $\rightarrow \Delta$ แรงเคลื่อนไฟฟ้า	- type B - S - R - K - E - J - T	600 ~ + 1,700°C 0 ~ + 1,600°C 0 ~ + 1,800°C -200 ~ + 1,200°C -200 ~ + 800°C -200 ~ + 800°C -200 ~ + 350°C
อาร์ทีดี	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ RTD $\rightarrow \Delta$ ความต้านทาน	แพลตินัม Pt นิกเกิล	-258 ~ 900°C -150 ~ 300°C
เทอร์มิสเตอร์	$\Delta$ อุณหภูมิ $\rightarrow$ เทอร์มิสเตอร์ $\rightarrow \Delta$ ความต้านทาน	ทองแดง, เทอร์มิสเตอร์	-200 ~ 120°C - 30 ~ 300°C

หลักการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงและการแผ่รังสี

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
ออปติคัลไพโร-มิเตอร์	ความเข้มของแสง → <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">เปรียบเทียบความเข้มของแสง</span> → อุณหภูมิ	-	> 700°C

หลักการวัดอุณหภูมิโดยวิธีการทางเคมี

เทอร์โมมิเตอร์	หลักการวัด	วัสดุที่ใช้	ช่วงการวัด
crayon แล็กเกอร์	$\Delta$ อุณหภูมิ → <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">แล็กเกอร์</span> → หลอมละลาย → เปลี่ยนสี	สารเคมี	37 ถึง 150°C 100 ถึง 300°C

4.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples)

นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน Thomas Seebeck พบว่า เมื่อนำโลหะสองเส้นที่ทำด้วยโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกัน จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองนี้ตามรูป 4.2.1 ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง และถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออก จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายด้านเปิด แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่า “ซีเบ็คโวลตเดจ”

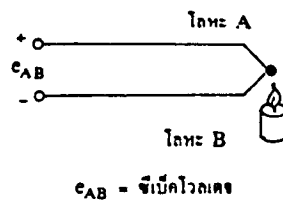
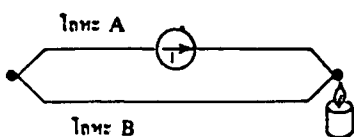
สมการ 4.2.1

$$e_{AB} = \alpha \Delta T$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) เป็นค่าคงที่ ; volt/K

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

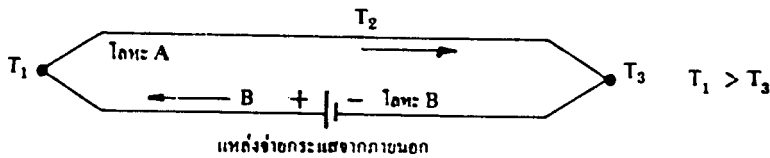
$e_{AB}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้



รูปที่ 4.2.1 แสดงวงจรการทดลองของซีเบ็ค

รูปที่ 4.2.2

ต่อมาพบว่าเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรลักษณะเดียวกับซีเบ็คสร้างขึ้น จะทำให้เกิด อุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของจุดต่อแตกต่างกัน โดยปลายข้างหนึ่งจะร้อนขึ้นและปลายอีกข้างหนึ่งจะ เย็นลงวงจรการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2.3



รูปที่ 4.2.3

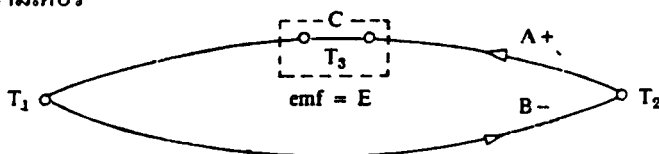
เมื่อมีกระแสจากแหล่งจากภายนอกไหล ผ่านเข้าไปในวงจรจะทำให้ปลายข้างขวามีอุณหภูมิสูง ขึ้นและปลายข้างซ้ายมีอุณหภูมิลดลง ในทางกลับกันเมื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสจะทำให้ อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองกลับกันด้วย

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอ โมคัปเปิลได้ดำเนินต่อไป จนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่นในปัจจุบัน

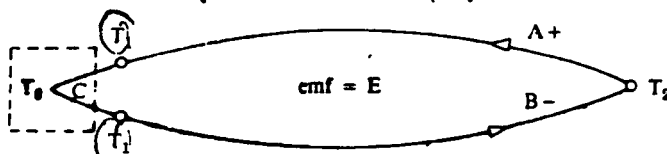
### กฎของการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเนื่องจากความร้อน (Thermoelectric Laws)

ก. กฎของวงจรโลหะชนิดเดียว (Law of the Homogeneous Circuit) ในวงจรที่ประกอบขึ้นด้วย โลหะชนิดเดียวกัน จะไม่เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ณ ปลายจุด ต่อทั้งสอง กระแสไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในกรณีที่ลวดทั้งสองเป็น โลหะต่างชนิดกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะเป็นสัดส่วนกับผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง

ข. กฎของโลหะแทรก (Law of Intermediate Metals) ในวงจรเทอร์โมคัปเปิล ถ้ามีโลหะแทรก อยู่ในส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจร หากจุดต่อของปลายโลหะแทรกทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากันแล้ว โลหะ แทรกนี้จะไม่มีส่วนต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ในทางปฏิบัติมีอยู่เสมอ เช่น ข้อต่อ (connectors) หรือ สายทองแดงที่ใช้ต่อขั้วมิเตอร์

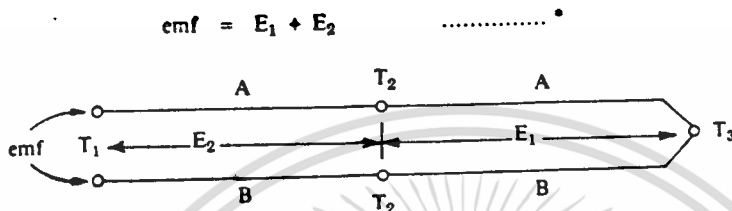


โลหะ C ที่ต่อแทรกอยู่ในวงจรจะไม่มีส่วนต่อการวัดค่าอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองเท่ากัน



รูปที่ 4.2.4 แสดงโลหะแทรก

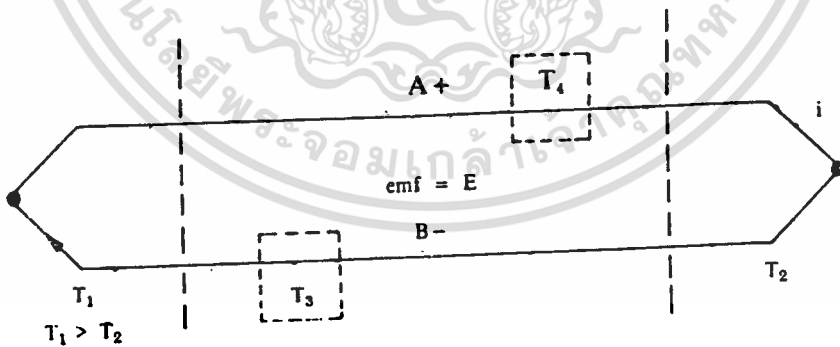
ก. กฎของอุณหภูมิแทรก ( Law of Intermediate Temperature) แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยเทอร์โมคัปเปิลชุดใดๆ ที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน จะมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิต ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชุดนั้น ตามรูปคือ ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลรวมของเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองชุด



รูปที่ 4.2.5 แสดงกฎของอุณหภูมิแทรก

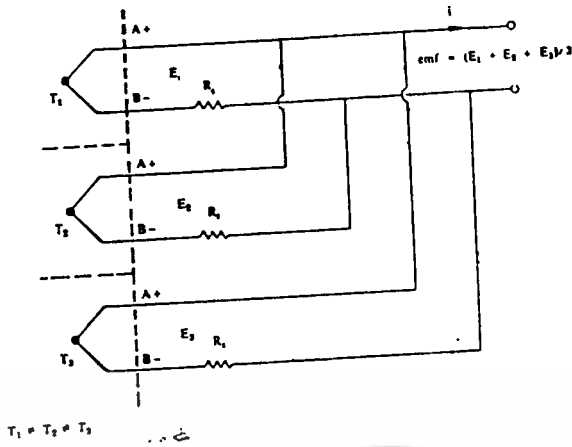
ง. ปรากฏการณ์ (Phenomena) ของเทอร์โมคัปเปิลที่ควรทราบ

1. ในเทอร์โมคัปเปิลคู่เดียวกัน อุณหภูมิที่มีผลคือ อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองเท่านั้น อุณหภูมิบนจุดต่างๆ ตามสายจะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.2.6 อุณหภูมิช่วงกลางสายจะไม่มีผลต่อการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า  
(Temperature gradients do not generate emf's in a homogenous conductor)

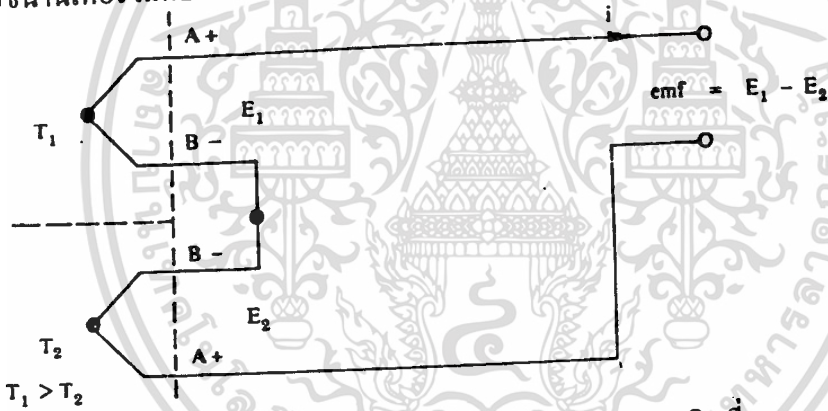
2. การต่อเทอร์โมคัปเปิลสองชุดกลับขั้วกันเป็นการวัดผลต่างของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.2.7 แสดงการหาผลต่างของอุณหภูมิที่จุด  $T_1$  และ  $T_2$

(Temperature differences are measured using thermocouples with reversed polarities)

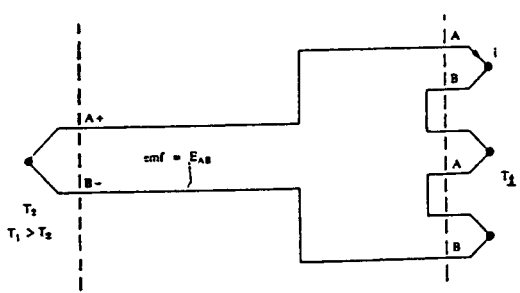
3. การต่อขนานเทอร์โมคัปเปิลเข้าด้วยกัน ผลที่ได้คืออุณหภูมิเฉลี่ย



รูปที่ 4.2.8 แสดงการขนานเทอร์โมคัปเปิลเป็นการหาอุณหภูมิเฉลี่ย

(Parallel thermocouples are used to measure temperature averages)

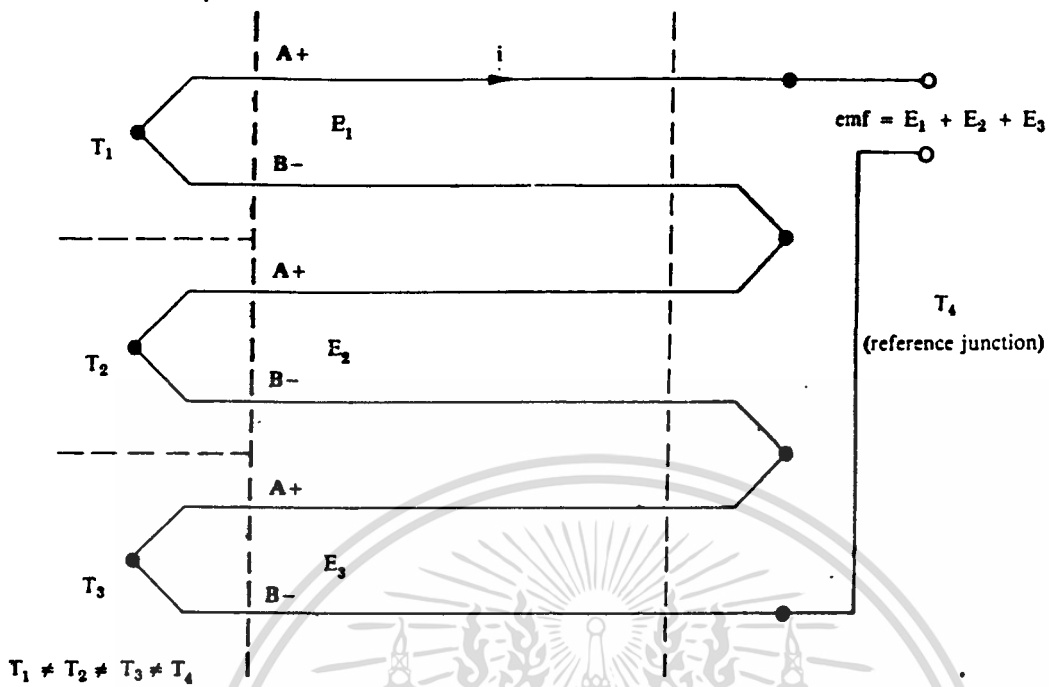
4. การเพิ่มเทอร์โมคัปเปิลที่  $T_1$  หรือ  $T_2$  ตามรูปจะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.2.9 การต่อเทอร์โมคัปเปิลเพิ่มไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้น

(Additional thermocouples at  $T_1$  or  $T_2$  do not affect the overall emf.)

5. การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิลแรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชุด



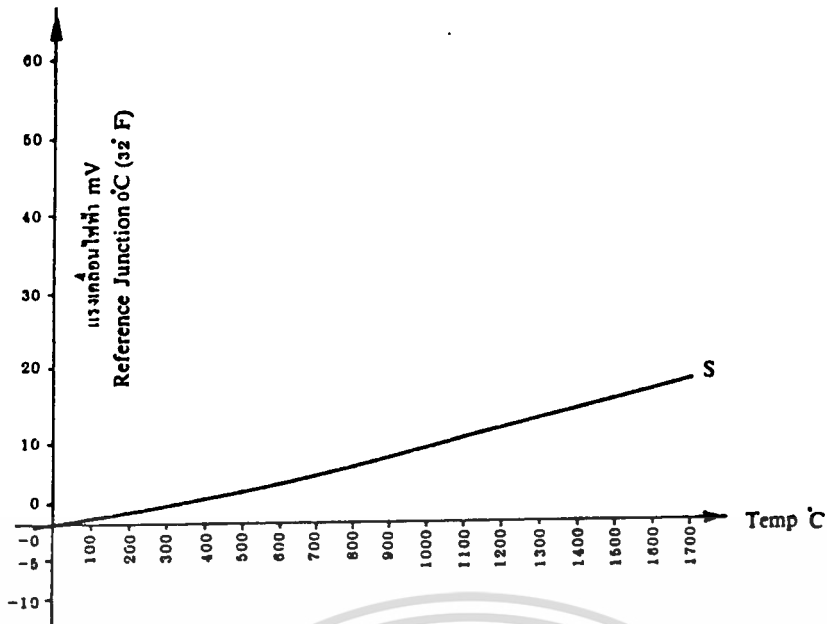
รูปที่ 4.2.10 การต่ออนุกรมเทอร์โมคัปเปิล emf ที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชุด

(series thermocouples can also be used to measure temperature averages, providing a special reference junction source and calibration is used)

### 4.3 แบบของเทอร์โมคัปเปิล

หลังจากได้มีการประดิษฐ์เทอร์โมคัปเปิลขึ้นมาใช้ ได้นำมาดัดแปลงใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง จึงเกิดแบบมาตรฐานของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นหลายแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. เทอร์โมคัปเปิลแบบ S (Type S Platinum 10 % Rhodium V.S. Platinum) เทอร์โมคัปเปิลประดิษฐ์โดยทำสายลบจาก พลาตินัม และสายบวกทำจากโลหะผสม 90 % ของพลาตินัม+10% ของโรเดียม สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง  $1400^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่อมาเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ได้กลายเป็นแบบ S , มาตรฐานสากลตาม IPTS 68 ระบุว่าสามารถใช้ในการสอบเทียบค่า และเปรียบเทียบเป็นค่ามาตรฐาน (Calibration and comparison) ตั้งแต่จุดแข็งตัวของ แอนติโมนี ( $630.74^{\circ}\text{C}$ ) จนถึงจุดแข็งตัวของทอง ( $1064.43^{\circ}\text{C}$ ) ตามกราฟแสดง รูปที่ 4.3.1 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบ S

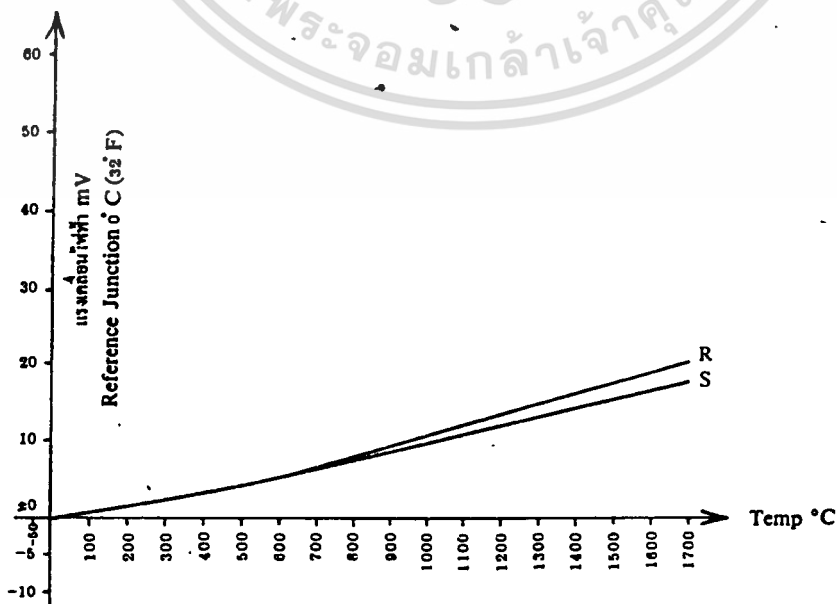


รูปที่ 4.3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ S

เทอร์โมคัปเปิลแบบ S นี้สามารถใช้งานในภาวะที่เป็น oxidizing และ inert ได้ดีโดยสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1,400°C หรือกับการใช้งานในระยะเวลาสั้นๆ สามารถทนได้ถึง 1,482°C แต่ไม่เหมาะสำหรับสภาวะงานที่เป็นแบบ reducing ,vacuum หรือสภาพงานที่มีไอของโลหะ ซึ่งทำให้มีอายุการใช้งานสั้นลง ถ้าจำเป็นจะต้องใช้จะต้องป้องกันด้วย protecting tube ที่เป็นแบบอโลหะ การเปลี่ยนแปลงสภาพเช่นนี้จะเกิดกับเทอร์โมคัปเปิลทุกรูปแบบที่มีส่วนผสมของเรเดียม

2. เทอร์โมคัปเปิลแบบ R (Type R Platinum 13% Rhodium V.S. Platinum)

เทอร์โมคัปเปิลแบบ R สายบวกทำจาก พลาตินัม สายลบทำจาก พลาตินัม 87% + โรเดียม 13% ผลที่ได้จะทำให้แบบ R ให้ output สูงกว่า แบบ S ตามกราฟแสดงคุณสมบัติเทียบกับแบบ S คุณสมบัติเหมือนกับแบบ S ทนอุณหภูมิสูงสุดได้ 1400°C

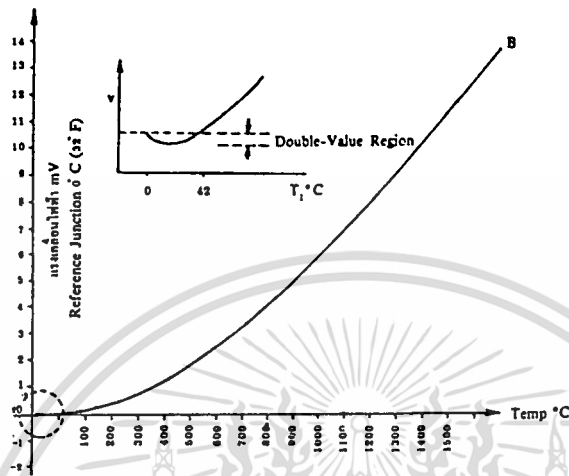


รูปที่ 4.3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ R

### 3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ B (Type B Platinum 30 % Rhodium/ Platinum 6 % Rhodium)

สายบวกทำจากแพลตินัม 70 % + โรเดียม 30 % สายลบทำจากแพลตินัม 94 % + โรเดียม 6%

คุณสมบัติแสดงดังกราฟ รูปที่ 4.3.3



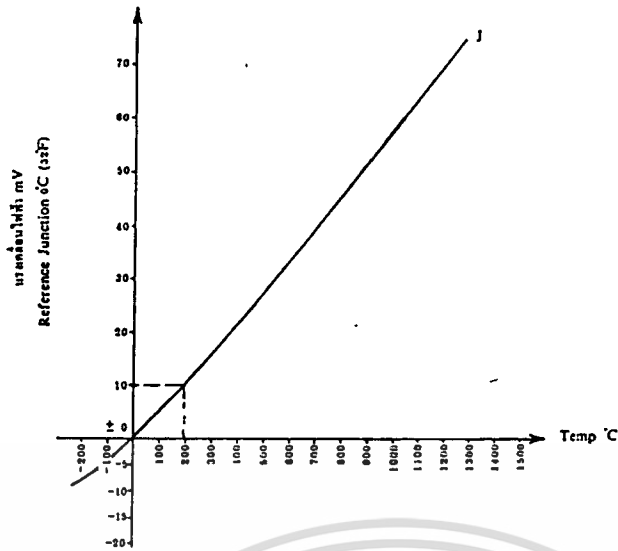
รูปที่ 4.3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ B

เทอร์โมคัปเปิลแบบ B จะให้แรงเคลื่อนต่ำกว่าแบบ S และ แบบ R แต่คุณสมบัติที่เด่นกว่าคือ แข็งแรงและทนทานกว่า สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง  $170^{\circ}\text{C}$  ( $3100^{\circ}\text{F}$ ) ในสถานะที่เป็น oxidizing หรือ inert แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานในสถานะ reducing หรือ vacuum และในงานที่มีไอของโลหะ และโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และแบบ S

\* เทอร์โมคัปเปิลที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์จะให้ลิเนียร์ดี แต่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ \*

### 4. เทอร์โมคัปเปิลแบบ J (Type J Iron V.S. Constantan)

เนื่องจาก แพลตินัมเป็นธาตุที่มีราคาแพง เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลมีราคาถูกลงได้มีการค้นคว้าหาวัสดุที่มีราคาถูกกว่าเพื่อให้แทนแพลตินัม วัสดุที่เริ่มทดลองใช้ เช่น เหล็ก นิกเกิล จากการทดลองพบว่าโลหะผสมระหว่าง 60 % ของทองแดง + 40 % ของนิกเกิล ที่ต่อมาเรียกว่า constantan สามารถแก้ปัญหานี้ได้ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้สายบวกทำด้วยเหล็ก และสายลบทำด้วย constantan ต่อมากลายเป็นแบบมาตรฐานแบบ J

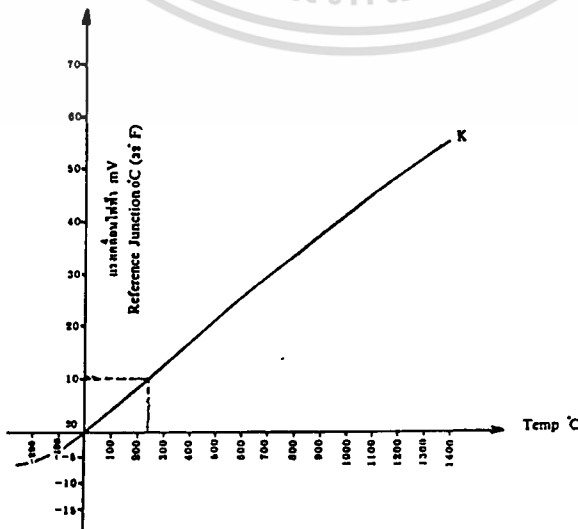


รูปที่ 4.3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ J

เหมาะสำหรับสภาพงานที่เป็น Vacuum , oxidizing , reducing หรือ inert ที่อุณหภูมิไม่เกิน 760°C ไม่เหมาะกับงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C และที่อุณหภูมิสูงกว่า 538°C สายที่เป็นเหล็กจะเกิด oxidization ด้วยอัตราสูงกว่าปรกติมาก สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่า 538°C ต้องใช้เทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่ช่วยให้อายุการใช้งานยืดยาวนาน

### 5. เทอร์โมคัปเปิลแบบ K (Type K Chromel V.S. Alumel)

เพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่าจึงได้ประดิษฐ์แบบใหม่ที่สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่าง นิกเกิล 10 % + โครเมียม 90 % และสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95 % + 5 % ของส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม แมงกานีส และซิลิคอน ซึ่งต่อมาได้เป็นแบบ K ที่นิยมแพร่หลายที่สุด



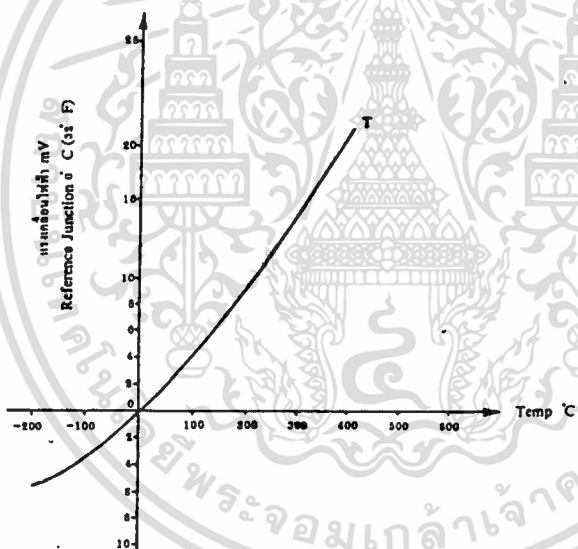
รูปที่ 4.3.5 แบบ K

คุณสมบัติที่เด่นมากของเทอร์โมคัปเปิลแบบ K คือให้แรงเคลื่อน output สูงกว่าแบบอื่นๆ  
ข้อควรระวัง ไม่ควรใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สัมผัสโดยตรงกับ

1. ในสภาวะงานที่เป็น reducing หรือเป็นการใช้งานสลับกันระหว่าง oxidizing และ reducing
2. สภาวะงานที่มีไอของซัลเฟอร์ เพราะซัลเฟอร์จะทำลายโลหะทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิลโดยเฉพาะสายลบ
3. ในสภาวะงานที่เป็น vacuum ชกเว้นในช่วงเวลาสั้นๆ

#### 6. เทอร์โมคัปเปิลแบบ T (Type T Copper V.S. Constantan)

เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ สายบวกทำจากทองแดง สายลบทำจาก constantan สภาพงานปกติวัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง  $-184^{\circ}\text{C}$  เป็นแบบที่ทนการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีความชื้นได้ดีเป็นพิเศษ

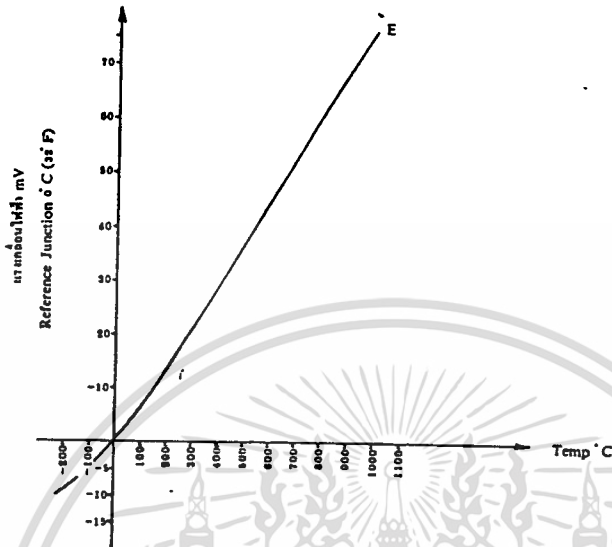


รูปที่ 4.3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ T

การใช้งานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรงจะทำให้ส่วนผสมของเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไป จึงไม่เหมาะกับการใช้งานลักษณะนี้

#### 7. เทอร์โมคัปเปิลแบบ E (Type E Chromel V.S. Constantan)

สายบวกทำจากส่วนผสมของโครเมียม 10 % + นิกเกิล 90% และสายลบทำจาก constantan อุณหภูมิใช้งานปรกติระหว่าง  $-250^{\circ}\text{C}$  ถึง  $871^{\circ}\text{C}$  เหมาะกับสภาวะงานที่เป็น oxidizing คุณสมบัติอื่นๆ คล้ายกับแบบ K ดังรูปหน้าต่อไป



รูปที่ 4.3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลแบบ E

เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะสามารถใช้กับงานในช่วงที่กว้างกว่าแบบอื่นๆ และมีราคาถูกในการสร้างชุดทดสอบขึ้นนี้จึงได้ถูกเลือกเพื่อนำมาใช้

#### 4.4 ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล

ส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

##### 1. ตัวเทอร์โมคัปเปิล (Termocouples elements)

หลักการเลือกใช้วัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล ได้ถูกกำหนดตามความต้องการตามสภาพของงาน ดังนี้

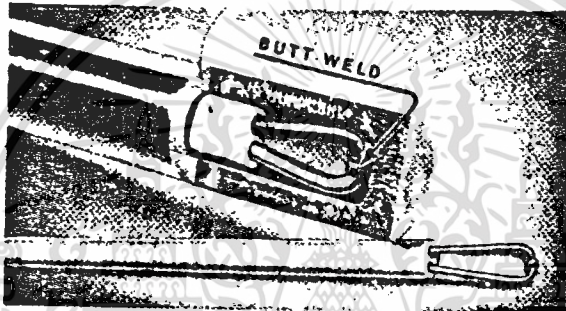
- ส่วนผสมของโลหะที่ใช้ทำจะต้องไม่เปลี่ยนแปลง หรือสูญเสียธาตุส่วนผสมไปในเวลาอันรวดเร็ว
- จะต้องให้แรงเคลื่อน output ที่มีเสถียรภาพ (stable) ในการใช้งานไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในช่วงเวลาใช้งาน

- มีความแข็งแรง และทนต่อสภาพแวดล้อมในการใช้งานที่พิสูจน์ได้

ตัวเทอร์โมคัปเปิลโดยปกติจะถูกเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน เรียกว่า จุดต่อสำหรับวัด (measuring junction) และร้อยด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการลัดวงจร แบบที่ใช้อยู่โดยทั่วไปในปัจจุบัน

ดังนี้

- รูป (ก) เป็นเทอร์โมคัปเปิลเปลือย จุดต่อสำหรับวัดบิดเป็นเกลียว และเชื่อมปลายไว้
- รูป (ข) แสดงการเชื่อมปลายจุดต่อแบบ butt weld ซึ่งเป็นแบบที่ดีที่สุด
- รูป (ค) จุดต่อบิดเป็นเกลียวและเชื่อมปลายไว้พันฉนวนด้วยใยหิน (asbestos) ซึ่งสามารถทนความร้อนได้ดี
- รูป (ง) ปลายจุดต่อเป็นแบบ butt weld ร้อยติดกันด้วยฉนวนกระเบื้องแบบรูคู่ สามารถตัดโค้งได้บ้าง
- รูป (จ) ฉนวนเป็นแบบร้อยแยกกันทั้ง 2 เส้น
- รูป (ฉ) เป็นเทอร์โมคัปเปิล 2 คู่ร้อยติดกันด้วยฉนวนกระเบื้องแบบ 4 รู เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน

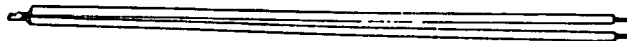


รูปที่ 4.4.1 แสดงการเชื่อมจุดต่อแบบ Butt Weld

(ก) Bare thermocouple element, twisted and welded



(ข) Butt-welded thermocouple element



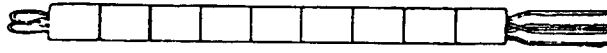
(ค) Thermocouple element, twisted and welded with asbestos insulation



(ง) Butt-weld thermocouple element with double-bare insulators



(จ) Butt-welded thermocouple element with fish-spine insulators



(ก) Two butt-welded thermocouple elements with 4-hole insulators

## รูปที่ 4.2.2 แสดงการเชื่อมจุดต่อและฉนวนที่ใช้ในเทอร์โมคัปเปิลโดยทั่วไป

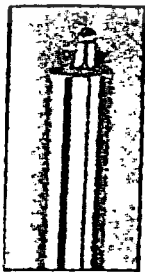
### 2. ครอบโลหะป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล (Metal Sheath)

เพื่อให้สภาพการใช้งานพร้อมที่จะนำไปใช้และคู่สายของเทอร์โมคัปเปิลมีความเรียบร้อยแข็งแรงจึงต้องมี Metal Sheath การประกอบตัว Metal Sheath มี 3 วิธี คือแบบเปลือยจุดต่อ แบบใช้ Metal Sheath เป็นจุดต่อเทอร์โมคัปเปิลและแบบไม่ใช่ Metal Sheath เป็นจุดต่อ

- แบบเปลือยจุดต่อ : เหมาะสำหรับงานแบบสแตติก หรือวัดอุณหภูมิของก๊าซที่ไม่กัดกร่อน ต้องการให้ผลการวัดที่ไวที่สุด จุดต่อสำหรับวัดสัมผัสกับของเหลวที่ต้องการวัดโดยตรง ผลเสียของแบบนี้คือ ชำรุดเสียหายง่ายและอายุการใช้งานสั้น ไม่เหมาะสำหรับงานความดันสูง หรือของเหลวที่มีการกลั่นตัวดังรูป 4.3.3 (ก)

- แบบใช้ Metal Sheath เป็นจุดต่อเทอร์โมคัปเปิล : เหมาะสำหรับงานที่เป็นแบบสแตติก หรือของเหลวที่เป็นสารกัดกร่อนให้ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิ ไวกว่าแบบไม่ใช่ Metal Sheath เป็นจุดต่อ ทนต่อสภาพงานที่มีความดันสูง ได้ดังรูป 4.3.3 (ข)

- แบบไม่ใช่ Metal Sheath เป็นจุดต่อ เทอร์โมคัปเปิล : จะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ถูกต้อง สามารถทนต่อสภาพงานที่มีความดันสูงถึง 100,000 Psi และมีอายุการใช้งานยืนยาวที่สุด แต่มีข้อเสียคือ ให้ผลการวัดช้าเหมาะกับงานที่อุณหภูมิไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงช้าๆ มีราคาสูงกว่าแบบอื่น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4.3

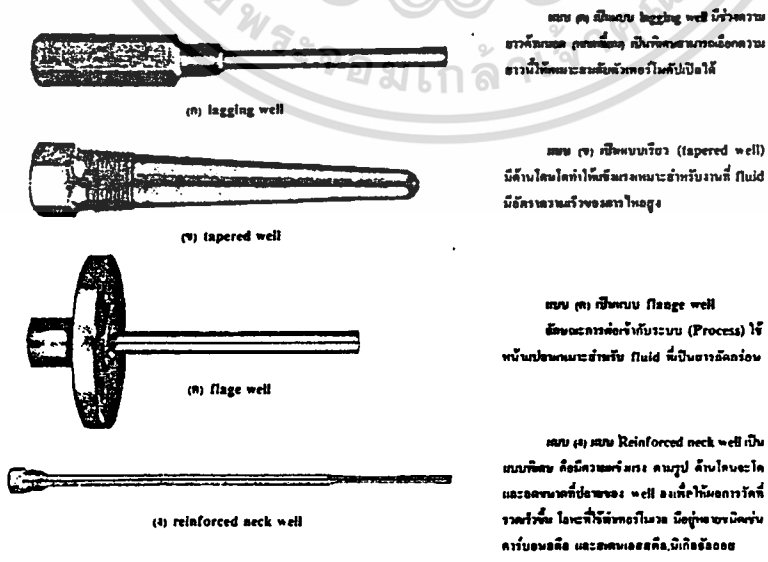
### 3. ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Insulators)

ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิลสำหรับกันตัวเทอร์โมคัปเปิลกับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภท แมกนีเซียมออกไซด์ หรืออลูมิเนียมออกไซด์ ลักษณะเดียวกับที่ใช้ใน Heater

ในปัจจุบัน วิธีการทำฉนวน คือ ใส่ผงอลูมิเนียมออกไซด์ ลงไปใน Metal Sheath ที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลอยู่และบีบอัดทำให้ Metal Sheath มีขนาดเล็กลงหลังจากนั้นจะถูกนำไปป้อนร้อนเป็นการคายความร้อน และเป็น การอบไล่ความชื้นที่มีอยู่ในตัว Sheath การทำฉนวนด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้เทอร์โมคัปเปิลที่กระต๊วต แข็งแรง และสะดวกสำหรับการติดตั้งใช้งาน ฉนวนแบบกระเบื้องเป็นแบบที่ผู้ใช้งานเป็นผู้เลือกใช้เองตามสภาพงาน มีหลายแบบให้เลือกทั้งขนาด รูปร่าง และความยาว

### 4. Protection tubes

Protection tubes จะทำหน้าที่หลักอยู่ 2 ประการ คือเสริมความแข็งแรง ทนทานให้ตัวเทอร์โมคัปเปิลและป้องกันความเสียหายจากสภาวะการใช้งาน เช่น สารเคมี หรือการแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดความร้อนของระบบ อันจะทำให้สารประกอบในตัวเทอร์โมคัปเปิลเปลี่ยนไป คุณสมบัติก็จะเปลี่ยนไปตามสภาพงานที่ fluid เป็นสารกัดกร่อนมีความดันสูง หรือในบางโอกาสต้องการถอดตัวเทอร์โมคัปเปิล เพื่อการซ่อมบำรุง โดยไม่รบกวนการทำงานของระบบในกรณีเช่นนี้ Protection well เป็นตัวกลางที่ช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยมันจะเป็นตัวกลางไม่ให้ fluid สัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิลโดยตรง และปกคลุมความดันของระบบไม่ให้รั่วออกจากภายนอกได้ Protection tubes มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบโลหะ และอโลหะ แบบโลหะนั้นในทางปฏิบัติมีชื่อต่างกัน โดยทั่วไปมี 4 แบบตามรูป 4.4.4



รูปที่ 4.4.4

## 5. Extention Wire

เนื่องจากการใช้งานจริงระยะทางระหว่าง Measuring และ Reference Junction บางครั้งอยู่ห่างกัน สายเทอร์โมคัปเปิลมีราคาแพงมาก จึงต้องหาสายมาต่อในช่วงนี้ที่มีราคาถูกกว่าสายเทอร์โมคัปเปิล และมีคุณสมบัติทางการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามอุณหภูมิ (Thermoelectric) เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล ในช่วงอุณหภูมิไม่สูงนักสูงสุดของบรรยากาศที่จะเป็นไปได้ชนิดนี้ เรียกว่า extension wire ในที่นี้จะเขียนถึง extension wire ที่ใช้กับเทอร์โมคัปเปิล แบบมาตรฐานเท่านั้น



รูปที่ 4.4.5 (ก) Extension Wire พร้อมฉนวนหุ้ม

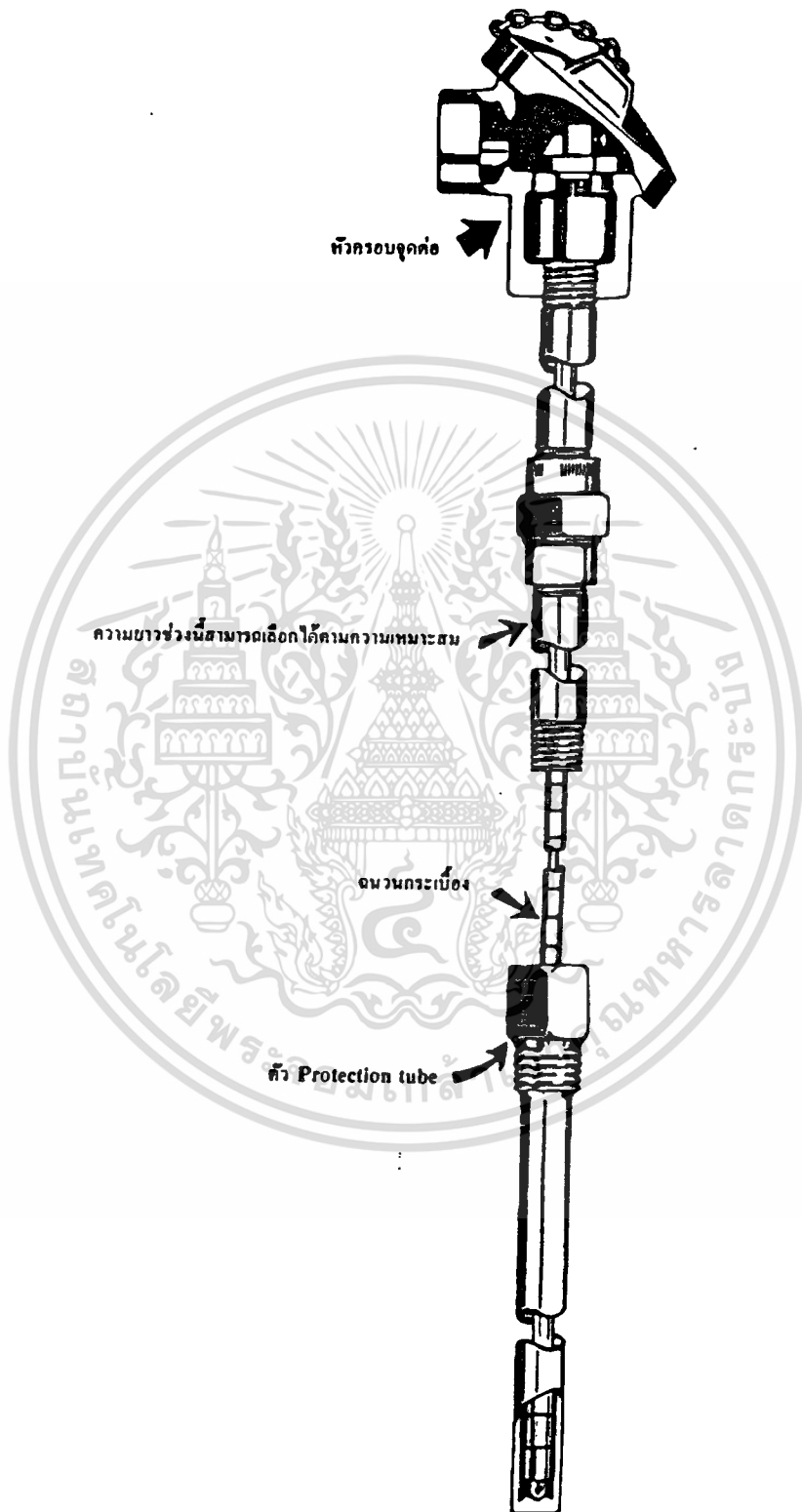


รูปที่ 4.4.5 (ข) Extension Wire หุ้มฉนวนและมี ชิลด์ป้องกันสนามแม่เหล็กภายนอกครบถ้วน เพราะ Extension Wire เป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกเปลี่ยนแปลงอาจเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำทำให้ค่า  $mV$  ที่วัดได้ผิดไป



รูปที่ 4.4.5 (ค) Extension Wire แบบรวม (multipair) มีหลายคู่ให้เลือกตั้งแต่ 4-24 คู่และมีชิลด์ป้องกัน

รูปที่ 4.4.5 Extension Wire แบบต่างๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

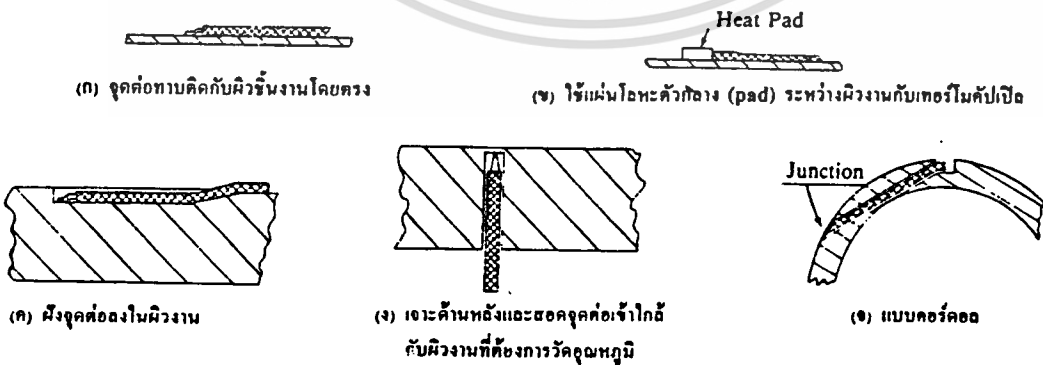


รูปที่ 4.4.6 แสดงส่วนประกอบที่สมบูรณ์ของเทอร์โมคัปเปิล

#### 4.5 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิผิววัสดุ

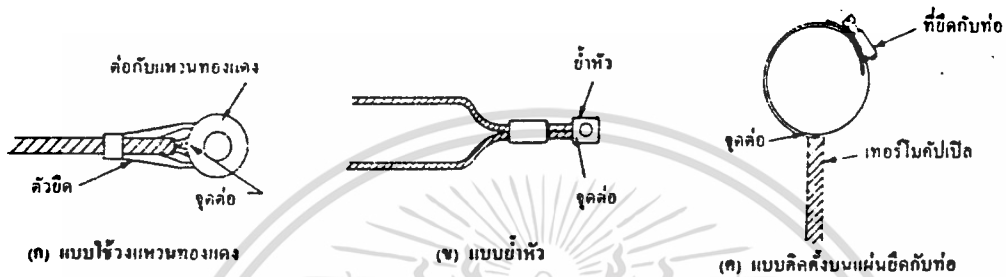
การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล เพื่อใช้วัดอุณหภูมิที่ผิวทำได้หลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของ วัสดุนั้นๆ เช่น ขนาด ความหนา บางกว่าวัสดุ รูปแบบของการถ่ายเทความร้อน ตัวอย่างการติดตั้งในรูป ของวัตถุเป็นการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลอย่างถาวรที่พบอยู่โดยทั่วไป รูปที่ 4.5.1 (ก) เมื่อต้องการวัด อุณหภูมิที่ผิวของโลหะบาง เช่นเดียวกับแบบ (ก) เมื่อต้องการวัดอุณหภูมิที่ผิวโลหะบางโดยการเชื่อม Measuring Junction ลงบนผิวของด้านที่ต้องการวัดอุณหภูมิ รูปที่ 4.5.1 (ข) เป็นการวัดอุณหภูมิที่ผิว โลหะบางเช่นเดียวกับแบบ ก. แต่จุด Measuring Junction และผิวของวัสดุที่ต้องการทราบอุณหภูมิไม่ ได้เชื่อมต่อกันโดยตรง แต่ใช้โลหะอีกอันหนึ่ง (collecting pad) เป็นตัวกลาง เพื่อให้การเตรียม Measuring Junction และการเชื่อมต่อเข้ากับพื้นผิวของโลหะเป็นไปได้โดยง่าย และแข็งแรงกว่าแบบ ก. แต่จะให้ผลการวัดต่ำกว่าสำหรับวัสดุที่หนานั้น เพื่อให้ผลการวัดถูกต้องยิ่งขึ้น การติดตั้งสามารถทำ ได้ตามรูปที่ 4.5.4 (ค) และ (ง) ตามรูป Measuring Junction ถูกฝังอยู่ในเนื้อโลหะด้วยการเจาะร่องบน ผิวของโลหะและเชื่อมต่อจุด Measuring Junction ลงในร่อง

ผิวด้านนอกจะถูกฉาบให้เต็มเหมือนสภาพเดิมด้วยซีเมนต์, การติดตั้งอีกวิธีหนึ่งคือการเจาะผิว วัสดุอีกด้านหนึ่ง เข้ามาให้ใกล้กับผิวที่ต้องการวัดอุณหภูมิ ตามรูปที่ 4.5.1 (ง) และเชื่อมต่อ Measuring Junction เข้ากับปลายสุดของรูที่เจาะ วิธีการจากรูปที่ 4.5.1 (ง) เหมาะสำหรับงานที่มีความดันไม่สูงนัก แต่ต้องการผลวัด (response) ที่รวดเร็ว แต่สำหรับกรวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของท่อ ท่อที่จัดเตรียม ไว้แล้วดังรูปที่ 4.5.1 (จ) ที่เรียกว่า chordal สามารถใช้ได้ดี ท่อช่วงนี้ต้องสั่งซื้อมาเป็นพิเศษ โดย กำหนดชนิดของโลหะ, ขนาดของท่อ , อ่านอุณหภูมิที่ต้องการวัดแล้วติดตั้งท่อที่จัดเตรียมเทอร์โมคัปเปิล ไว้ภายในนี้ลงบริเวณที่ต้องการทราบอุณหภูมิที่ผิวของท่อ



รูปที่ 4.5.1 วิธีการติดตั้งจุดต่อของเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานแบบต่างๆ

การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล สำหรับการวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุแบบชั่วคราว เพื่อหาข้อมูลเป็น ครั้งคราว สามารถทำได้โดยการออกแบบ Prode (หัววัด) แบบพิเศษตามรูป หัววัดตามรูป 4.5.2 (ก) Measuring Junction จะถูกเชื่อมลงบนแหวนทองแดงเพื่อให้สะดวกสำหรับการติดตั้งด้วยสกรูลงบน พื้นผิวของวัสดุ Supprot ด้านข้างทั้งสองที่ติดกับแหวนทองแดง เพื่อให้เกิดความแข็งแรงสำหรับการใช้ งาน ถ้าเป็นแผ่นโลหะบางอาจใช้หมุดย้ำก็ได้ตามรูปที่ 4.5.2(ข) หรืออีกลักษณะหนึ่งจุด Measuring Junction ถูกติดตั้งอยู่บนวงแหวนที่รัดรอบท่อ วงแหวนนี้สามารถปรับให้แน่นได้ตามรูปที่ 4.5.2 (ค)



รูปที่ 4.5.2

การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ จะทำให้อุณหภูมิที่พื้นผิวบริเวณนั้นผิดไปบ้าง เพราะการ กระจายความร้อน และการคายความร้อนของผิวบริเวณนั้นจะผิดไปจากเดิม เช่น การติดตั้งเทอร์โม คัปเปิล ตามรูป จะทำให้การไหลของ fluid ที่ผิวบริเวณนั้นผิดไป ดังนั้น เพื่อที่จะลดความผิดพลาดนี้ ให้เหลือน้อยที่สุด การติดตั้งควรทำอย่างระมัดระวัง โดยใช้สายขนาดเล็ก และพิจารณาความหนาบาง ของวัสดุ ถ้ามีความหนาพออาจติดตั้งโดยวิธีเจาะร่องขนาดพอที่จะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลได้ และใช้ ซีเมนต์ ทนความร้อน ฉาบผิวให้เรียบสภาพจะได้ใกล้เคียงกับก่อนการติดตั้งมากที่สุด

#### 4.6 ความผิดพลาดของการวัดอุณหภูมิ

เนื่องจากการวัดอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลอาจมีความผิดพลาดที่เกิดจากการนำความร้อนออก ของตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง จึงควรใช้สายขนาดเล็กและความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้หลายแห่ง เช่น extension wire จุดต่อต่างๆ ในการต่อคู่สาย extension wire จะต้องระวังไม่ให้ผิดพลาด โดยการสลับ สายทั้งที่ตัวเทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์อ่านค่า มิลลิโวลท์ หรือตัว ทรานสมิตเตอร์ สาย shield รอบ extension wire ก็จะต้องได้รับการต่อลง ground อย่างถูกวิธี เพราะค่าแรงเคลื่อนที่เกิดจาเทอร์โมคัปเปิล มีค่าน้อยอยู่ในย่านมิลลิโวลท์เท่านั้น และถ้าลากสาย extension wire ยาวขึ้น โอกาสที่จะได้รับการ เหนี่ยวนำจากสายไฟฟ้าอื่นๆ ที่มีกระแสสลับไหลอยู่ก็มีมากขึ้นจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดขึ้นได้ตามจุดต่อ ต่าง ๆ ต้องให้มีน้อยจุดที่สุด และเป็นวัสดุที่เลือกตามข้อแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ถ้าจุดต่อยาว และ อุณหภูมิปลายจุดต่อไม่เท่ากัน ความผิดพลาดจะเกิดขึ้น

ความผิดพลาดในการวัดของเทอร์โมคัปเปิล อาจมีความผิดพลาดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการส่งถ่ายสัญญาณไฟฟ้าระหว่างเทอร์โมคัปเปิล กับ Temperature Indicator หรืออาจเกิดจากการติดปลายเทอร์โมคัปเปิลกับตำแหน่งที่ต้องการวัดผิดวิธี โดยติดปลายเทอร์โมคัปเปิลไว้กับชิ้นงานทดสอบด้วยกาวเรซินเท่านั้น มิได้สอดปลายเทอร์โมคัปเปิลฝังเข้าไปในชิ้นงานทดสอบตามที่ ASTM แนะนำไว้

เพื่อให้ผลการวัดอุณหภูมิถูกต้องควรเลือกชนิด ขนาด และย่านการใช้งานให้เหมาะสมกับสภาพของงานและวิธีการติดปลายเทอร์โมคัปเปิลให้ถูกวิธี



## บทที่ 5

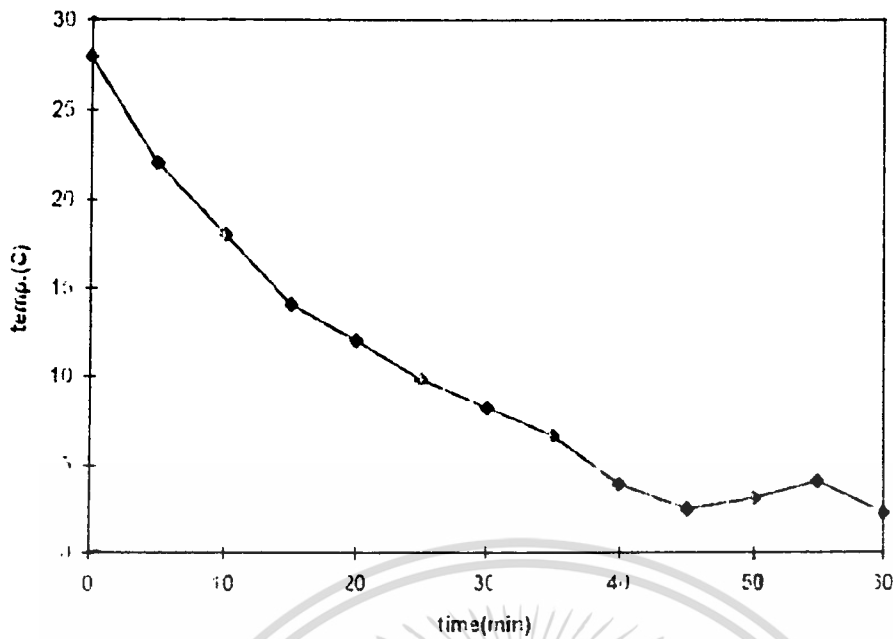
### การทดลองและวิเคราะห์ผลที่ได้

#### 5.1 ประสิทธิภาพและการทำงานของ Cold Box

เนื่องจากก่อนการทดลองจะต้องทดสอบความเชื่อถือได้และประสิทธิภาพการทำงานของ Cold Box โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิในกล่อง Cold Box ที่ปิดสนิทเทียบกับเวลาเพื่อดูประสิทธิภาพและการทำงาน ได้ค่าอุณหภูมิเทียบกับเวลาแสดงในตารางดังนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าอุณหภูมิใน Cold Box เทียบกับเวลา

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
0	28
5	22
10	18
15	14
20	12
25	9.8
30	8.2
35	6.6
40	3.8
45	2.4
50	3
55	4
60	2.2



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงแนวโน้มของอุณหภูมิใน Cold Box ขณะปิดกล่องเพื่อทดสอบอุณหภูมิ

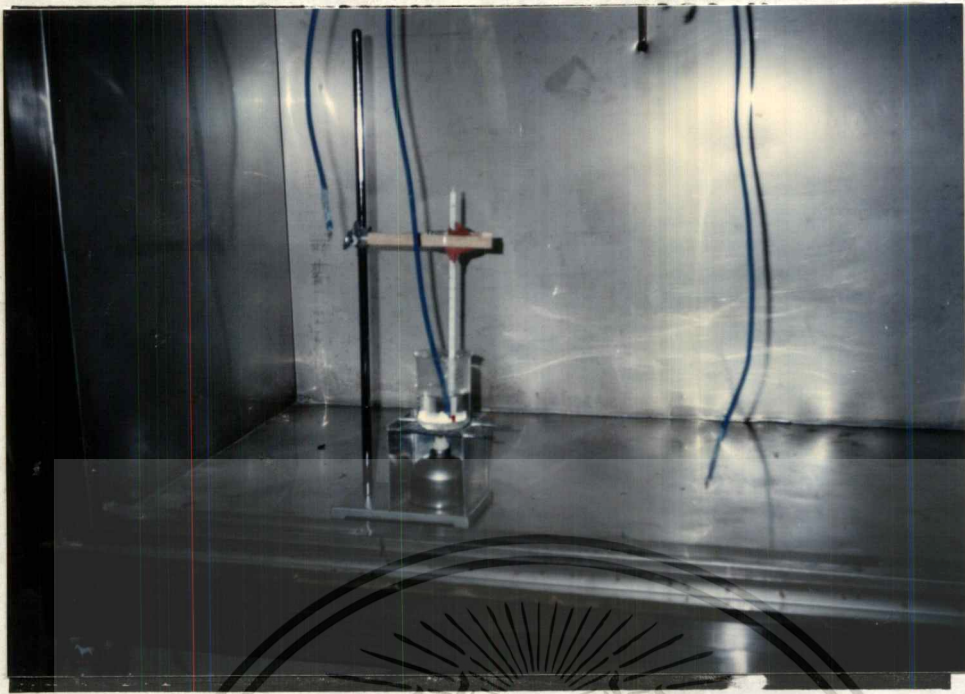
จากกราฟ อุณหภูมิต่ำสุดที่อิเวปโพเรเตอร์สามารถทำได้จะมีค่าประมาณ 2°C และในช่วงสถานะคงตัวของกราฟ กราฟจะมีลักษณะเป็นรูปโค้งคล้ายคลื่นเพราะการทำงานของระบบทำความเย็นของ Cold Box จะต้องรอให้มีการระเหยของสารความเย็นในอิเวปโพเรเตอร์ก่อนที่จะปล่อยให้ไอสารความเย็นเข้าไปในคอมเพรสเซอร์ เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากของเหลวไหลเข้าคอมเพรสเซอร์

## 5.2 การตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

สำหรับขบวนการวัดและอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมาก ๆ ต้องสามารถพิสูจน์ได้ว่ามีความถูกต้องทุกพื้นที่ของการวัด แต่สำหรับอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแต่ละชนิดจะมีความถูกต้องมากน้อยต่างกัน การใช้ปรอทในหลอดแก้วเป็นเทอร์โมมิเตอร์จะเป็นที่ยอมรับและถูกต้องมากที่สุด โดยไม่มีข้อจำกัดใดๆ ทั้งสิ้น

การใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ค่าที่ได้ออกมาอาจไม่ถูกต้องมากนักขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของสารโลหะและองค์ประกอบของสารโลหะผสมที่นำมาใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งแตกต่างกันไปตามการผลิตของแต่ละโรงงาน การนำผลของเทอร์โมคัปเปิลมาใช้ต้องมีการเปรียบเทียบผลที่ได้กับเทอร์โมมิเตอร์ ในการเปรียบเทียบผลต้องการความระมัดระวังอย่างมาก และต้องควบคุม metallurgy ของวัสดุด้วย

วิธีการ Calibrate ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ทำโดยนำน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาวัดค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลจุดที่สัมผัสกับชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 10 จุด เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิจาก 0 - 100°C และทำการบันทึกผล



รูปที่ 5-2 (a) แสดงการ Calibration โดยใช้น้ำร้อน



รูปที่ 5-2 (b) แสดงการ Calibration โดยใช้น้ำแข็ง

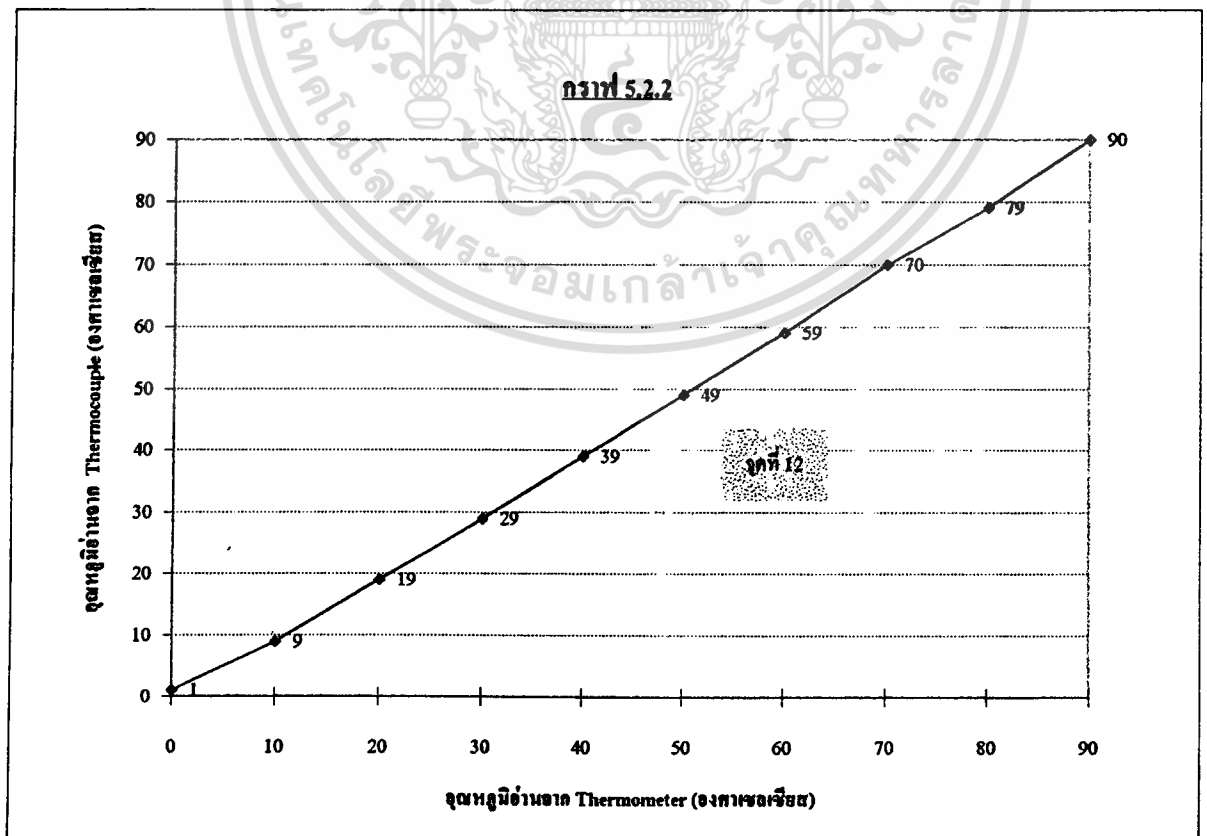
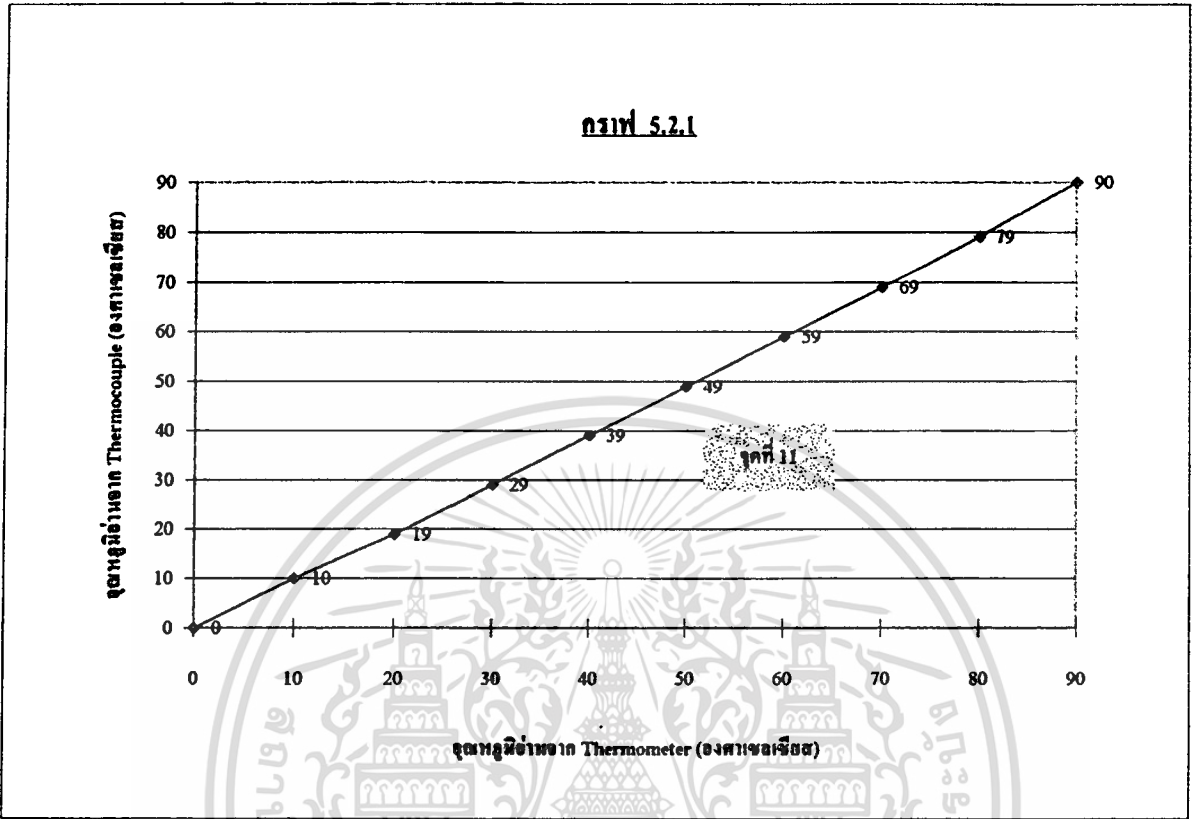
จากผลการทดลองเมื่อนำมาเขียนกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ กราฟที่ได้จึงมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่าค่าที่วัดได้เป็นค่าที่เชื่อถือได้

ตารางที่ 5.2.1 แสดงการ CALIBRATE THERMOCOUPLE

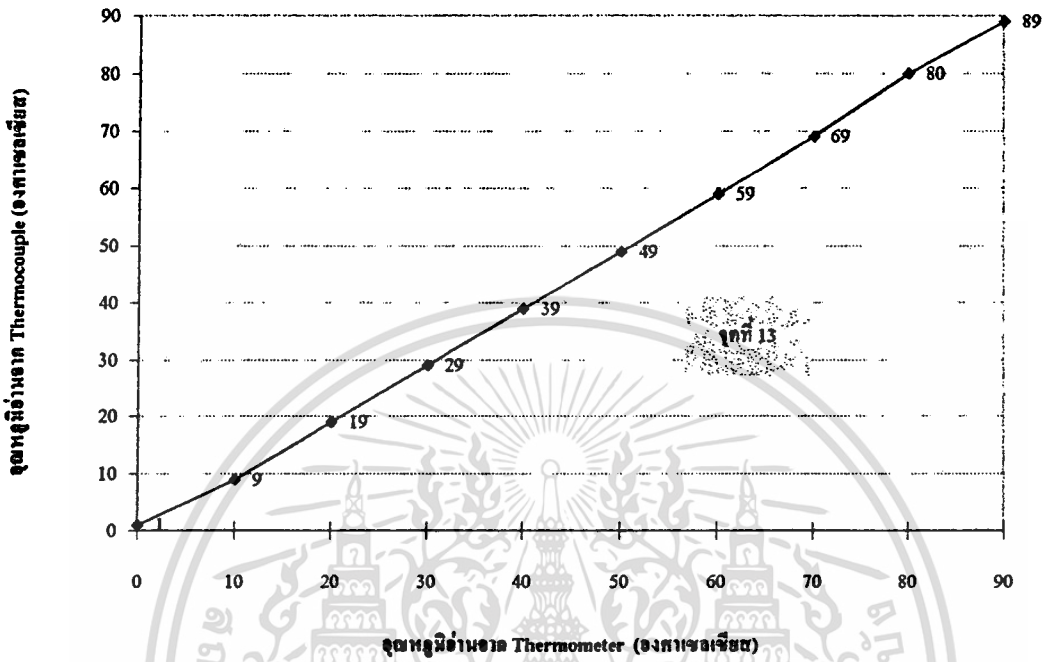
โดยใช้การวัดอุณหภูมิของน้ำเดือด และน้ำแข็ง เปรียบเทียบกับ THERMOMETER

อุณหภูมิที่วัดได้ จาก THERMOMETER (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่อ่านจาก THERMOCOUPLE (องศาเซลเซียส)									
	จุด 11	จุด 12	จุด 13	จุด 14	จุด 15	จุด 16	จุด 1	จุด 2	จุด 3	จุด 4
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3
10	10	9	9	9	9	9	8	8	8	8
20	19	19	19	20	19	20	17	17	17	17
30	29	29	29	29	29	29	28	27	28	27
40	39	39	39	39	40	39	37	37	37	37
50	49	49	49	49	49	49	47	47	47	46
60	59	59	59	60	60	59	57	57	57	56
70	69	70	69	70	70	69	67	67	67	67
80	79	79	80	81	80	80	77	77	77	77
90	90	90	89	90	90	91	87	87	87	87
95	94	94	94	95	95	96	93	93	93	93

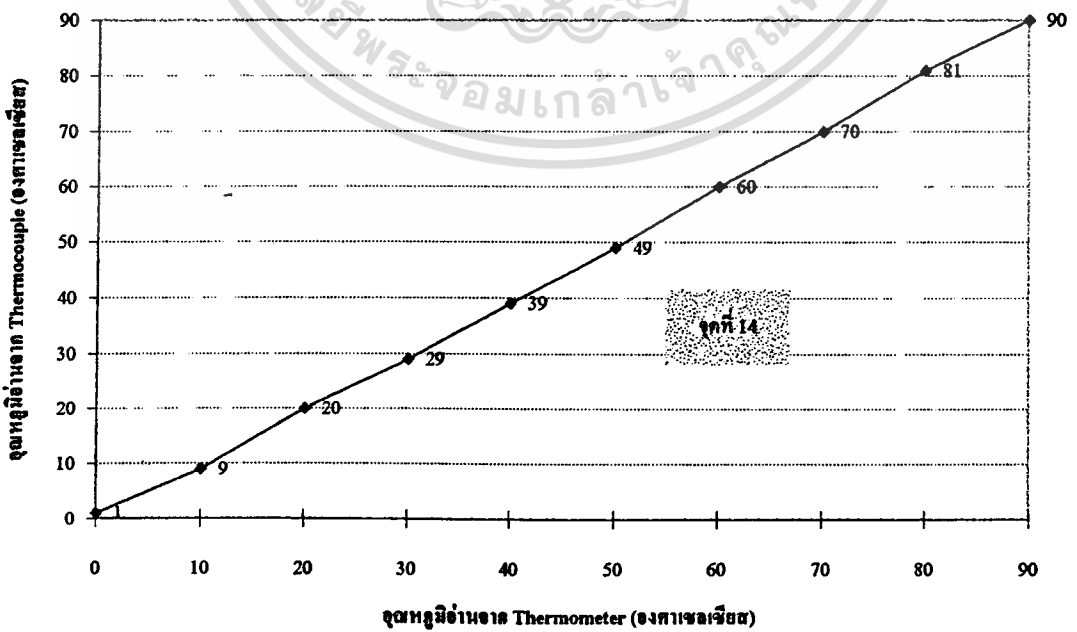
## กราฟแสดงการ CALIBRATION ที่จุดต่าง ๆ บนจิ้งงาน



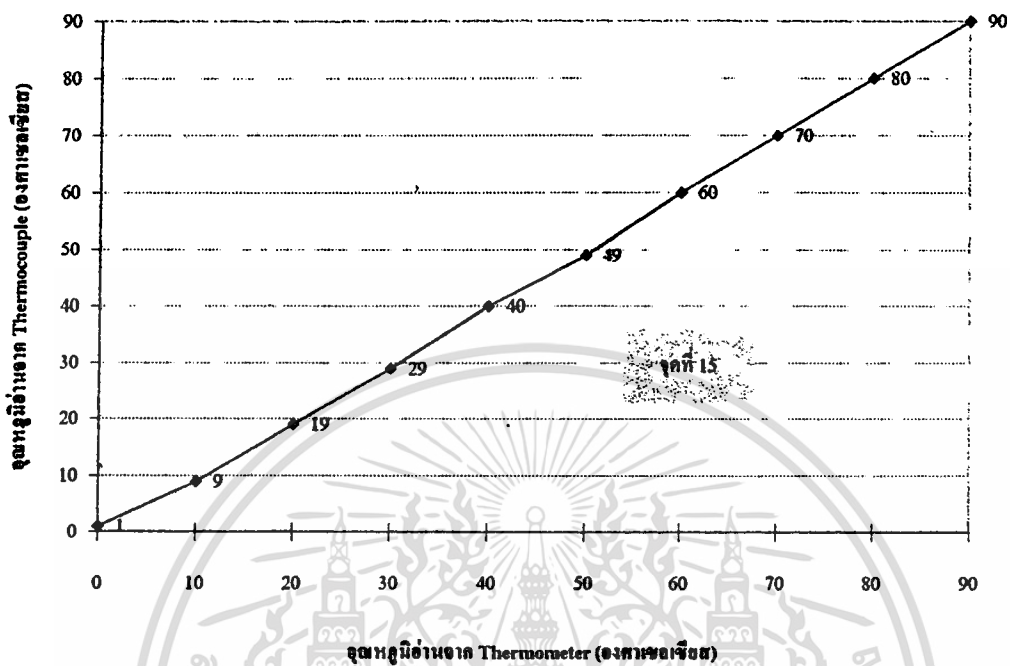
กราฟ 5.2.3



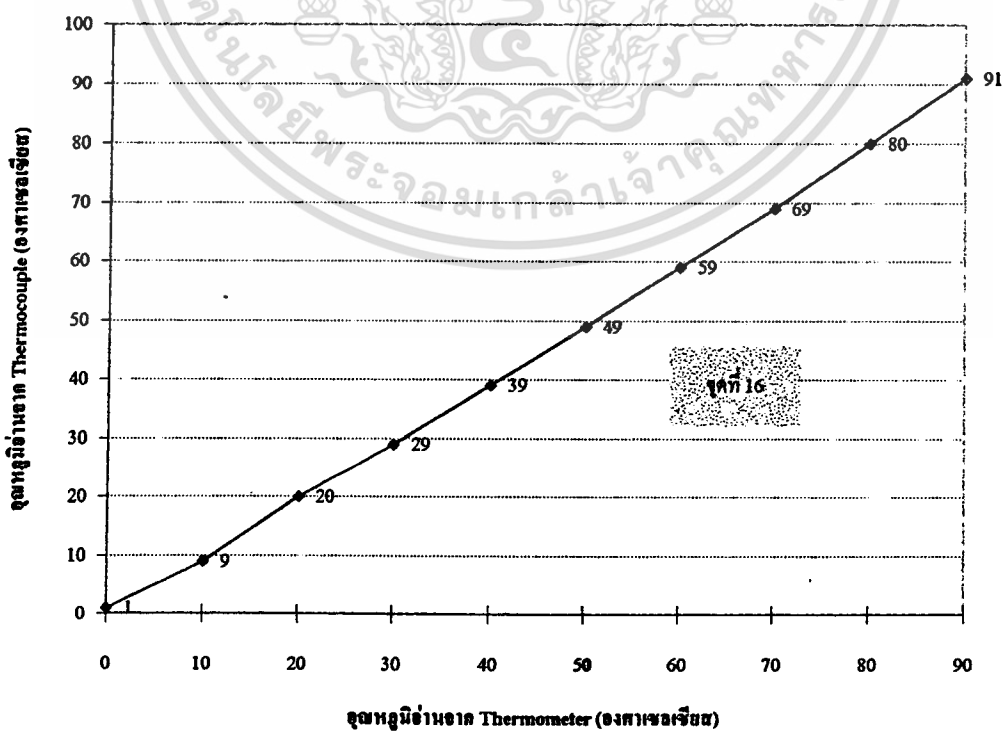
กราฟ 5.2.4



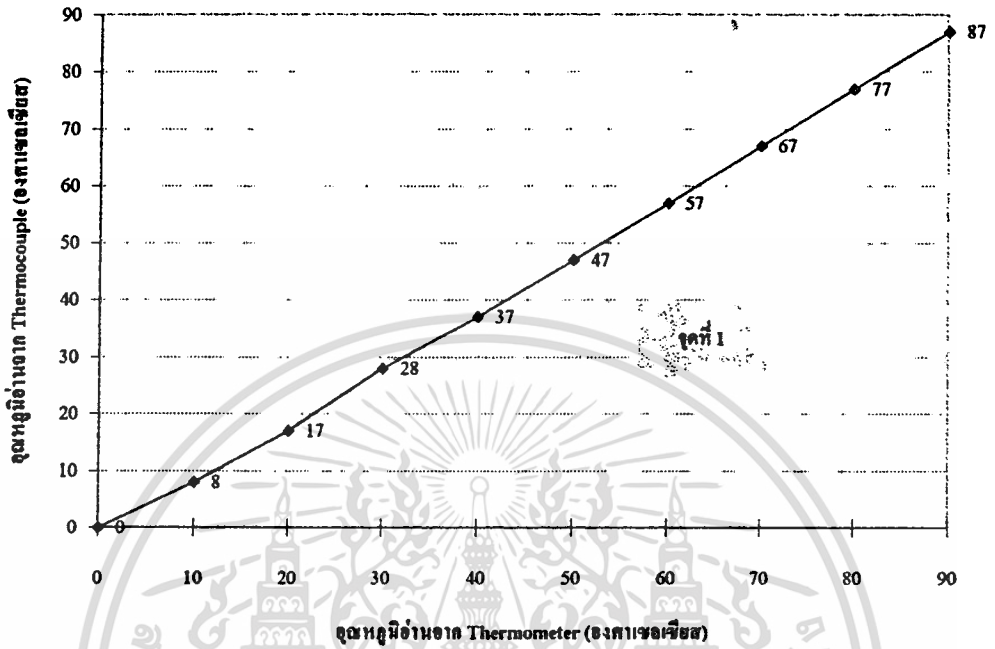
กราฟ 5.2.5



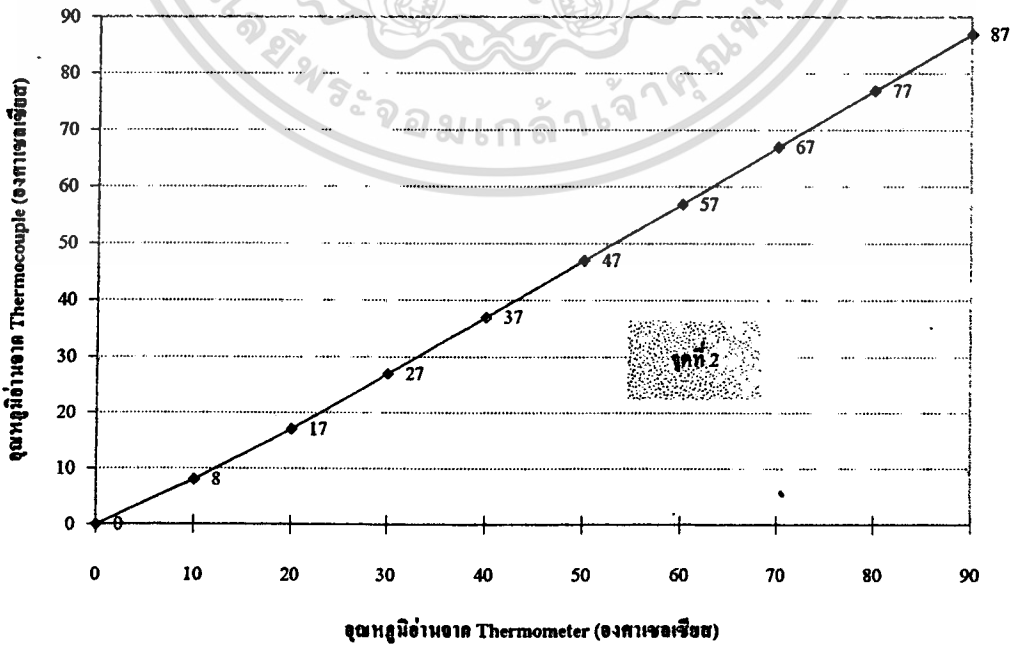
กราฟ 5.2.6



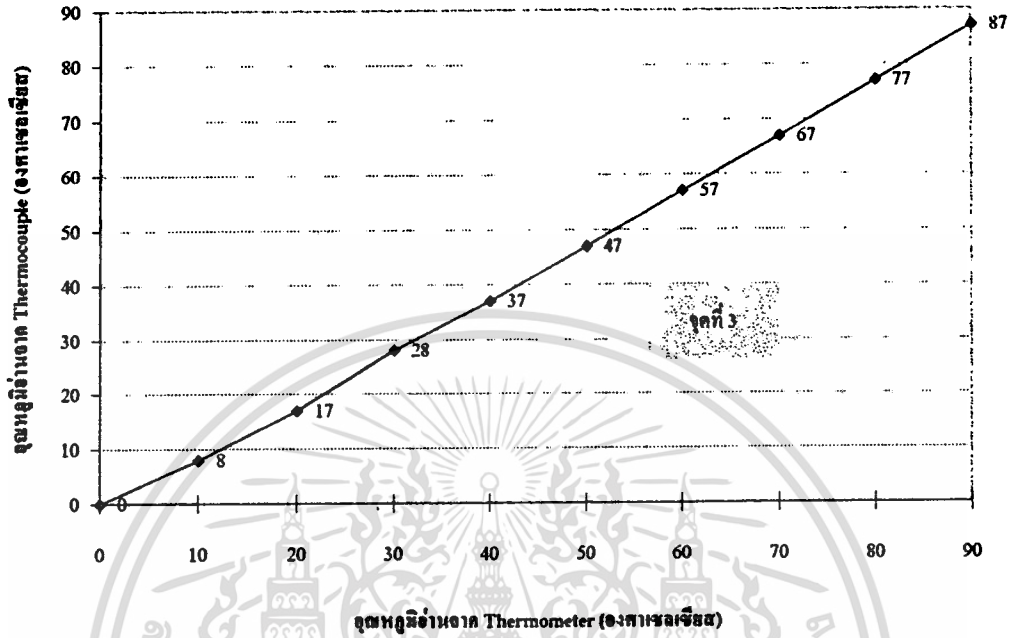
กราฟ 5.2.7



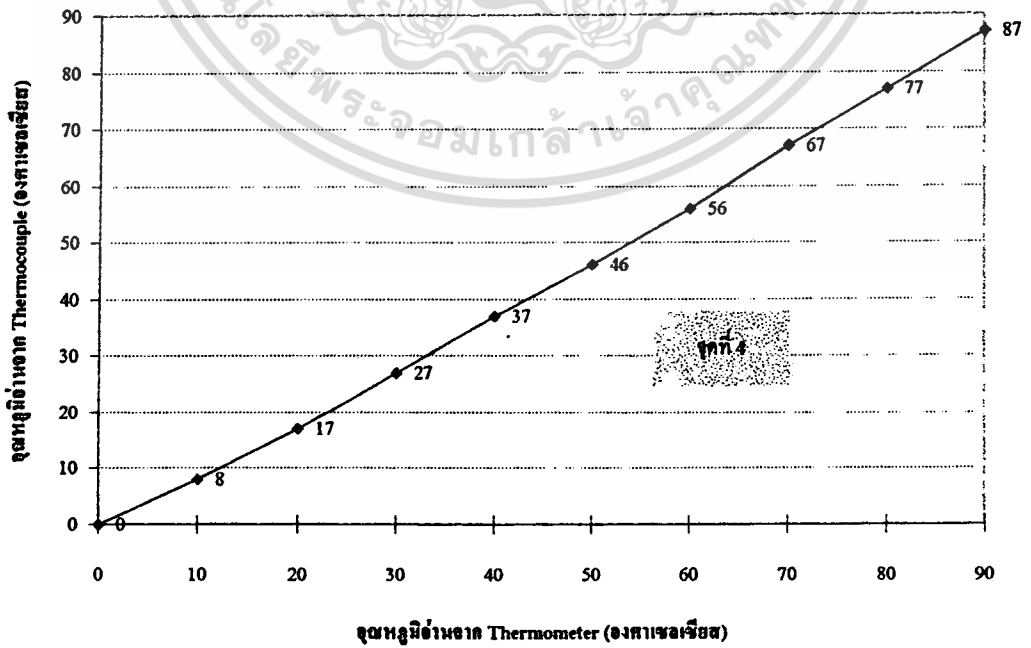
กราฟ 5.2.8



กราฟ 5.2.9



กราฟ 5.2.10



### 5.3 ผลการทดลอง

การทดลองวัดค่าการนำความร้อนสามารถทำได้ โดยการวัดค่าอุณหภูมิของผิวชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ คือ ไม้อัด, กระเบื้องแผ่นเรียบ, แผ่นอิปซัม ซึ่งได้แสดงค่าการนำความร้อนจากค่าอ้างอิงมาตรฐานจากบริษัทผู้ผลิตและความหนาของชิ้นงานทดสอบ ดังนี้

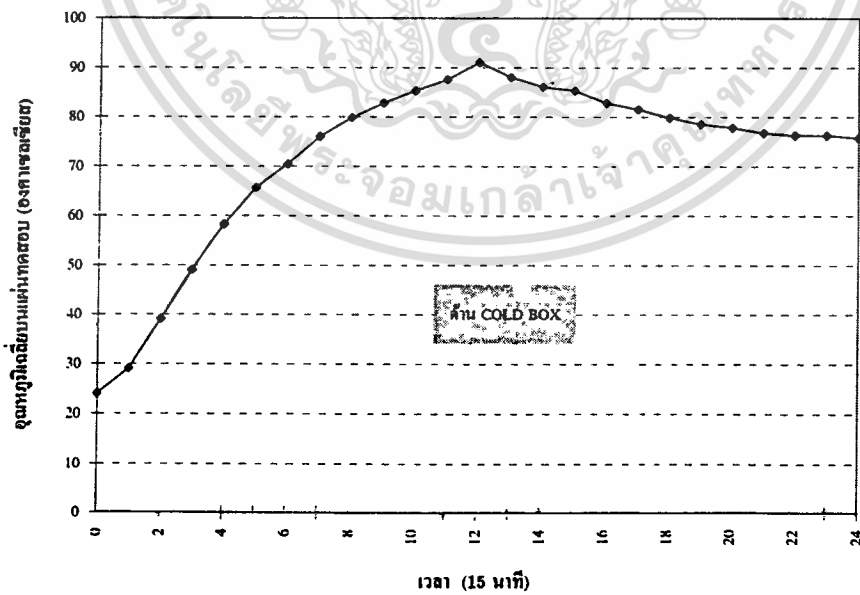
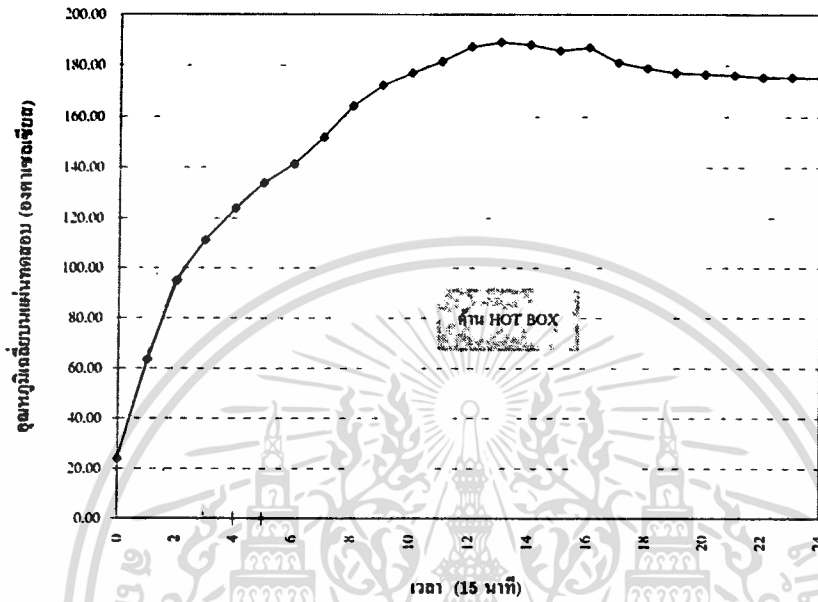
ชนิดของวัสดุ	ค่า k (W/m <sup>2</sup> .C)	ความหนา (mm.)
ไม้อัด	0.12	10
กระเบื้องแผ่นเรียบ	0.35-0.40	6
แผ่นอิปซัม	0.2	12

**หมายเหตุ** - ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของไม้อัดได้มาจาก Appendix A-9 ของหนังสือ Fundamental of heat and mass transfer  
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของกระเบื้องแผ่นเรียบและแผ่นอิปซัมได้มาจากบริษัทปูนซิเมนต์ไทย

ค่าการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ได้แสดงเป็นกราฟแสดงการเข้าสู่สภาวะ Steady State ของอุณหภูมิที่ด้าน Hot Box และ Cold Box ดังนี้

กราฟ 5.3.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

วัสดุทดสอบ ไม้อัด

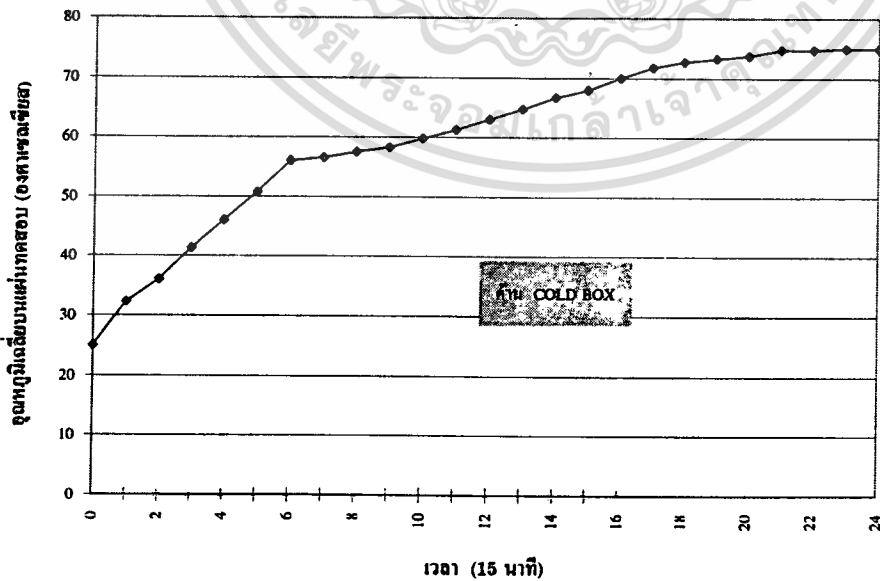
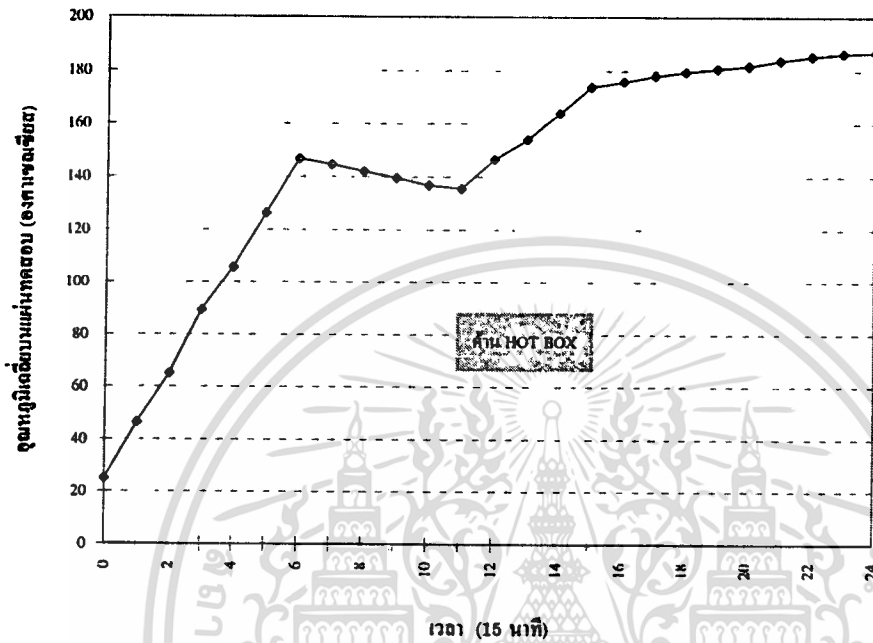


หมายเหตุ อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน HOT BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 11,12,13 และ 14

อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน COLD BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 1,2,3 และ 4

กราฟ 5.3.2 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

วัสดุทดสอบ ไม้อัด

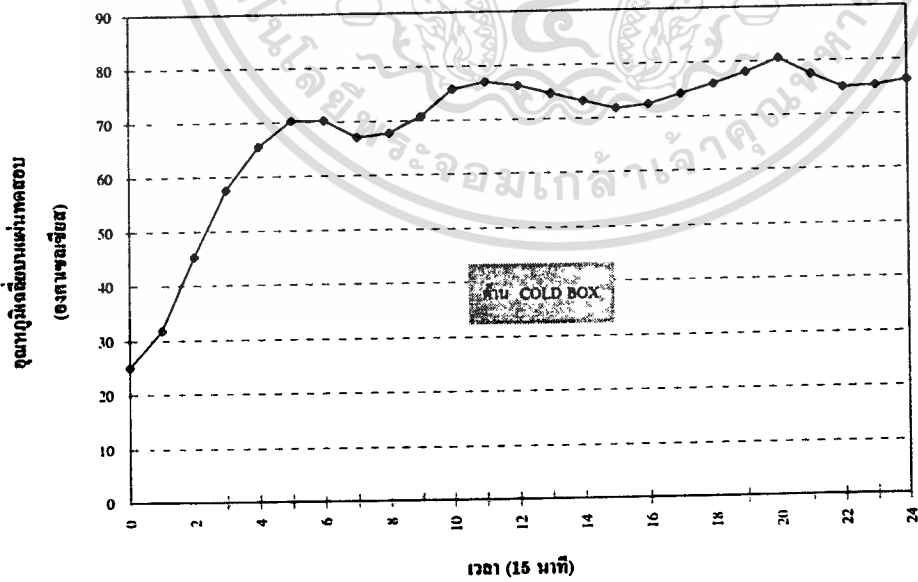
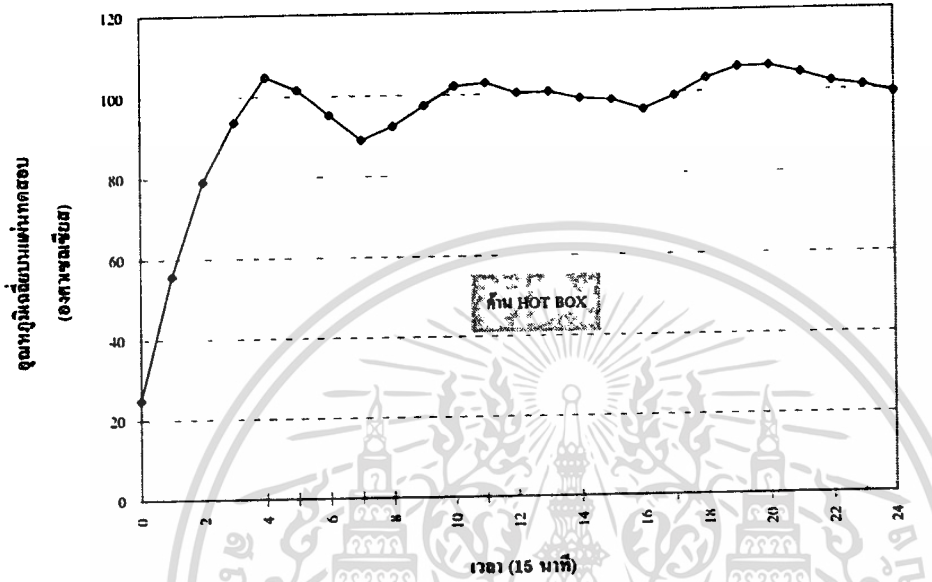


หมายเหตุ อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน HOT BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 11,12,13 และ 14

อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน COLD BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 1,2,3 และ 4

กราฟ 5.3.3 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

วัสดุทดสอบ แผ่นกระเบื้อง

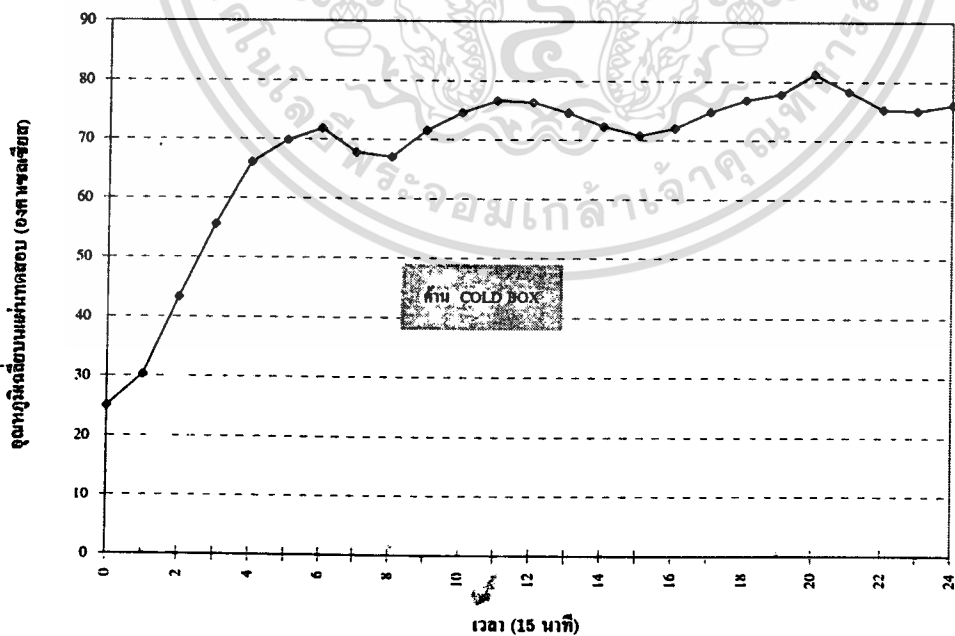
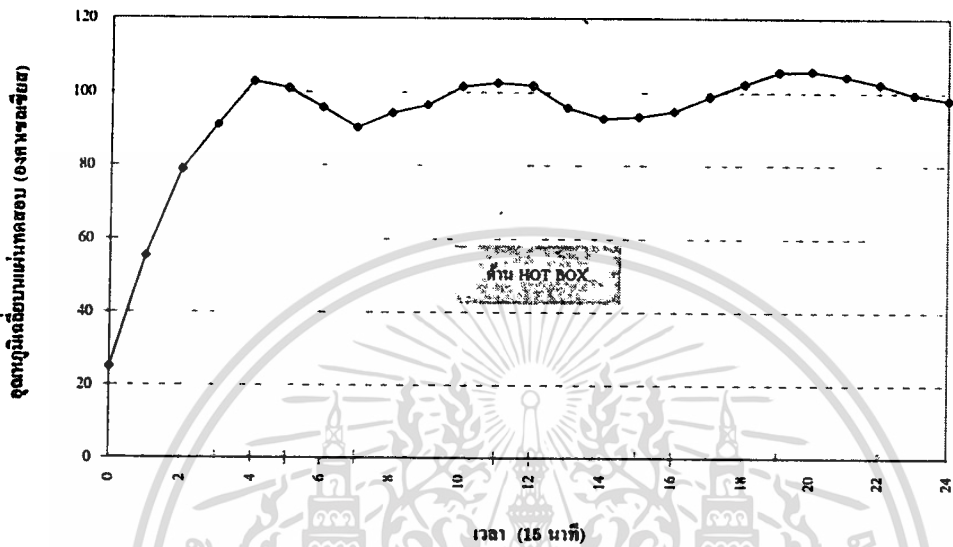


หมายเหตุ อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน HOT BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 11,12,13 และ 14

อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน COLD BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 1,2,3 และ 4

กราฟ 5.3.4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

วัสดุทดสอบ แผ่นกระเบื้อง

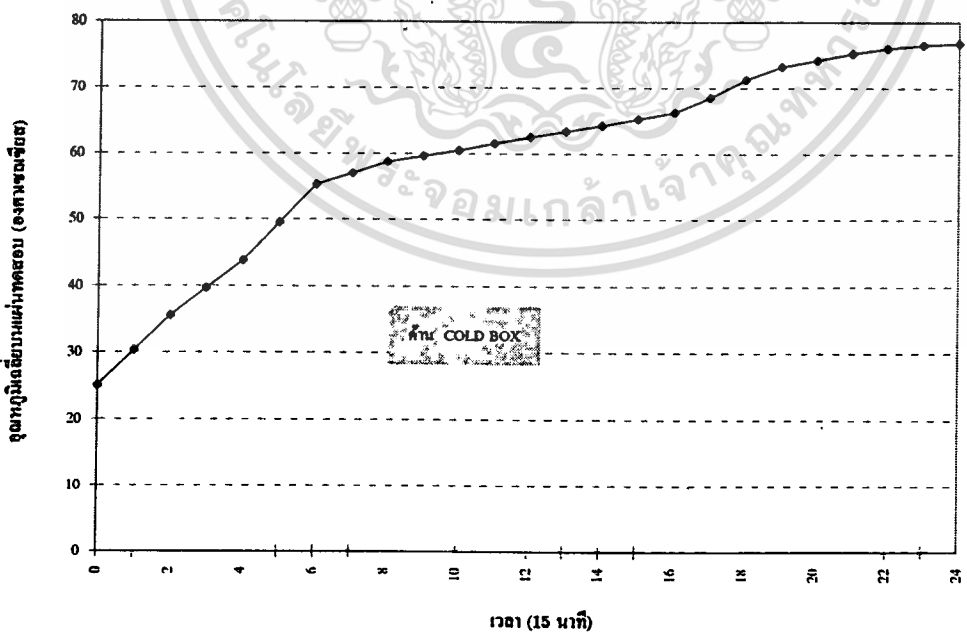
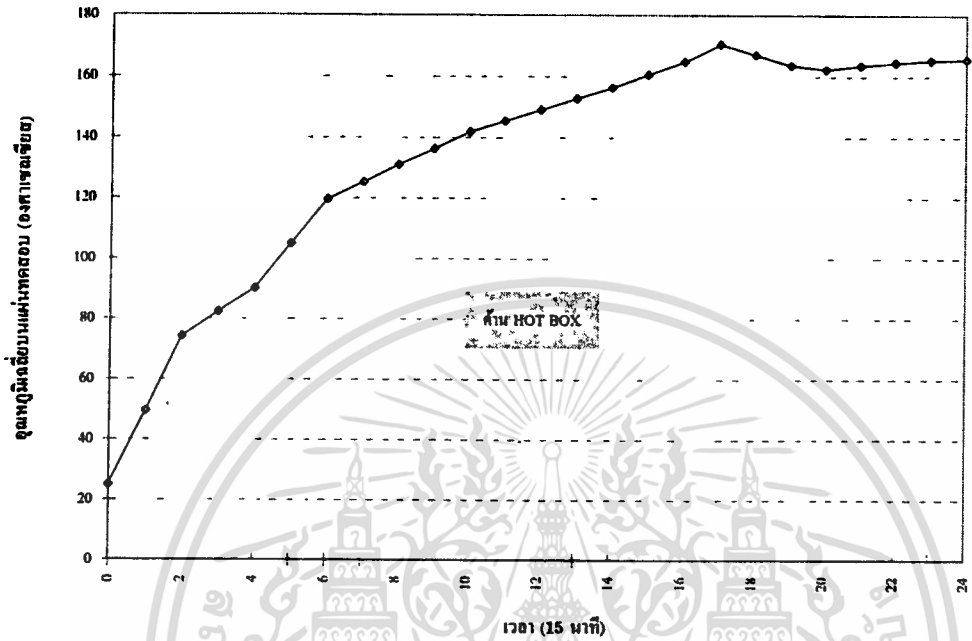


หมายเหตุ อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน HOT BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 11, 12, 13 และ 14

อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน COLD BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 1, 2, 3 และ 4

กราฟ 5.3.5 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

วัสดุทดสอบ แผ่นยิปซัม

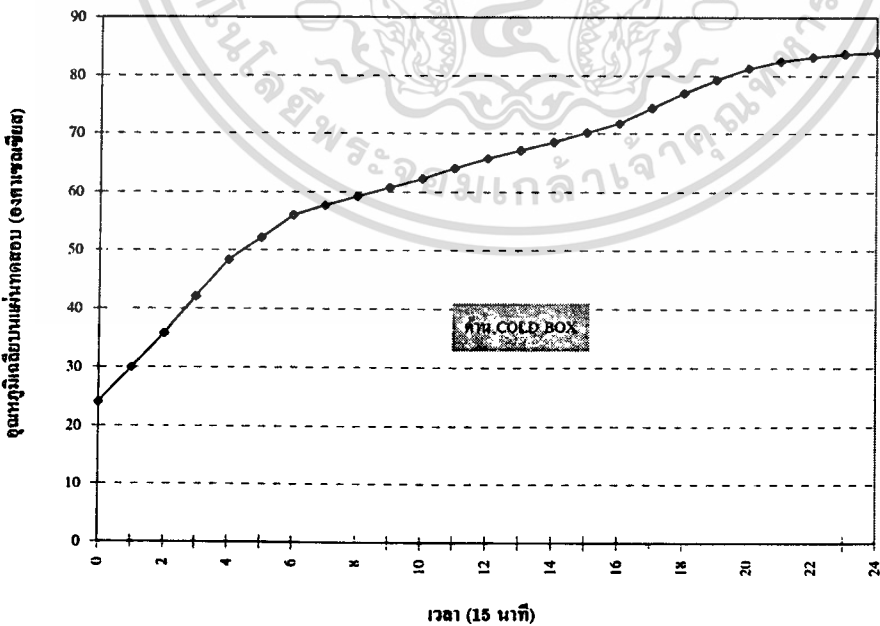
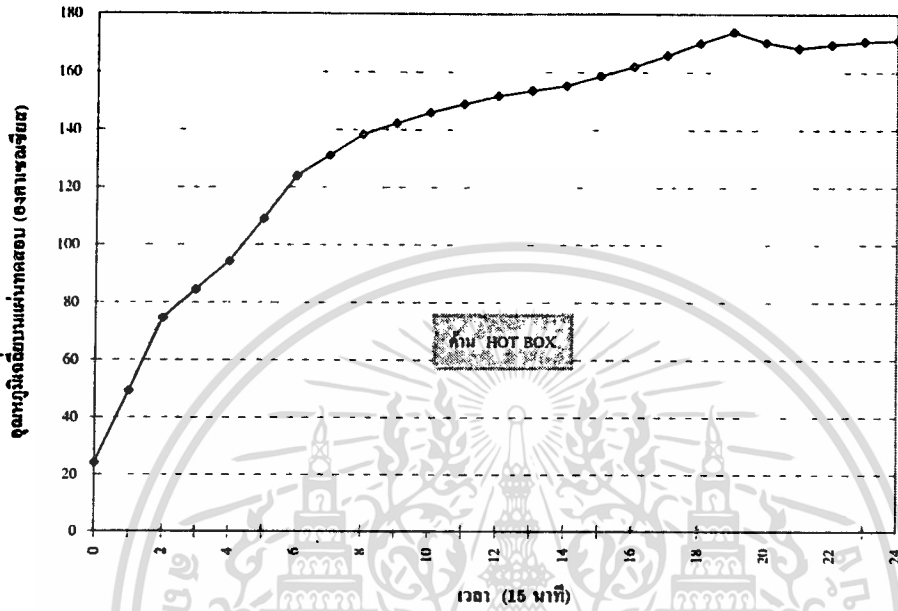


หมายเหตุ อุณหภูมิเฉลี่ยค่าน HOT BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 11, 12, 13 และ 14

อุณหภูมิเฉลี่ยค่าน COLD BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 1, 2, 3 และ 4

กราฟ 5.3.6 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

วัสดุทดสอบ แผ่นอิปซีม



หมายเหตุ อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน HOT BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 11, 12, 13 และ 14

อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน COLD BOX = ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิจุด 1, 2, 3 และ 4

## การคำนวณหาค่าการนำความร้อนของฉนวนทดสอบ

เมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ทั้ง 8 จุดบนฉนวนทดสอบแล้วนำค่าอุณหภูมิมารวมค่าการนำความร้อนได้จาก Fourier Equation

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

$$\text{จะได้ } k = \frac{q \Delta x}{A(T_L - T_H)}$$

โดย  $\Delta x$  = ความหนาของฉนวนทดสอบ , m.

$$A = \text{พื้นที่ผิวของฉนวนทดสอบในส่วน Metering Box , m.}^2 \\ = 0.6401 \text{ m.}^2$$

$$T_L = \text{อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน Cold Box} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}$$

$$T_H = \text{อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน Hot Box} = \frac{T_{11} + T_{12} + T_{13} + T_{14}}{4}$$

$k$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน , W/m. $^{\circ}$ C

$q$  = พลังงานความร้อนที่ได้จาก heater ใน Metering Box

= 1,400 W (สมมติว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่าง Guard Box และ Metering Box)

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุนั้น

### จากตาราง 5.3.1 ไม้อัด

$$T_H = \frac{176 + 175 + 176 + 176}{4} = 175.75^{\circ}\text{C}$$

$$T_L = \frac{77 + 77 + 74 + 75}{4} = 75.75^{\circ}\text{C}$$

$$\text{แทนค่า } k = \frac{1,400 \times (1 \times 10^{-2})}{0.6401(175.75 - 75.75)} = 0.2187 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

### จากตาราง 5.3.2 ไม้อัด

$$T_H = \frac{186 + 189 + 185 + 187}{4} = 186.75^{\circ}\text{C}$$

$$T_L = \frac{73 + 75 + 76 + 77}{4} = 75.25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{แทนค่า } k = \frac{1,400 \times (1 \times 10^{-2})}{0.6401(186.75 - 75.25)} = 0.1961 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

$$\therefore \bar{k}_{\text{ไม้อัด}} = \frac{0.2187 + 0.1961}{2} = 0.2074 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

### จากตาราง 5.3.3 แผ่นกระเบื้อง

$$T_H = \frac{100 + 103 + 97 + 97}{4} = 99.25^\circ\text{C}$$

$$T_L = \frac{78 + 83 + 72 + 72}{4} = 76.25^\circ\text{C}$$

$$\text{แทนค่า } k = \frac{1,400 \times (6 \times 10^{-3})}{0.6401(99.25 - 76.25)} = 0.5705 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

### จากตาราง 5.3.4 แผ่นกระเบื้อง

$$T_H = \frac{98 + 105 + 95 + 94}{4} = 98^\circ\text{C}$$

$$T_L = \frac{80 + 82 + 72 + 70}{4} = 76^\circ\text{C}$$

$$\text{แทนค่า } k = \frac{1,400 \times (6 \times 10^{-3})}{0.6401(98 - 76)} = 0.5964 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

$$\therefore \bar{k}_{\text{แผ่นกระเบื้อง}} = \frac{0.5705 + 0.5964}{2} = 0.58345 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

### จากตาราง 5.3.5 แผ่นยิปซัม

$$T_H = \frac{166 + 166 + 165 + 165}{4} = 165.5^\circ\text{C}$$

$$T_L = \frac{78 + 76 + 76 + 77}{4} = 76.75^\circ\text{C}$$

$$\text{แทนค่า } k = \frac{1,400 \times (12 \times 10^{-3})}{0.6401(165.5 - 76.75)} = 0.2957 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$$

จากตาราง 5.3.6 แผ่นยิปซัม

$$T_H = \frac{174 + 169 + 167 + 174}{4} = 171^\circ\text{C}$$

$$T_L = \frac{85 + 83 + 84 + 84}{4} = 84^\circ\text{C}$$

$$\text{แทนค่า } k = \frac{1,400 \times (12 \times 10^{-3})}{0.6401(171 - 84)} = 0.30 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\therefore \bar{k}_{\text{แผ่นยิปซัม}} = \frac{0.2957 + 0.30}{2} = 0.29785 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คำนวณได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ใช้อ้างอิง สามารถหาความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่ละชิ้นงานทดสอบ ได้ดังนี้

ความคลาดเคลื่อนคิดเป็น %

ไม้อัด k อ้างอิง = 0.12 W/m<sup>∘</sup>C

k วัดได้ = 0.2074 W/m<sup>∘</sup>C

ความคลาดเคลื่อน =  $\frac{(0.2074 - 0.12) \times 100}{0.12} = 72.83 \%$

แผ่นกระเบื้อง k อ้างอิง = 0.4 W/m<sup>∘</sup>C

k วัดได้ = 0.58345 W/m<sup>∘</sup>C

ความคลาดเคลื่อน =  $\frac{(0.58345 - 0.4) \times 100}{0.4} = 45.86 \%$

แผ่นยิปซัม k อ้างอิง = 0.2 W/m<sup>∘</sup>C

k วัดได้ = 0.29785 W/m<sup>∘</sup>C

ความคลาดเคลื่อน =  $\frac{(0.29785 - 0.2) \times 100}{0.2} = 48.925 \%$

ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่วัดได้จริงกับค่าอ้างอิง โดยรวมมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 45-70 %

ตารางท 5.3.1 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่าง ๆ ของแผ่นไม้อัด

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)																
	เวลา (นาที)																
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	255	270	285	300	315	380	345	360
1	24	92	116	127	130	132	141	136	132	129	128	127	127	126	126	125	126
2	24	60	86	97	105	112	120	117	114	112	111	109	108	107	107	107	107
3	24	56	79	95	101	106	112	110	107	106	104	104	103	102	102	102	102
4	24	60	82	99	108	112	119	116	112	111	110	109	107	106	105	105	105
5	24	51	80	99	113	121	128	123	119	118	118	117	115	114	113	113	113
6	24	53	77	91	97	103	111	110	108	106	105	104	104	103	102	102	102
7	24	96	118	125	131	142	148	136	132	130	127	126	125	125	124	124	123
8	24	75	93	109	117	125	130	125	121	121	119	116	115	114	114	113	113
9	24	92	107	118	127	142	152	142	141	139	136	134	133	133	131	131	131
10	24	98	127	149	166	182	189	182	181	180	179	179	178	178	178	178	178
11	24	99	129	147	163	174	186	184	183	176	175	175	175	174	174	176	176
12	24	93	127	142	164	178	187	190	188	182	179	177	176	176	175	175	175
13	24	90	117	136	162	177	186	188	188	182	180	178	177	177	176	176	176
14	24	98	122	140	168	179	190	190	189	184	181	178	178	177	176	176	176
15	24	52	75	89	97	104	110	111	112	113	114	114	115	116	116	116	116
16	24	50	72	85	93	99	107	109	111	112	113	113	113	114	114	115	115
1	24	38	56	70	77	83	91	87	84	83	81	80	80	78	78	78	77
2	24	41	58	69	79	86	92	87	83	82	80	79	79	78	77	77	77
3	24	40	59	72	81	85	90	85	82	80	79	78	66	76	75	75	74
4	24	37	60	71	82	87	91	85	82	81	79	77	66	75	75	75	75

หมายเหตุ

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 24 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิกระเปาะเปียก 22 องศาเซลเซียส

ความชื้นสัมพัทธ์ 83 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5.3.2 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่าง ๆ ของแผ่นไม้อัด

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)																
	เวลา (นาที)																
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	255	270	285	300	315	330	345	360
1	25	63	99	116	138	154	150	149	156	157	158	159	160	161	162	162	163
2	25	64	83	93	99	106	105	102	105	106	106	107	107	108	108	108	108
3	25	62	86	92	96	102	101	99	104	106	107	107	108	109	109	110	110
4	25	64	89	96	98	102	100	97	106	107	108	109	110	112	112	112	112
5	25	58	84	94	100	118	114	113	118	118	119	120	120	120	121	121	121
6	25	73	94	124	142	150	145	142	147	149	149	150	151	151	152	152	152
7	25	74	97	118	134	142	139	137	141	142	142	144	145	146	146	147	147
8	25	56	78	103	126	143	140	138	142	143	143	144	145	146	146	146	146
9	25	69	84	108	128	128	130	139	140	139	139	140	140	141	142	142	142
10	25	82	127	149	164	171	173	180	185	186	187	188	189	189	190	190	190
11	25	72	114	142	140	137	142	164	179	182	183	183	184	185	185	186	186
12	25	65	106	145	141	135	146	167	178	181	183	184	185	186	188	189	189
13	25	59	97	149	142	137	148	166	175	176	177	179	180	182	183	184	185
14	25	64	105	151	145	138	150	159	171	173	175	177	178	182	185	186	187
15	25	58	78	85	93	97	102	94	97	104	107	108	108	107	107	107	107
16	25	57	75	84	89	91	94	91	92	96	99	100	100	101	101	101	101
1	25	34	47	58	59	60	63	67	68	70	71	71	72	73	73	73	73
2	25	36	45	55	56	58	62	66	70	72	72	73	73	74	74	75	75
3	25	37	46	56	58	60	63	67	71	73	74	74	75	76	76	76	76
4	25	37	46	55	57	61	64	67	71	72	74	75	75	76	76	77	77

หมายเหตุ

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง : 25 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิกระเปาะเปียก : 22 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5.8.8 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นกระเบื้อง

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)																
	เวลา (นาที)																
	0	80	60	90	120	150	180	210	240	255	270	285	300	315	330	345	360
1	25	31	40	50	55	58	60	60	59	58	58	59	59	60	60	60	59
2	25	33	42	52	57	61	63	62	60	60	60	61	61	62	62	62	62
3	25	33	46	56	57	62	64	62	61	61	61	62	63	63	62	63	62
4	25	32	39	51	52	55	58	58	57	57	58	58	58	57	57	58	57
5	25	40	80	90	82	87	93	90	85	85	87	90	92	93	92	89	88
6	25	32	42	54	55	58	61	62	60	60	61	62	62	63	62	61	61
7	25	41	51	62	66	69	72	73	73	72	73	73	74	75	75	74	74
8	25	40	49	60	62	65	70	70	70	69	70	70	71	72	72	71	72
9	25	43	51	61	59	64	68	68	69	70	69	68	70	71	72	71	71
10	25	84	120	120	121	108	128	108	108	112	110	116	117	118	117	115	112
11	25	89	115	103	100	106	104	99	102	105	108	111	110	106	104	103	100
12	25	87	115	103	99	110	107	99	101	105	113	114	113	110	105	105	103
13	25	70	93	87	85	96	95	89	90	93	96	99	101	101	100	98	97
14	25	70	94	88	85	96	95	88	90	93	96	99	100	100	99	98	97
15	25	35	43	53	57	61	63	62	61	62	62	63	63	64	64	64	65
16	25	36	45	55	58	61	63	62	60	62	62	62	63	63	63	64	64
1	25	45	64	73	71	78	78	75	75	76	78	80	83	81	78	77	78
2	25	47	69	78	74	83	84	78	78	80	83	85	88	86	82	82	83
3	25	44	65	66	64	72	72	70	69	71	72	74	76	72	70	71	72
4	25	45	64	64	62	70	71	70	68	70	71	73	75	71	70	71	72

ตารางที่ 5.3.4 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่าง ๆ ของแผ่นกระเบื้อง

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)																
	เวลา (นาที)																
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	255	270	285	300	315	330	345	360
1	25	34	42	51	58	61	62	61	61	60	61	61	62	62	63	63	63
2	25	37	44	50	59	65	67	66	64	64	65	65	66	66	67	67	67
3	25	35	48	59	63	65	67	66	62	63	63	64	66	67	68	68	67
4	25	33	45	61	62	61	62	61	58	55	57	58	56	56	57	57	55
5	25	43	77	93	83	90	92	93	87	86	90	91	91	92	92	91	91
6	25	30	44	57	58	61	64	63	62	63	64	64	63	63	64	65	65
7	25	43	54	66	69	74	75	76	74	73	75	75	74	75	76	76	76
8	25	42	50	61	63	68	73	76	72	72	73	73	74	75	74	74	75
9	25	47	55	64	61	71	72	73	71	70	70	71	71	72	72	72	73
10	25	87	118	118	120	105	128	106	107	114	112	117	118	120	116	114	112
11	25	90	112	105	102	106	105	98	100	107	110	113	112	108	104	100	98
12	25	89	112	104	101	108	110	98	99	105	111	115	113	109	107	106	105
13	25	68	92	85	87	96	96	88	90	92	94	97	99	100	100	96	95
14	25	68	95	89	87	96	96	87	90	91	94	97	99	100	98	96	94
15	25	33	44	52	59	61	63	62	60	61	61	62	62	63	64	65	66
16	25	37	47	54	60	60	62	62	61	61	62	63	63	63	64	64	65
1	25	42	61	75	70	79	77	73	75	77	79	80	85	83	78	79	80
2	25	45	70	79	72	81	86	80	78	82	83	84	89	85	83	82	82
3	25	43	67	68	65	70	71	68	69	71	73	74	75	73	70	70	72
4	25	43	66	65	61	68	71	68	66	69	72	73	76	72	70	69	70

ตารางที่ 5.3.5 แสดงผลการวัดคุณหมุมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่าง ๆ ของแผ่นยิปซัม

จุดที่	คุณหมุมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)																
	เวลา (นาที)																
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	255	270	285	300	315	330	345	360
1	25	63	76	93	117	128	137	145	152	157	161	160	158	161	162	162	163
2	25	61	72	86	87	96	107	114	122	130	136	137	134	138	137	138	138
3	25	59	68	76	83	89	95	99	104	108	112	110	109	111	113	114	114
4	25	65	73	82	87	94	101	108	114	119	122	118	116	119	122	123	124
5	25	58	66	73	79	89	100	107	113	119	125	122	119	121	123	124	124
6	25	60	72	82	93	101	110	117	124	130	134	134	133	136	137	138	139
7	25	56	68	79	89	98	106	113	120	125	129	128	126	127	127	127	127
8	25	57	76	101	112	117	120	125	128	131	134	132	127	127	128	129	131
9	25	67	79	89	97	106	113	120	127	132	135	136	135	137	139	140	140
10	25	65	82	97	106	115	126	134	149	155	166	165	165	167	189	170	171
11	25	74	91	119	130	142	147	154	163	169	167	163	162	164	165	166	166
12	25	77	93	122	134	144	151	158	167	172	168	165	164	165	166	166	166
13	25	71	88	120	131	141	150	156	164	170	166	162	161	162	163	164	165
14	25	75	89	117	129	140	148	157	165	171	167	164	162	163	164	165	165
15	25	54	65	77	86	94	100	105	109	112	113	112	112	113	114	115	115
16	25	56	67	78	85	92	98	102	105	107	106	105	104	106	107	108	109
1	25	38	45	57	62	64	65	67	69	72	75	76	77	78	78	78	78
2	25	36	44	55	58	60	62	64	66	68	71	73	74	75	76	76	76
3	25	34	43	54	57	59	61	63	65	67	70	72	73	74	75	76	76
4	25	34	43	55	58	59	62	63	65	67	69	72	73	74	75	76	77

ตารางที่ 5.3.6 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่าง ๆ ของแผ่นยิปซัม

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)																
	เวลา (นาที)																
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	255	270	285	300	315	330	345	360
1	24	62	77	91	116	137	148	156	159	161	163	165	162	159	160	161	161
2	24	64	73	85	92	106	117	126	135	141	148	151	147	145	147	148	149
3	24	63	74	83	91	99	107	116	125	132	135	138	137	136	137	137	137
4	24	65	76	86	93	100	109	117	123	131	139	142	138	137	138	139	139
5	24	59	66	89	97	104	112	118	125	132	140	146	143	141	141	142	142
6	24	74	92	111	119	126	133	142	157	163	169	169	166	163	164	164	164
7	24	72	93	112	120	128	134	145	153	160	165	165	162	161	163	164	164
8	24	57	77	102	111	118	123	127	130	138	142	144	141	139	140	141	141
9	24	70	85	107	118	125	131	135	137	141	144	145	143	140	141	141	141
10	24	81	99	125	149	164	172	177	182	187	189	191	188	185	186	187	187
11	24	73	95	119	137	143	151	154	161	165	172	177	174	173	173	174	174
12	24	75	97	123	135	145	151	156	163	166	170	173	169	167	167	168	169
13	24	79	92	124	140	148	153	154	160	165	168	171	166	163	166	167	167
14	24	71	93	129	141	147	152	157	164	167	170	174	172	170	172	173	174
15	24	59	69	82	93	102	110	119	125	124	129	132	129	127	129	131	131
16	24	57	73	88	95	107	115	122	127	135	137	138	136	134	135	136	137
1	24	34	46	53	57	60	64	67	70	73	76	78	80	82	83	84	85
2	24	35	48	54	58	61	65	68	71	74	77	80	81	82	82	83	83
3	24	37	50	59	61	64	67	70	73	78	77	79	82	83	84	84	84
4	24	37	49	58	61	64	67	69	73	76	78	80	82	83	84	84	84

## บทที่ 6

### ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

#### ข้อสรุป

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ จะเห็นได้ว่า ในการทดสอบชิ้นงาน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ) ของชิ้นงานต่าง ๆ สิ่งที่สามารถพอจะสรุปได้จากการทดลองมีดังนี้

#### (1) ข้อควรระวังในการทดสอบ

เครื่องมือหรือส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในอุปกรณ์ควรตรวจสอบให้ได้มาตรฐานตามที่ระบุไว้ เช่น กำลังวัตต์ของ Heater, พัดลมที่ใช้กระจายอากาศ, ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่ใช้ทำผนังกล่อง นอกจากนี้ยังมีตัวอุปกรณ์ในการวัดและควบคุมอุณหภูมิของอากาศและพื้นผิววัสดุ ได้แก่ Thermostat, Temperature Controller, Thermocouple, Temperature Indicator เช่น การส่งถ่ายสัญญาณจาก Thermocouple ไปยัง Temperature Indicator, การตั้งค่า Temperature Controller สูงหรือต่ำไปไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ(สูงไปอาจจะไหม้ ต่ำไปเข้าสู่ steady state ช้า) ฯลฯ ก็จะมีผลให้ข้อมูลที่ได้นำนามาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

#### (2) มาตรฐานของชิ้นงานที่นำมาทดสอบ

ชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบควรจะเป็นชิ้นงานที่มีมาตรฐานการรองรับจากหน่วยงานที่เป็นที่ยอมรับ

#### (3) การทดลองทำที่สภาวะแวดล้อมต่างจากสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในข้อมูลอ้างอิง

เนื่องจากค่าการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานทดสอบต่างๆจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิแวดล้อมในขณะที่ทำการวัดค่า ดังนั้นถ้าสภาวะที่ทำการทดสอบกับสภาวะแวดล้อมของข้อมูลอ้างอิงแตกต่างกันแล้ว อาจจะมีผลให้ข้อมูลที่ใช้นำนามาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงควรทำการทดลองที่สภาวะแวดล้อมเดียวกับสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการอ้างอิง

#### (4) ทฤษฎีที่ใช้ในการอ้างอิงและที่ใช้ในการคำนวณ

ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณผลที่ได้จากการทดสอบ ในชุดอุปกรณ์นี้เป็นการใช้ทฤษฎีการนำความร้อนใน 1 มิติ โดยไม่ได้รวมทฤษฎีเกี่ยวกับการพาความร้อนและการแผ่รังสี การใช้สมการดังกล่าวด้วยนั้นจะให้ผลที่แตกต่างออกไป

เครื่องมือสำหรับวัดค่าการนำความร้อนชุดนี้ ใช้ในการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งวัสดุชนิดนั้นอาจจะเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอ้างอิงจากต่างประเทศ แต่เมื่อนำมาใช้ในประเทศไทยก็น่าจะไม่เหมาะสมเพราะสภาพแวดล้อมต่างกัน หรืออาจเป็นวัสดุที่ยังไม่มีค่าการนำความร้อน ก็สามารถใช้เครื่องมือสำหรับวัดค่าการนำความร้อนชุดนี้ได้

เมื่อได้มีการทดสอบเครื่องมือนี้กับวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับ ปรากฏว่ายังมีความแตกต่างกันอยู่ ซึ่งเป็นเพราะยังเป็นการสร้างชุดทดสอบช่วงแรก ยังต้องอาศัยเวลาและการศึกษาพัฒนาเพื่อให้เครื่องมือชุดนี้สามารถนำมาใช้งานได้จริง และเป็นที่เชื่อถือได้สำหรับนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมของประเทศไทยต่อไป

#### (5) การตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

จากกราฟแสดงการ Calibration ที่จุดต่าง ๆ บนชิ้นงาน ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลและเทอร์โมมิเตอร์ (กราฟรูปที่ 5.2.1 - 5.2.10) มีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะไม่มีผลต่อการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เนื่องจากค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ 1-2°C ทุก ๆ ค่าอุณหภูมิที่ทำการ Calibration

#### (6) การวัดค่าอุณหภูมิบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

จากกราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา (กราฟที่ 5.3.1 - 5.3.6) จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้นจะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะ Steady State แยกต่างหาก เมื่อสังเกตจากความชันของกราฟในช่วงเริ่มต้นการทดลองจะพบว่า กราฟที่มีความชันมากจะใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะ Steady State เร็วกว่ากราฟที่มีความชันน้อย ดังนั้นจึงสามารถจัดลำดับการเข้าสู่สภาวะ Steady State ของชิ้นงานทดสอบจากก่อนไปหลังดังนี้คือ แผ่นกระเบื้อง , ไม้อัด และแผ่นอิปซัม ตามลำดับ

## ข้อเสนอแนะ

ในการทำปฏิญานិพนธ์เรื่องการพัฒนาต่อเนื่องของเครื่องมือสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนฉบับนี้ บทปฏิญานิพนธ์ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาและทำงานต่อเนื่องจากปฏิญานิพนธ์เรื่องการพัฒนาเครื่องมือสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM (The American Society for Testing and Materials) เป็นหลัก สำหรับข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงชุดเครื่องมือทดสอบดังกล่าว สามารถจำแนกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การนำทฤษฎีและสมการที่แตกต่างกันมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานทดสอบให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
2. การปรับปรุงชุดเครื่องมือทดสอบ ให้มีการวัดค่าข้อมูลต่าง ๆ ได้ละเอียดมากขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง เช่น การเพิ่มตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิที่ผิวของชิ้นงานทดสอบมากขึ้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานทดสอบ
3. การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ถึงผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชิ้นงานทดสอบที่คำนวณได้ เช่น ลักษณะการไหลของอากาศภายใน Metering Box เป็นต้น เพื่อที่จะทำการออกแบบอุปกรณ์ทดสอบให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
4. เนื่องจากในการทดสอบชิ้นงานแต่ละชนิดจะใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะ Steady State ช้าเร็วแตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรมีระบบตัดไฟ อัตโนมัติเพิ่มเข้ามา เพื่อช่วยควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบไม่ให้เกิดความเสียหายและไม่เป็นการเสียเวลาสำหรับผู้ทดสอบด้วย





# Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 236; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

## 1. Scope

1.1 This test method, known as the guarded hot box method, covers the measurement of the steady-state thermal transfer properties of panels. In distinction to Test Method C 177, which is primarily applicable to homogeneous samples, the guarded hot box method provides for the evaluation of thermal performance of building assemblies. This test method is suitable for building construction assemblies, building panels, and other applications of nonhomogeneous specimens at similar temperature ranges. It may also be used for homogeneous specimens.

1.2 This test method may be applied to any building construction for which it is possible to build a reasonably representative specimen of size appropriate for the apparatus.

NOTE 1—A calibrated hot box, Test Method C 976, may also be used for the described measurements and may prove more satisfactory for testing assemblies under dynamic conditions (nonsteady-state) and to evaluate the effects of water migration and air infiltration. The choice between the calibrated or the guarded hot box should be made only after careful consideration of the contemplated use.

1.3 In applying this test method, the general principles outlined must be followed; however, the details of the apparatus and procedures may be varied as needed.

1.3.1 The intent of this test method is to give the essential principles and the general arrangement of the apparatus. Any test using this apparatus must follow those principles. The details of the apparatus and the suggested procedures that follow are given not as mandatory requirements but as examples of this test method and precautions that have been found useful to satisfy the essential principles.

1.3.2 Persons applying this test method shall be trained in the methods of temperature measurement, shall possess a knowledge of the theory of heat flow, and shall understand the general requirements of testing practice.

1.3.3 This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

NOTE 2—While various units may be found for thermal properties, the International System of units is used exclusively in this test method.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurements.

Current edition approved Sept. 29, 1963. Published June 1990. Originally published as C 236-60. Last previous edition C 236-87.

For conversion factors to inch-pound and kilogram-calorie systems, see Table 1.

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

- C 168 Definitions of Terms Relating to Thermal Insulating Materials<sup>2</sup>
- C 177 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus<sup>2</sup>
- C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus<sup>2</sup>
- C 578 Specification for Preformed Cellular Polystyrene Thermal Insulation<sup>2</sup>
- C 976 Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box<sup>2</sup>
- C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements<sup>2</sup>
- E 178 Practice for Dealing With Outlying Observations<sup>3</sup>
- E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables, for Standardized Thermocouples<sup>4</sup>
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Study to Determine the Precision of Test Methods<sup>3</sup>

## 3. Terminology

3.1 **Definitions**— For definitions of terms used in this test method, refer to Definitions C 168.

### 3.2 Symbols:

3.2.1 The symbols used in this test method have the following significance:

- $\lambda$  = thermal conductivity,  $W/(m \cdot K)$ ,
- $C$  = thermal conductance,  $W/(m^2 \cdot K)$ ,
- $h$  = surface conductance,  $W/(m^2 \cdot K)$ ,
- $U$  = thermal transmittance,  $W/(m^2 \cdot K)$ ,
- $q$  = heat flux (time rate of heat flow through Area  $A$ ),  $W/m^2$ ,
- $Q$  = time rate of heat flow, total input to the metering box,  $W$ ,
- $A$  = metering area normal to heat flow,  $m^2$ ,

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

**TABLE 1 Conversion Factors for Thermal Conductivity<sup>a</sup>**

	W/(m·K) <sup>ⓐ</sup>	W/(cm·K)	cal/(s·cm·K)	kg-cal/(h·m·K)	Btu/(h·ft·°F)	Btu·in./(h·ft <sup>2</sup> ·°F)
1 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> =	1.000	1.000 × 10 <sup>-2</sup>	2.388 × 10 <sup>-3</sup>	0.8598	0.5778	6.933
1 W·cm <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> =	100.0	1.000	0.2388	85.98	57.78	693.3
1 cal·s <sup>-1</sup> ·cm <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> =	418.7	4.187	1.000	360.0	241.9	2903.00
1 kg-cal·h <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> =	1.163	1.163 × 10 <sup>-2</sup>	2.778 × 10 <sup>-3</sup>	1.000	0.6720	8.064
1 Btu·h <sup>-1</sup> ·ft <sup>-1</sup> ·°F <sup>-1</sup> =	1.731	1.731 × 10 <sup>-2</sup>	4.134 × 10 <sup>-3</sup>	1.488	1.000	12.00
1 Btu·in·h <sup>-1</sup> ·ft <sup>-2</sup> ·°F <sup>-1</sup> =	0.1442	1.442 × 10 <sup>-3</sup>	3.445 × 10 <sup>-4</sup>	0.1240	8.333 × 10 <sup>-3</sup>	1.000

Thermal Conductance <sup>a</sup>					
	W/ft <sup>2</sup> ·K <sup>ⓐ</sup>	W/(cm <sup>2</sup> ·K)	cal/(s·cm <sup>2</sup> ·K)	kg-cal/(h·m <sup>2</sup> ·K)	Btu/h·ft <sup>2</sup> ·°F)
1 W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> =	1.000	1.000 × 10 <sup>-4</sup>	2.388 × 10 <sup>-3</sup>	0.8598	0.1761
1 W·cm <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> =	1.000 × 10 <sup>4</sup>	1.000	0.2388	85.98	17.61
1 cal·s <sup>-1</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> =	4.187 × 10 <sup>3</sup>	4.187	1.000	3.600 × 10 <sup>4</sup>	7.373
1 kg-cal·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> =	1.163	1.163 × 10 <sup>-4</sup>	2.778 × 10 <sup>-3</sup>	1.000	0.2048
1 Btu·h <sup>-1</sup> ·ft <sup>-2</sup> ·°F <sup>-1</sup> =	5.678	5.678 × 10 <sup>-4</sup>	1.356 × 10 <sup>-4</sup>	4.882	1.000

<sup>a</sup> Units are given in terms of (1) the absolute joule per second or watt, (2) the calorie (International Table) = 4.1868 J, or the British thermal unit (International Table) = 1055.06 J.

<sup>ⓐ</sup> This is the SI unit.

- L** = length of path of heat flow (thickness of specimen), m.
- N** = minimum number of thermocouples (see Eq 1.6.5.1.1).
- R** = surface resistance, K·m<sup>2</sup>/W.
- K** = thermal resistance, K·m<sup>2</sup>/W.
- R<sub>total</sub>** = overall thermal resistance, K·m<sup>2</sup>/W.
- t<sub>a</sub>** = average temperature of air 75 mm or more from the hot surface, K.
- t<sub>h</sub>** = area weighted average temperature of hot surface, K.
- t<sub>c</sub>** = area weighted average temperature of cold surface, K, and
- t<sub>e</sub>** = average temperature of air 75 mm or more from cold surface, K.

**4. Summary of Test Method**

4.1 To determine the conductance, *C*, the thermal transmittance, *U*, and the thermal resistance, *R*, of any specimen, it is necessary to know the area, *A*, the heat flux, *q*, and the temperature differences, all of which must be determined under such conditions that the flow of heat is steady. The hot box is an apparatus designed to determine thermal performance for representative test panels and is an arrangement for establishing and maintaining a desired steady temperature difference across a test panel for the period of time necessary to ensure constant heat flux and steady temperature, and for an additional period adequate to measure these quantities to the desired accuracy. The area and the temperatures can be measured directly. The heat flux, *q*, however, cannot be directly measured, and it is to obtain a measure of *q* that the hot box has been given its characteristic design. In order to determine *q*, a five-sided metering box is placed with its open side against the warm face of the test panel. If the average temperature across the walls of the metering box is maintained the same, then the net interchange between the metering box and the surrounding space is zero, and the heat input to the metering box is a measure of the heat flux through a known area of the panel. The portion of the panel outside the meter area, laved by the air of the surrounding guard space, constitutes a guard area to minimize lateral heat flow in the test panel near the metering area. Moisture migration, condensation, and freezing within the specimen can cause variations in heat flow; to avoid this, the dew point temperature on the warm side must be kept below the

temperature of the cold side when the warm surface is susceptible to ingress of moisture vapor. It is expected that, in general, tests in the guarded hot box apparatus will be conducted on substantially dry test panels, with no effort made to impose or account for the effect of the vapor flow through or into the panel during the test.

4.2 Since the basic principle of the test method is to maintain a zero temperature difference across the metering box walls, adequate controls and temperature-monitoring capabilities are essential. It is recognized that small temperature gradients could occur due to the limitations of controllers. Since the total wall area of the metering box is often more than twice the metering area of the panel, small temperature gradients through the walls may cause heat flows totaling a significant fraction of the heat input to the metering box. For this reason, the metering box walls may also be equipped to serve as a heat flow meter so that heat flow through them can be estimated and minimized by adjusting conditions during tests, and so that a heat flow correction can be applied in calculating test results.

**5. Significance and Use**

5.1 When the guarded hot box is constructed to test assemblies in the vertical orientation, it is suited for evaluating walls and other vertical structures. When constructed to test assemblies in the horizontal orientation, it is suited for evaluating roof, ceiling, floor, and other horizontal structures. Other orientations are allowable. The same apparatus may be used for both vertical and horizontal testing if it can be rotated or reassembled in either orientation.

**NOTE 1**—Horizontal structures that incorporate attic spaces between a ceiling and a sloping roof are highly complex constructions, and testing in the guarded hot box would be extremely difficult. Proper consideration must be given to specimen size, natural air movement, ventilation effects, radiative effect, baffles at the guard-meter demarcation, etc. All of these special conditions must be included in the report (10.1.1). Consideration should be given to the use of the calibrated hot box for such large, complex constructions.

5.2 For vertical specimens with air spaces that significantly affect thermal performance, the metering box height should ideally match the construction height. If this is not possible, horizontal convection barriers must be installed to prevent air exchange between meter and guard areas, unless

it can be shown that the omission of such barriers does not significantly affect results.

5.3 For all specimens it is necessary to maintain a near zero lateral heat flow between the guard area and the meter area of the specimen. This can be achieved by maintaining a near zero temperature difference on the specimen surface between the metered and guard areas. In specimens incorporating an element of high lateral conductance (such as a metal sheet), it may be necessary to separate the metered and the guard areas of the highly conductive element by a narrow gap such as a saw cut.

5.4 Since this test method determines the total flow of heat through the test area demarcated by the metering box, it is possible to determine the heat flow through a building element smaller than the test area, such as a window or representative area of a panel unit, if the parallel heat flow through the remaining surrounding area or mask is determined (see Annex A1).

6. Apparatus

6.1 Arrangement—Fig. 1 (a) shows a schematic arrangement of the test panel and of various major elements of the apparatus; Fig. 1(b) and (c) show alternative arrangements. Still other arrangements, accomplishing the same purpose, may be preferred for reasons of convenience or ease of installing panels. In general, the size of the metering box determines the minimum size of the other elements.

6.2 Metering Box:

6.2.1 Size—The size of the metering box is largely governed by the metering area required to obtain a representative test area of panel. For example, for panels incorporating air spaces or stud spaces, the metering area, preferably, should exactly span an integral number of spaces. The height

of the metering box should be not less than the width and is subject to the limitations as described in 5.2. The depth of the metering box should be not greater than that required to accommodate its necessary equipment.

6.2.2 Thermal Resistance—The metering box walls shall have a thermal resistance of not less than  $0.83 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . In order that the resistance of the box wall shall be uniform over the entire box area, a construction without internal ribs shall be used. For example, a glued balsa wood or a sandwich construction with aged urethane foam core. The edge in contact with the panel shall, if necessary, be narrowed on the outside only, to hold a gasket not more than 13 mm wide. If necessary, a wood nosepiece can be used to carry the gasket. The metering area of the panel shall be taken as the area included between the center lines of the gaskets. All surfaces that can exchange radiation with the specimen must have a total hemispherical emittance greater than 0.8.

6.2.3 Heat Supply and Air Circulation—Fig. 2 shows a possible arrangement of equipment in the metering box to assure an even, gentle movement of air over the metering area of the panel. The electric heaters are mounted in a housing with walls of resistance not less than  $0.83 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , and with a low emittance outside surfacing to minimize

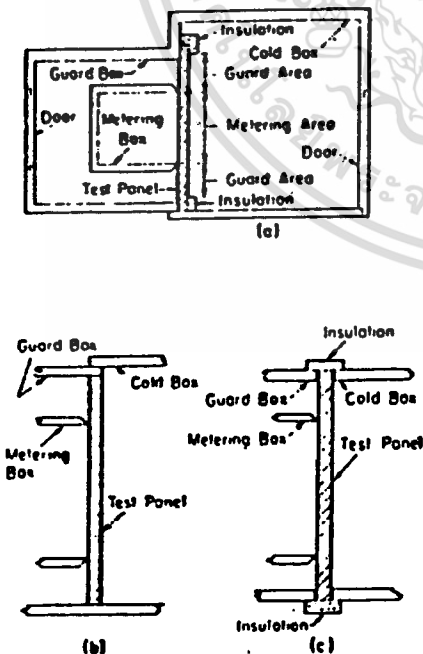


FIG. 1 General Arrangements of Test Box, Guard Box, Test Panel, and Cold Box

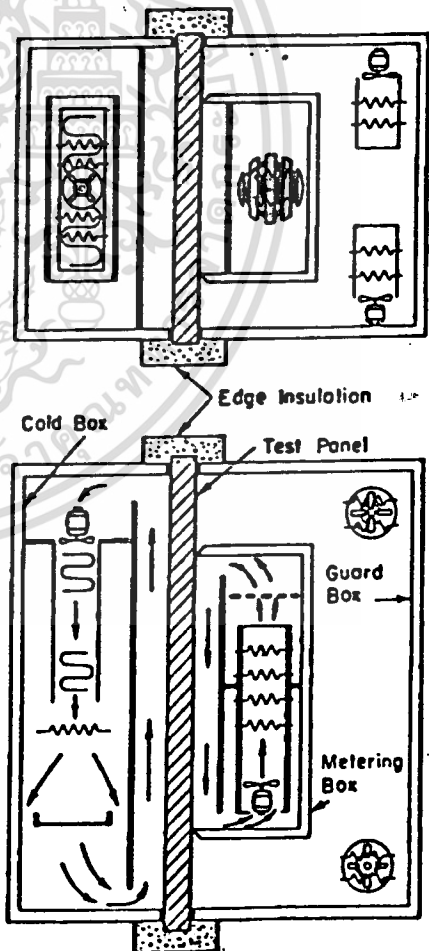


FIG. 2 Arrangement of Equipment During the Test

radiation heat transfer to the metering box walls. In this arrangement air is continuously circulated by a small fan upward through the cylindrical housing and downward between the baffle and the panel in accordance with the motion that would result from natural convection forces. A slat-type baffle is placed some distance above the outlet of the cylindrical housing to prevent impingement of a jet of heated air against the top inner surface of the metering box. For large meter boxes the cylindrical housing may cause concentrations of air flow. To direct the air properly across the specimen, other fan arrangements may be preferable. A curved vane is mounted at the top of the baffle to smooth the entrance of air into the baffle space. In a hot-box apparatus used for testing panels in a vertical position only, the moderate circulation of air resulting from natural convection may be sufficient without the use of a fan. The change in temperature of the air as it moves along the surface of the panel will, in general, be greater with natural circulation than with a fan. If a fan is used, its motor should be within the metering box, its electrical input should be as small as feasible, and the input should be carefully measured. If it is necessary to locate the motor outside the metering box, the heat equivalent of the shaft power must be accurately measured, and air leakage into or out of the metering box around the shaft must be zero.

**6.2.4 Temperature Control**—To obtain reliable test results, accurate temperature control equipment must be utilized. Temperature controllers must be capable of controlling temperature within 0.25 K during the test period. The heaters should be the open-wire type of minimal heat capacity and lag.

**6.2.5 Gaskets**—The contact edges of the metering box should ensure, by a gasket or other means, a tight air seal against the surface of the test panel. For some panels special provisions may be necessary. The metering box should be pressed tightly against the panel by suitable means. Some gasket materials age with time and service. Periodic inspection of gaskets is recommended in order to confirm their ability to provide a tight seal under test conditions.

**6.2.6 Heat Flux Transducer**—To equip the metering box walls to serve as a heat flux transducer, a means of detecting the temperature difference across the metering box walls or the heat flux through the metering box walls shall be provided. One method found satisfactory for this purpose is to apply a number of differential thermocouples connected in a series to the inside and outside surfaces of the metering box walls to form a thermopile. Precautions must be taken when determining the number of differential thermocouples. Based on a survey of guarded hot box operators, the number of differential thermocouple pairs located on metering box walls shall be five pairs per square metre of specimen metered area located on the metering box sides. At no time shall there be less than 1 pair of differential thermocouples on each of the five sides of the metering box (1).<sup>3</sup> Precautions must also be taken when determining locations of the differential thermocouples, as temperature gradients on the inside and outside of the metering box walls are likely to exist

and have been found to be a function of metering and guard box air velocities and temperature. The junctions and the thermocouple wires for at least a 100-mm distance from the junctions shall be flush with, and in thermal contact with, the surface of the wall. The output of the thermocouple pairs shall be averaged.

**6.2.7 Thermopile emf and Heat Flow Relationship**—The relationship between thermopile emf and heat flow through the metering box walls shall be determined. This relationship shall be determined for each set of metering box conditions (temperature and air velocity). A suggested method of accomplishing this objective is outlined in Appendix X1.

### 6.3 Guard Box:

**6.3.1 Size**—It is recommended that the guard box be large enough so that there is a clear distance between its inner wall and the nearest surface of the metering box of not less than the thickness of the thickest panel to be tested, but in no case less than 150 mm.

**6.3.2 Thermal Conductance**—To assure that there shall be a temperature difference of no more than a few degrees between the guard box air and its inner surfaces, the walls shall have a thermal conductance not greater than 0.6 W/(m<sup>2</sup>·K). A low conductance is also desirable for operating reasons, to assure that the heat flow into or out of the guard box from outside will be only a small fraction of the heat flow through the guard area of the test panel.

**6.3.3 Heat Supply and Air Circulation**—One or more reflective-surfaced cylindrical heater units with a fan may be used to supply heat to the guard box air and also to circulate the air to avoid stratification. The fan air intake of at least one such heater unit should be located at the lowest point in the guard box, to prevent pooling of cool air at the bottom. The air discharged from the heater cylinder shall not impinge directly against either the metering box or the test panel.

**6.3.4 Temperature Control**—The guard box air temperature and heat input can be controlled by a differential thermopile such as that used on the metering box for a heat flow meter, or by a sensitive bridge circuit with opposed temperature-sensitive arms located in the guard and metering boxes. To avoid hunting due to the small periodic temperature variations of the metering box air, as its thermostat functions, it is desirable to put the temperature-sensitive element of the differential control in the metering box in good thermal contact with the inside surfaces of the metering box. The temperature-sensitive element in the guard box should be placed to avoid being directly in the air stream of the heater units and should be of minimum thermal lag. The control equipment used to maintain guard box temperatures must be capable of controlling to within 0.25 K.

### 6.4 Cold Box:

**6.4.1 Size**—The size of the cold box is governed by the size of the test panel or by the arrangement of boxes used, as illustrated in Fig. 1.

**6.4.2 Insulation**—The cold box should be heavily insulated to reduce the required capacity of the refrigerating equipment, and the exterior of the cold box should be provided with a good vapor barrier to prevent ingress of vapor and heavy frost accumulations on the cooling coils.

**6.4.3 Temperature Control**—The cold box may be cooled in any manner that is capable of the close control of air

<sup>3</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.

temperature necessary during a test. An arrangement of equipment similar to that in the metering box may be used with a fan to force air downward through the enclosed refrigerating coils and upward through the space between a baffle and the test panel as indicated in Fig. 2. It has been found satisfactory with an arrangement of this sort to operate a unit refrigeration system continuously, with the evaporation temperature of the coil held constant by an automatic back-pressure regulating valve, and refrigerant supplied to the coil through an automatic expansion valve. An alternative method is to use an exterior located refrigeration system and insulated ducts to supply chilled air to the cold box. Liquid nitrogen in connection with a solenoid valve regulating its flow may also be used. For fine control of the cold box, installation of open wire electrical heaters in the blower duct or other fast moving part of the air circulation system and controlling these heaters by a sensor located in the discharge of the air circulation system is recommended. The use of desiccants to remove excessive moisture in the recirculating cold air may be useful. Temperature controllers for steady-state tests must be capable of controlling temperatures within  $\pm 0.25$  K.

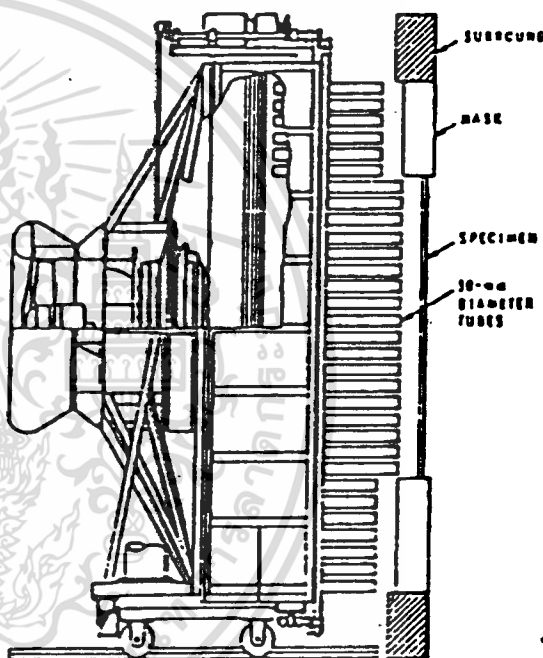
6.4.4 Air Circulation—High air velocities are permissible when their effect upon heat flow is to be determined. This may be accomplished by directing the airflow either parallel or perpendicular to the specimen cold surface. One method of obtaining parallel uniform velocity is to force air through a space between the specimen and a parallel baffle whose spacing may be adjustable to aid in changing the air curtain velocity. Parallel velocities, as provided in this test method, aid in obtaining uniform specimen surface temperatures and simulate the effect of cross winds. Velocities commonly used to simulate cross wind conditions are 3.35 m/s for summer conditions and 6.70 m/s for winter conditions. Perpendicular velocities, simulating direct wind impingement require moving larger amounts of air than most parallel situations, with corresponding larger power requirements. Also, the baffle should be placed further from the specimen surface and should have a porous section (a screen or honeycomb flow straightener) that directs the wind at the specimen surface (see Fig. 3 and 4). Velocities commonly used to

simulate wind conditions are 3.35 m/s for summer conditions and 6.70 m/s for winter conditions. Air leakage through the specimen should be eliminated by sealing all cracks and joints with tape, caulk, or foam strips.

6.4.4.1 After construction of the air circulation system a velocity scan across the air curtain is required to verify that a uniform air curtain is formed. The apparatus should provide a means for determining air velocity past the specimen surface. One method is to locate velocity sensors directly in the air curtain.

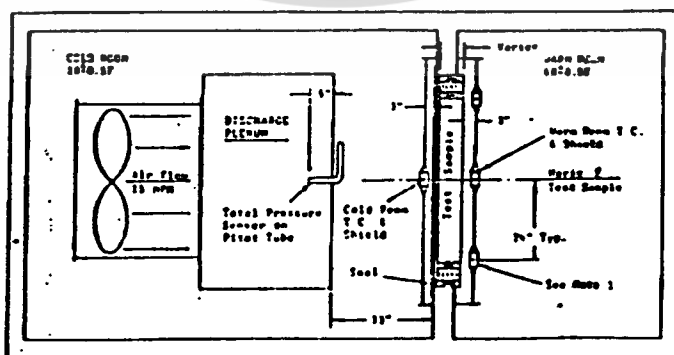
6.5 Temperature-Measuring Equipment:

6.5.1 Surface Temperatures—Thermocouples of wire not larger in size than 0.25 mm (No. 30 AWG gage), and which



NOTE—One inch is equal to 25.4 mm.

FIG. 3 DBR Wind Machine



NOTE 1—Thermocouples and shields on the warm side are movable to maintain 3 in. spacing to test sample.

NOTE 2—Overall chamber length may vary.

NOTE 3—One inch is equal to 25.4 mm.

NOTE 4—Thirty-two degrees Fahrenheit is equal to 0°C.

FIG. 4 Thermal Chamber Diagram

meet or are calibrated to the special limits of error specified in Standard E 230, are recommended for measuring surface temperatures in the apparatus (larger thermocouples can be used if it can be shown that there is no difference in bias); for this purpose the thermocouple junction and the adjoining lead wires for a distance of at least 100 mm should be taped, or preferably cemented, tightly to the surface. The emittance of the surfacing material tape or cement should be close to the emittance of the surface.

6.5.1.1 If the specimen (and therefore its thermal resistance) is uniform, or nearly so, over the area and thus the surface temperatures vary only slightly at lower air velocities, a minimum number of thermocouples spaced uniformly and symmetrically over the surface is sufficient. This minimum number depends on the specimen size. Experience has shown that the required minimum number of thermocouples,  $N$ , can be determined from the relation that:

$$N = .4/(0.07 + 0.08 \sqrt{A}) \quad (1)$$

where  $A$  is the metering area in  $m^2$ . If the number of thermocouples used is within 10% of the number determined by this relation, then the requirements of this section are judged to be met.

6.5.1.2 If the specimen is of nonuniform construction, the number of thermocouples specified in 6.5.1.1 may still be sufficient. In this case the thermocouples shall be judiciously located to represent each of the construction elements. Such representation shall be distributed approximately uniformly and symmetrically over the specimen surface.

6.5.1.3 If the surface temperatures are expected to be greatly nonuniform, additional thermocouples must be used to sample adequately the different temperature areas so that reliable weighted mean temperatures may be obtained.

6.5.1.4 With some nonhomogeneous walls, such as concrete, it may be advisable to use copper shim stock under the thermocouples to average the temperature. Large aggregates in the concrete can create biased temperature readings.

6.5.1.5 At least two surface thermocouples shall be placed on the guard area of the specimen at suitable locations to indicate the effectiveness of the guard area.

6.5.1.6 Surface temperatures on the cold side of the test panel shall be measured by surface thermocouples placed directly opposite those on the warm side.

6.5.2 Air temperatures may be measured by thermocouples, temperature sensitive resistance wires, or other sensors. All thermocouples shall be made of wire not larger than 0.51 mm (No. 24 AWG).

6.5.2.1 If thermocouples or other point sensors are used, they shall be located in the metering box area in the same quantity and spacing as that specified for surface thermocouples in 6.5.1.1. The thermocouple shall be located midway between the face of the panel and the baffle, if one is used, but in no case less than 75 mm from the face of the panel. The junctions of the thermocouples shall have bright metallic surfaces and shall be as small as possible to minimize radiation effects. Another method is to shield the thermocouple junction. The thermocouples may be placed directly opposite the surface thermocouples; in any case they should be located as uniformly as possible over the metering area.

6.5.2.2 Thermocouples shall also be placed in the guard space at suitable locations, to indicate the degree of uniformity of guard space air temperatures; preferably, one should

be placed opposite each guard area surface thermocouple, but not less than 75 mm from the panel.

6.5.2.3 Air temperatures on the cold side of the panel shall be measured by one thermocouple placed directly opposite each of the warm side air temperature thermocouples and located in a plane parallel to the specimens surface and spaced far enough away that they are unaffected by temperature gradients in the boundary layer. The thermocouples shall be located midway between the face of the panel and the baffle, if one is used. For low velocities, a minimum spacing of 75 mm from the specimen surface is required. At higher velocities the required minimum spacing is less but in no case less than 20 mm. No thermocouples need be placed in the cold space opposite guard space thermocouples remote from the panel surface.

6.5.2.4 If air temperatures are to be measured by means of resistance wire grids, the wire shall be distributed uniformly to indicate approximately the average temperature of the air on both sides of the panel at a plane midway between the baffle and the panel but in no case less than 75 mm from the panel.

6.5.2.5 It is recommended that the surface temperature of the baffles on the hot and cold sides be measured by placing thermocouples on all surfaces the specimen can see.

NOTE 4—This is not a requirement of this test method but is highly recommended. There are several reasons for the recommendation: (1) this indicates any difference between the baffle surface and air temperatures; (2) it will allow corrections to be made to the radiation component of the surface conductances due to differences in these temperatures; and (3) it is necessary to do this for specimens such as glass which have a high-thermal conductance.

#### 6.6 Instruments:

6.6.1 All thermocouples or other temperature sensors for observing surface and air temperatures shall have their leads brought out individually to suitable measuring instruments capable of indicating temperatures to within  $\pm 0.05$  K.

6.6.2 Total average power (or integrated energy over a specified time period) for all energy to the meter box shall be accurate to within  $\pm 0.5$  % of reading under conditions of use. Power measuring instruments must be compatible with the power supplied whether ac, dc, on-off, proportioning, etc. Voltage stabilized power supplies are strongly recommended.

6.6.3 Velocities of air over both surfaces of the panel should be measured with suitable instruments or be calculated from a heat balance between the rate of loss or gain of heat as it moves through the baffle space, as indicated by its temperature change, and the rate of heat flow through the test panel, average values of which can be determined from the test data. It should be recognized that radiant transfer between the baffle and the specimen can affect the calculation if the radiation is significant. For this reason direct velocity measurement is desirable.

NOTE 5—It is recommended that a central control location be established, that automatic scanning and recording equipment for unattended operation be used, and that data be computer processed.

6.7 Verification—When a new or modified apparatus is constructed, verification tests shall be conducted on panels made from materials of known conductance that does not exceed  $1.5 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$  as determined in Test Methods C 177 or Test Method C 518. Any differences in results should be

carefully analyzed and corrective measures taken. Further periodic checks are recommended.

## 7. Sampling and Test Specimens

7.1 Specimens shall be representative of the construction to be investigated but may be modified if necessary for test purposes as mentioned in 5.2 and 5.3. It must be recognized that modifications to the construction may result in conditions that do not represent true field conditions. In many cases conduction and convection paths have considerable effect on the performance of the specimen and must be left intact. Other considerations are:

7.1.1 *Sensors*—Install temperature sensors as directed in 6.5. When desired, temperature and other sensors may be installed throughout the interior of the specimen for special investigations.

7.1.2 *Conditioning*—The usual pre-test conditioning is in ambient air long enough to come to practical equilibrium. Assemblies that may have significant moisture content, which can influence test results, must be allowed to reach steady-state moisture conditions. Since the specimen size will probably preclude oven drying, concrete wall specimens may require 6 to 8 weeks of room temperature aging.

7.1.3 *Edge Insulation*—When a test panel is installed, its edges shall, if necessary, be insulated to prevent edge effect from overtaking the guarding effect of the guard area of the panel. For this purpose, the edges of the panel may be protected against heat loss or gain by a thickness of insulation with an  $R$  of 1 or  $1.25 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ . It may be necessary to vapor-proof the insulation to prevent condensation of moisture in the edges of the panel, if a test arrangement similar to that shown in Fig. 1(c) is used. The edge of the specimen should be well sealed to prevent air infiltration between the guard and the cold box.

## 8. Procedures

8.1 Test conditions of temperature and orientation should be chosen to correspond as closely as possible to the circumstances of use of the construction to be tested. This test method is primarily designed for the temperatures encountered in normal building use, however, it is recognized that the method may find application in testing conditions that are outside this normal range. It is recommended that a minimum temperature differential of approximately 25 K be maintained for accurate measurement.

8.2 The required stabilization and test periods are as follows:

8.2.1 Impose steady-state conditions for at least 4 h prior to final data collection. This condition is satisfied when, over this 4-h period, the average surface temperature did not vary by more than  $\pm 0.06^\circ\text{C}$  ( $\pm 0.1^\circ\text{F}$ ) and the average power in the meter area did not vary by more than  $\pm 1\%$  and the data did not change unidirectionally. During this period, data shall be collected at intervals of 1 h or less.

8.2.2 After the conditions in 8.2.1 have been satisfied, continue the test period at least 8 h, but do not terminate the test until two or more successive 4-h periods produce results that do not differ by more than 1%. During this period take data at intervals of 1 h or less. The average of the data for the two or more successive 4-h periods that agree within 1% are used in calculating the final results. In testing panels that are

heavily insulated, very massive, or both, it may be necessary to extend the duration of the test beyond the minimum period of two consecutive 4-h periods in order to be assured that conditions are steady, as it has been observed that continuing but small incremental changes can give a premature appearance of stability.

8.2.3 The calculation of a time constant, generated from apparatus measurements (Note 6) combined with an estimate of the thermal properties of the specimen, will help in estimating the time required for the test set-up to reach equilibrium. (2) It is also suggested that  $C$  and  $U$  values be calculated for the test specimen, utilizing known properties of the components. This will serve as general check of the measured results and avoid serious errors in measurement.

NOTE 6—The thermal mass of the apparatus may be the major factor contributing to the time constant of the system.

8.3 Data to be determined include:

8.3.1 The total net energy or average power through the specimen during a measurement interval. This includes all meter box heating and power to fans or blowers, and any corrections for meter box wall heat flow.

8.3.2 All air and surface temperatures specified in 6.5.1 and 6.5.2 (Note 7).

8.3.3 The effective dimensions of the metered area.

NOTE 7—In 6.5 the locations of thermocouples or temperature-measuring elements at various points are stipulated, for example, in the guard space and on the guard area of the test panel. The temperatures indicated by such thermocouples are of great value in evaluating the uniformity of temperatures prevailing in the guard space and on the test panel surfaces, but it is not feasible to stipulate generally the limits within which certain of these measured temperatures must agree. It must, therefore, be the responsibility of the test engineer to observe and weigh the significance of these temperatures to ascertain their effect upon the validity of a particular test measurement.

## 9. Calculation

9.1 Calculate the final test results by means of the following equations using the average data obtained in 8.2.2 for the two 4-h periods that agree within 1%:

$$U = Q/A(t_h - t_c)$$

$$C = Q/A(t_1 - t_2)$$

$$R = (t_1 - t_2)A/Q$$

$$R_o = (t_h - t_c)A/Q = r_c + R + r_h$$

$$r_h = (t_h - t_1)A/Q$$

$$r_c = (t_2 - t_1)A/Q$$

$$h_h = Q/A(t_h - t_1)$$

$$h_c = Q/A(t_2 - t_1)$$

$$\lambda = QL/A(t_1 - t_2)$$

9.1.1 For a relatively uniform but nonhomogeneous specimen such as normal walls, floors, ceilings, etc., the properties that may be calculated are transmittance  $U$ , conductance  $C$ , resistance  $R$ , overall resistance  $R_o$ , surface resistances and surface conductances,  $h$ .

9.1.2 For uniform and homogeneous specimens all of the properties listed in 9.1.1 may be calculated plus thermal conductivity  $\lambda$ .

9.1.3 For elements smaller than the metering area, the properties that apply to the element, according to the distinctions of 9.1.1 and 9.1.2 may be calculated if tests have been run that allow the element heat flow to be determined.

Annex A1 presents considerations for these calculations.

10. Report

10.1 Report the following information:

10.1.1 Name, and any other identification or description of the test construction, including if necessary a blueprint showing important details, dimensions, and all modifications made to the construction, if any, and specimen orientation. Description of the test construction and a complete and detailed description of all materials. This includes the generic name of the material and its density. (For hygroscopic materials, such as some concrete materials and wood, the moisture content should also be given). If the thermal conductivities of these materials, at the test conditions, have been measured in a hot box facility (Test Method C 236 or Test Method C 976), a guarded hot plate (Test Method C 177) or a heat flow meter (Test Method C 518), these values should also be included.

NOTE 8—By generic description, the name of the material in addition to the brand name should be given (for example, preformed, cellular polystyrene Type VIII with a density of 22 kg/m<sup>3</sup>; spruce-pine-fir with a moisture content of 12 % and a dry density of 486 kg/m<sup>3</sup>).

10.1.2 Pertinent information in regard to preconditioning of the test panel.

10.1.3 Size and dimensions of the metering and guard areas of the test panel.

10.1.4 Average values during the test period of the temperatures and velocities of the air on both sides of the metering area of the panel, and of the temperature of the surfaces on both sides. (If significant, give the average values of the temperature of specific areas of the surface of the panel.)

10.1.5 Average rate of net heat input to the metering box.

10.1.6 Any thermal transmission properties calculated in 9.1 and the known precision of the equipment. Precision of the equipment should be checked using the propagation of errors theory.

NOTE 9—Discussions of this method can be found in many textbooks on engineering experimentation and statistical analysis (3).

10.1.7 Test duration and date.

10.2 All values shall be reported in both SI and inch-pound units unless specified otherwise by the client.

10.3 Where this test method is specifically referenced in published test reports and published data claims, and where deviations from the specifics of the test method existed in the tests used to obtain said data, the following statement shall be required to accompany such published information: "This test did not fully comply with the following provisions of Test Method C 236" (followed by a listing of specific deviations from this test method and any special test conditions that were applied).

11. Precision and Bias

11.1 Background—A round robin for guarded and calibrated hot boxes was conducted in accordance with Practice E 691. This round robin involved 21 different laboratories of which 16 had guarded hot boxes (4). Data were reported for 100-mm (4-in.) thick homogeneous specimens of expanded polystyrene board (Specification C 578). Each laboratory received material from a special manufacturer's lot that was controlled to maintain a uniform density. Data reduction and analysis using Practice E 178 identified one of the 16 laboratories as a statistical outlier. Results from the other 15 laboratories showed that at a mean temperature (*t*) of 24°C (75°F), the average *R* value was determined to be 2.78 K·m<sup>2</sup>/W (15.77 F ft<sup>2</sup>h/Btu). The regression equation for the data set was:

$$R = 3.146 - 0.016 t \quad (R \text{ in K}\cdot\text{m}^2/\text{W} \text{ and } t \text{ in } ^\circ\text{C}) \quad (2a)$$

$$R = 17.867 - 0.028 t \quad (R \text{ in F ft}^2\text{h/Btu} \text{ and } t \text{ in } ^\circ\text{F}) \quad (2b)$$

over the mean temperature range from 4°C to 43°C (40°F to 110°F). The mean specimen density ranged from 20.2 to 23.9 kg/m<sup>3</sup> (1.26 to 1.49 lbs/ft<sup>3</sup>).

11.2 Precision—At a specimen thermal resistance of *R* = 2.78 K·m<sup>2</sup>/W (15.76 F ft<sup>2</sup>h/Btu) and on the basis of test error alone, the difference in absolute value of two test results obtained in different laboratories on the same specimen materials will be expected to exceed the reproducibility interval only 5 % of the time according to Table 2. For example, measurements from two different laboratories on the same specimen could differ by up to ±7.8 % at a mean temperature of 24°C (75°F) 95 % of the time.

11.3 Bias—Based on guarded hot plate data (Test Method C 177) from the National Institute of Standards and Technology—Center for Building Technology and supported by measurements from other laboratories, the true value for the round-robin specimen is a thermal resistance of 2.81 K·m<sup>2</sup>/W (15.94 F ft<sup>2</sup>h/Btu). The mean value measured by the guarded hot box differed by -1.07 %.

NOTE 10—Another test series was conducted on homogeneous common lot specimens in three guarded hot boxes at different laboratories. (5, 6) *R*-values of the specimens ranged from approximately 0.3 to 2.1 K·m<sup>2</sup>/W (3 to 11.8 F ft<sup>2</sup>h/Btu) at mean temperatures of 4, 24, and 43°C (40, 75, and 110°F). This series indicated that results with precision of ±5 % may be achieved.

NOTE 11—Both round robins used a homogeneous specimen, an ideal wall section. Actual wall sections will be nonhomogeneous. The precision and bias has not yet been determined for nonhomogeneous specimens. The above statements provide a bound.

TABLE 2 Precision for Test Method C 236

Mean Temperature, °C (°F)	Thermal Resistance, K·m <sup>2</sup> /W (Ft <sup>2</sup> h/Btu)	Reproducibility Interval, %	Change in <i>R</i> , K·m <sup>2</sup> /W (Ft <sup>2</sup> h/Btu)
4 (40)	2.95 (16.75)	±7.3	±0.22 (±1.23)
24 (75)	2.78 (15.77)	±7.8	±0.22 (±1.23)
43 (110)	2.60 (14.79)	±8.6	±0.22 (±1.27)

ANNEX

(Mandatory Information)

**A1. USING THE GUARDED HOT BOX TO DETERMINE HEAT TRANSFER THROUGH A BUILDING ELEMENT SMALLER THAN THE METERING AREA**

**A1.1 General Considerations**

A1.1.1 In this use, the building element area ( $A_b$ ) is located centrally in the metering area ( $A_h$ ) demarcated by the hot box, and is surrounded by a masking partition which extends homogeneously beyond the area  $A_b$  into the guard area. The area of the mask ( $A_m$ ) within the metering area equals ( $A_h - A_b$ ). The total heat flow rate  $Q_h$  determined by the hot box measurement consists of two heat flow rates in parallel, in accordance with the equation

$$Q_h = Q_b + Q_m \quad (A1.1)$$

where  $Q_b$  is the total through the building element area  $A_b$  and  $Q_m$  is that through the mask area  $A_m$ .

A1.1.2 In conducting a test to ascertain  $Q_b$  for a particular building element,  $Q_h$  is determined by the hot box measurement, and  $Q_m$  is inferred from the results of calibration measurements. The calibration is made by means of hot box tests of the masking partition either before the aperture for the building element is cut out or with a blank of known thermal conductance installed in place of the building element. The error in  $Q_b$  is evidently equal to the difference of the algebraic errors in  $Q_h$  and  $Q_m$ . The fractional error is given by

$$\Delta Q_b/Q_b = (\Delta Q_h - \Delta Q_m)/(Q_h - Q_m) = [(\Delta Q_h/Q_h) - (\Delta Q_m/Q_m)]/(1 - Q/Q_h) \quad (A1.2)$$

where  $(\Delta Q_b)$  is the algebraic error in  $Q_b$  etc. An estimate of the fractional error  $(\Delta Q_m)/Q_m$  is dependent upon the method which is used to calibrate the mask. If the calibration is made before the aperture for the building element is cut out then

$$\Delta Q_m/Q_b = (\Delta Q'_h/Q_h) \times (A_m/A_h) \quad (A1.3)$$

where  $(\Delta Q'_h)$  is the error in heat flow measured during the calibration test. If a blank of known thermal conductance is used to calibrate the mask then

$$\Delta Q_m/Q_b = (\Delta Q'_b - \Delta Q_{h1})/Q_b \quad (A1.4)$$

where  $(\Delta Q_{h1})$  is the algebraic error in determination of heat flow through the blank. Little can be said in general about the magnitudes of the algebraic fractional errors  $(\Delta Q_h)/Q_h$  and  $(\Delta Q_m)/Q_b$ , since these depend on the quality and management of the particular hot box apparatus and upon the accuracy of determination of heat flow through the blank, but it is evident that the systematic portion of the error  $(\Delta Q_b)/Q_b$  is reduced as  $Q_m/Q_b$  is made small. Also, as  $Q_m$  is made small, the term  $(\Delta Q_m)/Q_b$  is presumably also made less significant. Thus, the fractional systematic error possible in the determination of  $Q_b$  is reduced by increasing either the area of the building element (if feasible), or the total thermal resistance of the mask.

A1.1.3 The need to infer the mask heat flow  $Q_m$  accurately requires that the mask be designed to act as a heat flow meter with an emf output and temperature difference of  $\Delta$ ,

proportional to the total heat flow through it. This consideration is the basis for the specific recommendations which follow.

NOTE A1.1—Additional error may arise due to the possible influences of the building element in causing two or three dimensional heat flow at the boundary with the mask and thus affecting the mask heat flow in regions adjacent to the element. Thus mask heat flow, determined under a given set of conditions with a calibration standard in place, may change when the building element is installed, even though the test conditions remain unchanged. The user of this procedure should be aware of such possible errors and should attempt to evaluate their magnitude in relation to the desired accuracy of the test.

**A1.2 Recommendations**

A1.2.1 It is recommended that the mask be made of a suitable uniform thickness of a homogeneous and stable material of low thermal conductivity having adequate strength to support the weight of the building elements to be tested. Suitable materials are faced high-density glass fiber or polystyrene boards laminated together as necessary. Stronger masks can be fabricated by sandwiching layers of insulation between layers of rigid materials such as plywood. Such masks, though nonhomogeneous, are uniform in the direction perpendicular to the direction of heat flow and are calibrated in the same manner as homogeneous masks. It may be necessary in some cases to incorporate framing in the mask to support heavy building elements such as heavy-duty metal frame windows or masonry sections. Such nonuniform masks are necessarily calibrated using blanks of known thermal conductance. Framing members must be kept away from the juncture with the building element and with the boundary of the metering area so as not to contribute excessively to lateral heat transfer at these points. It is important that the mask be low in hygroscopicity to minimize changes in its thermal resistance with ambient humidity conditions, and that it be substantially impervious to air flow through it.

A1.2.2 Thermocouples for measuring the temperature difference across the mask should be permanently installed uniformly flush with or just under its surfaces. These may be connected in series-differential for determination of the mask temperature difference, or as individual thermocouples for exploring the temperature distributions on the faces of the mask. It is recommended that there be at least eight thermocouple junctions on each face of uniform masks: four at positions bisecting the four lines from the corners of the building element aperture to the corresponding corners of the metering area, and four at positions bisecting the sides of the rectangle having the first four thermocouples at its corners. A suitable thermocouple arrangement would have to be chosen for nonuniform masks that would provide representative average surface temperatures. This is particularly important when natural convection is used and air

temperatures and film coefficients vary over the metering face. If framing members are used, an area-weighted average of temperatures measured over the members and away from them is necessary. The mask, as a heat flow meter, should be calibrated and used in terms of the average temperature (or thermocouple emf) difference across it indicated by the permanently installed thermocouples.

A1.2.3 To protect the surfaces of the mask and the permanently installed thermocouples, and if necessary to render the surfaces impervious to air, a permanent coating or thin facing on each face of the mask is desirable. However, the coating or facing must be of low conductance laterally so that it does not contribute excessively to lateral heat transfer at the juncture with the building element or at the boundary of the metering area. The emittance of the mask surfaces should be uniform, and unchanged after calibration of the mask; in cases where the transmittance (rather than the conductance) of the building element is of particular interest, it is preferable that the emittance of the mask surfaces be large.

A1.2.4 In view of the desirability of high thermal resistance of the mask relative to that of the building element, the uniform thickness of the mask should in general not be less than that of the building elements to be tested, and may be greater than that of the thinner elements. Mask thickness greatly exceeding that of the building element is to be avoided if possible because of lateral heat flow in the mask due to its exposure at uncovered areas of its aperture. (In special instances, for example, a window designed to be set a few inches outward from the plane of the inner surface of a wall, a special calibration of the mask as a heat flow meter may be necessary using a blank of known thermal conductance in the precise position of the window at the juncture with the mask aperture.)

A1.2.5 The mask aperture in which the building element is installed for test should fit the element specimen snugly. Cracks between them should be minimal in width, and should be filled completely with a good fibrous insulation and caulked or otherwise sealed at the mask surfaces to prevent air leakage. It is desirable that the insulation used to fill cracks have approximately the same conductivity as the mask material; it would then be possible, if the cracks aggregate an area significant in relation to the mask area, to

compensate roughly for the increased virtual mask area by increasing the mask heat flow indicated by its temperature drop in proportion to the increase of area.

A1.2.6 It is probable that many building elements to be tested are inhomogeneous or nonuniform in construction for structural reasons, and in consequence that the local thermal conductances differ considerably at different frontal areas of the element. The variations are inherent, and the result of the test is an average conductance or transmittance value for the total construction, provided that the conductance variations at edges do not seriously impair the validity of using the mask as an adequate heat flow meter. This is a matter which varies with the case, and therefore must rest on the judgment and discretion of those conducting the test measurement. A useful guiding principle is that nothing should be incorporated in, or omitted from, a building element specimen being tested that would make it not representative of the assembly that would be found in actual installation in service. For example, if a metal window ordinarily is installed with inset wood framing, the test specimen should include just so much of the wood framing as is properly chargeable to it.

### A1.3 Calibration of the Mask as a Heat Flow Meter

A1.3.1 The calibration of the mask is made by means of hot box tests either before the aperture for the building elements is cut out or with a blank of known thermal conductance installed in place of the building element. The mask must be fully prepared with the permanent differential thermocouples installed and any final facings or coatings applied. Several tests are made, adequately covering the range of mask mean temperatures (and perhaps mask temperature drops and box air velocities) at which the mask will be operated in tests of building elements. In each test, under steady-state conditions, the metering box heat flow  $Q'$ , and the corresponding mask temperature drop  $\Delta t$ , indicated by its permanently installed thermocouples, are determined. The net mask heat flow  $Q'_m$  corresponding to  $\Delta t$  is calculated as  $Q'_m(A_m/A_b)$  when the calibration is made before the aperture is cut, where  $A_m$  and  $A_b$  are as defined earlier, and as  $(Q'_1 - Q_{b1})$  for the calibrated-blank method where  $Q_{b1}$  is the calculated heat flow through the blank. In the latter method of calibration, a suitable blank must first be prepared and calibrated.

## APPENDIX

(Nonmandatory Information)

## XI. THERMOPILE EMF AND HEAT FLOW RELATIONSHIP (7, 8)

XI.1 The procedure given in this Appendix outlines the steps suggested to obtain the relationship between heat flow and thermopile output. This method addresses the technique that will yield the heat flow relationship as a function of the thermopile output and a thermopile offset, if present.

XI.1.1 It is essential that the number of fans and power input in the metering, guard, and environmental boxes be held constant along with all temperatures throughout the calibration (and measurement) phase. By holding the fan number and input along with the surface temperatures constant, the operator assures a constant heat transfer film coefficient to the specimen throughout testing. The  $E_m$  value associated with negligible net heat flow across the meter box walls is then obtained from the relationship between  $Q_m$  and  $E$ . The equation that describes the total heat flow drawn schematically in Fig. 4 is:

$$Q_F + Q_H + Q_m = Q_s = \frac{\Delta T}{R} \quad (\text{X1.1})$$

where:

- $Q_F$  = heat flow due to fan, W,
- $Q_H$  = heat flow due to heater, W,
- $Q_m$  = heat flow through the metering box walls, W,
- $Q_s$  = heat flow through specimen, W,
- $R$  = thermal resistance of specimen,  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ,
- $\Delta T$  = temperature difference across specimen, K,
- $E_m$  = thermopile emf when net heat flow through metering box walls is negligible, and
- $E$  = thermopile emf.

The goal is to make  $Q_m$  equal to zero.  $Q_m$  can be described by:

$$Q_m = f_1(E) = mE + b \quad (\text{X1.2})$$

XI.1.2 To quantify  $m$ , at least two test runs must be performed with differing levels of  $E$ .  $E$  must be held constant within each test. The specimen surface to surface temperature difference for all tests must be constant and of the same value.  $Q_s$  can be approximated by assuming the design  $R$ . It is not necessary to know the  $R$  of the specimen. Plot  $Q_m$  calculated from Eq X1.1 versus  $E$ . The slope of the line is  $m$ .

The next step is to quantify  $b$  in Eq 2. Set the temperature difference across the specimen surface equal to zero ( $Q_s = 0$ ). Substituting Eq X1.2 into Eq X1.1 and setting  $Q_s = 0$  reduces Eq X1.1 to:

$$Q_F + Q_H = -(mE + b) \quad (\text{X1.3})$$

XI.1.3 Set  $E$  to a value such that the fan wattage is at operational conditions and the heater wattage is at the minimum value that maintains temperature control. This will assure that no heat is flowing anywhere except through the meter box walls. During this test, lateral heat flow must still be negligible. Using  $m$  that was determined, Eq X1.3 will yield  $b$ . The thermopile emf value that pertains to negligible net heat flow through the meter box walls  $E_m$  can then be calculated using Eq X1.2:

$$E_m = -(b/m) \quad (\text{X1.4})$$

## REFERENCES

- (1) Miller, R. G., "Hot Box Operating Techniques and Procedures: A Survey," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 15, No. 3, May 1987, pp. 153-166.
- (2) Rohsenow, W. M., Choi, H. L., *Heat, Mass and Momentum Transfers*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1961, p. 112.
- (3) Schenck, Hilbert, *Theory of Engineering Experimentation*, McGraw-Hill, NY, NY, Second Ed., 1968, Chap. 3, p. 46.
- (4) Bales, E., "ASTM/DOE Hot Box Round Robin," ORNL/Sub/84-97333/2, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, November 1988.
- (5) Miller, R. G., Perrine, E. L., and Linchan, P. W., "A Calibrated/Guarded Hot Box Test Facility," *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, 1978, p. 329.
- (6) Sherman, M., "Aged Thermal Resistance ( $R$ -value) of Foil-Faced Polyisocyanurate Foam," Thermal Insulation Board Proceedings of the ASHRAE/DOE-DEHL Conference on *Thermal Performance of External Envelopes of Buildings*, ASHRAE SP 28, 1981, pp. 952-964.
- (7) Gerace, R. R., Derderian, G. D., Cirignano, P. C., Orlandi, R. D., and Shu, L. S., "An Operational Procedure for Guarded Hot Box Testing," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 15, No. 3, May 1987, pp. 138-144.
- (8) Orlandi, R. D., Howanski, J. W., Derderian, G. D., and Shu, L. S., "Development of a Testing Procedure for a Guarded Hot Box Facility," *Symposium on Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the 80's, ASTM STP 789*, 1982, pp. 205-214.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



# Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 518; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue that has been adopted by the Department of Defense.

## INTRODUCTION

This test method presents a comprehensive assemblage of information and requirements on the complex problem of the measurement of the thermal transmission properties of insulations using a heat flow meter apparatus. For convenience, it is organized in four major parts:

- General Considerations (Sections 1 through 6)
- Apparatus and Calibration (Sections 7 through 9)
- Test Procedures and Report (Sections 10 through 14)
- Annexes (A1 through A4)

This test method shall be used in conjunction with Practice C 1045.

Many advances have been made in thermal insulation technology, both in measurement techniques and in improved understanding of the principles of heat flow through such materials. These advances have prompted revisions in the conceptual approaches to the measurement of the thermal transmission properties, see References (1), (2), (3), and (4).<sup>2</sup> All users of this test method should be aware of these concepts.

### 1. Scope

- 1.1 This test method covers the measurement of steady state thermal transmission through flat slab specimens using a heat flow meter apparatus.
- 1.2 This is a comparative (or secondary) method of measurement since specimens of known thermal transmission properties must be used to calibrate the apparatus. Properties of the calibration specimens must be traceable to an absolute measurement method, and should be obtained from or traceable to a recognized national standards laboratory.
- 1.3 The test method is applicable to the measurement of thermal transmission through a wide range of specimen properties and environmental conditions. The method has been used at ambient conditions of 10 to 40°C with thicknesses up to approximately 250 mm, and with plate temperatures from -195°C to 540°C at 25 mm thickness (Refs. (5, 6)).
- 1.4 To meet the requirements of this test method the thermal resistance of the sample must be greater than 0.10 K·m<sup>2</sup>/W in all directions.

- 1.5 It is not practical in a method of this type to try to establish details of construction and procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without pertinent technical knowledge. Thus users of this test method shall have sufficient knowledge to satisfactorily fulfill their needs. For example, knowledge of heat transfer principles, low level electrical measurements, and general test procedures is required.

- 1.6 Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development of improved or new methods or procedures by research workers.

- 1.7 Since the design of a heat meter apparatus is not a simple matter, a procedure for qualifying an apparatus is given in 7.8.

- 1.8 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

- C 167 Test Methods for Thickness and Density of Blanket or Batt Thermal Insulations<sup>3</sup>
- C 168 Terminology Relating to Thermal Insulating Materials<sup>3</sup>

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved Oct. 22, 1985. Published December 1985. Originally published as C 518 - 63T. Last previous edition C 518 - 76<sup>1,2</sup>.

<sup>2</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

- C 177 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties By Means of the Guarded Hot Plate Apparatus<sup>3</sup>
- C 519 Test Method for Density of Fibrous Loose-Fill Building Insulations<sup>3</sup>
- C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements<sup>3</sup>
- E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples<sup>4</sup>
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods<sup>5</sup>

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—The terms and symbols are as defined in Definitions C 168 with exceptions included as appropriate.

3.2 *Symbols and Units*—The symbols used in this test method have the following significance:

- $\lambda$  = thermal conductivity, W/m·K,
- $C$  = thermal conductance, W/m<sup>2</sup>·K,
- $R$  = thermal resistance, K·m<sup>2</sup>/W,
- $q$  = heat flux density, W/m<sup>2</sup>,
- $Q$  = heat flux, W,
- $A$  = area measured on a selected isothermal surface, m<sup>2</sup>,
- $L$  = thickness of specimen measured along a path normal to isothermal surfaces, m,
- $T_m$  = mean temperature, K,
- $\Delta T$  = temperature difference, K,
- $\rho$  = density of the material as tested, kg/m<sup>3</sup>,
- $S$  = sensitivity of heat flow transducer (W/m<sup>2</sup>)/V,
- $E$  = heat flow transducer output, V,
- $T_h$  = temperature of hot plate surface, K, and
- $T_c$  = temperature of cold plate surface, K.

### 4. Summary of Method

4.1 The heat flow meter apparatus establishes steady state unidirectional heat flux through a test specimen between two parallel plates at constant but different temperatures. By appropriate calibration of the heat flux transducer(s) with calibration standards and by measurement of the plate temperatures and plate separation, Fourier's law of heat conduction is used to calculate thermal conductivity, thermal resistance, or resistivity.

4.2 The accurate use of the method is limited by the capability of the apparatus to reproduce unidirectional constant heat flux density in the specimens, or by the precision in the measurement of temperature, thickness, EMF produced by heat flux transducer, etc.

### 5. Significance and Use

5.1 This method provides a rapid means of determining thermal properties with high precision and as such is useful in research and quality control work.

5.2 The thermal transmission properties of specimens of a given material or product may: (1) vary due to variability of the composition of the material; (2) be affected by moisture or other conditions; (3) change with time; (4) change with mean temperature and temperature difference, and (5) depend upon the prior thermal history. It must be recognized, therefore, that the selection of typical values of thermal transmission properties representative of a material

in a particular application should be based on a consideration of these factors and will not necessarily apply without modification to all service conditions. As an example, the method provides that the thermal properties shall be obtained on specimens that do not contain any free moisture although in service such conditions may not be realized. Even more basic is the dependence of the thermal properties on variables such as mean temperature and temperature difference. These dependencies should be measured or the test made at conditions typical of use.

5.3 Special care must be taken in the measurement procedure for specimens exhibiting appreciable inhomogeneities, anisotropies, rigidity, or especially high or low resistance to heat flow (see Practice C 1045). Special considerations are necessary when the measurements are conducted at either high or low temperatures, in a vacuum or in hazardous gases.

5.4 The determination of the accuracy of the method for any given test is a function of the apparatus design, of the related instrumentation and of the type of specimens under test (see Section 9), but this method is capable of determining thermal transmission properties within  $\pm 2\%$  of those determined by Test Method C 177 when the ambient temperature is near the mean temperature of the test ( $T$  (ambient) =  $T$  (mean)  $\pm 1^\circ\text{C}$ ), and in the range of 10 to 40°C.

5.4.1 Where certification of measurement by this test method is required, the apparatus shall have the capabilities required in 7.8 and one of the following procedures must be followed:

5.4.1.1 The testing laboratory apparatus shall be calibrated within 24 h before or after the certification test using calibration standards that have been issued or whose values have been established by a recognized National Standards Laboratory not more than five years prior to the certification date. The average of two calibrations shall be used as the calibration factor and the specimen(s) certified with this average value. When the change in calibration factor is greater than one percent, the standard specimen shall be retested and a new average calculated. If the change in calibration factor is still greater than 1 % the apparatus must be calibrated using the procedure in Section 8.

5.4.1.2 Where both the short and long term stabilities of the apparatus have been proven to be better than 1 % of the reading, see 8.4, the apparatus may be calibrated at less frequent intervals, not exceeding 30 days. The specimens so tested cannot be certified until after the calibration following the test and then only if the change in calibration factor from the previous calibration test is less than 1 %. When the change in calibration is greater than one percent, test results from this interval shall be considered void and the test repeated in accordance with 5.4.1.1.

5.4.2 The precision (repeatability) of measurements made by the heat flow meter apparatus calibrated as in 5.4.1 are normally much better than  $\pm 1\%$  of the mean value. This precision is required to identify changes in calibration and is desirable in quality control applications.

### 6. Limitations to Test Method

#### 6.1 Limitations Due to Apparatus:

6.1.1 The apparatus shall not be used at temperatures, thicknesses, or resistances, other than those within the range

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

of the calibration, unless it can be shown that there is no difference in accuracy.

6.1.2 The apparatus must be capable of maintaining at least a 10°C temperature difference across the specimen for the duration of the test, unless a smaller  $\Delta T$  is a requirement of a particular test.

6.2 *Limitations Due to the Specimens:*

6.2.1 The specimens under test may also limit the use of the test method and these limitations are outlined in Practice C 1045.

7. Apparatus

7.1 The construction details given in this section should be understood by the user of this test method. While it is mandatory that these details be carefully followed when constructing an apparatus, it behooves the user to verify that the equipment was built as specified. Serious errors of measurement may result from this oversight.

7.2 *General:*

7.2.1 The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are discussed in Annex A1. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers, equipment to measure and control temperature, thickness, and the output of the heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this test method. There are distinct advantages for each method in practice and these are discussed in Annex A1.

7.2.2 The working surfaces of the plates and the heat flux transducer (that is, the surfaces making contact with the specimens) shall be painted or otherwise treated to have a total hemispherical emittance of greater than 0.84 at operating temperatures (Note 1).

NOTE 1—Hard anodizing of aluminum produces a surface with a total hemispherical emittance of approximately 0.85. Several paints are available which when applied as directed, produce a total hemispherical emittance of approximately 0.86.

7.3 *Plate Assemblies, Hot and Cold*—The two plate assemblies provide isothermal surfaces in contact with either side of the test specimen. The assemblies consist of heat source or heat sink, a high conductivity surface, means to measure surface temperature, and means of support. A heat flux transducer may be attached to one, both or neither plate assembly, depending upon the design. In all cases the area defined by the dimensions of the heat flux transducer is called the metering area and the remainder of the plate is the guard area.

7.3.1 The portion of each plate assembly in contact with the heat flux transducer, or if a heat flux transducer is not mounted on the plate assembly, the portion in contact with the sample, shall consist of a high conductivity material, usually metal, known as the isothermal plate. The isothermal plate shall be supported so as to minimize temperature gradients across its surface. For a 2% total uncertainty, deviations from isothermal conditions over the plate surface of no more than  $\pm 0.5$  K shall be allowed.

7.3.2 A means shall be provided to maintain the temperature of the isothermal plates at the desired level. Examples

are fluid baths, electrical heaters and combinations of these (see Refs (7, 8, 9)).

7.3.3 If a heat flux transducer is mounted at the midplane of the specimen then means shall be provided to determine the average temperature of the transducer in order to apply temperature corrections to the calibration, except when test temperatures are equal to those used in calibration, in which case no correction is required.

7.3.4 Means shall be provided to measure the temperature of the surfaces of the heat flux transducer or plates in contact with the specimen.

7.3.5 The surface plates shall be sufficiently rigid to maintain flatness and parallelism to within one-tenth the accuracy required of the final result. For measurements on non-rigid materials and an allowable total uncertainty of  $\pm 2\%$ , a flatness and parallelism of 0.2% of the maximum linear dimension of the heating unit is thus required (Note 2). One recommended way to check this is to generate a L-map over the metering area. This is discussed fully in Ref (10).

NOTE 2—The planeness of the surface can be checked with a straightedge, of a length greater than the width or diameter of the unit, held against the surface and viewed with a light behind the straightedge. Departures as small as 25  $\mu\text{m}$  are readily visible, and larger departures can be measured using shimstock or thin paper.

7.3.5.1 The parallelism of the plates must be maintained for several reasons. In most cases it is the plate separation which is measured in order to determine specimen thickness. Furthermore the plate parallelism is important in maintaining consistent surface contact with specimens in repeat testing (such as calibration), and is required to maintain a uniform temperature difference across the specimen(s).

7.3.6 The rigidity, flatness, and parallelism of the plates may impede the testing of rigid specimens where it is not possible to obtain good surface contact. In such cases the use of a thin sheet of suitable homogeneous material may be interposed between the specimen and the plate surfaces. This thin sheet should have a low thermal resistance relative to the specimen. The resistance of the thin sheet should be determined using a Test Method C 177 apparatus. The resistance of the composite sandwich (sheet-rigid specimen-sheet) is then determined and the value of the sheet resistance (determined in a separate test) subtracted from the total resistance measured.

7.4 *Temperature Measuring and Control Systems:*

7.4.1 Any proven device possessing adequate accuracy may be used for measurement and control of the temperatures in the apparatus.

7.4.2 Surface temperatures are often measured by permanently mounting temperature sensors, such as thermocouples, RTD's or thermistors, in grooves or flush with the working surfaces on both plates.

7.4.3 Many existing systems utilize a minimum of two temperature sensors to determine the average temperature of each isothermal surface. However, to determine the actual surface temperature variations under typical operating conditions, the temperature must be sampled at considerably more than two points. This is especially true when the specimen surface temperature itself must be measured or when the specimen is highly inhomogeneous. Therefore, no strict specification is given as to the number of temperature

sensors that must be used for each surface. However, the user must report the uncertainty of the temperature measurement, including the component, due to temperature nonuniformity across the surface. This determination is probably best done with a multijunction thermocouple in ad-hoc experiments and not part of every measurement. (See Ref (10).) In some cases where temperature mapping of the plate surfaces has indicated high uniformity under all conditions of use, one thermal sensor per surface has been satisfactorily used.

7.4.3.1 Special precautions should be taken to ensure that the temperature sensors are thermally anchored to the surface to be measured and that the temperature gradients along the wires leading to the sensors are minimized. If sensors on opposing surfaces are connected differentially, they must be electrically insulated from the plates with a resistance of  $1\text{M}\Omega$  or greater (11, 12).

7.4.3.2 Thermocouples mounted in the surfaces of the plates should normally be made of wire not larger than 0.51 mm in diameter (No. 24 B & S gage). Thermocouples placed against or set into the surfaces of the specimens should be made of wire not larger than 0.25 mm in diameter (No. 30 B & S gage). For information concerning sensitivity and accuracy of thermocouples in the cryogenic temperature range, and installation, see Refs (6) and (13).

7.4.3.3 Temperature sensors should be calibrated to an accuracy equivalent to that for thermocouples conforming to Tables E 230. The temperature measuring system shall have an equivalent accuracy. The precision of the temperature measuring system may need to be better than this to detect the effect of drift on the results as discussed in 7.9. Tables E 230 lists both "standard" and "special" limits on the accuracy of thermocouples. The accuracy required by a heat flow meter apparatus can best be determined by carrying out an error analysis (see Section 9), and then calibrating the temperature sensors to the degree required.

7.5 *Heat Flux Transducer*—The heat flux transducer is a device including both the metering and guard areas which measures heat flux by sensing the temperature difference across a core of appropriate thermal resistance and thermal stability. The metering area usually consists of a number of differentially connected temperature sensors placed on each face of the core and surface sheets to protect the assembly. The guard area is usually constructed of the same material as the core. A properly designed transducer will have a sensitivity that is essentially independent of the specimens' thermal properties (14, 15).

7.5.1 *Types of Heat Flux Transducers*—The type of heat flux transducer described in this test method is called a gradient type. This type consists of a slab of material, the "core," across which the temperature gradient is measured, normally with a thermopile.

7.5.2 *Temperature Difference Detector*—The temperature difference across the core material shall be measured with a sensitive stable temperature detector. The main transducer surfaces are assumed to be isothermal, so that heat flow will be normal to them. Precautions must be taken to limit the effect of heat flow through the leads on the output of the temperature difference detector. Often the heat flux transducer is also instrumented to measure one of the surface temperatures of the specimen(s).

7.5.3 *Surface Sheets*—To prevent damage to the temperature difference detector that will affect its calibration, both surfaces shall be covered with a layer of material as thin as compatible with protection from thermal shunting of the temperature difference detector wires. The working surface of the heat flux transducer shall be smoothly finished and conform to the desired geometric shape to within the limits of 7.3.

7.6 *Plate Separation, Specimen Thickness*—A means shall be provided to determine the average separation between the heating and cooling plate surfaces during operation. Rigid specimens generally act as the spacers themselves and plate separation is determined by their thickness at operating temperature. In this case a small constant force is generally applied to hold the plates against the specimen. It is unlikely that a pressure greater than 25 kPa (approximately 50 lbf/ft<sup>2</sup>) will be required. For easily compressible specimens, small stops interposed between the corners of the hot and cold plates, or some other positive means shall be used to limit the compression of the specimens, (Note 3). Provision must be made for checking the linearity of any thickness measuring system.

NOTE 3—Because of the changes of specimen thickness possible as a result of temperature or compression by the plates, it is recommended that specimen thickness be measured in the apparatus, at the existing test temperature and compression conditions whenever possible.

7.7 *Edge Insulation*—Heat loss from the outer edges of the heat flow meter apparatus and specimens shall be restricted by edge insulation or by governing the surrounding air temperature or by both methods. The three different configurations differ in their sensitivity to edge heat losses as is discussed in Annex A1 (2, 4, 16).

7.7.1 For all three configurations, the sensitivity to edge heat losses is strongly related to the sensitivity of the transducer to temperature differences along its main surface and therefore only experimental checks while changing environmental conditions can confirm, for each operating condition, the magnitude of the effect of edge heat losses on measured heat flux. This error should be smaller than 0.5%. An approximate guideline is to maintain power lost through the edges below 5% of the power flowing through the specimen.

7.8 *Measuring System Requirements for Certification*—When the apparatus is used for certification testing, the measuring system shall have the following capabilities:

7.8.1 The accuracy of the measurement of the temperature difference across the specimens shall be within  $\pm 0.5\%$ . The accuracy of the measurement of the output from the heat flux transducer shall be within  $\pm 0.6\%$ .

7.8.2 A voltage sensitivity of better than 0.2% of the minimum output (from the transducer) to be measured.

7.8.3 Sufficient linearity so that it contributes less than 0.2% error at all outputs.

7.8.4 Sufficient input impedance so that it contributes less than 0.1% error for all readings. One megohm has been found adequate for many apparatuses.

7.8.5 Sufficient stability so that it contributes less than 0.2% error during the period between calibrations, or 3 days, whichever is greater.

7.8.6 Adequate noise immunity so that less than 0.2% rms noise occurs in the readings.

7.8.7 Where direct readout equipment is used, adequate provision shall be made for calibration of the electronic circuitry, independent of the remainder of the apparatus, and shall contribute no more than 0.2 % error, for each variable.

7.9 *Proven Performance*—Any heat flow meter apparatus that is new or has been modified must be tested for the following characteristics and corrections shall be made where a change of greater than one percent occurs in the transducer output due to the effects of 7.9.1 to 7.9 over the range of operation and are recommended for changes of 0.3 % over the range of operation.

7.9.1 *Zero Offset*—If there is any output from the transducer for zero heat flux, this may be due to:

7.9.1.1 Electrical contact resistance on a transducer with low output: improve connections to eliminate the problem as this type of output may be temperature dependent.

7.9.1.2 Also check grounding circuits because such a signal may be due to AC pickup in the leads from the transducer. If after checking 7.9.1.1 and 7.9.1.2 there is still a zero off-set, it may be possible to correct for this by assuring that the calibration curve of output versus heat flux is linear over the range of operating conditions.

7.9.2 Sensitivity to warm or cold plate temperature non-uniformity. Check for temperature non-uniformity under all operating conditions.

7.9.3 Drift in the transducer due to material aging or delamination. This can be used to determine the required calibration frequency.

7.9.4 Temperature coefficient of the transducer sensitivity, as this depends on the type of temperature detectors used in the temperature difference detector (thermocouple materials used in the thermopile) and the type of material used for the transducer core. If it is found that the sensitivity is temperature dependent, a curve of sensitivity versus temperature shall be developed and used to correct measurement data.

7.9.5 Heat flow down the leads. One possible way to check for this is to move one's hand across the surface of the transducer between the metering area to the point where the leads exit the plate assembly, while observing the transducer output. In a well designed plate or transducer assembly there should be no observable output from the transducer except in the metering area.

7.9.6 Effect of the thermal conductivity of the specimen on the sensitivity of the transducer. A "thermal shorting" effect between elements caused by low thermal resistance between the sensors of the thermopile or a funneling of heat through the sensors can change the sensitivity of the meter. This can best be tested by running specimens with known widely different thermal conductivities.

7.9.7 Effect of loading pressure on the transducer sensitivity, if the transducer core is flexible.

7.9.8 The test results obtained by this method can only be assured if the limitations of the apparatus are known. To establish the limitations, one must prove the performance by comparing the results with materials of similar thermal properties previously tested on a guarded hot plate apparatus as those to be evaluated.

7.9.8.1 A single point of reference may lead to serious errors. It is best to select a range of transfer standards having known thermal transmission properties which cover the

range of values to be tested, in both resistance and thickness.

7.9.8.2 If the apparatus is to be used at thicknesses greater than that of the available reference materials, a series of calibration measurements must be performed to insure that the equipment does not introduce additional errors which may be due to lateral heat losses or gains brought about by insufficient guarding (4, 17).

7.10 *Environmental Control*—In many applications, it is desirable to control the environment surrounding the test specimen to reduce edge heat losses and it is especially important if the mean test temperature must be below the ambient temperature, in order to avoid condensation on the cold plate.

7.10.1 A cabinet or enclosure surrounding the heat flow meter assembly to maintain the ambient temperature at the mean temperature of the specimen may also be used as a means to maintain the dew point temperature at least 5 K lower than the temperature of the cold plates, that will prevent condensation and moisture pickup by the specimen. This is required when conducting tests at mean temperatures substantially lower than the laboratory air temperature.

7.10.2 Any environmental control system employed in conjunction with a heat flow meter apparatus shall be capable of maintaining its set point condition within  $\pm 1^\circ\text{C}$  in temperature, and  $\pm 2\%$  in humidity.

## 8. Calibration

8.1 The calibration of a heat flow meter apparatus is a very critical operation. Since lateral heat losses or gains of heat are not automatically controlled or eliminated, but only lessened by increasing the size of the guard area and edge insulation, there is no guarantee that the heat losses or gains are negligible under all testing conditions. To ensure that the equipment is performing properly with specimens of different thermal resistances, the apparatus must be calibrated with materials having similar characteristics as the materials to be evaluated. These reference materials must be evaluated through an absolute test method such as the guarded hot plate, Test Method C 177.

8.1.1 In order to determine the calibration factor, and aid in the determination of the apparatus precision and bias, a series of repeat measurements should be run on one calibration standard with known properties. The average of these tests shall be used to determine the calibration factor of the heat flow transducer.

8.1.2 To determine the possible effects of test materials on the calibration factor a series of tests should be run on varying calibration standards with known properties such as a range of densities, thicknesses, or thermal resistance. Such a series of tests will help define the uncertainty of the test results for the apparatus.

8.2 *Calibration Curve*—Most heat flux transducers are temperature sensitive and the sensitivity will change with the mean temperature; therefore, measurements must be repeated at different mean temperatures to cover the expected temperature range of the heat flow meter apparatus. A calibration curve or equation shall be prepared (sensitivity versus mean temperature of the transducer assembly). The calibration should be done using at least two specimens of widely differing thermal resistance if the apparatus is to be used for certification purposes.

8.3 *Calibration Drift*—Check the heat flow meter apparatus for calibration at least once every month; maintain a running record of calibration results. If the checks indicate a difference in the measurement of the thermal resistance of the standard specimens of more than 1 %, then prepare a new calibration curve or equation. It is unlikely that the shape of the curve will change. The curve can be shifted to the new position.

8.4 *Maintenance of Calibration*—The use of secondary reference standards is recommended for continuous monitoring of calibration. Each secondary reference specimen should be tested a minimum of five times in order to establish control limits, within which any one test of the reference specimen should fall (these limits should also encompass operating variability if applicable). If a calibration check is made using one secondary reference specimen and the results fall outside the previously established control limits a second reference specimen should be tested before any calibration changes are considered. If such tests confirm a shift in calibration and the cause is not obvious (plate temperature shifts,  $\Delta L$  readout shift, etc.), new calibration coefficients shall be developed based on the primary reference standards.

9. Error Analysis

9.1 A complete error analysis is complex. However, it is mandated for compliance with this test method. The performance of this analysis involves consideration of:

9.1.1 Estimates of errors in each individual measurement procedure and propagation of these errors to the final result.

9.1.2 Measurements to determine apparatus sensitivity to intentional deviations from normal operations. and

9.1.3 Measurements on reference materials and participation in round-robin programs.

9.1.4 For a more complete discussion of this error analysis the reader is directed to Test Method C 177, and Ref (10).

9.2 To illustrate a procedure of error analysis estimation, consider the operational definition of thermal conductivity:

$$\lambda = Q \cdot L / A \cdot \Delta T$$

The uncertainties in  $Q$ ,  $A$ ,  $L$ , and  $\Delta T$  ( $\delta Q$ ,  $\delta A$ ,  $\delta L$ , and  $\delta \Delta T$ ) can be used to form the uncertainty  $\delta \lambda$  by the usual error propagation formula where the total uncertainty is calculated from the square root of the sums of the squares of the individual standard deviations.

$$\delta \lambda^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta A/A)^2 + (\delta L/L)^2 + (\delta \Delta T/\Delta T)^2$$

This equation assumes that the errors in  $Q$ ,  $A$ , etc., are random and independent of each other since the covariance terms are omitted. This is valid here if different instrumentation is used for measurements on each of the variables.

9.2.1 An alternative approach, which generally leads to larger calculated uncertainty, is to sum the upper limits of the individual uncertainties (10).

9.2.2 Care must be taken to properly evaluate all of the uncertainties in the variables  $Q$ ,  $A$ , etc. For example, the obvious sources of error in  $Q$  are those causing extraneous transverse heat flow along leads and deviations from one dimensional heat flow. However, an often neglected but important quasi-heat leak is that caused by a temperature drift of the transducer itself, or in the heater, or both.

9.2.2.1 This can readily be estimated from the heat capacity of the transducer assembly and the drift detection limit of the measurement system. The error in  $\Delta T$ ,  $\delta \Delta T$ , can be caused by calibration errors and measurement errors but also by incorrect placement, incorrect thermal anchoring, and disturbances introduced by the thermocouple itself.

9.3 Numerous experiments can be performed to determine the sensitivity of the measurement results to deviations from normal operating conditions. This sensitivity combined with the probable deviation under normal operating conditions can be used to estimate the error from this source. As one example, the effect of imperfect guard balance control can be determined by purposely offsetting the guard (if this is possible) by a sufficient  $\Delta T$  in both directions and measuring the differences in the measured output.

9.3.1 Care should be taken to not use such large offsets that nonlinear effects occur in the specimens. These results combined with the probable value of the offset during normal operation yield the error due to imperfect guard balance.

9.4 Finally, measurements should be performed on accepted reference materials, if available, to qualify the apparatus. Care should be taken here to ensure that the reference materials have characteristics similar to the specimens to be measured, and that the uncertainties of the standards themselves are known.

9.5 The total estimated imprecision can be listed in a table of errors such as shown in Table 1. This table is shown as an example only and does not represent any one particular heat

TABLE 1 Estimates of Random and Systematic Errors at Room Temperature

Variable	Absolute Variations		Percent Variations	
	Random	Systematic	Random	Systematic
Mean Temperature, $T$	0.02 K	0.2 K	0.007	0.07
$\Delta T$	0.01 K	0.2 K	0.04	0.40
$\Delta L$	0	0.1 mm	0	0.40
Transducer area	0	50 mm <sup>2</sup>	0	0.10
Heat flux				
drift	1 mW	1 mW	0.2	0.2
lateral	1 mW	2 mW	0.2	0.4
calibration	0	2 mW	0	0.2
Temperature				
drift	0.05 K	0.05 K	0.01	0.01
calibration	0	0.1 K	0	0.4
$\lambda$	0.2 mW/m·K	0.3 mW/m·K	0.4	0.6

flow meter apparatus since the errors will be specific to each apparatus.

## 10. Test Procedures

10.1 *Foreword on Testing Procedures*—The simplicity of this test procedure may lead one to overlook very important factors which may affect the results. To ensure accurate measurement, the operator must be fully instructed in the operation of the equipment. Furthermore, the equipment must be properly calibrated with reference materials having similar heat transfer characteristics. It is also necessary that the specimen be properly prepared for the evaluation.

### 10.2 Sampling and Preparation of Specimens:

10.2.1 *Test Specimens*—One or two-piece specimens may be used, depending on the configuration selected for the test. Where two pieces are used, they shall be selected from the same sample to be essentially identical in construction, thickness, and density. For loose fill materials, the method specified in the material specification shall be used to produce a specimen or specimens of the desired density.

10.2.2 *Selection of Specimens*—The specimen or specimens shall be of such size as to cover the heat flux transducer, cold plate and warm plate surfaces and shall either be of the actual thickness to be applied, or of sufficient thickness to give a true average representation of the material to be tested.

10.3 *Specimen Conditioning*—Details of the specimen selection and conditioning are preferably specified in the material specification. Where such specifications are not given, the specimen preparation shall be conducted in accordance with the requirement that materials shall not be exposed to temperatures that will change the specimens in an irreversible manner.

### 10.4 Measurements on Specimens:

10.4.1 *Blanket and Batt Type Materials*—When specified, the test thickness of blankets and batt type materials shall be determined before testing in accordance with Test Methods C 167, provided that good contact is maintained between the specimen and the isothermal plates.

### 10.5 Limitations on Specimen Thickness:

10.5.1 *General*—The combined thickness of the specimen or specimens, the heat flux transducer and any damping material, which in total equals the distance between the cold and hot plates, must be restricted in order to limit the effect of edge losses on the measurement of heat flux. The edge losses are affected by the edge insulation and the ambient temperature, so the requirements on both these parameters must be met as well.

10.5.2 *Maximum Spacing Between Hot and Cold Plates*—The maximum allowable distance between the hot and cold plates during the test, is related to the dimensions of the heat flux transducer, the heat metering area, the width of the non-metering plate, the construction of the heat meter apparatus, and the properties of the specimen. No suitable theoretical analysis is available to predict the maximum allowable thickness of specimens. It is possible to use the results of an analysis for a similarly sized guarded hot plate as a guide (8, 18).

## 11. Procedure of Measurement

11.1 *Temperature Difference and Gradient*—For any test,

make the temperature difference across the specimen not less than 10 K. For specimens that are expected to have a large thermal resistance, a larger temperature difference in the specimen is recommended. The actual temperature difference or gradient is best specified in the material specifications or by agreement of the parties concerned.

11.2 *Edge Insulation*—Wrap the edges of the specimens with the required thermal insulation to reduce edge heat losses to an acceptable level (see 7.7).

11.3 *Settling Time and Measurement Interval*—Check for thermal equilibrium by observing and if possible recording, the mean temperature and the emf output of the heat flux transducer, the mean temperature of the specimens, and the temperature drop across the specimen. Make observations at time intervals of at least 10 minutes unless experience has shown that a shorter time interval may be used until five successive observations yield values of thermal conductance which fall within one-half percent of their mean value. If the five readings show a unidirectionally increasing or decreasing trend the data is suspect and additional sets of readings shall be taken. For high density specimens ( $\rho > 40 \text{ Kg/m}^3$ ) or for low conductance specimens ( $C < 0.05 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ ) the time between readings may have to be increased to 30 minutes or longer (19).

## 12. Calculation

12.1 *Density and Change in Mass*—When required, calculate the density of the dry specimen as tested,  $\rho$ , the loss of mass due to conditioning of the material, and the mass regain of the specimen during test.

12.1.1 *Density of Batt and Blanket Specimens*—It has been found that in characterizing the thermal performance of low density materials it is important to measure the mass of the specimens in contact with the heat flux transducer metering area. For these materials, the area of the specimen directly measured must be cut out and its mass determined after testing. This procedure is desirable for all specimens.

12.2 *Thermal Properties for One Specimen*—When only one specimen is used, calculate the thermal conductance of the specimens as follows:

$$C = S \cdot E / \Delta T$$

and where applicable, calculate the thermal conductivity, as follows:

$$\lambda = S \cdot E \cdot (L / \Delta T)$$

12.3 *Thermal Properties for Two Specimens*—When two specimens are used, calculate the total thermal conductance,  $C$ , as follows:

$$C = S \cdot E / (\Delta T_1 + T_2)$$

The  $\lambda$  factor, that is, the average thermal conductivity of the specimen is calculated as follows:

$$\lambda_{\text{ave}} = \frac{S \cdot E}{2} \frac{L_1 + L_2}{\Delta T_1 + \Delta T_2}$$

where the subscripts refer to the two specimens.

12.4 Other derived thermal transmission properties may be calculated but only under the provisions given in Practice C 1045.

12.5 *Thermal Properties for Two Transducers*—All pertinent specifications of 12.2 apply on this configuration,

provided  $S \cdot E$  will be replaced by  $(S' \cdot E' + S'' \cdot E'')/2$ , where the superscripts ' and '' refer to the first and second heat flux transducer, respectively.

### 13. Precision and Bias

13.1 The precision and bias of this test method cannot be stated quantitatively for all apparatus variations and test conditions. However, it is mandated that for compliance with this test method, any result must be accompanied with its uncertainty. Further details on doing this are given in Section 9.

13.2 While no definitive statement of precision or bias can be made at this time, results of a round robin test involving both high and low density mineral wool specimens are currently being analyzed. In addition inter-lab testing carried out between nine laboratories involve in the National Voluntary Laboratory Accreditation Program is currently showing a range of laboratory test results of 4.3 % between the laboratory values of thermal conductivity obtained on similar but not identical specimens. The standard deviation about the mean value for three different tests was found to be 1.06 %.

13.3 It should be noted that the only statistically valid procedure to determine uncertainty is to force all sources of systematic bias to be exhibited as random errors and then uncertainty can be directly estimated from imprecision. However, this is impractical since it involves variation of all measurement variables (Global set) and cost constraints make this impossible. For example, this implies the repetition of an experiment with differently calibrated thermocouples, different size and configuration of the apparatus, different operators, different environment, differently calibrated instrumentation, etc. For any one given apparatus a careful error analysis as outlined in Section 9 will, in most cases, show up any major difficulties, which may need correcting in order to improve the measurement accuracy of the heat flow meter apparatus.

### 14. Report

14.1 The report of the results of each test shall include the following information with all data to be reported in both SI and inch-pound units unless specified otherwise:

14.1.1 Name and any other pertinent identification of the material including a physical description.

14.1.2 Description of the specimen and its relationship to the sample.

14.1.3 Thickness of the specimen as received and as tested. In a two piece specimen configuration this is the thickness of one piece only.

14.1.4 Method and temperature of the conditioning, K or °C.

14.1.5 Density of the conditioned specimen as tested  $\text{kg/m}^3$ .

14.1.6 Mass loss of the specimen during conditioning and testing, in percentage of conditioned mass.

14.1.7 Mass regain of the specimen during test, in percentage of conditioned mass.

14.1.8 Average temperature gradient in the specimen during test as computed from the temperatures of the hot and cold surfaces, K/m.

14.1.9 Mean temperature of the test, K or °C.

14.1.10 Heat flux per unit area through the specimen  $\text{W/m}^2$ .

14.1.11 Thermal conductance,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

14.1.12 Orientation and position of the heat meter apparatus during test (vertical, horizontal, etc.) and whether the meter was against the hot or cold surface of the specimen and whether the edges of the specimen(s) were sealed or open to the ambient.

14.1.13 Duration of the measurement portion of the test, min or h.

14.1.14 For loose-fill materials report the sample preparation followed.

14.1.15 Date of the test, the date of the last heat meter calibration, and the type or types of materials used.

14.1.16 For certification testing only, the specimens used in calibration must be identified as to the type, thermal resistance, date of specimen certification, source of certification, expiration date of calibration and the certification test number.

14.1.17 Statement of Compliance or, where circumstances or requirements preclude complete compliance with the procedures of the test, agreed exceptions. A suggested wording is: "This test conformed with all requirements of ASTM C 518 - \_\_\_\_\_ with the exception of (a complete list of exceptions follows)."

14.1.18 For direct reading apparatus, the results of the calibration of electronic circuitry and equipment, or a statement of compliance including date, and a statement of compliance on linearity requirements.

14.1.19 Estimated or calculated uncertainty in reported values.

ANNEXES

(Mandatory Information)

TABLE A1.1 Limits of Error for Thermocouples

NOTE 1—Limits of error in this table apply to new thermocouple wire, normally in the size range 0.25 to 3 mm in diameter (No. 30 to No. 8 Awg) and used to measure temperatures not exceeding the recommended limits of Table 2. If used at higher temperatures these limits of error may not apply.

NOTE 2—Limits of error apply to new wire as delivered to the user and do not allow for calibration drift during use. The magnitude of such changes depends on such factors as wire size, temperature, time of exposure, and environment.

NOTE 2—NOTE 3—Where limits of error are given in percent, the percentage applies to the temperature being measured when expressed in degrees Celsius. To determine the limit of error in degrees Fahrenheit multiply the limit of error in degrees Celsius by 9/5.

Thermo- couple Type	Temperature Range		Limits of Error-Reference Junction 0°C (32°F)			
	°C	°F	Standard		Special	
			°C (whichever is greater)	°F	°C (whichever is greater)	°F
T	0 to 350	32 to 700	±1 or ±0.75 %	Note 3	±0.5 or 0.4 %	Note 3
J	0 to 750	32 to 1400	±2.2 or ±0.75 %		±1.1 or 0.4 %	
E	0 to 900	32 to 1600	±1.7 or ±0.5 %		±1 or ±0.4 %	
K	0 to 1250	32 to 2300	±2.2 or ±0.75 %		±1.1 or ±0.4 %	
R or S	0 to 1450	32 to 2700	±1.5 or ±0.25 %		±0.6 or ±0.1 %	
B	870 to 1700	1600 to 3100	±0.5 %		—	
T <sup>a</sup>	-200 to 0	-328 to 32	±1 or ±1.5 %		s	
E <sup>a</sup>	-200 to 0	-328 to 32	±1.7 or ±1 %		s	
K <sup>a</sup>	-200 to 0	-328 to 32	±2.2 or ±2 %		s	

<sup>a</sup> Thermocouples and thermocouple materials are normally supplied to meet the limits of error specified in the table for temperatures above 0°C. The same materials, however, may not fall within the sub-zero limits of error given in the second section of the table. If materials are required to meet the sub-zero limits, the purchase order must so state. Selection of materials usually will be required.

<sup>b</sup> Little information is available to justify establishing special limits of error for sub-zero temperatures. Limited experience suggests the following limits for Types E and T thermocouples:

Type E -200 to 0°C ±1°C or ±0.5 % (whichever is greater)

Type T -200 to 0°C ±0.5°C or ±0.8 % (whichever is greater)

These limits are given only as a guide for discussion between purchaser and supplier.

Due to the characteristics of the materials, sub-zero limits of error for Type J thermocouples and special sub-zero limits for Type K thermocouples are not listed.

A.3 Response of Heat Flux Transducers

A3.1 Configurations—The general features of a heat flow meter apparatus with the specimen or the specimens installed are shown in Fig. A2.1. A heat flow meter apparatus consists of two isothermal plate assemblies, one or more heat flux transducers, equipment to measure and control temperature, thickness and the output of the heat flux transducers and equipment to control the environmental conditions when needed. Configuration a is called single transducer, one face; the heat flux transducer may be placed against either plate. The Configuration b is called two transducer, both faces. The Configuration c is called single transducer, mid-plane; in this case, the specimens should be halves of the same specimen (20). Each configuration will yield equivalent results if used within the limitations stated in this method. For a particular heat flux transducer, the test configuration that has the fastest response, that is shortest settling time, is best determined by experiment. Four specimens of different materials, such as urethane, ceramic fiber board, a rubber, and a high conductivity, low-thermal capacity material, each of which is conditioned to the mean test-temperature, should be tested in each configuration. A study of these will allow either the selection of the proper configuration for each type of material, or the selection of a reasonable configuration for all types.

A3.1.1 In order to predict settling times for all types of specimens, each of the above specimens must be retested

after being conditioned to temperatures both below and above the mean temperature of the test.

A3.2 Time Responses of Heat Flux Transducers:

A3.2.1 High Thermal Resistance Transducer—A transducer with a high thermal resistance is generally used in Configuration a. When the specimens are preconditioned to the mean temperature of the test and when the plates are capable of both heating and cooling the specimen, the time response of a high resistance transducer will be more rapid than a comparable guarded hot plate apparatus. However, if the heat flux transducer has appreciable mass the response will not be rapid.

A3.2.1.1 The temperature drop across a high thermal resistance transducer may be greater than desirable, that is, one percent of the total, when used in Configuration c, and thus its use in this configuration is not recommended.

A3.2.1.2 Configuration b can be used to obtain very rapid response times if both plates are capable of heating and cooling and if the outputs of both transducers are summed, (15). Configuration b is always faster than Configuration a with the same transducers and specimens and can be comparable to Configuration c if a low thermal resistance transducer is employed.

A3.2.2 Low Thermal Resistance Transducers—The low-thermal resistance, gradient-type heat flux transducer is better suited to the Configuration c. The temperature drop across the low-resistance transducer is small enough so that the two specimens can be considered as halves of a single

TABLE A1.2a Conversion Factors (Thermochemical)

NOTE—Conversion factors for thermal resistivity and thermal conductance can be found by using these tables in the reverse direction.

Thermal Conductivity <sup>a</sup>						
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} (^\#)$	$W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$cal \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$kg \cdot cal \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^\circ F^{-1}$	$Btu \cdot h \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1}$
1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} =$	1.000	$1.000 \times 10^{-2}$	$2.390 \times 10^{-3}$	0.8604	0.5782	6.938
1 $W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1} =$	100.0	1.000	0.2390	86.04	57.82	693.8
1 $cal \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1} =$	418.4	4.184	1.000	360.0	241.9	2903
1 $kg \cdot cal \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} =$	1.162	$1.162 \times 10^{-2}$	$2.778 \times 10^{-3}$	1.000	0.6720	8.064
1 $Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^\circ F^{-1} =$	1.730	$1.730 \times 10^{-2}$	$4.134 \times 10^{-3}$	1.488	1.000	12.00
1 $Btu \cdot in \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1} =$	0.1441	$1.441 \times 10^{-3}$	$3.445 \times 10^{-4}$	0.1240	$8.333 \times 10^{-2}$	1.000

Thermal Resistance <sup>a</sup>					
	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1} (^\#)$	$K \cdot cm^2 \cdot W^{-1}$	$K \cdot cm^2 \cdot s \cdot cal^{-1}$	$K \cdot m^2 \cdot kg \cdot cal^{-1}$	$^\circ F \cdot ft^2 \cdot h \cdot Btu^{-1}$
1 $K \cdot m^2 \cdot W^{-1} =$	1.000	$1.000 \times 10^4$	$4.184 \times 10^4$	1.162	5.674
1 $K \cdot cm^2 \cdot W^{-1} =$	$1.000 \times 10^{-4}$	1.000	4.184	$1.162 \times 10^{-4}$	$5.674 \times 10^{-4}$
1 $K \cdot cm^2 \cdot s \cdot cal^{-1} =$	$2.390 \times 10^{-5}$	0.2390	1.000	$2.778 \times 10^{-5}$	$1.356 \times 10^{-4}$
1 $K \cdot m^2 \cdot h \cdot kg \cdot cal^{-1} =$	0.8604	$8.604 \times 10^3$	$3.600 \times 10^4$	1.000	4.882
1 $^\circ F \cdot ft^2 \cdot h \cdot Btu^{-1} =$	0.1762	$1.762 \times 10^3$	$7.373 \times 10^3$	0.2048	1.000

<sup>a</sup> Units are given in terms of (1) the absolute joule per second or watt, (2) the calorie (thermochemical) = 4.184 J, or the British thermal unit (thermochemical) = 1054.06 J.

<sup>#</sup> This is the SI (International System of Units) unit.

TABLE A1.2b Conversion Factors (International Table)

NOTE—Conversion factors for thermal resistivity and thermal conductance can be found by using these tables in the reverse direction.

Thermal Conductivity <sup>a</sup>						
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} (^\#)$	$W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$cal \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$kg \cdot cal \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^\circ F^{-1}$	$Btu \cdot h \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1}$
1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} =$	1.000	$1.000 \times 10^{-2}$	$2.388 \times 10^{-3}$	0.8598	0.5778	6.933
1 $W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1} =$	100.0	1.000	0.2388	85.98	57.78	693.3
1 $cal \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1} =$	418.7	4.187	1.000	360.0	241.9	2903
1 $kg \cdot cal \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} =$	1.163	$1.163 \times 10^{-2}$	$2.778 \times 10^{-3}$	1.000	0.6720	8.064
1 $Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^\circ F^{-1} =$	1.731	$1.731 \times 10^{-2}$	$4.134 \times 10^{-3}$	1.488	1.000	12.00
1 $Btu \cdot in \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^\circ F^{-1} =$	0.1442	$1.442 \times 10^{-3}$	$3.445 \times 10^{-4}$	0.1240	$8.333 \times 10^{-2}$	1.000

Thermal Resistance <sup>a</sup>					
	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1} (^\#)$	$K \cdot cm^2 \cdot W^{-1}$	$K \cdot cm^2 \cdot s \cdot cal^{-1}$	$K \cdot m^2 \cdot h \cdot kg \cdot cal^{-1}$	$^\circ F \cdot ft^2 \cdot h \cdot Btu^{-1}$
1 $K \cdot m^2 \cdot W^{-1} =$	1.000	$1.000 \times 10^4$	$4.187 \times 10^4$	1.163	5.678
1 $K \cdot cm^2 \cdot W^{-1} =$	$1.000 \times 10^{-4}$	1.000	4.187	$1.163 \times 10^{-4}$	$5.678 \times 10^{-4}$
1 $K \cdot cm^2 \cdot s \cdot cal^{-1} =$	$2.388 \times 10^{-5}$	0.2388	1.000	$2.778 \times 10^{-5}$	$1.356 \times 10^{-4}$
1 $K \cdot m^2 \cdot h \cdot kg \cdot cal^{-1} =$	0.8598	$8.598 \times 10^3$	$3.600 \times 10^4$	1.000	4.882
1 $^\circ F \cdot ft^2 \cdot h \cdot Btu^{-1} =$	0.1761	$1.761 \times 10^3$	$7.373 \times 10^3$	0.2048	1.000

<sup>a</sup> Units are given in terms of (1) the absolute joule per second or watt, (2) the calorie (International Table) = 4.1868 J, or the British thermal unit (International Table) = 1055.06 J. These tables are meant for use in Canada and Great Britain.

<sup>#</sup> This is the SI (International System of Units) unit.

specimen. When the specimens are first conditioned to the mean temperature of the test and when the specimens are identical, the response is sufficiently rapid to be used for quality control work.

A3.2.2.1 Where half thicknesses of the normal specimen can be used, it can be more rapid than Configuration a, especially when each of the specimens is first conditioned to the mean temperature at which it will operate in the test. The use of the low-resistance transducer in Configuration a is ideal if Plate 1 can provide both heating and cooling, but unless the temperature of Plate 1 is extremely well controlled, a damping layer will be required between the transducer and the plate. The advantage of the fast response time is then partially lost, but the response time is likely rapid enough in any event. The transducer can be mounted permanently in this configuration.

A3.3 Sensitivity of Configurations to Edge Losses:

A3.3.1 The Configuration a is similar to the guarded hot plate apparatus regarding edge heat losses through the specimen. The edge heat losses in the transducer may be much more significant than those in the guarded hot plate apparatus because they may produce errors due to the temperature non-uniformity on the side in contact with the specimen.

A3.3.2 The Configuration b is the most insensitive to edge conditions if the average of the readings of the two meters is assumed to be the measured heat flux per unit area through the specimen. If the plates were perfectly uniform in temperature, if the two transducers were exactly equal in the layout of the thermopile junctions, and if the specimen had thermal conductivity independent of temperature, this configuration would be insensitive to edge conditions. However, even under these ideal conditions the use of Configuration b does not eliminate edge losses but only reduces the apparatus

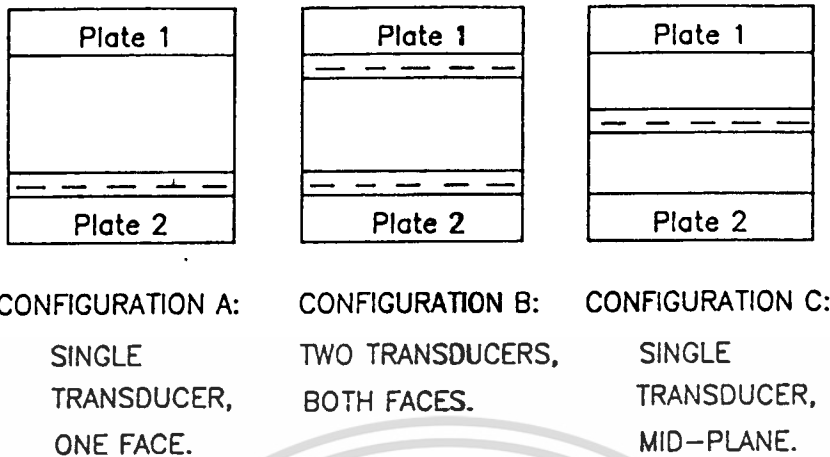


FIG. A2.1 Typical Heat Flow Meter Apparatus Configurations

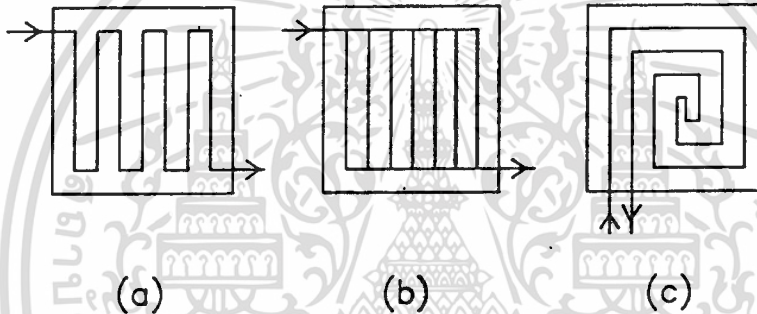


FIG. A2.2 Some Layouts of the Liquid Paths in Heating or Cooling Plates

sensitivity to variations in the boundary temperatures. Also, the settling time is short if the average of the two readings is used.

A3.3.3 Configuration c is very sensitive to edge heat losses on the heat flux transducer as the power that flows through the edges is supplied, not by a heavy nearly isothermal metal plate, but by the specimens, so that their surface temperatures may not be uniform. If the transducer is sensitive to temperature differences along its main surfaces, edge heat losses may now create serious errors. Edge heat losses within the specimens are similar to those in the guarded hot plate when the surrounding temperature is that of the hot or cold plate.

#### A4. Calibration of a Heat Flow Meter Apparatus

A4.1 Procedure—This is a representative procedure for the calibration of a typical heat flow meter apparatus with the transducer(s) mounted on one of the plates. For other calibration techniques, see Refs (15 and 16).

A4.1.1 In order to calibrate an apparatus primary reference materials must be available. These calibration transfer standards must have been tested in an absolute apparatus such as a Test Method C 177 guarded hot plate. The critical parameters which must be known are the thermal resistance, the test thickness, the mean temperature, and the uncertainties of the measured values. In most cases the mean temperature of both the heat flow meter apparatus and the

guarded hot plate will be 75°F (25°C).

A4.1.2 The calibration transfer standard is then tested in the heat flow meter apparatus at the same test thickness and a calibration coefficient is determined from the equation as follows:

$$S = (T_h - T_c) / (E \cdot R)$$

where:

- S = calibration coefficient at the given thickness and mean temperature of the transducer,
- T<sub>h</sub> = hot plate temperature,
- T<sub>c</sub> = cold plate temperature,
- E = output of the heat flux transducer, mV, and
- R = thermal resistance measured in the guarded hot plate.

A4.1.2.1 While this seems simple and straight forward, in the real world it is seldom possible to achieve. The coefficient derived from a single calibration standard must be used with caution, if the apparatus is used for samples with widely different thermal resistances, or at different thicknesses.

A4.1.2.2 The critical apparatus variables effecting the calibration are the heat flux (determined by the specimens' R-value), the thickness, and the temperatures. There may be systematic errors in the measurement of all three of these and while these errors are to some extent cancelled at the calibration point they may well change away from that test condition. Furthermore, the underlying assumption has been made that the flux transducer output voltage is linear with heat flux.

A4.1.2.3 It is therefore highly desirable to calibrate at heat

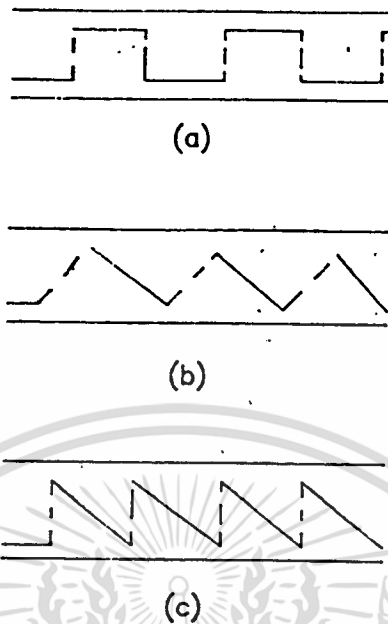


FIG. A2.3 Schematic Designs of Transducers

flow meter apparatus at more than one point. One common method is to calibrate at various thicknesses of a material.

One can then prepare a calibration curve for the instrument of the calibration coefficient versus thickness.

REFERENCES

- (1) Tye, R. P.. *Thermal Conductivity Vols I and II*. Academic Press, London and N.Y., 1969.
- (2) Degenne, Klarsfeld, Barthe, "Measurement of the Thermal Resistance of Thick Low-Density Mineral Fiber Insulation." *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*, 1978, p. 130.
- (3) Pelanne, C. M.. "Does the Insulation Have a Thermal Conductivity? The Revised ASTM Test Standards Require an Answer." *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*. R. P. Tye, Ed., 1978, pp. 60-70.
- (4) Pelanne, C. M.. "Discussion on Experiments to Separate the Effect of Thickness' from Systematic Equipment Errors in Thermal Transmission Measurements," DOE/ASTM C16.00 Thermal Insulation Conference October 22-25, 1978, Tampa, FL. *ASTM STP 713*. McElroy and Tye Eds, 1980, pp. 322, 334.
- (5) Zabawsky, Z.. "Construction and Calibration of a Heat Flow Meter for Thermal Conductivity Measurements," *Paper No. 68-520*. ISA.
- (6) Hollingsworth, M., Jr.. "An Apparatus for Thermal Conductivity at Cryogenic Temperatures Using a Heat Flow Meter." *Symposium on Thermal Conductivity Measurements of Insulating Materials at Cryogenic Temperatures, ASTM STP 411*, 1967, p. 43.
- (7) Pelanne, C. M., and Bradley, C. B., "A Rapid Heat Flow Meter Thermal-Conductivity Apparatus," *Materials Research and Standards*, Vol 2, No. 7, July 1962, p. 549.
- (8) De Ponte, F., and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus." *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, 1974, p. 97.
- (9) De Ponte, F., and Di Filippo, P., "Some Remarks on the Design of Isothermal Plates," *Prec. Meeting, Comm. B1, 11R*, Zurich 1943-1944, pp. 145-155.
- (10) Rennex, B. "Error Analysis for the National Bureau of Standards 1016 mm Guarded Hot Plate." *NBSIR 83-2674*, Washington, DC 1983.
- (11) Marechal, J. C.. "Metrologie et Conductivite Thermique," *Materiaux et Constructions*, Janvier-Fevrier 1974, No. 37, pp. 61-65.
- (12) Clulow, A., and Rees, W. H.L. "The Transmission of Heat through Textile Fabrics, Part III. A New Thermal Transmission Apparatus," *Journal of the Textile Institute*, 1968, pp. 286-294.
- (13) Kinzer, G. R., and Pelanne, C. M.. "A Cryogenic Heat-Flow-Meter Apparatus." *Heat Transmission Measurement in Thermal Insulations, ASTM STP 544*, 1974, p. 13.
- (14) Baines, D. J.. "A Comparative Theoretical Evaluation of Five Commonly Used Types of Unsteady Heat Flux Sensor," *Report HSA* (prior to 1970), Dept. of Supply, Australian Defense Scientific Service, Weapons Research Establishment, Box 1424H, G.P.O., Adelaide, South Australia. 5001.
- (15) De Ponte, F. and Maccato, W. "The Calibration of Heat Flow Meters," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*. McElroy and Tye Eds, 1980, pp. 237-254.
- (16) Bomberg, M. and Solvason, K. R.. "Comments on Calibration and Design of a Heat Flow Meter." *ASTM STP 789*, Govan, Greason and McCallister, Eds, 1983, pp. 277-292.
- (17) Hollingsworth, M. "Experimental Determination of the Thickness Effect in Glass Fiber Building Insulation," *ASTM STP 718*. McElroy and Tye Eds, 1980, pp. 255-271.
- (18) *1982 Annual Book of ASTM Standards*, Part 18, pp. 35-47.
- (19) Shirliffe, C. J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens," *Heat Transmission Measurement in Thermal Insulations, ASTM STP.544*, 1974, p. 13.
- (20) Lang, D. L., "A Quick Thermal Conductivity Test on Insulating Materials," *ASTM Bulletin No. 216*, September 1956.

*The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.*





# Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 177; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This test method has been approved for use by agencies of the Department of Defense and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.*

## 1. Scope

1.1 This test method covers the achievement and measurement of steady-state heat flux through flat-slab specimens using a guarded-hot-plate apparatus. The method encompasses both the single-sided and the double-sided mode of measurement. Both distributed and line source guarded heating plate designs are included, in principle, in this test method. The reader should consult the standard practices on the single-sided mode of operation and on the line source apparatus for further details on these variations of the method.

1.2 The calculations of thermal transmission properties based upon measurements using this method shall be performed in conformance with Practice C 1045.

1.3 This is an absolute (or primary) method of measurement since no heat flux reference standards are required except to confirm accuracy statements and to establish traceability to recognized standards. This absolute method is contrasted with a comparative (or secondary) method, such as Test Method C 518, in which the results are directly dependent on heat flux reference standards.

1.4 This test method is applicable to the measurement of a wide variety of specimens, ranging from opaque solids to porous or transparent materials, and a wide range of environmental conditions. Special precautions in the measurement process are described for the following:

1.4.1 Specimens exhibiting appreciable inhomogeneities, anisotropies, rigidity, or extremes of thermal flux density.

1.4.2 Measurements conducted at extremes of temperature (either high or low) or under vacuum conditions.

1.5 This test method is intended to allow a wide variety of apparatus designs and design accuracies to satisfy the requirements of specific measurement problems. Compliance with this test method requires a statement of the uncertainty of each reported variable in the report. Therefore, in the following sections, the significant error factors will be discussed.

1.6 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is*

*the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

C 167 Test Methods for Thickness and Density of Blanket or Batt Thermal Insulations<sup>2</sup>

C 168 Terminology Relating to Thermal Insulating Materials<sup>2</sup>

C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus<sup>2</sup>

C 687 Practice for Determination of the Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation<sup>2</sup>

C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements<sup>2</sup>

E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples<sup>4</sup>

### 2.2 Adjunct:

Descriptions of Three Guarded-Hot-Plate Designs (C 177)<sup>5</sup>

## 3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms and symbols used in this test method, refer to Definitions C 168.

3.2 *Description of Term Specific to this Standard:*

3.2.1 *heat flux*—the term heat flux is not defined in Definitions C 168; it is used here as synonymous with heat flow.

## 4. Significance and Use

4.1 This test method covers the measurement of heat flux and associated test conditions for flat-slab specimens. Since heat flux and its uncertainty may be dependent upon environmental and apparatus test conditions, as well as intrinsic characteristics of the specimen, the report for this test method must include a thorough description of the specimen and of the test conditions. Also, since this test method is applicable to a wide range of specimen characteristics, test conditions, and apparatus design, it is impractical to give an all-inclusive statement of precision and bias for the

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.30 on Thermal Measurement.

Current edition approved Oct. 22, 1985. Published December 1985. Originally published as C 177 - 42 T. Last previous edition C 177 - 76.<sup>4,5</sup>

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

<sup>5</sup> Available at a nominal cost from ASTM Headquarters, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103. Request PCN No. 12-301770-00.

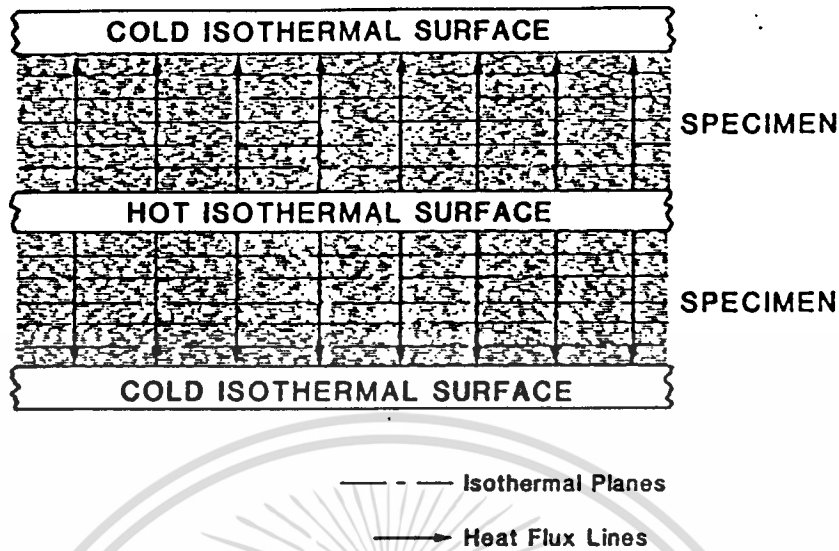


FIG. 1 Schematic of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

test method. For this reason, conformance with the test method includes the requirement that the user must estimate and report the uncertainty of the results under the reported test conditions. Based on the heat flux measurements conducted with this method, thermal transmission properties shall be calculated in conformance with Practice C 1045.

5. Principle of the Experimental Method

5.1 This section discusses both the idealized principle of the method and the deviations from this that are encountered in practice. Figure 1 illustrates the core components of the idealized system: two isothermal cold surface units and a guarded isothermal hot-surface unit. The guarded isothermal hot-surface unit is composed of the metered area unit and a concentric guard unit. Sandwiched between these three units (as illustrated in Fig. 1) is the material to be measured, that is, the specimen. In the double-sided mode of measurement, the specimen is actually composed of two pieces. The measurement in this case produces a result that is the average of the two pieces and therefore it is important that the two pieces be as identical as possible. In the one-sided mode of measurement only one of the pieces is measured and therefore they do not have to be identical. However, the backflow specimen is needed and it should have thermal properties similar to the specimen. In further discussion, specimen will be used to denote either one piece or two pieces unless further clarification is needed. The metered area unit is the portion of the assembly that provides the power (heat flow per unit time) for the measurement and defines the actual test volume, that is, that portion of the specimen that is actually being measured.

5.1.1 The function of the guard portion of the isothermal hot surface unit is to provide the additional power necessary to create the proper thermal conditions within the test volume. In the idealized case, the guard portion can be thought of as infinite in width. The proper (idealized) conditions are illustrated in Fig. 1 by the configuration of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux density within the specimen. The isothermal surfaces are planes that

are parallel to each other and to the three core components. In addition, the lines of constant heat flux density are perpendicular to these planes and are uniformly distributed throughout the metered area. The establishment of the above idealized conditions simply means that there are no radial components of heat flow within or immediately adjacent to the test volume.

5.1.2 Deviations from the idealized configuration are caused by: (a) specimen inhomogeneities, (b) temperature differences between the metered unit and the guard unit (gap unbalance), and (c) temperature differences between the outer edge of the assembly and the surrounding environment (edge unbalance). These experimental realities lead to distortions of the isothermal surfaces and lines of constant heat flux density within the test volume. Consequently, the power supplied to the metered area unit is not exactly equal to that which flows through the test volume. The measured power can be either too small or too large depending on the direction of the above-mentioned unbalances. The resulting actual heat flows are qualitatively indicated in Fig. 2.

5.2 The three heating/cooling units are designed to create isothermal surfaces on the faces of the specimens within the

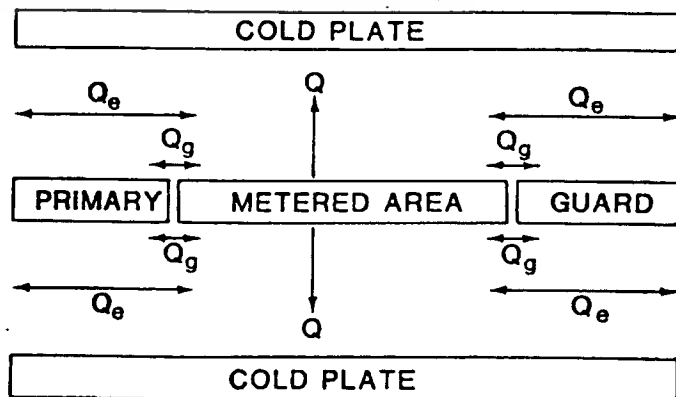


FIG. 2 Illustration of Specimen Heat Flux,  $Q$ , Gap Heat Flux,  $Q_g$ , and Edge Heat Flux,  $Q_e$ .

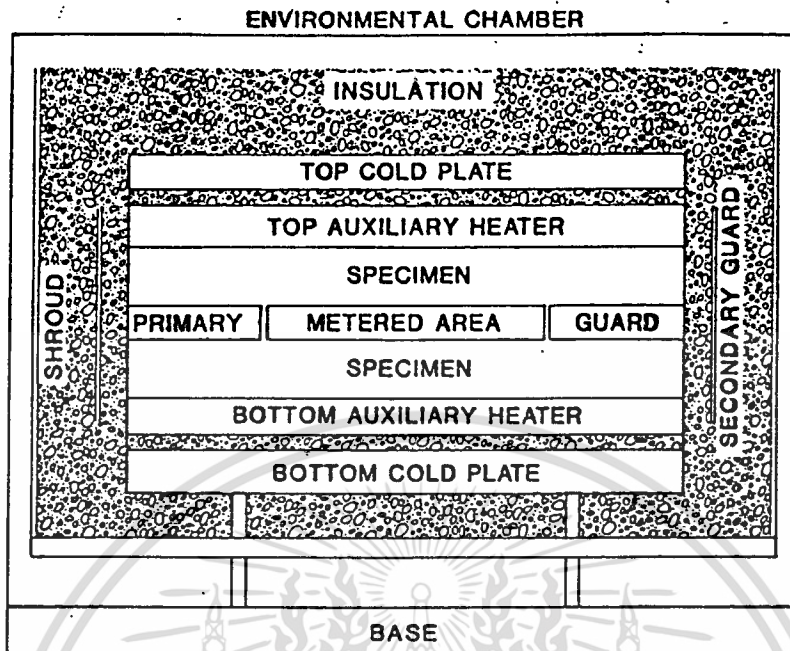


FIG. 3 General Arrangement of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

metered region. The two surfaces designated as the cold isothermal surfaces are adjusted to the same temperature for the double-sided mode of operation (that is, two specimens are measured). In the single-sided mode of operation (that is, only one specimen is measured) the temperature of one of the surfaces designated as the cold isothermal surface is adjusted to be equal to the temperature of the central plate. Because the plates and specimens are of finite dimensions and because the external environment is at a temperature distribution different from the edge of the metered region, some radial heat flow occurs in practice. The guard for the metered region limits the magnitude of the radial heat flux in the metered region. The effectiveness of the guard is determined, in part, by the ratio of its radial dimension to that of the metered region and to the specimen thickness.

5.3 Compliance with this test method requires: (a) the establishment of steady-state conditions, and (b) the measurement of the unidirectional heat flux in the metered region, the metered area, the temperatures of the hot and cold surfaces, the thickness of the specimens, and other parameters which may affect the unidirectional heat flux through the metered region of the specimen.

## 6. Apparatus

6.1 *Guarded-Hot-Plate Apparatus*—The term “guarded-hot-plate apparatus,” applies to the entire plate-specimen system and associated control and measuring components. The general arrangement of the mechanical components of such a system are illustrated in Fig. 3. This system consists of a guarded heating unit, two auxiliary heating plates, two cooling units, secondary guarding in the form of edge insulation, and a temperature-controlled secondary guard. The system illustrated in Fig. 3 contains components frequently omitted in systems designed for ambient condition measurements. The environmental chamber may not be necessary if atmospheric air is used for the fill gas. The

auxiliary heater plates and offset insulation are generally not used for tests conducted with the cold surfaces near room temperature. The secondary guard is not essential if both hot and cold surfaces are near room temperature.

6.1.1 Two essentially identical specimens are placed on either side of the guarded heating unit. (In the single-sided mode of operation the specimens need not be identical.) The opposite faces of the specimens are in contact with the auxiliary heating units. The purpose of these three isothermal units is to create an accurately measurable steady-state heat flux unidirectionally through the two specimens (one specimen in the single-sided mode). The purpose of the secondary guard and edge insulation is to further reduce radial heat flow. The cooling units are isothermal heat sinks to remove the energy generated by the heating units. In the double-sided mode of operation the auxiliary heating units are adjusted so they are at the same temperature. In the case of single-sided operation, the temperature of one of these units is adjusted to equal the temperature of the guarded heating unit, thus resulting in heat flow in only one direction. Although this has been done successfully see Refs. (1), (2), and (3),<sup>6</sup> the preponderance of experience is with the double-sided mode of operation. It is also noted that the apparatus can be operated with either vertical heat flow or horizontal heat flow. The results of the two orientations can be different due to differences in convective heat flow. For further details on the construction of a guarded-hot-plate apparatus see Refs. (1), (2), (3), and (4).

### 6.2 Guarded Heating Unit:

6.2.1 *Surface Plates and Core Heater*—The guarded heating unit consists of two concentric, thermally-isolated, heater-surface plate sections. Both round and square units

<sup>6</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

have been used successfully. The inner heater-surface plate section is the metered region, while the outer heater-surface plate section is the primary guard region. The width of the guard region is typically equal to about one-half of the linear dimension of the metered region to reduce edge heat loss to an acceptable level. This primary guard section, in some cases, is further divided into two concentric sections (double guard) with a gap separator to improve the guard effectiveness. The surface plates of this unit shall be sufficiently rigid to maintain the reported flatness and parallelism, measured as a percentage of the maximum linear dimension of the metered region. The surface plates should have a high thermal conductivity, compared to the specimen thermal conductivity, to ensure that the plates are sufficiently isothermal. For ambient and low temperature measurements, high-thermal conductivity metal plates are generally recommended. This is especially important when measuring inhomogeneous specimens. The core heater of this heating unit should be installed to produce a uniform distribution of heat flux density over the entire assembly. It should be symmetrically centered in the axial direction to maintain equal temperatures on the opposing faces of the heating unit. Deviations from this condition can lead to difficulties in proper adjustment of the primary guard temperature, and may cause unsuspected radial heat flow from the metered region to the guard region. Thermal resistances in the axial direction within the heating unit should be minimized. This is especially significant when operating in the single-sided mode because of the axial asymmetry of heat flux.

6.2.1.1 When the heat flux through the specimen for a given  $\Delta T$  is dependent on plate emittance, that is, the specimen is not totally opaque, the plate emittances shall be reported. For insulation measurements, the plates are generally coated to maintain an emittance of 0.8 to 0.9 to approximate common end-use conditions. The plate emittance requirement should be specified in the appropriate material specification. The importance of this emittance specification increases with decreasing specimen density, decreasing thickness, and increasing temperature because radiant heat transfer generally increases under these conditions.

6.2.1.2 Construction materials shall be chosen to ensure adequate capacity and compatibility under extreme operating conditions. At extremes of temperature, one should be cautious of warpage. At high temperatures, normally good electrical insulations may allow stray power exchanges within the heating unit. Under high vacuum conditions surface-to-surface thermal contact resistances may become unacceptably high and non-uniform.

6.2.2 *Gap*—The gap between the concentric meter/guard heaters shall be uniform, and its width should be optimized to minimize gap heat flow while simultaneously minimizing temperature distortion effects within the specimen near the gap. In the past, it was recommended that the total gap area be as small as possible. Recent studies (1), (5), (6), (7), and (8) have shown that the optimum value is dependent on apparatus design, operating range, and specimen characteristics. Most past experience is based on gap areas that are about 5 % of the metered area. To reduce the heat flow across the gap, any connections between the metering section and the primary guard should have a high thermal resistance,

that is, they should be as small in thermal cross-section and as long as possible. Traversing the gap at an oblique angle is recommended. The gap region shall be instrumented with temperature unbalance sensors to monitor and control the average temperature unbalance across the gap. Fine-gage thermocouples connected as thermopiles are often used for this purpose, although other temperature control sensors, such as thermistors have been used. Highly alloyed thermocouple wires, rather than pure metals, should be used to maximize the thermal resistance across the gap. Because of nonuniform heat flux within the plates, temperature imbalance is not always constant along the whole gap. It has been found that with proper design the thermal conductance of the wires crossing the gap can be made relatively small and, therefore, a large number of elements can be used to increase the gap unbalance sensitivity. It is not uncommon to use ten or more sensing elements. When using only a minimum number of sensing elements along the gap, the most representative positions to detect the average balance for a square plate are those at a distance from the corners equal to one-fourth of the side of the metering section (5). The corners and the axes should be avoided. For a round plate, the sensors should be spaced equally around the gap. The gap unbalance sensors should be placed on both surface plates of the guarded heating unit to average the unbalance on both faces of the heating unit. It is also desirable to provide for gap unbalance readout from each surface separately (3). Any leads crossing the gap should be thermally anchored to the primary guard to provide a heat sink for external thermal variations. In some instances it may be desirable to provide a heat sink for these leads outside the primary guard to further minimize radial heat flow (8).

6.3 *Cooling/Auxiliary Heating Units*—It is recommended that the surface dimensions of the cooling and auxiliary heating units (when used) be the same as or larger than those of the guarded heating unit. These units shall have the same flatness, parallelism, conductivity, emittance, and heat distribution requirements as the guarded heating unit. Generally, the temperature of the cooling units is controlled with a circulating constant-temperature fluid. The auxiliary heating units are electrically controlled, and are constructed similar to the guarded heating unit, but usually without a gap.

6.4 *Secondary Guarding*—When the test conditions are significantly different from room conditions, secondary guarding of the specimen-plate assembly may be necessary. For example, if either the hot or cold plate test temperatures are more than 25 K different from room temperature, edge insulation is likely to be necessary. Edge insulation or an environmental chamber will also help eliminate spurious effects of room drafts. If the test temperatures differ more significantly from room temperatures, a secondary controlled-guard will likely be necessary. This usually takes the form of an electrically-controlled concentric heater surrounding the region from cold plate to cold plate. The concentric gap between it and the specimen-plate stack should be uniform and optimized to achieve a high gap thermal resistance and a small "window" to outside conditions. A gap width of approximately 2 cm has been found to be adequate for a 20-cm diameter plate. Further, if conditions must be maintained within the specimen-plate stack, that are different from the room conditions, an environ-

mental chamber must be added. This is necessary for: (a) low temperature measurements to prevent condensation; (b) fill gases other than air, and (c) measurements with vacuum (1) and (3).

**6.5 Temperature Measuring and Control Sensors**—Any temperature sensor-readout system possessing an accuracy consistent with the required error analysis may be used for measurement and control of the temperatures within the system. Plate surface temperatures are often measured by embedding sensors, such as thermocouples, in grooves in the working surface. In some instances, such as with rigid specimens and high heat flux, it will be necessary to mount the sensors on the surface of the specimen. For heat flux densities above about  $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  alternate temperature sensing should be considered. Many existing systems utilize a minimum of two temperature sensors to determine the average temperature of each isothermal surface. However, to determine the actual surface temperature variations under typical operating conditions, the temperature must be sampled at considerably more than two points. This is especially true when the specimen surface temperature itself must be measured or when the specimen is highly inhomogeneous. Therefore, no strict specification is given as to the number of temperature sensors that must be used for each surface. However, the user must report the uncertainty of the temperature measurement, including the component, due to temperature nonuniformity across the surface. This determination is probably best done with a multijunction thermocouple in ad-hoc experiments and not part of every measurement. Precautions should be taken to assure that heaters and temperature sensors are thermally anchored to the surface involved. Temperature gradients along the leads leading to temperature sensors should be minimized. The subject of thermal anchoring is discussed in Ref (9).

**6.5.1** Normal precautions should be used to minimize spurious voltages in temperature control and measuring circuits. Spurious voltages, due to wire inhomogeneities, generally increase as the temperature gradients within the measuring leads increase. Therefore, spurious voltages will be larger for measurements at temperatures appreciably different from room temperature. For the same reason, junctions between dissimilar metal leads should not be made in the regions of appreciable temperature gradients. High quality, low thermal switches should be used in the temperature measurement circuits. The sensitivity of metallic temperature sensors generally decreases with decreasing temperature, and therefore, the above procedures become more important at low temperatures. Since the temperature difference between the two specimen surfaces enters directly into the determination of derived thermal properties, it is frequently better to connect the temperature sensors in a differential manner rather than subtracting the results of two temperature measurements. Care must be taken to avoid more than one electrical ground, especially when using the differential arrangement.

**6.5.2** Temperature sensors must be calibrated to within the uncertainty allowed by the apparatus design accuracy. For information concerning sensitivity and accuracy of thermocouples see Table 1 of Tables E 230. For a comprehensive discussion on the use of thermocouples, see Ref (10).

For low temperature thermocouple reference tables, see Ref (11).

**6.6 Thickness Measurement**—A means shall be provided for the measurement of the specimen thickness under test conditions. If the specimen is rigid, its room temperature thickness (along with thermal expansion corrections if necessary) can be used for the actual thickness. If the specimen is compressible under operating plate pressure, a means must be provided to maintain a known plate spacing. This is often done with three or more low-conductance rigid spacers placed at the outer periphery between the guarded heating unit and the cooling units (auxiliary heating unit, if used). The thickness is taken as the average length of the spacers corrected for thermal expansion. Other methods of plate positioning and thickness determination are common, especially when the plates are positioned for horizontal heat flow. It is also helpful for uncertainty analysis to determine the variation of thickness within the metered area under operating conditions.

**6.7 Power to Metered Region**—The power to the metered region is determined with a wattmeter or from voltage and current measurements across the heater in the metered region. The user should note that ac power determinations are more prone to error than dc measurements. Therefore, dc power is recommended for the metered region heater. The voltage taps for this measurement should be placed to measure the voltage to the mid-point of the guarded heating unit gap. The current is normally determined from the voltage drop across a precision resistor placed in series with the metered region heater.

**6.7.1** Care should again be taken to minimize the thermal gradients in the voltage and current wires leading to the metered heater, and the current leads should be adequately sized to prevent significant self-heating under maximum power conditions. Within this limitation both sets of leads should be as fine as possible to limit radial heat losses.

## 7. Test Procedure

**7.1** The testing procedure includes the following steps:

- 7.1.1 Specimen selection.
- 7.1.2 Specimen preparation and installation,
- 7.1.3 Establishing thermal steady-state, and
- 7.1.4 Data acquisition.

**7.2 Specimen Selection**—Only those specimen selection factors important to the performance of the apparatus are considered here. Those factors dictated by the objectives related to obtaining derived thermal properties are described in Practice C 1045 and material specifications. For the two-sided mode of operation, the two specimens should be selected to be as similar in thickness and thermal characteristics as possible.

**7.2.1 Size**—The maximum specimen thickness that can be measured to a given accuracy is dependent on several parameters, including the size of the apparatus, thermal resistance of the specimen, and the accuracy desired. To maintain edge heat losses to below about 0.5 %, for a guard width that is about one-half the linear dimension of the metered region, the recommended maximum thickness of the specimen is one-third the maximum linear dimension of the metered region. For more specific quantitative information on this limitation see Refs (1), (5), (7), and (8).

7.2.1.1 The specimen shall be sized to cover the entire metered region. In most instances it is desirable to cover the gap between the metered region and the guard as well. The guard portion of the volume between the heating and cooling plates should be filled with material having characteristics similar to the specimen.

7.2.2 *Homogeneity*—There are two potential problems in determining the heat flux through highly inhomogeneous specimens. One is related to the interpretation and application of the resulting data; it is discussed in Practice C 1045. The other is connected with the degradation in performance of the apparatus. If the specimen itself is highly inhomogeneous, that is, the heat flux density varies appreciably over the metered area, several errors can be significantly increased. The plate temperature distribution can deviate appreciably from isothermal conditions which, in turn, can cause large uncertainties in the average temperature difference across the specimen. The increased plate temperature variations can also lead to increased gap and edge heat losses. The importance of measuring the plate or specimen surface temperatures at numerous points is greatly increased under such conditions.

7.3 *Specimen Preparation*—Preparation and conditioning of the specimens shall be in accordance with the appropriate material specification. The following guidelines are given when the material specification is incomplete or unavailable. In general, the surfaces of the specimen should be prepared to assure uniform thermal contact with the heating and cooling plates.

7.3.1 *Compressible Specimens*—For compressible specimens the surfaces of the uncompressed specimens may be comparatively rough so long as these undulations essentially vanish under test compression. Under more extreme conditions, it may be necessary to smooth the specimen surfaces to achieve better plate-to-specimen contact. If the apparent thermal conductivity of the contact void is greater than that of the specimen, the measured  $R$  value will be smaller than the  $R$  value that would be obtained if the voids were absent. This may often be the case at higher temperatures where radiant heat transfer predominates in the void. For the measurement of compressible specimens, the temperature sensors are often mounted directly in the plate surfaces. Also, plate spacers need to be used for the measurement of compressible specimens (see 6.6).

7.3.2 *Rigid and High Conductance Specimens*—The measurement of rigid specimens or high conductance specimens requires more careful surface preparation. First, the surfaces should be made flat and parallel to the same degree as the heating plate. If the specimen has a thermal resistance that is sufficiently high compared to the specimen-to-plate interface resistance, temperature sensors mounted in the plates may be adequate. However, if the interface resistance is too high, other techniques that assure good thermal contact and accurate temperature measurement will be necessary.

7.3.2.1 In some cases it is necessary to mount the temperature sensors directly on the specimen surfaces. Under vacuum conditions, the slightest space between plate and specimen is essentially an infinite thermal resistance (except for radiative heat transfer). Under these conditions extreme heat flux nonuniformities will occur. In any event the user should always try to minimize the ratio of contact resistance

to specimen resistance and to strive for a constant ratio over the entire surface.

7.3.2.2 Another potential solution (that must be used with caution) is to mount a compressible thin sheet (for example, a soft rubber) between the plates and specimen to improve the uniformity of the thermal contact. If the thermal conductance of the thin sheet is known, temperature corrections can be applied to the measured plate temperatures to obtain the specimen surface temperatures. Clearly the thermal resistance of the thin sheets should be small compared to the specimen thermal resistance, otherwise the temperature correction uncertainty will cause excessive errors in the specimen surface temperatures.

7.3.3 *Anisotropic Specimens*—The measurement of highly anisotropic specimens may result in significantly larger errors than for isotropic specimens. For example, layered specimens that have a high lateral to axial conductance ratio require special attention. For such specimens, it is recommended that a low conductance gap be created in the specimen directly in line with the gap in the main plate. Specimens whose axes of symmetry do not coincide with flat-slab geometry are not recommended for measurement by this test method because the results will be ambiguous due to increased measurement errors as well as data interpretation.

7.3.4 *Loose-Fill Specimens*—The determination of thermal properties for loose-fill specimens requires special handling, conditioning, and measurement techniques. The user is directed to Practice C 687 for details on loose-fill measurements.

#### 7.4 Test Execution:

7.4.1 *Preliminary Preparation*—After installation of the specimen and installation of appropriate secondary guarding and an environmental chamber (if necessary), the thermal test procedure begins. If the test is to be conducted with other than air within the specimen-plate assembly, the environmental chamber should be purged and backfilled with the desired gas. Care should be observed to limit the pressure of the fill-gas to below its condensation point at the lowest temperature within the chamber. Since the measured heat flux is dependent on both the species of fill-gas and pressure, the report should include this information along with other pertinent specimen characteristics. The various heating and cooling units are placed into operation to achieve the test temperature conditions.

7.4.2 *Thermal Steady-State*—The time required to achieve thermal steady-state of the system varies considerably with the characteristics of the apparatus design, the specimen to be measured, and the test conditions. Generally, however, since this test method is applicable to low conductance specimens, the settling time is on the order of hours. Settling times generally increase with thicker specimens, specimens with low thermal diffusivity, and the mass of the guarded heater. After achievement of the desired steady-state, three successive repeat data acquisition runs shall be completed. These runs shall be conducted at intervals of no less than 30 min. Longer times may be necessary for thermally massive systems. It is recommended that the intervals be no less than the thermal time constant of the system (see Note 1). This combination of three runs shall be considered a valid test if each datum obtained for each

measured variable differs from the mean by no more than the uncertainty of that variable as estimated to establish the values given in the report. If the data obtained change monotonically with time, the test shall be considered suspect and further repeat runs shall be conducted until this steady drift is no longer observed. Such a drift, even at low levels, may indicate that the specimen characteristics are changing or that the system is not at steady-state within its test capabilities. In either event, serious errors may result. For further details see Refs (3), (12), and (13).

**NOTE 1**—The thermal time constant of the system is the time required to come to within  $1/e$  (37 %) of the fixed value after a step thermal disturbance of the system. This time is strongly dependent on the mode of operation. The two modes of operation generally used are: (a) constant power to the plates, and (b) constant temperature control of the plates. The thermal time constant for the latter mode is usually considerably shorter because it is not dependent on the mass of the plates. The thermal time constant in the constant power mode is the time required to come to within 37 % of the final temperature. The thermal time constant in the constant temperature mode is the time required to come to within 37 % of the final power. The thermal time constant of a system can be approximated from a knowledge of the thermal diffusivities of the components of the system, but it is more readily determined experimentally.

**7.4.3 Final Checks**—Upon completion of the thermal measurements, the specimen should be removed and the system components, such as temperature sensor mounting, should be examined for proper placement and operation. The specimen thickness spacers should be checked to ensure accuracy. If the specimen is a conditioned thermal insulation, its mass should be redetermined to detect changes during the test procedure. Any changes in the physical characteristics of the specimen should be noted. If the specimen is rigid, its thickness should be checked for an irreversible change during the test.

## 8. Calculation

**8.1** The primary data required for this test method include electrical power, surface temperatures, area, and thickness. Of these, only thickness is generally a directly-measured quantity. The others are either calculated from other more fundamental measurements or are converted by an electrical device. The manner in which these variables can be obtained is discussed below.

**8.2 Heat Flux**—The heat flux to be reported is that which passes through each specimen. For the single-sided mode of operation this is equal to the power generated by the metered region heater. For the double-sided mode of operation, only one-half the power generated by the heater flows through each specimen. The power,  $Q$ , is frequently determined from emf,  $E$ , and current,  $I$ , measurement, and is calculated as follows:

$$Q = E \cdot I \quad (1)$$

**8.3 Metered Area**—The metered area,  $A$ , is obtained from the area,  $A_m$ , of the metered region plate and the gap area,  $A_g$ . If there is no discontinuity in specimen characteristics in the gap region, it is calculated as follows:

$$A = A_m + A_g/2 \quad (2)$$

If there is a discontinuity between the specimen in the metered region and the guard region, this equation is

modified slightly to include the effect of heat flux distortion in the gap region:

$$A = A_m + A_g \lambda_g / (2\lambda) \quad (2)$$

where:

$\lambda_g$  = thermal conductivity of the material in the guard region, and

$\lambda$  = thermal conductivity of the specimen in the metered region.

**8.4 Temperature**—Again, the basic measurement here is voltage (for a thermocouple) or voltage and current for a resistive temperature sensor. These data are normally converted to temperature through a formula based on a calibration curve or interpolation of a table. In some instances, the formula is packaged within an instrument that reads directly in temperature. In any event, the user should note that the total error contains components due to the measurement process and the calibration (including the error caused by the functional or tabular interpolation of the calibration).

**8.5 Density**—The specimen density is to be reported. The equation for density,  $\rho$  is the following:

$$\rho = M/V \quad (4)$$

where:

$M$  = mass of the specimen, kg, and

$V$  = volume that the specimen occupies between the plates under test conditions.

To minimize the error caused by specimen inhomogeneity it is best to determine the density of the specimen within the metered volume. This requires cutting out the metered position of the specimen for the mass determination. The volume is determined from the metered area and the in-situ specimen thickness. In the case of compressible specimens, the plate spacing is used for specimen thickness.

**8.6 Thermal Transmission Properties**—The properties included are thermal conductance, thermal resistance, thermal conductivity, and thermal resistivity as defined by Definitions C 168. These quantities shall be reported only in accordance with the requirements and restrictions of Practice C 1045. In addition to reporting the systematic and random uncertainty of these properties, the range of applicable conditions must be reported. These include mean temperature or temperature range, specimen thickness, density, and plate emittance. Other variables that affect thermal transmission, such as fill-gas and pressure, shall also be specified when applicable.

## 9. Precision and Bias<sup>7</sup>

**9.1** The accuracy or uncertainty of a measured result indicates the probable or possible difference between the measured value and the true value. It is obtained by considering the combined effects of precision (random errors) and bias (systematic errors). Past experience (recent unpublished round-robin studies and Refs (3), (4), (14), (15), (16), and (17)) has provided the following accuracy guidelines. It should be noted, however, that the accuracies given here may be either too large or too small depending on the care taken in the construction and operation of each individual apparatus.

<sup>7</sup> Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: C16-1009.

**9.1.1 Case 1, Low Density Compressible Thermal Insulations for Ambient Temperature Applications**—An accuracy of  $\pm 2\%$  can be achieved for this category of measurements. Most of the experience is for specimen thicknesses of approximately 2 to 8 cm, metered region dimensions of from 10 to 50 cm, heat flux densities in the range of 2 to 20  $W \cdot m^{-2}$  at mean temperatures of from  $-20$  to  $40^\circ C$ , temperature differences of about  $25^\circ C$ , and plate emittances near 0.9.

**9.1.2 Case 2, High Density Rigid Specimens for Ambient Temperature Applications**—The accuracy of this category of measurements is somewhat poorer than Case 1, primarily because of the difficulty of establishing the specimen surface temperatures and the higher conductance of such specimens. An accuracy of about  $\pm 5\%$  can be achieved. The conditions are approximately the same as Case 1 except that the heat fluxes are generally 10 to 100 times greater, and the apparatus dimensions are usually smaller.

**9.1.3 Case 3, Extreme Conditions**—This category includes measurements under conditions that significantly depart from the above conditions. Some examples are given below:

**9.1.3.1 Extremes of Mean Temperature**—As the mean temperature departs progressively from ambient, the uncertainty becomes greater, and experience is more limited. Uncertainties of  $\pm 5\%$  and greater may be expected at mean temperatures above  $100^\circ C$  and below  $-100^\circ C$ .

**9.1.3.2 Extremes of Thickness**—At small thicknesses (below 0.5 cm) systematic errors will increase because of the difficulty in determining the average thickness, and because of the relative size of the plate-to-specimen thermal resistance. The guarded-hot-plate is used frequently for such measurements. At large thicknesses (above 30 cm) there is little experience, but errors are expected to be above  $\pm 2\%$  especially if the user is not careful in observing the problems associated with longer thermal time constants and larger edge heat losses.

**9.1.3.3 Extremes of Heat Flux Density**—The guarded-hot-plate is not well suited for such measurements. At very high heat flux densities (above about  $1000 W \cdot m^{-2}$ ) the plate-to-specimen contact resistance uncertainty can result in large temperature measurement errors. Variations in contact resistance along the surface of the specimen also lead to excessive heat flux density variations through the specimen. At very low heat fluxes (below about  $0.1 W \cdot m^{-2}$ ) errors become excessively large due to the effect of radial losses, inaccurate power determination, and inaccuracies due to temperature drift of the heater plate. Errors as large as 50% can occur under combinations of extreme conditions.

**9.2** The precision and bias statement required by this test method is based upon consideration of the random and systematic components of the following measurement uncertainties:

**9.2.1** Uncertainty in heat flow,  $\delta Q$ ,

**9.2.2** Uncertainty in temperature difference,  $\delta \Delta T = \delta (T_H - T_C)$ .

**9.2.3** Uncertainty in metered area,  $\delta A$ , and

**9.2.4** Uncertainty in specimen thickness,  $\delta L$ .

**9.2.5** Other specimen characterization and test condition data may need to be reported. The precision and bias of these data are to be reported to the extent they have a direct

bearing on the accuracy of the results. Prescribed precision and bias of the primary data are not mandated by this test method. However, it is required that the user assess and report the precision and bias of the data. The discussion below provides guidelines to assist the user in performing this uncertainty assessment. A variety of helpful performance checks are included in this discussion. In the following discussion both random and systematic errors are considered. The subscript  $s$  is used to denote systematic, and the subscript  $r$  is used for the random components.

**9.2.5.1 Systematic error,  $\delta_s$** , is any component of error that remains fixed during the runs that constitute a successful test. To simplify the discussion, this does not include any components of error that are known both in magnitude and sign. Under such circumstances, the user should make appropriate corrections and supply the justification for them. The task of estimating the remaining systematic errors is based on judgment and experience, including an awareness of the results of interlaboratory comparisons. The implications of such estimates is often that they are the maximum possible systematic errors. In this event the total maximum systematic error is the sum of the errors. It is, however, more likely that these estimates are probabilistic in nature and do not, in fact, represent the worst possible case. The total probable systematic errors are summed in the same manner as random errors, that is, the square root of the sum of squares. In the following discussion the latter approach is taken. However, the user must decide if the bias estimates are worst cases or probabilistic in nature, and sum them accordingly.

**9.2.5.2 Random Error,  $\delta_r$** , is that component of error that varies both in sign and magnitude during the runs that constitute a successful test. For simplicity, it is assumed that the variations are normally distributed and conventional statistical techniques are applicable. An estimate of random error components can be obtained by repeat measurements of each variable.

**9.2.5.3** It is important to distinguish between random and systematic errors for the following reason. The results reported in the test method are mean values derived from more than a single run. The uncertainties reported generally apply to these mean values. The uncertainty of a mean value due to the random error component decreases approximately as  $1/\sqrt{n}$  where  $n$  is the number of repeat runs. In contrast to this, the uncertainty of the mean value due to the systematic error component does not decrease with repeat runs. Thus, it is recommended that the error components be treated separately. The total uncertainty is expressed by reporting both components separately.

**9.3** In the following sections, the error components of each reported variable are discussed. The total random or systematic uncertainty for each variable is taken to be the square root of the sum of squares.

**9.4 Heat Flow,  $Q$** —The objective of the test method is to establish and measure uniaxial heat flow through the metered region of the specimen. Any deviation from this objective represents error in the reported heat flow. The following sources of error should be considered:

**9.4.1 Edge Heat Loss,  $\delta_s Q_e$** , is a systematic error insofar as the conditions surrounding the plate-specimen stack remain constant throughout the test procedure. Although tests have

been reported that shed some light on the magnitude of this error. The results generally are not proven to the point where corrections based on these results are universally accepted (see Refs (1), (4), (6), (7), (18), (19), (20), (21), and (22)). However, the results are considered sufficiently valid for the basis of defining the maximum specimen thickness. The optimum environmental temperature to minimize this error is a small fraction of  $\Delta T$  above the mean test temperature. To determine the sensitivity of this error to test conditions, the user should determine the heat flux as a function of secondary guard temperature. This dependence may change appreciably with specimen and apparatus characteristics and, therefore, should be done under typical test conditions.

9.4.2 *Gap Heat Loss*, considered to be composed of both systematic,  $\delta_s Q_g$ , and random,  $\delta_r Q_g$ , components. The systematic component is, in part, due to the fact that there are a finite number of locations along the gap at which the unbalance is measured. Improper position of the sensors will lead to systematic error. Spurious emfs within the circuitry will result in a systematic unbalance. The random component is due to short-term control fluctuations. After estimating the probable unbalance across the gap in terms of temperature (or sensor voltage) one needs to determine the effect of this unbalance on the measured heat flow through the metered area. This can be done by measuring the dependence of metered area power on intentionally introduced gap unbalance. The unbalance introduced should be large enough to yield an easily measured change in  $Q$ , but small enough to remain in the region where the dependence of  $Q$  upon unbalance is approximately linear.

9.4.2.1 It has been found that (see Refs (3), (15), and (16)) the gap heat loss,  $\delta Q_g$ , is linearly dependent on temperature unbalance,  $\Delta T_g$ , that is,  $\delta Q_g = B \Delta T_g$ . The proportionality constant,  $B$ , is dependent on the wires crossing the gap (number, size, and type), the gap fill material (gas, insulation), the emittance of the gap surfaces and the material in the vicinity of the gap between the hot and cold plates. A reasonable approximation of this heat flow can be calculated from this information. It is recommended that this be done for confirmation of the value measured by the procedure described in the previous paragraph.

9.4.3 *Effect of Drift of the Guarded Heater*—A quasi-heat loss exists due to the changing heat content of the guarded heater as its temperature changes. Typical plates have a relatively high heat capacity and even for small drift rates can produce significant errors in measured heat flow. If the drift is monotonic, the error is systematic,  $\delta_s Q_d$ ; if not, the error is exhibited as random error,  $\delta_r Q_d$ . Normally, the experiment is conducted so that there is no observable drift. Under this circumstance, the possible drift is determined by the detectability or control limit,  $dT/dt$ , of the system. One can compute the magnitude of this error,  $\delta Q_d$  in watts, from a knowledge of the maximum possible  $dT/dt$  and the specific heats and masses of the various components of the metered section of the plate as follows:

$$\delta Q_d = dT/dt \sum C_i M_i$$

where:

$C_i$  = the specific heat of the  $i$ th component of the plate, J/kg · K,

$M_i$  = the mass of the  $i$ th component, kg, and

$dT/dt$  = potential or actual drift rate of the plate, K/s.

The specimen heat capacity also contributes to the drift error, but for low-density insulations the heat capacity of the specimen is small compared to the plate. This error also can be determined by measuring the dependence of drift rate on measured heater power. Comparison of the calculated and measured results is advised to increase confidence in the reported result.

9.4.4 *Power Determination Error*, composed of both systematic,  $\delta_s Q_p$ , and random,  $\delta_r Q_p$ , components. With high quality instrumentation these errors can be reduced to an insignificant level. The manufacturers' specifications on bias and precision will normally suffice to define these errors.

#### 9.5 *Temperature and Temperature Difference:*

9.5.1 Temperature error is composed of systematic,  $\delta_s T$ , and random,  $\delta_r T$ , components. In addition, these errors are further subdivided according to the source of the error:

9.5.1.1 *Calibration Error*,  $\delta_s T_c$ , is entirely systematic as long as the same calibration is used. It is, however, not necessarily the same for each temperature sensor. In the case of thermocouples, calibration is frequently performed for each spool of wire, not for each piece of wire from that spool. Therefore, systematic differences can occur as one progresses through the spool. The calibration is frequently represented by an equation which approximates the experimental calibration data taken at selected temperatures. If a digital read-out device is used that yields temperature directly, the calibration formulation is built into the device and the same basis for error exists.

9.5.1.2 *Instrumentation Measurement Error*,  $\delta T_m$ , occurs when the sensor output is measured. This error contains both systematic and random components. Each component should be estimated from equipment manufacturer's specifications and from estimated spurious circuit effects. In addition, temperature errors are introduced by long- and short-term control fluctuations. A helpful procedure to assess the magnitude of these errors is as follows. Place the guarded heating unit in thermal contact with the adjacent cold plates (insert high conductance plates in place of the specimens if the plates cannot be placed physically together). Adjust the cold plates to the desired temperature; control this temperature until steady-state is reached. The metered area heater should be off. Periodically read the isothermal surface temperatures to detect systematic differences and random variations over an extended time.

9.5.1.3 *Sensor Positioning*, a potentially significant source of error in temperature measurement is caused by improper positioning of the sensor or the disturbance caused by the temperature sensor itself. It is intended that the average temperature of each specimen surface be measured. If the sensor is mounted in the plate surface, thermal contact resistance between the plate and specimen is a source of error. If the sensor is mounted in the specimen surface,

sensor separation (specimen thickness) is a source of error. If the specimen is inhomogeneous across the metered area, surface temperature variations exist and the indicated temperature will depend on its location on the surface. If heatflows along the sensor leads from the external environment, the measured temperature will be in error because of the presence of the sensor. For a single test on a given specimen, this source of error,  $\delta_s T_p$ , is systematic. A performance check that is helpful to determine the potential temperature error due to temperature nonuniformity is as follows: Assemble a multijunction thermocouple and place it between the specimen and plate in question. Establish steady-state at the desired test condition. Determine the variation in temperature across the plate from the multijunction thermocouple outputs.

9.5.1.4 A helpful technique to estimate interface temperature errors is to mount sensors both within the plate and within the specimen surface. Then perform a test and calculate the difference between the two sets of data.

9.5.2 Temperature difference error is also composed of systematic,  $\delta_s \Delta T$ , and random components,  $\delta_r \Delta T$ . Care must be exercised in estimating these components compared to the error components for temperature itself. The results can depend strongly on whether a differential measurement or two absolute measurements are performed. Because  $\Delta T$  is frequently small, large percentage errors can occur if care is not observed. For example, a 1-K error at 300 K in the surface temperature measurement results in a error of 1 K in the mean temperature, which corresponds to about 0.2 % error in thermal conductance for typical insulations. However, this same error in  $\Delta T = 25$  K corresponds to a 4 % error in  $\Delta T$  and in thermal conductance. The ad hoc experiment described in 9.5.1.3 is recommended to help form estimates of these error components.

9.6 *Specimen Thickness Error,  $\delta_s L$ , and meter area error,  $\delta_s A$ .* are both systematic errors. The specimen thickness error is determined by the ability to measure the plate spacing (including variations of this thickness over the metered region) or, in the case of rigid specimens, the specimen thickness and the changes due to thermal expansion. The effect of bowing or warping at operating temperatures should be given attention. At relatively large thicknesses (above 5 cm) this error can be maintained below 0.5 %. At small thicknesses (below 0.5 cm) this error may become a dominating factor in the overall accuracy. The meter area error is usually small except for the assumption about what proportion of the gap area to include. This error is difficult to estimate for very thin specimens or when a discontinuity in

the specimen occurs at the gap. The specimen thickness error will contain a random component,  $\delta_r L$ , due to assembly and disassembly.

9.7 *Thermal Conductance or Thermal Resistance*—The relative uncertainty in thermal conductance,  $C$ , caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\delta C/C)^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta \Delta T/\Delta T)^2$$

where  $\delta Q/Q$  and  $\delta \Delta T/\Delta T$  are the total relative uncertainties of heat flux and temperature difference, respectively. The same equation applies to thermal resistance. Included in the total relative uncertainties are those due to the measurement as well as those discussed in Practice C 1045.

9.8 *Thermal Conductivity or Thermal Resistivity*—The relative uncertainty in thermal conductivity,  $\lambda$ , caused by either random or systematic errors may be calculated from the following error propagation formula:

$$(\delta \lambda/\lambda)^2 = (\delta Q/Q)^2 + (\delta \Delta T/\Delta T)^2 + (\delta A/A)^2 + (\delta L/L)^2$$

where  $\delta A/A$  and  $\delta L/L$  are the total relative uncertainties of area and thickness, respectively. Again, the above total relative uncertainties include not only the measurement uncertainty, but also the effect of material variability and deviations from the definitions as discussed in Practice C 1045. In addition, it should be noted that the temperature to which each measured property is assigned also contains a measurement error that effects the uncertainty of the final result. The effect of this error increases as the temperature dependence of the measured property increases.

9.9 It is recommended that a confirmation of these calculated uncertainties be conducted periodically by measuring specimens from established standard reference materials or calibrated transfer specimens. For further information on this see Refs (23), (24), (25), (26), (27), (28), and (29).

## 10. Report

10.1 The report of the results of each test shall include identification of the specimen, the environmental test condition, salient features of the apparatus, and measured results along with their estimated systematic and random uncertainties. The measured results shall be the average values as obtained from the test. If unusual circumstances exist that prevent compliance with the method, they shall be described. The results shall be reported in a form similar to that shown in Fig. 4. Narrative details requiring further space may be attached on a separate sheet of the report. When possible, a description of the physical characteristics of the specimen are helpful to the data analyst. Test results shall be reported in both conventional British thermal units and SI units.

<b>Operator:</b> _____	<b>Test Number:</b> _____
	<b>Duration of Test:</b> _____
<b>Specimen Identification:</b>	Product name, manufacturers description
<b>Specimen Characteristics:</b>	Unique characteristics such as degree of homogeneity or anisotropy, density (optimal)
<b>Specimen Conditioning:</b>	Temperature, time, humidity
<b>Specimen Dimensions and Mass:</b>	Before and after conditioning and after measurement
<b>Apparatus Description:</b>	Size, shape, and orientation of plates
	Single or double-sided operation, description of secondary guarding, unique procedures

Variable	Measured Value	Uncertainty	
		Systematic	Random
O. W			
T <sub>H</sub> . K			
T <sub>C</sub> . K			
T. K			
ΔT. K			
A. m <sup>2</sup>			
L. m			
Fill gas pressure, P <sub>g</sub>			
Other			

Derived thermal transmission properties including applicable range of conditions shall be determined in conformance to Practice C 1045.

FIG. 4 Example Report Form

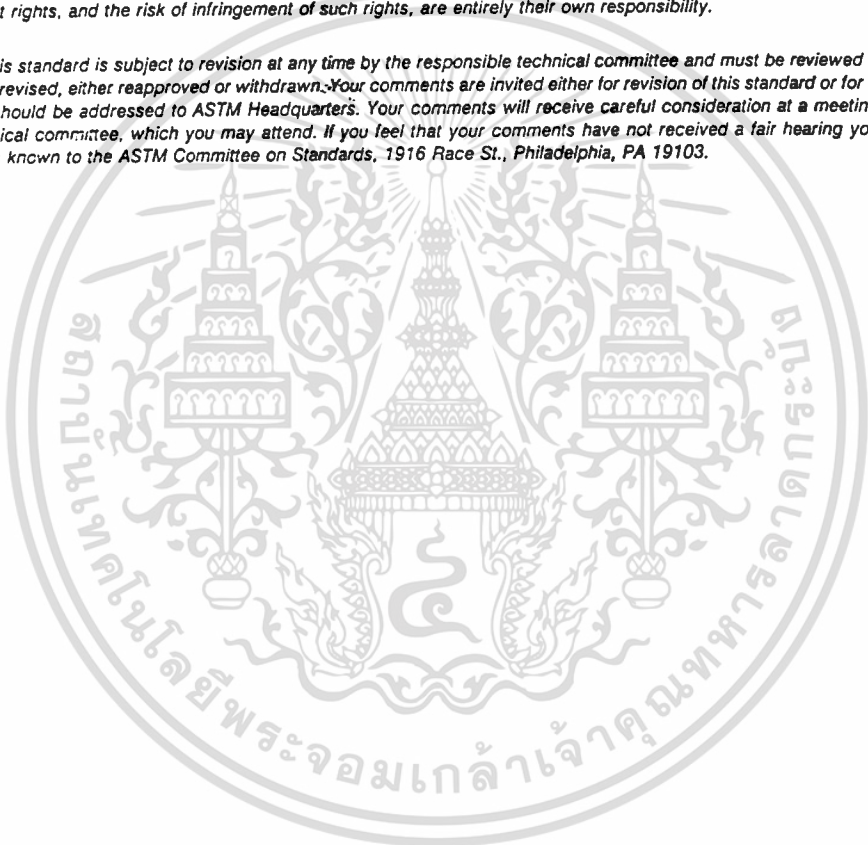
REFERENCES

- (1) Bankvall, C. G., "Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and Their Investigation in a Special Guarded Hot Plate." *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*. R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 34-48.
- (2) Brendeng, E. and Frivik, P. E., "New Development in Design of Equipment for Measuring Thermal Conductivity and Heat Flow," *ASTM STP 544*. R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 147-166.
- (3) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "A Guarded-Hot-Plate Apparatus for Measuring Effective Thermal Conductivity of Insulations Between 80 K and 360 K," *NBSIR 81-1657*, 1982, 49 pp.
- (4) Pratt, A. W., Chapter 6: "Heat Transmission in Low Conductivity Materials." in *Thermal Conductivity*, Vol 1, R. P. Tye, Ed., Academic Press, 1969, pp. 301-405.
- (5) De Ponte, F. and Di Filippo, P., "Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus." *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*. R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 97-117.
- (6) Woodside, W. and Wilson, A. G., "Unbalance Errors in Guarded Hot Plate Measurements." *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1956, pp. 32-48.
- (7) Woodside, W., "Analysis of Errors Due to Edge Heat Loss in Guarded Hot Plates," *Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of Thermal Insulations, ASTM STP 217*, 1957, pp. 49-64.
- (8) Woodside, W., "Deviations from One-Dimensional Heat Flow in Guarded Hot Plate Measurements," *Review of Scientific Instruments*, Vol 28, 1956, pp. 1933-1937.
- (9) Hust, J. G., "Thermal Anchoring of Wires in Cryogenic Apparatus," *Review of Scientific Instruments*, Vol 41, No. 5, May 1970, pp. 622-624.
- (10) ASTM Subcommittee E20.04, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, ASTM STP 470B*, 1981, 285 pp.
- (11) Sparks, L. L., Powell, R. L., and Hall, W. J., *Cryogenic Thermocouple Tables, NBS Report 9712*, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, 1968, pp. 21.
- (12) Bertasi, M., Bigolaro, G., and De Ponte, F., "Fibrous Insulating Materials as Standard Reference Materials at Low Temperatures." *Thermal Transmission Measurements of Insulation, ASTM STP 660*. R. P. Tye, Ed., 1978, pp. 30-49.
- (13) Shirtliffe, C. J., "Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens." *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544*. R. P. Tye, Ed., 1974, pp. 13-33.
- (14) Bomberg, M. and Solvason, K. R., "Precision and Accuracy of Guarded Hot Plate Method." *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 393-410.
- (15) Siu, M. C. L., "Comparison of Results of Measurements Made on a Line-Heat-Source and a Distributed Heat Source Guarded-Hot-Plate Apparatus." *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 413-418.
- (16) Siu, M. C. L. and Bulik, C., "National Bureau of Standards Line-Heat-Source Guarded-Hot-Plate Apparatus." *Review of Scientific Instruments*, Vol 52(11), 1981, pp. 1709-1716.
- (17) Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program, Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials Laboratory Accreditation Program." *NBSIR 84-2890*, 1984, 17 pp.
- (18) Donaldson, I. G., "A Theory for the Square Guarded Hot Plate—A Solution of the Heat Conduction Equation for a Two Layer System," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol XIX, 1961, pp. 205-219.
- (19) Donaldson, I. G., "Computer Errors for a Square Guarded Hot Plate for the Measurement of Thermal Conductivities of Insulating Materials," *British Journal of Applied Physics*, Vol 13, 1962, pp. 598-602.
- (20) Pratt, A. W., "Analysis of Error Due to Edge Heat Loss in Measuring Thermal Conductivity by the Hot Plate Method." *Journal of Scientific Instruments*, Vol 39, 1962, pp. 63-68.
- (21) Somers, E. V. and Cybers, J. A., "Analysis of Errors in Measuring Thermal Conductivity of Insulating Materials," *Review of Scientific Instruments*, Vol 22, 1951, pp. 583-586.
- (22) Troussart, L. R., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Guarded Hot Plate Apparatus and its Computer Implementation," *Journal of Thermal Insulation*, Vol 4, 1981, pp. 225-254.
- (23) Pelanne, C. M., "The Development of Low Density Glass-Fiber Insulation as Thermal Transmission Reference Standards," *Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 763-776.

- (24) Rennex, B. G., Jones, R. R., and Ober, D. G., "Development of Calibrated Transfer Specimens of Thick, Low-Density Insulations," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 419-426.
- (25) Shirliffe, C. J., "Effect of Thickness on the Thermal Properties of Thick Specimens of Low-Density Thermal Insulation," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 36-50.
- (26) Siu, M. C. I., "Fibrous Glass Board as Standard Reference Material for Thermal Resistance Measurement Systems," *Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718*, D. L. McElroy and R. P. Tye, Eds., 1980, pp. 343-360.
- (27) Smith, D. R. and Hust, J. G., "Effective Thermal Conductivity of Glass-Fiber Board and Blanket Standard Reference Material," *Proceedings of the Seventeenth International Thermal Conductivity Conference*, J. G. Hust, Ed., Plenum Press, 1983, pp. 483-496.
- (28) Smith, D. R. and Hust, J. G., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of a Glass Fiberboard Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 7, July 1981, pp. 408-410.
- (29) Smith, D. R., Hust, J. G., and Van Poolen, L. J., "Measurement of Effective Thermal Conductivity of Glass Fibreblanket Standard Reference Material," *Cryogenics*, Vol 21, No. 8, August 1981, pp. 460-462.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

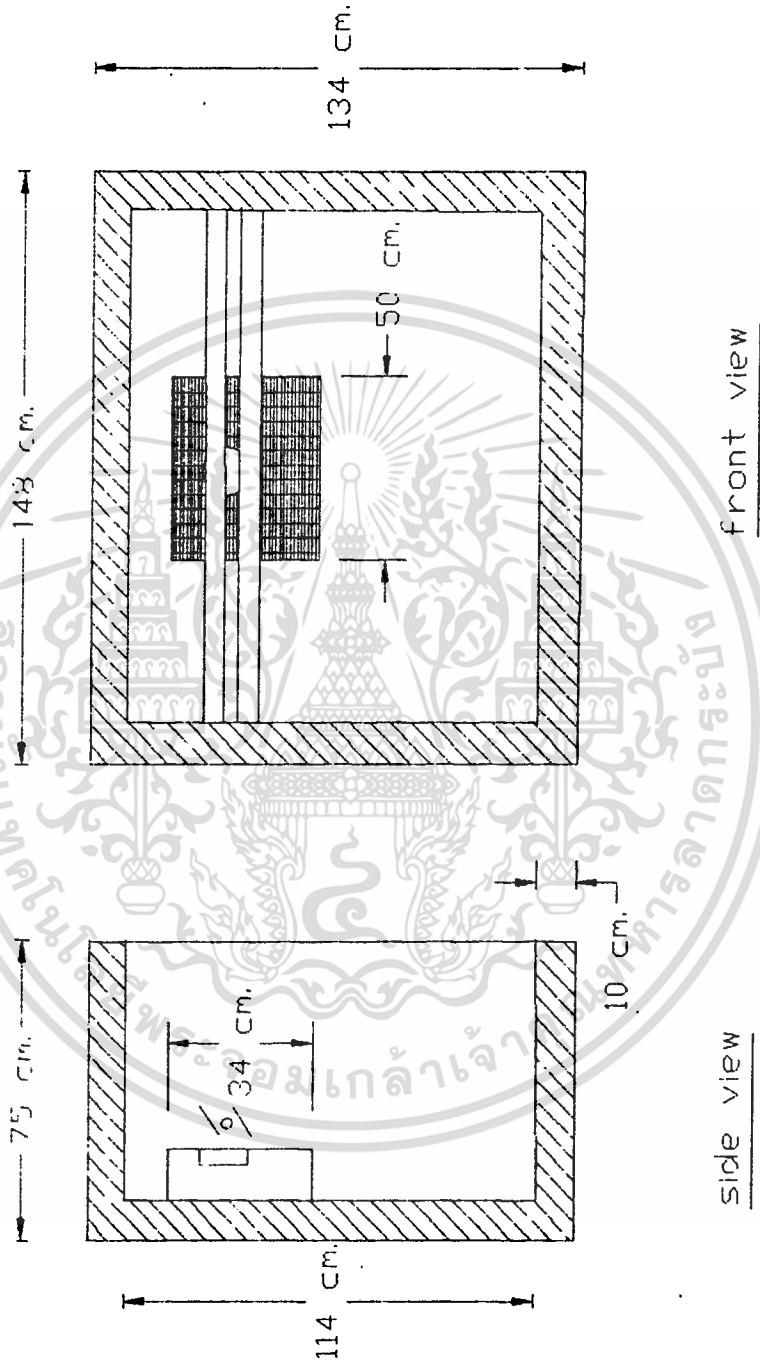
This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



**ภาคผนวก ข.**

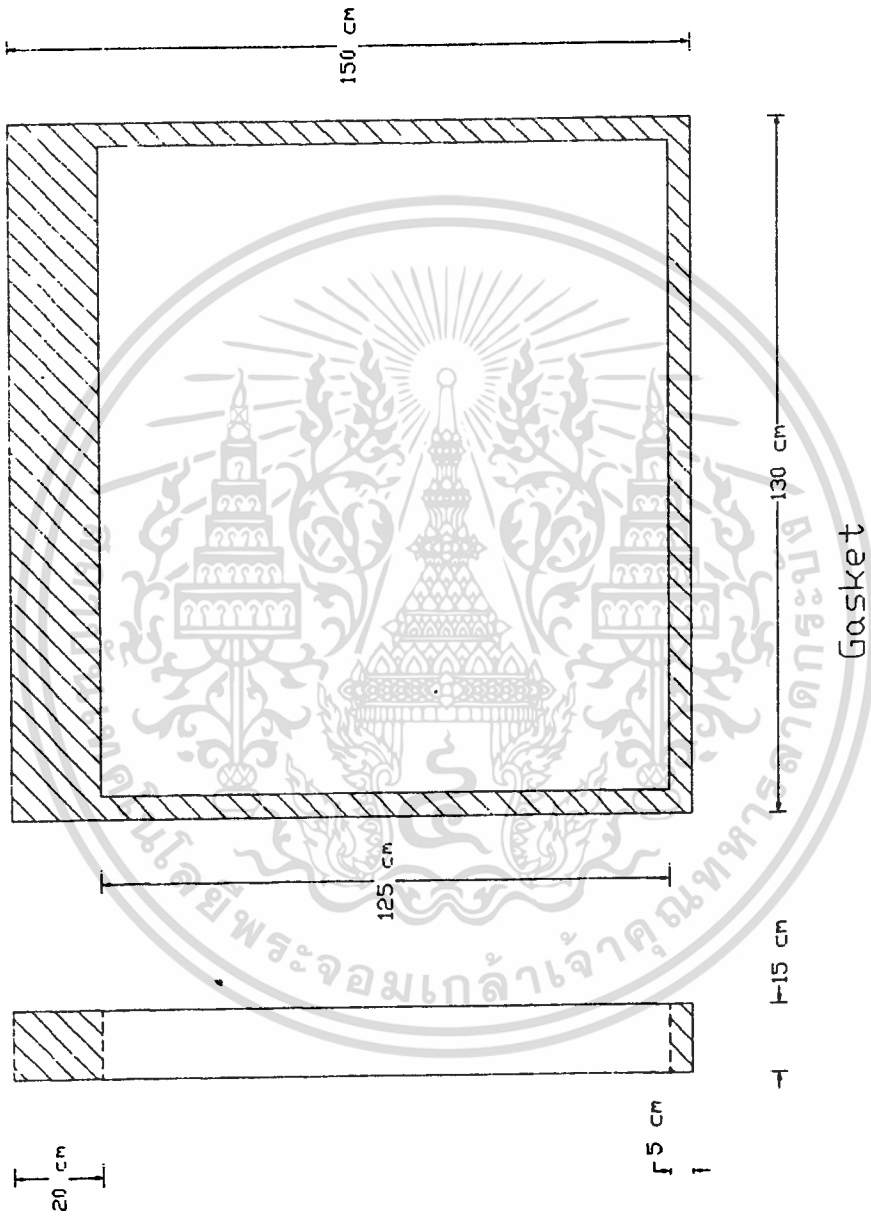


Cold Box



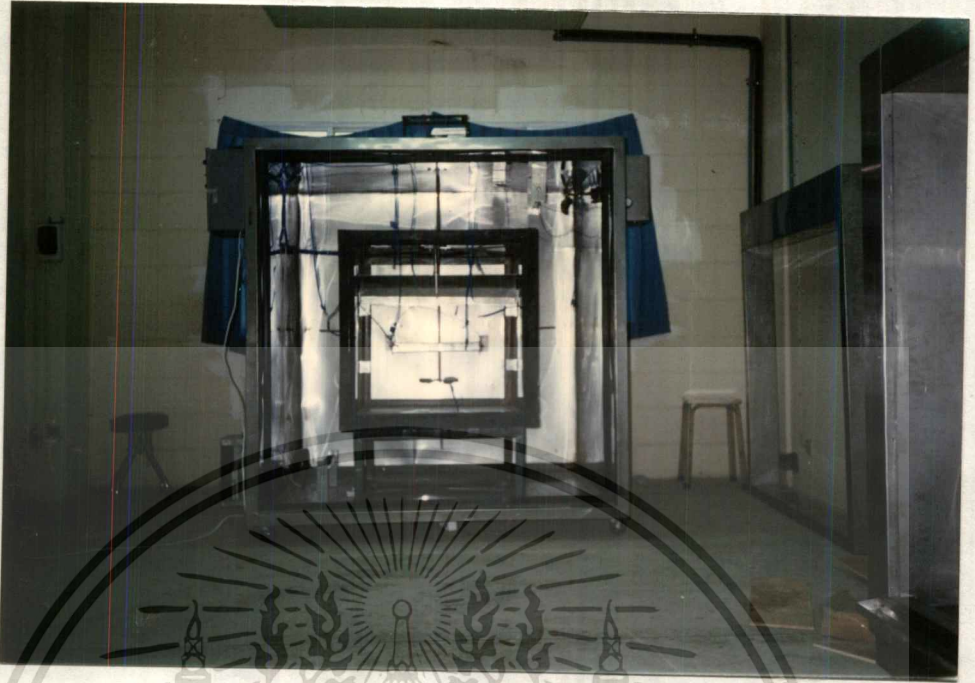
front view

side view

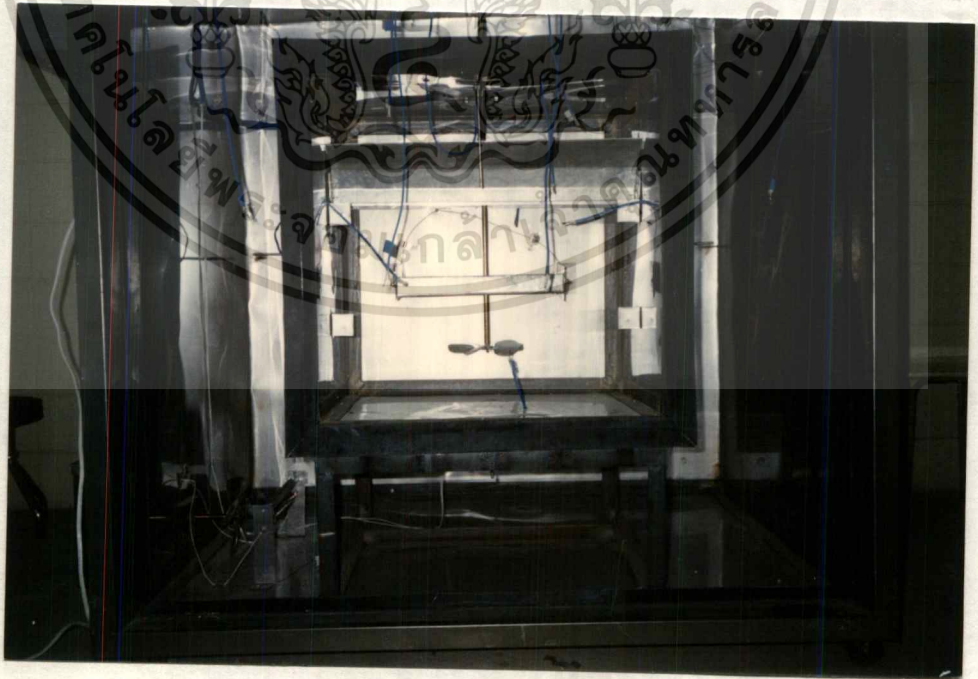


**ภาคผนวก ค.**

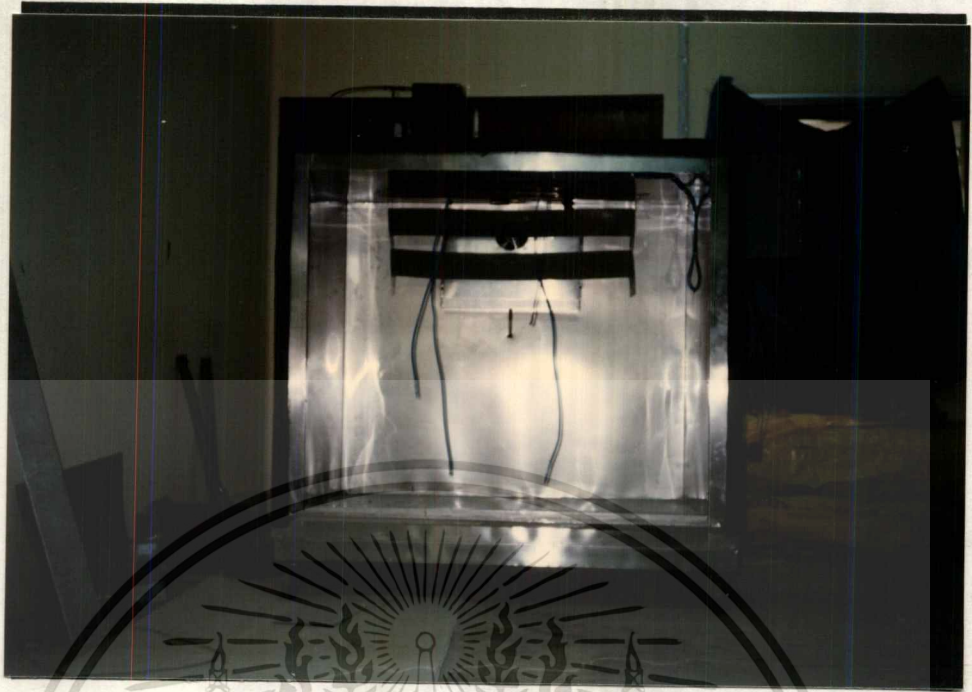




รูปแสดง Hot Box



รูปแสดง Metering Box



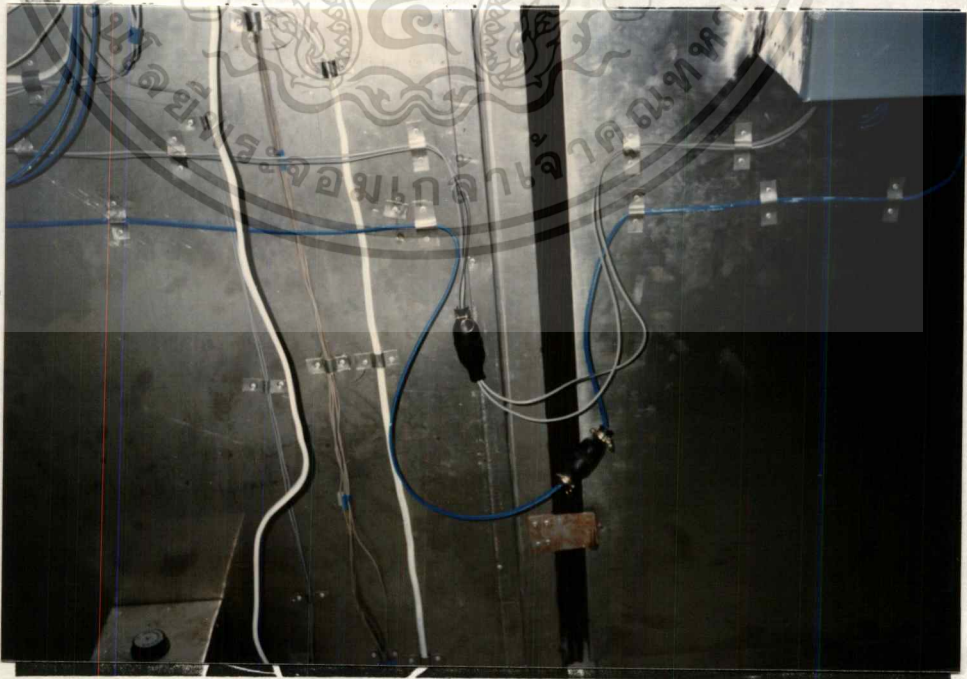
รูปแสดง Colded Box



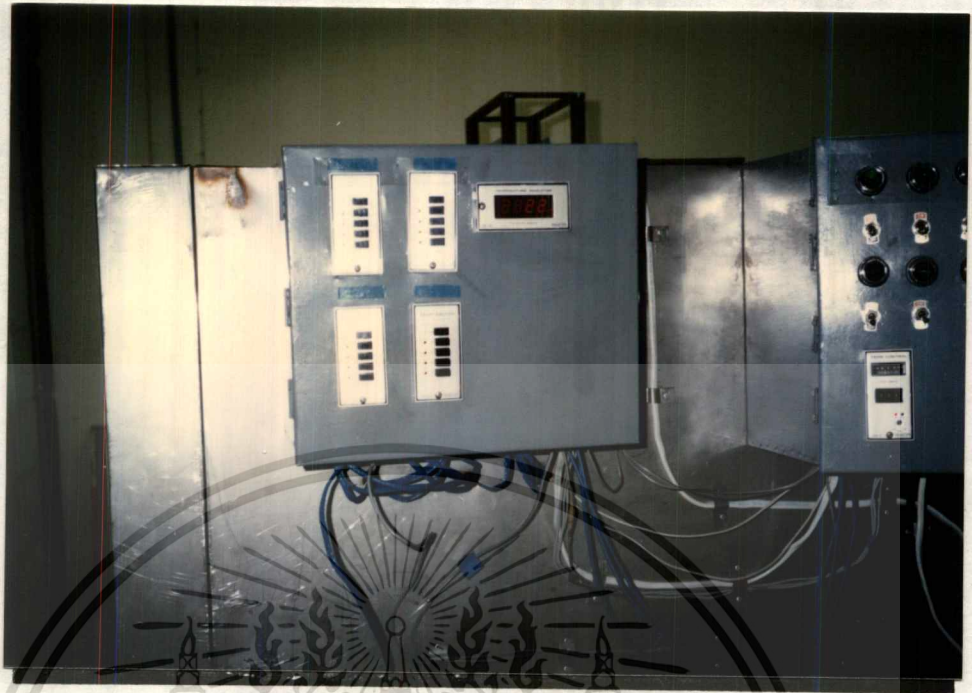
รูป Gasket



รูปแสดงระบบการทำงานความเย็นของ Cooled Box



รูปแสดงการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่าง Hot Box และ Cooled Box



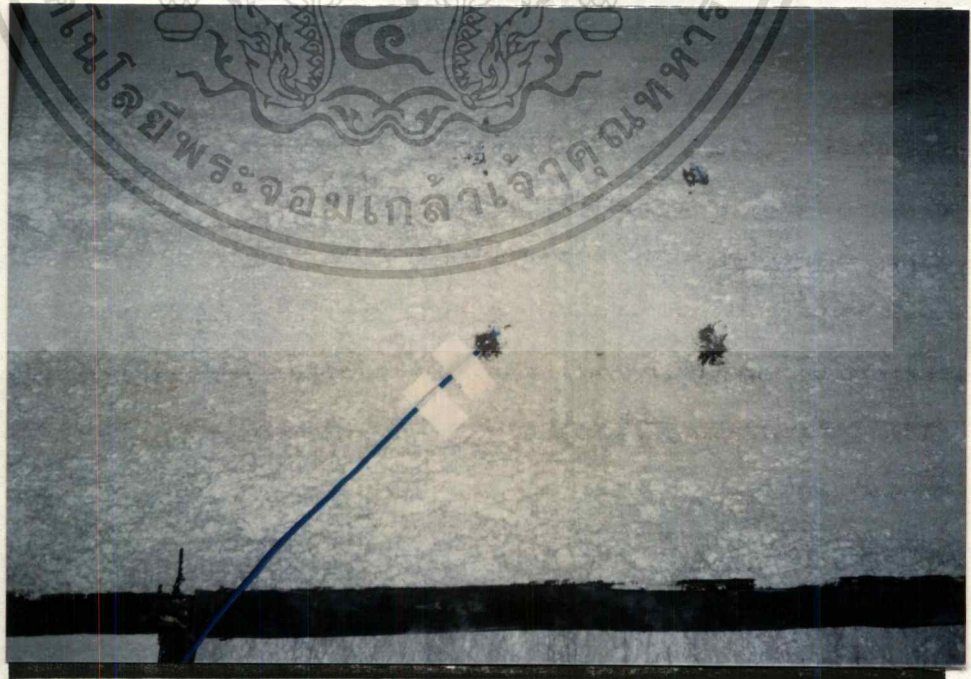
รูปแสดง Control Box ของ Hot Box



รูปแสดง Control Box ของ Colded Box



รูปแสดงการประกอบชิ้นงานทดสอบ



รูปแสดงการติดตั้ง Thermocouple กับจุดที่ต้องการวัดบนชิ้นงานทดสอบ

**ภาคผนวก ง.**



## ขั้นตอนการสั่งให้ระบบทำงาน

1. เชียบปลั๊กให้ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบและเชียบปลั๊กต่อระหว่าง Guarded Box และ Cold Box แล้วเปิดให้ Breaker 30 A และ 10 A ให้อยู่ในตำแหน่ง on ซึ่งเมื่อสับ Breaker อยู่ในตำแหน่ง on จะทำให้ชุด TS และ TI ทำงาน

2. ปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้ Heater ใน Hot Box ทำงานโดย Heater ใน Guarded Box จะตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการโดย Thermostat ที่ติดไว้ที่กล่องของพัดลมตัวที่ 2 และ 3 และ Heater ใน Metering Box จะตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการโดย Temperature Controller ที่ Control Box II

3. เปิดสวิทช์ MBH , GBH1 , GBH2 , FAN1 , FAN2 , FAN3 ให้อยู่ในตำแหน่ง on เพื่อเป็นการเริ่มการทำงานของ Heater ทุกตัวและพัดลมทุกตัว

4. ปลดปล่อยระบบทำงานจนถึงสถานะเสถียร (ประมาณ 6 ชั่วโมง) โดยที่สถานะเสถียรสามารถสังเกตจากการที่อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ใน Metering Box คงที่ และอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ใน Guarded Box (ซึ่งปกติอุณหภูมิใน Metering Box และ Guarded Box ควรเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน) สำหรับการอ่านค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ใน Guarded Box , Metering Box และ Cold Box จะต้องใช้ TS1 - TS5 และ TI ซึ่งมีขั้นตอนการปฏิบัติงานในการใช้งาน TS1 - TS5 และ TI ดังนี้

4.1 TS ของจุดที่ต้องการอ่านค่าจะถูกกดปุ่มที่เป็นหมายเลขของจุดที่ต้องการอ่านค่าอุณหภูมิและ TS ตัวอื่น ๆ ถูกกดอยู่ที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณจากจุดที่ต้องการอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัว TS ตัวอื่น ๆ ไปได้โดยไม่มีการรบกวน และเข้าสู่ TI เพียงจุดเดียว เพราะฉะนั้นการอ่านค่าของเราจะอ่าน (แสดงผลที่ TI) ได้ครั้งละ 1 จุดเท่านั้น (เพราะฉะนั้นจะมี TI เพียง 1 ตัว) ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการอ่านค่าอุณหภูมิที่จุด 4 ซึ่งอยู่บน TS1 ก็จะต้องให้ TS2 - TS5 ถูกกดอยู่ที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณที่จุด 4 บน TS1 ผ่าน TS2→TS3→TS4→TS5→TS1 ได้ค่าอุณหภูมิที่จุด 4 แสดงออกมาหรือถ้าต้องการอ่านค่าอุณหภูมิที่จุด 10 บน TS3 ก็จะต้องให้ TS1 , TS2 , TS4 และ TS5 ถูกกดอยู่ที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณจากจุด 10 บน TS3 ถูกส่งผ่านไป TS5→TI เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิที่จุด 10 ออกมา

4.2 เนื่องจากอุปกรณ์ที่ต่อกันเป็นวงจร ต้องส่งสัญญาณเป็นแบบตามลำดับ คือ สัญญาณส่งจาก TS1→TS2→TS3→TS4→TS5→TI ดังนั้นสัญญาณที่ส่งจาก TS1 จะต้องส่งไปยัง TS2→TS3→TS4→TS5→TI ทำให้ TS2 , TS3 , TS4 , TS5 จะต้องถูกกดปุ่มที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณจาก TS1 ผ่านไปยัง TI ได้

4.3 จากเหตุผลในข้อ 4.2 ถ้ามีการกดปุ่มที่เป็นหมายเลขจุดที่ต้องการอ่านค่า  
อุณหภูมิพร้อมกัน 2 จุด ซึ่งอยู่บน TS คนละตัวก็จะทำให้จุดที่มีหมายเลข TS สูงกว่าจะถูกอ่านค่า  
อุณหภูมิออกมา เพราะฉะนั้นจุดที่อยู่บน TS เลขน้อยกว่าจะไม่สามารถส่งสัญญาณผ่านไปยัง TI  
ได้ เพราะฉะนั้น TS ที่มีเลขสูงกว่าไม่ได้อยู่ที่ปุ่ม TF เช่นจุด 1 กับจุด 7 ถูกกดทั้ง 2 ปุ่ม ก็จะทำ  
ให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้เป็นค่าอุณหภูมิที่จุด 7 ไม่ใช่จุด 1

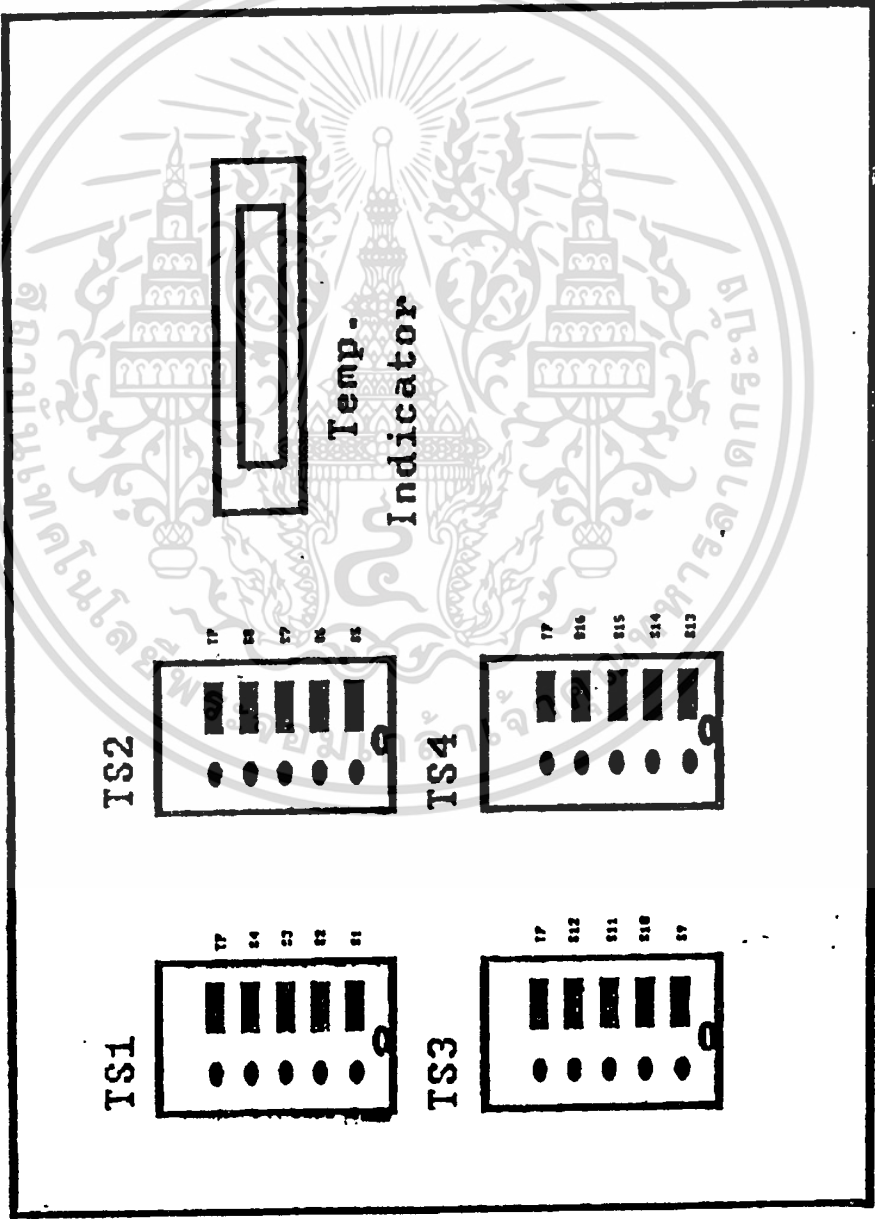
4.4 ถ้าเป็นการกด 2 ปุ่มบน TS เดียวกันจะไม่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ หรือ  
อาจเป็นค่าที่อ่านได้ แต่เราไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นค่าอุณหภูมิที่จุดใด



4.3 จากเหตุผลในข้อ 4.2 ถ้ามีการกดปุ่มที่เป็นหมายเลขจุดที่ต้องการอ่านค่าอุณหภูมิพร้อมกัน 2 จุด ซึ่งอยู่บน TS คนละตัวก็จะทำให้จุดที่มีหมายเลข TS สูงกว่าจะถูกอ่านค่าอุณหภูมิออกมา เพราะฉะนั้นจุดที่อยู่บน TS เลขน้อยกว่าจะไม่สามารถส่งสัญญาณผ่านไปยัง TI ได้ เพราะฉะนั้น TS ที่มีเลขสูงกว่าไม่ได้อยู่ที่ปุ่ม TF เช่นจุด 1 กับจุด 7 ถูกกดทั้ง 2 ปุ่ม ก็จะทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้เป็นค่าอุณหภูมิที่จุด 7 ไม่ใช่จุด 1

4.4 ถ้าเป็นการกด 2 ปุ่มบน TS เดียวกันจะไม่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ หรืออาจเป็นค่าที่อ่านได้ แต่เราไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นค่าอุณหภูมิที่จุดใด





TS1-Temp. Switch 1

TS2-Temp. Switch 2

TS3-Temp. Switch 3

TS4-Temp. Switch 4

S1-Switch 1

S2-Switch 2

S3-Switch 3

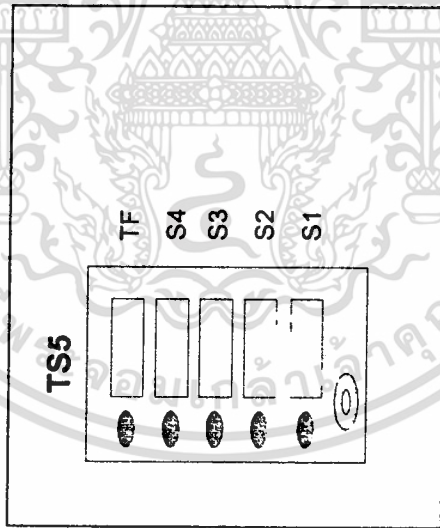
.

.

.

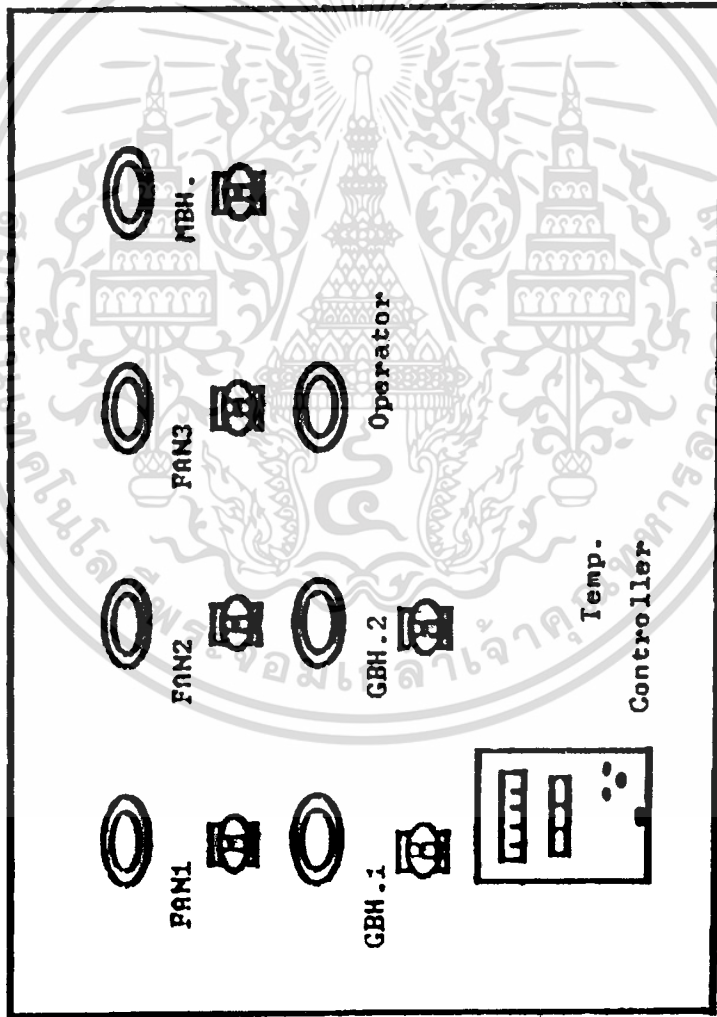
S15-Switch 15

S16-Switch 16



TS5 - Temp. Switch 5





MBH.-Metering Box Heater

GBH.1-Guarded Box Heater

No.1<High Position>

GBH.2-Guarded Box Heater

No.2<Low Position>

FAN1-Metering Box Fan

FAN2-Guarded Box Fan

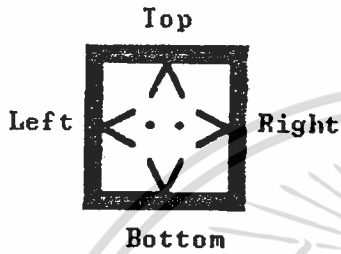
<High Position>

FAN3-Guarded Box Fan

<Low Position>

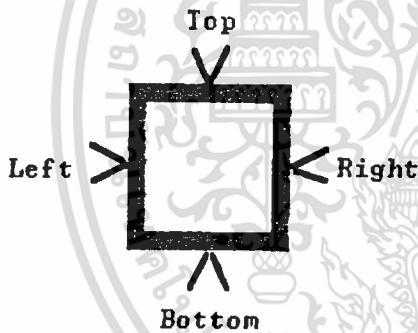
**METERING BOX**

**INSIDE**



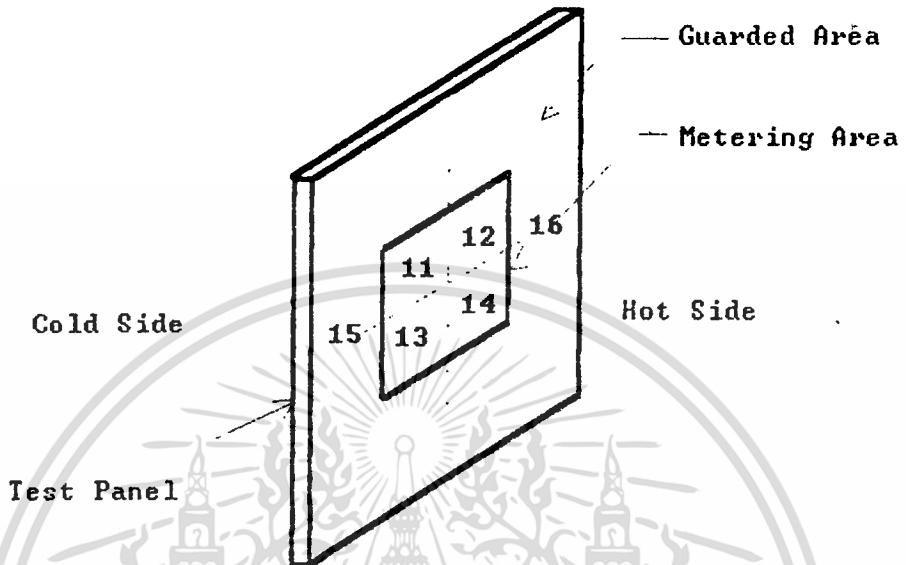
- Switch: 1 - Left Side
- Switch: 2 - Top Side
- Switch: 3 - Right Side
- Switch: 4 - Bottom Side
- Switch: 5 - Back Side

**OUTSIDE**



- Switch: 6 - Left Side
- Switch: 7 - Top Side
- Switch: 8 - Right Side
- Switch: 9 - Bottom Side
- Switch: 10 - Back Side

**TEST PANEL**



**HOT SIDE**

- Switch: 11 - Point 11
- Switch: 12 - Point 12
- Switch: 13 - Point 13
- Switch: 14 - Point 14
- Switch: 15 - Point 15
- Switch: 16 - Point 16

**COLD SIDE**

- Switch: 17 - Opposite 11
- Switch: 18 - Opposite 12
- Switch: 19 - Opposite 13
- Switch: 20 - Opposite 14

## อุปกรณ์การสร้างชุดทดสอบ

### 1. ส่วน Metering Box

	จำนวน
1) Heater แบบ Fin ขนาด 700 W	2 ตัว
2) ไบพัสวาล์วแบบเข็ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว แบบจุด	1 ใบ
3) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 0.24 A 250 V	1 ตัว
4) Thermocouple วัดอุณหภูมิของอากาศชนิด K ติดตั้งภายใน	1 ตัว
5) Thermocouple วัดอุณหภูมิของอากาศชนิด K ติดตั้งภายนอก	5 ตัว
6) สายไฟทนความร้อน	

### 2. ส่วน Guarded Box

	จำนวน
1) Heater แบบ Fin ขนาด 700 W	2 ตัว
2) ไบพัสวาล์วแบบเข็ม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว แบบเป่า	2 ใบ
3) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 0.24 A 250 V	2 ตัว
4) Thermostat	2 ตัว
5) สายไฟทนความร้อน	

3. ส่วน Cold Box

จำนวน

- 1) Compressor แบบลูกสูบ ขนาด  $\frac{3}{8}$  hp
- 2) ขดท่อทองแดงของอีแวปพิเรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 mm.
- 3) เครื่องควบแน่นแบบของไหล ไทล 2 ทางสวนกัน
- 4) ชุด Guide Vane
- 5) Thermocouple วัดอุณหภูมิของอากาศ ชนิด K
- 6) สายไฟทนความร้อน

1 ตัว



## หนังสืออ้างอิง

1. Frank P. Incropera ,and David P. Dewitt, **Fundamental of heat and mass transfer**, third Edition.
2. The American Society for Testing and Materials, **ASTM Desingnation :C236-66,C518-85,C177-85**
3. Thomas G.Beckwith ,and N. Lewis Buck ,**Mechanical Measurements**.
4. Thomas D.Mc Gee , **Principles and Methods of Temperature Measurement**.
5. อัครเดช สินธุภักดิ์ ,การทำควมเย็น ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
6. สมศักดิ์ กิรติวุฒิเศรษฐ์ , เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม ,สถาบันส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
7. เกียรติขจร ธีระจรรยา, ชาญวิทย์ วงศ์รัตนพรกุล และ ถ้านุญ สิมะขจรบุญ ,การพัฒนาเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อน ,ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537

