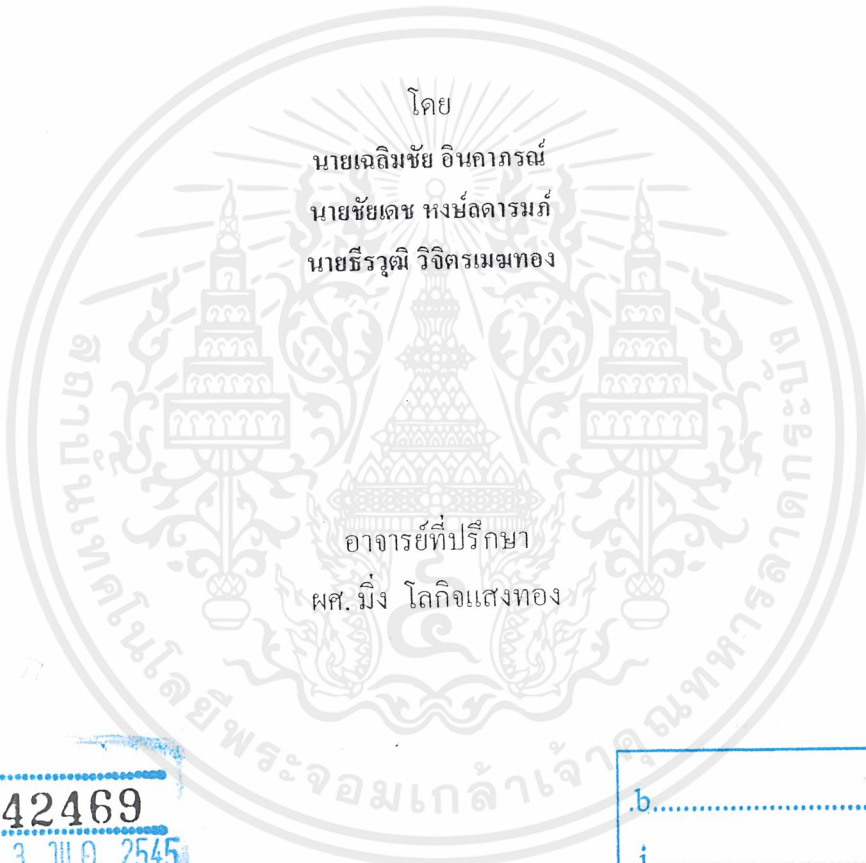




การปรับปรุงพัฒนาเครื่องวัดความนำความร้อนแบบมีกล่องกำบัง
MODIFICATION OF GUARDED BOX CONDUCTIVITY METER



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42469
วัน, เดือน, ปี..... 23 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงพัฒนาเครื่องวัดความนำความร้อนแบบมีกล่องกำบัง

MODIFICATION OF GUARDED BOX CONDUCTIVITY METER

ผู้จัดทำ

1. นาย เฉลิมชัย อินคราภรณ์ รหัสประจำตัว 40010153
2. นาย ชัยเดช หงษ์ถาวรภักดิ์ รหัสประจำตัว 40010173
3. นาย ธีรวุฒิ วิจิตรเมฆทอง รหัสประจำตัว 40010342



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. มิ่ง โลกจิแสงทอง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงพัฒนาเครื่องวัดความนำความร้อนแบบมีกล่องกำบัง

นายเฉลิมชัย อินคาภรณ์ 40010153

นายชัยเดช หงส์ตารมภ์ 40010173

นายธีรวิทย์ วิจิตรเมฆทอง 40010342

อาจารย์มิ่ง โลกิจแสงทอง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาความสำคัญของค่าการนำความร้อนได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในประเทศแถบเขตร้อน เช่น ประเทศไทย เป็นต้น เพราะค่าการนำความร้อนนี้เป็นค่าที่สำคัญมากในการที่จะนำไปใช้ในการเลือกกระบวนการทำความเย็น และระบบการทำความร้อนต่างๆ โดยค่าการนำความร้อนนี้จะช่วยในเรื่องของการออกเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ในระบบนั้น ซึ่งค่าการนำความร้อนดังกล่าวนี้มักจะได้มาจากค่าอ้างอิงจากต่างประเทศ ซึ่งมีความจำกัดมากในด้านต่างๆและอาจเกิดการผิดพลาดได้หากนำค่าดังกล่าวมาใช้ เพราะอาจเกิดจากเนื้อวัสดุอาจไม่เหมือนกันทั้งหมด และในปัจจุบันก็มีการผลิตวัสดุชนิดใหม่ออกมามากมายซึ่งวัสดุเหล่านี้ก็ยังไม่มีการนำความร้อนที่สามารถจะอ้างอิงได้ รวมทั้งสภาวะหรืออุณหภูมิก็อาจมีผลทำให้วัสดุชนิดเดียวกันแต่ต่างสภาวะกันก็อาจทำให้ค่าการนำความร้อนแตกต่างกันได้ ฉะนั้นทำให้เราต้องการเครื่องมือที่สามารถวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุที่จะนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

โครงการนี้ต้องการที่จะปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือวัดค่าการนำความร้อนให้มีประสิทธิภาพในการวัดค่าการนำความร้อนมากยิ่งขึ้น โดยเครื่องมือวัดค่าการนำความร้อนดังกล่าวได้ทำการออกแบบไว้ตามมาตรฐาน AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) ซึ่งใช้ทฤษฎีการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนเอามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และได้มีการสร้างไว้แล้วตามการออกแบบในโครงการของรุ่นที่ผ่านมา ทั้งนี้ทางกลุ่มผู้ร่วมโครงการได้ทำการศึกษาและหาข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขส่วนเหล่านั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่อง

Modification of Guarded Box Conductivity Meter

Chaleamchai Inkraporn

Chaidate Hongladarom

Theerawooth Vijitmakthong

Ming Lokitsangtong Advisor

ABSTRACT

During the past few years, the importance of thermal conductance has become more and more interesting, especially in Thailand which is located a little bit above the equator line. This is due to the fact that the thermal conductance is very essential in the designing process of many cooling and heating systems. In particular, the thermal conductance facilitates the selection of materials to be used in those systems. Lately, most of the thermal conductance utilized is obtained from the western standards. Nevertheless, these standards are subjected to some limits and usage of them may in turn result in mistakes. This problem stems from three major reasons which are the difference in materials' textures; the absence of standards for some newly produced materials nowadays; and, the diversity of atmospheres that lead to different thermal conductance. As a result, it is necessary to develop a device that can precisely measure the thermal conductance of materials.

The objective of this project is to improve and develop the thermal conductance-measuring device in order to increase the efficiency of the device. The device has been designed according to the American Society for Testing and Materials (ASTM) standard which had applied the concepts of heat conduction, heat convection, and heat radiation. Moreover, the device has already been developed by previous years students. This project concentrates on studying and examining mistakes and errors of the device with the intention to increase the efficiency by improving and rectifying mistakes and errors.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ อาจารย์ มิ่ง โลกิจแสงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก รวมทั้งต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำ shop ภาคเครื่องกลทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ต่างๆ และนายไพโรจน์ (โปรเจกต์เครื่องสูบน้ำแรงดันศูนย์กลาง) ที่ให้ยืมกล้องดิจิตอลถ่ายภาพชิ้นงาน

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

เฉลิมชัย อินคาภรณ์
ชัยเดช หงส์ถาวรภักดิ์
ธีรวุฒิ วิจิตรเมฆทอง

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ทฤษฎีการนำความร้อน	4
2.2 การนำความร้อนในสถานะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ	4
2.3 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความเป็นตัวนำความร้อนของวัสดุ	12
บทที่ 3 การพัฒนาและการออกแบบ	13
3.1 หัวข้อการพัฒนาและข้อผิดพลาด	13
3.2 การคิดตั้งปะเก็นฉนวนใยแก้ว	13
3.3 การคิดฉนวนที่ Gasket เพื่อไม่ให้ความร้อนจาก Guarded box ถ่ายเทเข้าสู่ Cold box	15
3.4 การทำท่อลม (Air duct) เพื่อควบคุมทิศทางการไหล ของอากาศเย็นภายใน Cold box	17
3.5 การวัดอุณหภูมิผิวของชิ้นงาน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบวงแหวน	19
3.6 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ	21
3.7 การปรับปรุงอื่นๆ	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	26
4.1 ผลการทดลองที่ 110 °C	26
4.2 ค่าการนำความร้อนที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิวัสดุ	35
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการทดลอง	38
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	39
ภาคผนวก ก. มาตรฐาน C 236-89, C 177-85, C 518-85 ของ ASTM	
ภาคผนวก ข. รูปแบบและขนาดของชุดทดสอบ	
ภาคผนวก ค. ภาพถ่ายแสดงชุดทดสอบ	
ภาคผนวก ง. ขั้นตอนการสั่งให้ระบบทำงาน	
หนังสืออ้างอิง	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นไม้อัด	32
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นกระเบื้อง	33
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นยิบซัม	34
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของ ไม้อัด	35
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระเบื้อง	36
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของยิบซัม	37



สารบัญรูป

รูปที่ 1-1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอย่างง่าย	2
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ	5
รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสมมุติสำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม	9
รูปที่ 2.3	9
รูปที่ 2.4 การนำความร้อนในผนังเรียนที่มีการผลิตความร้อนคงที่	11
รูปที่ 3.1 การประกอบปะเก็นใยแก้วกับขอบของ Metering box	14
รูปที่ 3.2 ลักษณะการสัมผัสระหว่างปะเก็นกับแผ่นวัสดุ	15
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งฉนวนบน Gasket	16
รูปที่ 3.4 หลักในการเพิ่ม-ลดขนาดท่อ	17
รูปที่ 3.5 ลักษณะและขนาดของท่อลม	18
รูปที่ 3.6 ลักษณะของจุดวัด	20
รูปที่ 3.7 การติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิบนผิววัสดุ	20
รูปที่ 3.8 กราฟค่าการนำความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ	21
รูปที่ 3.9 กล้อง Temp Switch ที่ Hot box	22
รูปที่ 3.10 กล้องควบคุมที่ Hot box	23
รูปที่ 3.11 กล้องควบคุมที่ Cold box	23
รูปที่ 3.12 การต่อสายไฟและสายเทอร์โมคัปเปิล	24
รูปที่ 3.13 วงจรไฟฟ้าของกล้อง Control box	25

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันคุณสมบัติด้านการนำความร้อนของวัสดุมีความสำคัญอย่างยิ่งในการใช้คำนวณการถ่ายเทความร้อนซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆเช่น การออกแบบด้านระบบทำความร้อน ระบบทำความเย็น ระบบปรับอากาศ การเลือกวัสดุสำหรับโครงสร้างต่างๆ เป็นต้น โดยคุณสมบัติด้านการถ่ายเทความร้อนนี้สามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(Thermal Conductivity) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จัดว่าเป็นคุณสมบัติประเภท Transport Property ทั้งนี้เพราะแสดงการถ่ายเทของพลังงานในของไหล และในของแข็งสำหรับก๊าซและของเหลวนั้น การถ่ายเทพลังงานจะเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานในของแข็งจะเป็นผลมาจากอิเลคตรอนอิสระ และการสั่นสะเทือนของโครงสร้างโมเลกุลเป็นสำคัญ โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆสามารถหาได้จากหนังสือคู่มืออ้างอิงจากต่างประเทศ และข้อมูลดังกล่าวก็มีจำนวนจำกัดไม่ครอบคลุมวัสดุทั้งหมดที่มีอยู่รวมทั้งวัสดุชนิดใหม่ที่มีการผลิตขึ้นอยู่เสมอ ทำให้มีข้อจำกัดอย่างมากในการที่จะนำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้มาใช้จนอาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่เราจะต้องมีอุปกรณ์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่มีความถูกต้องเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

โดยอุปกรณ์หรือเครื่องมือในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้ได้ถูกออกแบบและกำหนดมาตรฐานไว้แล้วโดย ASTM (The American Society for Testing and Materials) โดยตัวเครื่องประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ 2 ส่วนด้วยกัน คือส่วนที่เป็นเครื่องกำเนิดความร้อน และส่วนทำความเย็น โดยในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุนั้น เราจะใช้หลักการนำความร้อนของวัสดุจากความสัมพันธ์ของ Fourier equation ดังนี้

$$q = -kA \frac{dT}{dx} W \quad (1.1)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, Btu/h หรือ W

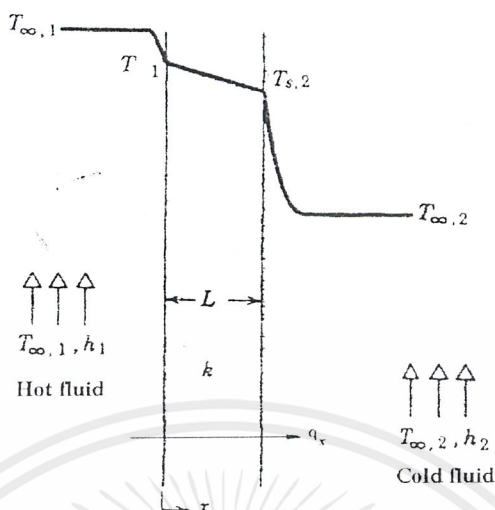
A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน, ft² หรือ m²

$\frac{dT}{dx}$ คือ ค่า Temperature gradient ในทิศทางที่ความร้อนถ่ายเท, °F/ft หรือ °C/m

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity), Btu/h. ft. °F หรือ W/m °C

โดยในการทดสอบนั้นจะให้ความร้อนจากฝั่งเครื่องกำเนิดความร้อนให้แก่ผนังด้านหนึ่งของแผ่นวัสดุซึ่งจะถูกถ่ายเทออกไปสู่ผนังอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นฝั่งเครื่องทำความเย็น ในการถ่ายเทความร้อนนี้เกิดขึ้นจาก

ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองฝั่งโดยการถ่ายเทความร้อนนี้เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการนำความร้อนของวัสดุ นั้นเองดังรูปที่ 1-1



รูปที่ 1-1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอย่างง่าย

อย่างไรก็ตามการสร้างเครื่องแบบดังกล่าวเป็นผลออกมาก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจนักและมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น วัสดุบางอย่างที่ใช้ทำตัวเครื่องนั้นมียุการใช้งานน้อยเกินไป วิธีการวัดยังไม่เป็นมาตรฐานที่แน่นอน อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร และที่ตัวเครื่องก็ยังมีปัญหาที่การหมุนเวียนอากาศก็ยังไม่ดีพอ รวมทั้งการป้องกันอากาศรั่วไหลก็ยังไม่ดีพอ ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิทั้งสองฝั่งได้ เป็นต้น ฉะนั้นเราจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อที่จะพัฒนาและปรับปรุงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือหรืออุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2.2 เพื่อทำการปรับปรุงวิธีการวัดหรือวิธีการทดลองเพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลองมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของงาน

โครงการนี้จะทำการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์หรือเครื่องมือสำหรับวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยอาศัยการศึกษาโครงสร้างและระบบการทำงานของเครื่องจากแบบที่มีอยู่ซึ่งได้มาจากมาตรฐานของ ASTM (The American Society for Testing and Materials) แล้วมาทำการศึกษหาข้อบกพร่องหรือข้อผิดพลาดต่างๆ โดยศึกษาเทียบกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แล้วมาทำการปรับปรุงแก้ไข ในส่วนต่างๆ โดยจะสร้างอยู่บนพื้นฐานของระบบASTM

แต่โครงการนี้จะไม่สนใจในแง่ของการที่จะทำ Software เพื่อที่จะช่วยในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนให้ง่ายขึ้นแต่จะเน้นในด้าน Hardware เป็นหลักมากกว่า ซึ่งโครงการนี้จะทำการปรับปรุงอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้การวัดหรือการหาค่าสัมประสิทธิ์มีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมทั้งทำการหาวิธีการวัดหรือวิธีการทดลองที่เหมาะสมอีกด้วย

นอกจากนั้นในโครงการนี้ยังถือว่าเป็นโครงการที่ทำการปรับปรุงและพัฒนา เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในการใช้งานในสถานะอุณหภูมิปกติหรือสูงกว่านี้เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในแถบภูมิประเทศแถบนี้ แต่อย่างไรก็ตามอาจมีข้อจำกัดของข้อมูลบางประการ เช่น ยังไม่อาจทดลองในสภาพภูมิอากาศต่างๆ ได้ รวมทั้งการหาค่าการนำความร้อนนั้นอาจจะยุ่งยากซับซ้อนอยู่บ้างหรือต้องอาศัยการคำนวณหลายขั้นตอน ยังไม่มีความสะดวกมากนัก

1.4 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งก็มีเรื่องหลัก ๆ อยู่ 3 เรื่องด้วยกัน คือ หลักการนำความร้อนของวัสดุ หลักการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ หลักการหมุนเวียนของอากาศ หลักการวัดอุณหภูมิและการติดตั้ง Thermocouple และหลักการคำนวณต่างๆ โดยในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่อง โดยจะทำการอธิบายถึงทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องที่ได้นำมาใช้ในการพัฒนา จากนั้นก็จะนำเอาความรู้ที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดมาออกแบบสิ่งที่เราจะทำการเปลี่ยนหรือติดตั้งเพิ่มเติมหรือทำการแก้ไขสิ่งค้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องซึ่งคำอธิบายต่างๆ นี้จะประกอบกับภาพเพื่อทำให้เกิดความเข้าใจได้มากขึ้น โดยรายละเอียดของหัวข้อนี้จะอยู่ในบทที่ 3

จากนั้นก็เริ่มเข้าสู่ขั้นตอนของการทดลองสิ่งที่ได้ทำการปรับปรุงและพัฒนาไป ต่อจากนั้นเราก็จะทำการแสดงผลและทำการวิเคราะห์ผลการทดลองให้ได้ทราบ โดยทำการนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบของกราฟเพื่อให้ทำให้เกิดการเปรียบเทียบอย่างเห็นได้ชัดเจนและง่ายต่อการเข้าใจซึ่งจะได้นำเสนอในบทที่ 4 และบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายก็จะเป็นการสรุปการทำงาน ผลที่ได้รับจากโครงการชิ้นนี้ และแนวทางในการพัฒนาโครงการนี้เพิ่มเติม รวมทั้งแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

โดยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะมีภาคผนวกอยู่ท้ายเล่มเพื่อที่จะขยายบางส่วนของผู้อ่านยังสับสนหรือต้องการศึกษาเพิ่มเติม เช่น จะมีส่วนที่อธิบายถึงขั้นตอนการสั่งให้ระบบทำงาน รูปแสดงแบบและขนาดของชุดทดสอบ ภาพถ่ายแสดงชุดทดสอบ และตารางรายการแสดงอุปกรณ์ เป็นต้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีการนำความร้อน

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนแบบจลน์ (kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไปหาอยู่ภายในโครงสร้างของโมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ตามไปด้วย

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำหนดจากบิโอท์ (Biot) แต่ต่อมาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กล่าวคือ อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน และเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูรีเยร์กำหนดเป็น

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

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

โดยที่ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

q_x'' คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity of material) และเป็นค่าบวก

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน

$\frac{dT}{dx}$ คือ ค่า Temperature gradient ในทิศทางที่ความร้อนถ่ายเท, $^{\circ}\text{F}/\text{ft}$ หรือ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$

2.2 การนำความร้อนในสถานะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One Dimensional, Steady-State Conduction)

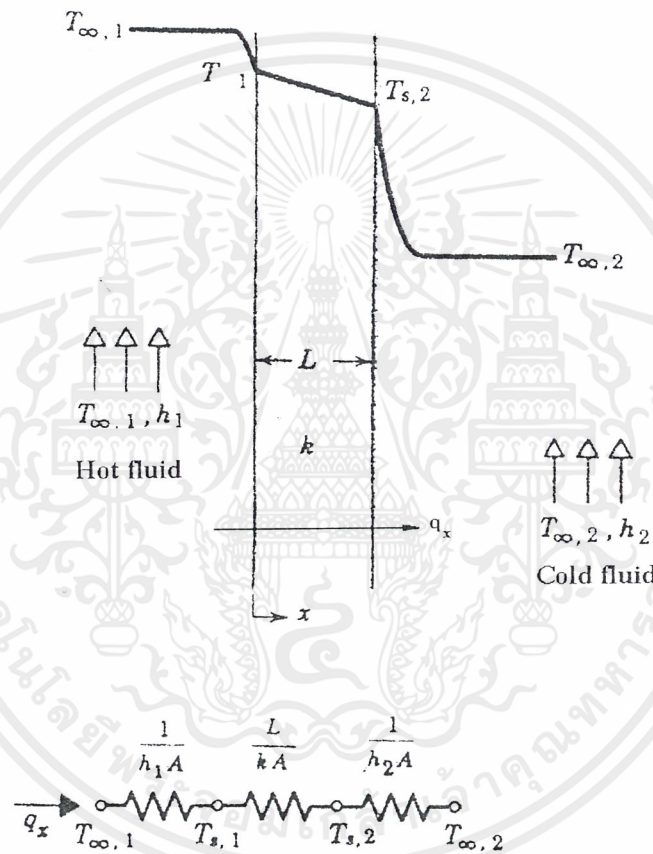
เป็นการพิจารณาเกี่ยวกับปัญหาการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอในหนึ่งมิติเพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิ และความร้อนที่ไหลภายในวัตถุที่รูปร่างเป็นแบบผนังเรียบ ลักษณะของการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้จะมีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ และการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียงทิศทางเดียว โดยที่อุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และลักษณะของการที่มีและไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในวัตถุอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 4

2.2.1 ผนังเรียบ (Plane wall)

สำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติของผนังเรียบ อุณหภูมิจะเป็นฟังก์ชันของ โคออร์ดิเนต x และการส่งผ่านความร้อนพิจารณาเฉพาะในทิศทางนี้ ในรูป 2.1 ของไหล 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันไหลผ่านในแต่ละด้านของผนังเรียบ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นโดยการพาความร้อนจากของไหลร้อนที่ $T_{\infty,1}$ ตัวผิวหนึ่งของผนังที่ $T_{s,1}$ และผ่านผนังโดยการนำไปยังอีกด้านหนึ่งที่ $T_{s,2}$ จากนั้นความร้อนจะถูกพาออกไปโดยของไหลเย็นที่ $T_{\infty,2}$

ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ สิ่งแรกที่จะต้องรู้คือ การกระจายของอุณหภูมิภายในผนังเรียบ



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ

2.2.2 การกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution)

การกระจายของอุณหภูมิภายในผนัง หาได้จากสมการการพุ่มกระจายของความร้อนและเงื่อนไขขอบแบบต่างๆ ตามเงื่อนไขดังกล่าว และไม่มีการผลิตความร้อนภายในผนัง สมการจะลดรูปเป็น

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.2)$$

ถ้าสมมุติค่า k คงที่ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง ได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.3)$$

โดยเงื่อนไขที่ขอบตามรูปได้ว่า $T(0) = T_{s1}$ และ $T(L) = T_{s2}$ แทนใน (2.3) จะได้

$$C_1 = (T_{s2} - T_{s1})/L$$

$$C_2 = T_{s1}$$

ดังนั้นคำตอบทั่วไปของการกระจายของอุณหภูมิในผนัง คือ

$$T(x) = (T_{s2} - T_{s1})x/L + T_{s1}$$

โดยใช้กฎของฟูรีเยร์ เพื่อหาค่าตอบของการส่งผ่านความร้อน นั่นคือ

$$T(x) = (T_{s1} - T_{s2}) \frac{x}{L} + T_{s1} \quad (2.4)$$

สังเกตว่า A เป็นพื้นที่ของผนังซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน และฟลักซ์ความร้อนนั้นก็คือ

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s1} - T_{s2}) \quad (2.5)$$

สังเกตเช่นกันว่า ค่าฟลักซ์ความร้อนเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ x ซึ่งเป็นลักษณะที่ตรงกับสมการ (2.2) ซึ่งหมายความว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x

$$q''_x = q_x / A = (k/L)(T_{s1} - T_{s2}) \quad (2.6)$$

2.2.3 ความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

ในที่นี้เราจะนำสมการ (2.5) ซึ่งให้แนวทางที่สำคัญมากมาใช้นั้นคือความคล้ายคลึงกันระหว่างการฟุ้งกระจายของความร้อนและประจุไฟฟ้า โดยที่ความต้านทานไฟฟ้านั้นเกี่ยวข้องกับให้นำไฟฟ้า ดังนั้นความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้⁶

ต้านทานความร้อนก็ต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน จากสมการ (2.5) ความต้านทานการนำความร้อน คือ

$$R_{\text{conc}} = (T_{s1} - T_{s2}) / q_x = L / kA \quad (2.7)$$

ในทำนองเดียวกัน นำหลักการจำไฟฟ้าในระบบเดียวกัน กฎของโอห์ม ได้ให้รูปแบบความต้านทานไฟฟ้าเป็น

$$R_c = (E_1 - E_2) / I = L / (\sigma A) \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ ความต้านทานความร้อนยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับการพาความร้อน จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (2.9)$$

ความต้านทานความร้อนสำหรับการพา คือ

$$R_{\text{conv}} = (T_s - T_{\infty}) / q = 1 / hA \quad (2.10)$$

วงจรความร้อนสมมูลย์สำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิว แสดงในรูปที่ 2.2x อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จากการแยกพิจารณาของแต่ละช่วงในวงจร ซึ่งได้

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{s1})}{1/h_1A} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{L/kA} = \frac{(T_{s2} - T_{\infty,2})}{1/h_2A} \quad (2.11)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนอาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างอุณหภูมิทั้งหมด $(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$ และความต้านทานความร้อนรวม R_{to}

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{to}} \quad (2.12)$$

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาซ้อนกัน จึงได้

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2A} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ผนังหลายชั้น (Composite wall)

วงจรความร้อนสมมูลย์อาจใช้สำหรับระบบที่ซับซ้อนได้เหมือนกัน เช่น ผนังหลายชั้น ซึ่งจำนวนความต้านทานความร้อนที่ต่ออนุกรมและขนานกัน จะขึ้นอยู่กับชั้นของวัสดุที่ค่าต่างกันพิจารณาผนังเรียบหลายชั้นที่ต่ออนุกรมกันของรูปที่ 2.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของระบบนี้ เขียนได้เป็น

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_t} \quad (2.14)$$

โดยที่ $T_{\infty,1} - T_{\infty,4}$ เป็นผลต่างของอุณหภูมิทั้งหมด และ $\sum R_t$ เป็นผลรวมของความต้านทานความร้อนรวม ดังนี้

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\left[(1/h_1 A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (L_C/k_C A) + (1/h_4 A) \right]} \quad (2.15)$$

หรืออาจหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากการคิดในแต่ละช่วงก็ได้

$$q_x = \frac{(T_{\infty,1} - T_{s1})}{(1/h_1 A)} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{(L_A/k_A A)} = \frac{(T_{s2} - T_{s3})}{(L_B/k_B A)} \quad (2.16)$$

และโดยให้ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient) ซึ่งกำหนดขึ้นมาจากความคล้ายคลึงกันกับกฎของการเย็นตัวของนิวตัน จะได้ว่า

$$q_x \equiv UA\Delta T \quad (2.17)$$

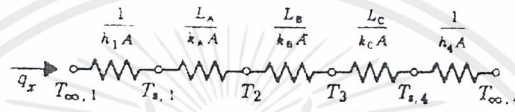
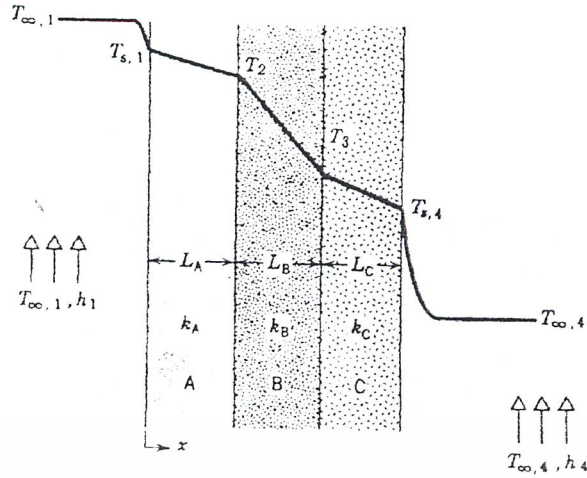
ซึ่ง T เป็นผลต่างของอุณหภูมิรวม จากสมการ (2.14) และ (2.15) จะพบว่า $UA = 1/R_{tot}$ และนำหรับผนังหลายชั้นตามรูป 2.3

$$U = \frac{1}{R_{tot} A} = \frac{1}{\left[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4) \right]} \quad (2.18)$$

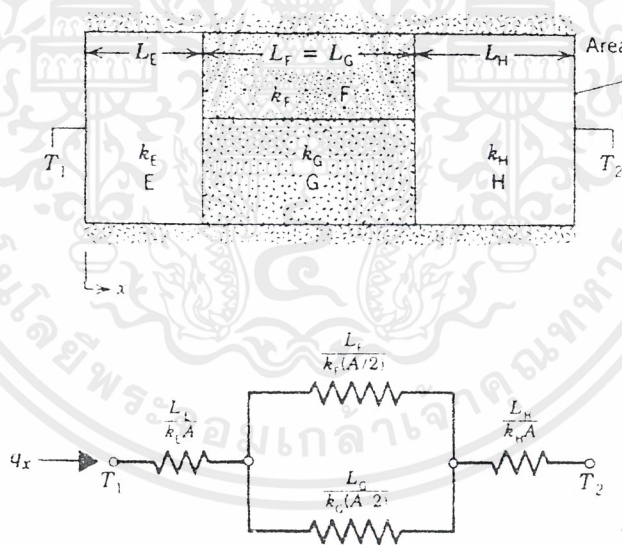
โดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น

$$R_{tot} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 วงจรความร้อนสมมูลย์สำหรับผนังหลายชั้นอย่างอนุกรม



รูปที่ 2.3

ผนังหลายชั้นอาจมีคุณลักษณะตามรูปร่างเป็นแบบอนุกรม-ขนานก็ได้ ดังเช่นแสดงในรูป 2.3 ถึงแม้ว่าการไหลของความร้อนจะเป็น 2 มิติ แต่อาจสมมุติเป็นเงื่อนไขหนึ่งมิติได้โดยสมมุติว่าผิวที่ตั้งฉากกับทิศทาง x มีอุณหภูมิคงที่ตลอดเวลาหรืออาจสมมุติว่าผิวซึ่งขนานกับแกน x เป็นอะเดียบาติก อย่างไม่อย่างหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 ระบบการนำความร้อนที่มีแหล่งผลิตความร้อนภายใน (Heat source system)

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่น่าสนใจจำนวนมาก ที่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายใน เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของลวดไฟฟ้า และระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นต้น เราจะพิจารณาระบบหนึ่งมิติที่ซึ่งอุณหภูมิเป็นฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตเดียวเท่านั้น

ผนังเรียบมีแหล่งผลิตความร้อน (Plane wall with heat source)

พิจารณารูปที่ 2.4 ผนังมีการผลิตความร้อนสม่ำเสมอ (\dot{q} คงที่) ผนังมีความหนา L มีอุณหภูมิ $T_{s,1}$ และ $T_{s,2}$ สำหรับกรณีค่า k คงที่ สมการการฟู้งกระจายความร้อน ลดรูปเหลือ

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.20)$$

สมการคำตอบทั่วไป คือ

$$T = -\frac{\dot{q}x^2}{2k} + C_1x + C_2 \quad (2.21)$$

โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต จากสมการเงื่อนไขที่ขอบ คือ

$$T(-L) = T_{s,1} \quad \text{and} \quad T(L) = T_{s,2}$$

แทนใน (2.21) ได้

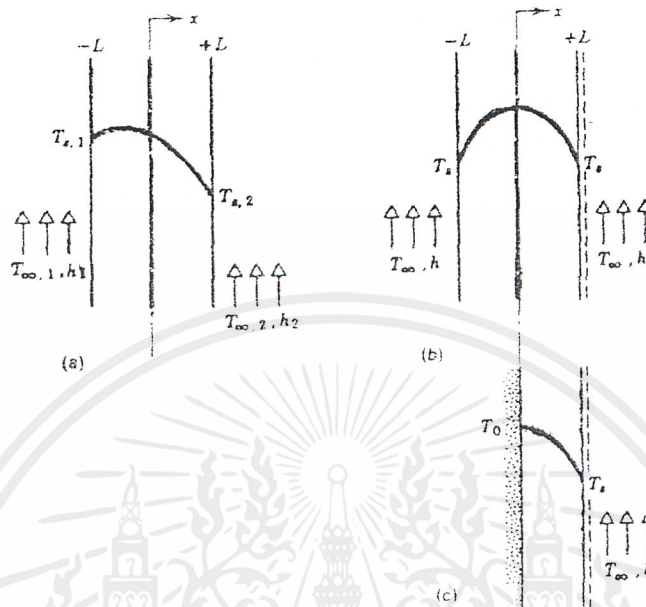
$$C_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2L}$$

$$C_2 = \frac{\dot{q}}{2k} L^2 + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

ดังนั้น การกระจายอุณหภูมิเป็น

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2} \frac{x}{L} + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การนำความร้อนในผนังเรียวที่มีการผลิตความร้อนคงที่

ก) สภาวะขอบเขตไม่สมมาตร ข) สภาวะขอบเขตสมมาตร ค) ผิวอะเดียบาติกที่กึ่งกลาง

ค่าฟังก์ชันของความร้อนที่จุดใดๆในผนัง สามารถหาได้โดยการใช้สมการ (2.22) กับกฎของฟูริเยร์ เพื่อให้สะดวกขึ้นเราให้อุณหภูมิทั้งสองข้างของพื้นผิวเท่ากัน ($T_{s,1} = T_{s,2} = T_s$) การกระจายของอุณหภูมิจะสมมาตรรอบกึ่งกลางระนาบ ตามรูป 2.4 และกลายเป็น

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + T_s \quad (2.23)$$

อุณหภูมิสูงสุดจะมีจริงที่กึ่งกลางระนาบ

$$T(0) \equiv T_0 = \frac{\dot{q}L^2}{2k} + T_s \quad (2.24)$$

กรณีการกระจายอุณหภูมิสมการ (2.23) เขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{T(x) - T_0}{T_s - T_0} = \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (2.25)$$

ในกรณีไม่รู้อุณหภูมิผิว (T_s) แต่ทราบค่าอุณหภูมิของไหลรอบๆ (T_∞) เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ T_s และ T_∞ ได้ โดยประยุกต์การสมดุลของพลังงานที่ผิว จะได้

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.26)$$

แทนค่าสมการ (2.23) เพื่อให้ได้เกรเดียนอุณหภูมิที่ $x = L$ ซึ่งจะได้

$$T_s = T_\infty + \frac{qL}{h} \quad (2.27)$$

ดังนั้น T_s หาได้จากการรู้ค่าของ T_∞ , q , L และ h

2.3 หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความเป็นตัวนำความร้อนของวัสดุ

เครื่องมืออาศัยหลักการทำงานโดยทฤษฎีการนำความร้อนในหนึ่งมิติสถานะคงตัว คือทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนคงที่ (350 วัตต์) ผ่านวัสดุที่ต้องการทดสอบแล้ววัดอุณหภูมิผิวทั้งสองด้านมาคำนวณหาค่าการนำความร้อนของวัสดุนั้น

ตัวเครื่องประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนกำเนิดความร้อนคงที่ (Hot box) ส่วนที่รับความร้อนจากวัสดุ (Cold box) และส่วนวัสดุ (Gasket) แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. Hot box เป็นส่วนที่มีหน้าที่ให้กำเนิดความร้อนคงที่ คือ 350 วัตต์ ในการทดลองนี้ และจะต้องควบคุมความร้อนให้ถ่ายเทผ่านวัสดุไปในทิศทางเดียว ประกอบไปด้วย 2 ส่วนย่อย คือ

1.1 Metering box คือส่วนที่ทำหน้าที่สร้างความร้อนคงที่ถ่ายเทให้วัสดุ

1.2 Guarded box คือส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมให้ความร้อนภายใน Metering box ไหลผ่านวัสดุไปในทางเดียว อยู่ด้านนอกคอยควบคุมอุณหภูมิผิวของ Metering box

2. Cold box เป็นส่วนที่รับความร้อนจากวัสดุที่ถ่ายเทมาจาก Hot box จึงต้องรับความร้อนจาก Hot box ได้เพียงพอและรักษาอุณหภูมิได้ดี

3. Gasket เป็นส่วนที่ควบคุมวัสดุให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกทางด้านขอบของวัสดุ

บทที่ 3

การพัฒนาและการออกแบบ

3.1 หัวข้อการพัฒนาและข้อผิดพลาด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาต่างๆ เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดของเครื่องมือให้สามารถวัดความเป็นตัวนำความร้อน ได้ถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การติดตั้งปะเก็นใยแก้วตรงขอบของ Metering box เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากภายใน Metering box

3.1.2 การติดตั้ง Gasket เพื่อไม่ให้ความร้อนจาก Guarded box ถ่ายเทเข้าสู่ Cold box

3.1.3 การทำท่อลม (Air duct) เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของอากาศเย็นภายใน Cold box

3.1.4 การวัดอุณหภูมิผิวของชิ้นงาน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบวงแหวน

3.1.5 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ

3.1.6 อื่นๆ

3.2 การติดตั้งปะเก็นฉนวนใยแก้ว

ในการทดสอบหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ เมื่อนำแผ่นวัสดุที่ต้องการจะทดสอบปะกบกับ Hot box แผ่นวัสดุจะต้องสัมผัสกับขอบของ Metering box และ Guarded box ตลอดเวลาทดสอบ แต่เนื่องจากขอบของ Metering box และ ขอบของ Guarded box ไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน จึงทำให้แผ่นวัสดุที่ทดสอบโค้งตัวเกิดรอยร้าวขึ้นระหว่าง Metering box และ Guarded box ทำให้เกิดการรั่วซึมของอากาศออกจาก Metering box จึงเกิดการสูญเสียความร้อนออกจาก Metering box ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิววัสดุจึงมีค่าไม่เท่ากับตามทฤษฎี

ตรงขอบของ Metering box จะมีปะเก็นอยู่เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยร้าวของอากาศ เดิมทำมาจากแผ่นยางแข็งทนความร้อนขนาด 6 x 80 x 1 cm. ซึ่งมีลักษณะแข็ง และยืดหยุ่นน้อยมากทำให้เกิดรอยร้าวได้ จึงได้เปลี่ยนมาใช้ปะเก็นที่ทำมาจากใยแก้วซึ่งมีลักษณะเป็นฉนวน และมีความยืดหยุ่นสูง แต่ใยแก้วมีลักษณะเป็นรูพรุนจึงต้องหุ้มใยแก้วไว้ด้วยแผ่นอลูมิเนียม (Aluminium foil) การคำนวณหาค่าการนำความร้อนของปะเก็นใยแก้วทำได้ดังนี้

ปะเก็นใยแก้ว

ประกอบด้วย	: ใยแก้วหนา	0.05 m.	$k = 0.055 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$ (ที่อุณหภูมิ 50°C)
	: แผ่นอลูมิเนียมหนา	0.0005 m.	$k = 204 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$ (ที่อุณหภูมิ 50°C)

จากสมการ

$$C = \frac{1}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3}}$$

แทนค่า

$$C = \frac{1}{\frac{0.0005}{204} + \frac{0.05}{0.055} + \frac{0.0005}{204}}$$

$$C = 1.09999 \approx 1.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$k = C \times L = 1.1 \times (0.0005 + 0.05 + 0.0005) = 0.0765 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

ผนังของ Metering box

ประกอบด้วย : สแตนเลสหนา 0.0015 m. $k = 13.95 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (ที่อุณหภูมิ 50°C)

: โยหินหนา 0.05 m. $k = 0.0377 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (ที่อุณหภูมิ 50°C)

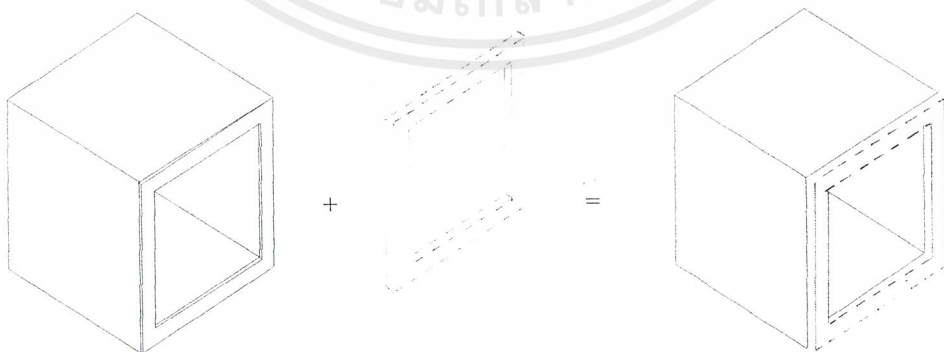
แทนค่า

$$C = \frac{1}{\frac{0.0015}{13.95} + \frac{0.05}{0.0377} + \frac{0.0015}{13.95}}$$

$$C = 0.754 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

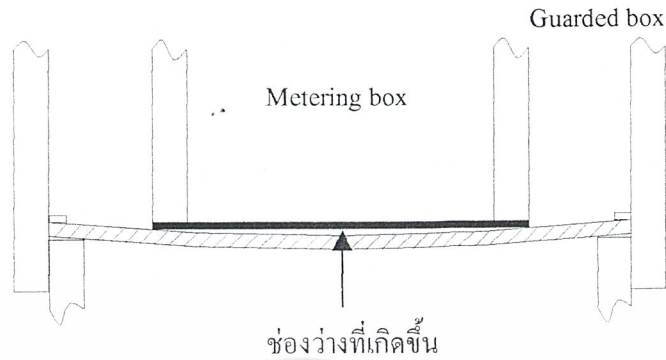
$$k = C \times L = 0.754 \times (0.0015 + 0.05 + 0.0015) = 0.039962 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อนของปะเก็นที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของผนัง Metering box แต่พื้นที่ผิวของปะเก็นมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่ผิวของผนัง Metering box มาก ($A_{\text{ปะเก็น}}/A_{\text{ผนัง}} = 0.16/3.2 = 1/20$) ทำให้การถ่ายเทความร้อนผ่านปะเก็นมีปริมาณน้อย จึงถือว่ายอมรับได้ การติดตั้งปะเก็นมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

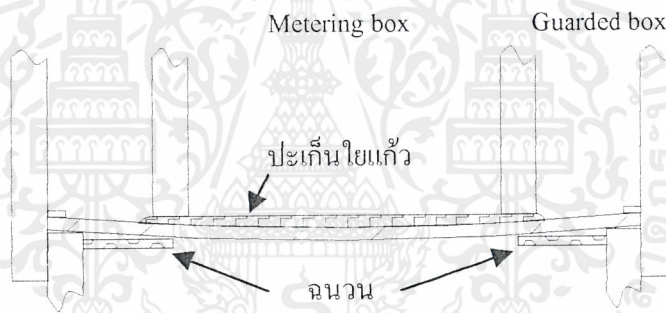


รูปที่ 3.1 การประกอบปะเก็นโยแก้วกับขอบของ Metering box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ 14



ก) เมื่อใช้ปะเก็นยางแผ่นแข็งทำให้เกิดช่องว่าง



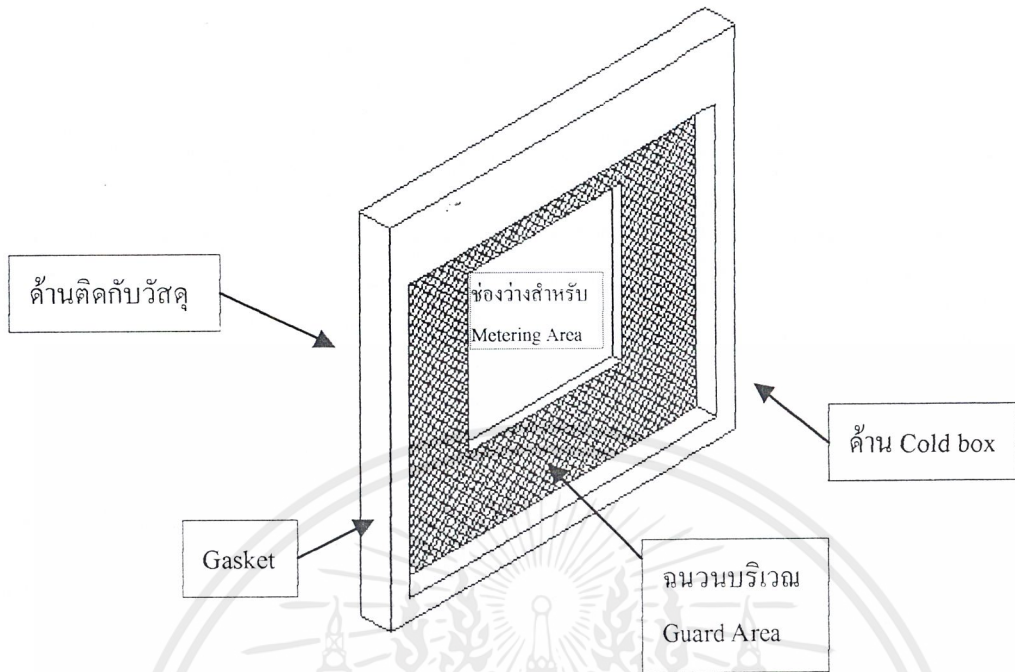
ข) เมื่อใช้ปะเก็นใยแก้วทำให้ไม่มีช่องว่าง

รูปที่ 3.2 ลักษณะการสัมผัสระหว่างปะเก็นกับแผ่นวัสดุ

3.3 การติดตั้งฉนวนที่ Gasket

Gasket เป็นส่วนที่ใช้ดันแผ่นวัสดุให้ติดกับขอบของ Metering box ตลอดเวลา จึงมีขนาดพอดีกับขอบในของ Guarded box และเป็นฉนวนกันความร้อนจาก Hot box ออกสู่ภายนอกและ Cold box เดิมจะมีช่องว่างภายใน Gasket ขนาดใหญ่กว่า Metering Area ทำให้ความร้อนจาก Guarded box ไหลเข้าสู่ Cold box ส่วนได้ เพื่อเป็นการลดการทำความเย็นของ Cold box จึงทำการติดตั้งฉนวนโฟมบริเวณ Guarded Area เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนของวัสดุจาก Guarded box เข้าสู่ Cold box และให้บริเวณ Guarded Area บนผิววัสดุมีอุณหภูมิเพียงพอที่ไม่ให้ความร้อนจากบริเวณ Metering Area ถ่ายเทมาได้ ความร้อนจาก Heater ใน Metering box จึงจะถ่ายเทผ่านวัสดุบริเวณ Metering Area เข้าสู่ Cold box เท่านั้น มีลักษณะดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งฉนวนบน Gasket

สำหรับฉนวนที่ติดตั้งเพิ่มนี้ประกอบไปด้วย โฟมดำหนา 2 มิลลิเมตร ภายในเป็นโฟมขาวแผ่นหนา 2 เซนติเมตร มีขนาด 1.3 x 1.3 เมตร ด้านในเป็นช่องว่างรูปสี่เหลี่ยมให้ ท่อลมสวมเข้าไปได้ ขนาด 0.8 x 0.8 เมตร มีค่าการนำความร้อนคำนวณได้ ดังนี้

ประกอบด้วย : โฟมดำหนา 0.002 m $k = 0.020 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ (ที่อุณหภูมิ 50°C)
 : โฟมขาวหนา 0.05 m $k = 0.016 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ (ที่อุณหภูมิ 50°C)

แทนค่า

$$C = \frac{1}{\frac{0.002}{0.02} + \frac{0.05}{0.016} + \frac{0.002}{0.02}}$$

$$C = 0.30075 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$$

$$k = C \times L = 0.30075 \times (0.002 + 0.05 + 0.002) = 0.0162 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$$

สมมติให้ $T_{s,1}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวด้านวัสดุ = 50°C

$T_{s,2}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวด้าน Cold box = 20°C

\therefore ความร้อนที่ผ่านฉนวนเข้าไปภายใน Cold box : $q_{\text{ฉนวน}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_{\text{นวน}} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{W}$$

แทนค่า $q_{\text{นวน}} = 0.0162 \times (1.3^2 - 0.8^2) \frac{(50 - 20)}{0.054} \quad \text{W}$

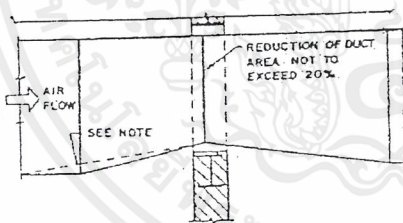
$$q_{\text{นวน}} = 9.45 \quad \text{W}$$

จะเห็นได้ว่าความร้อนที่ไหลผ่านเข้ามาภายใน Cold box มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความร้อนที่ผลิตขึ้นใน Guarded box (1.400 W) ทำให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นของ Cold box มากขึ้น จึงสามารถหาผลการทดลองได้ถูกต้องยิ่งขึ้น และใช้เวลาในการทดลองน้อยลง

3.4 การทำท่อลม (Air duct) เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของอากาศเย็นภายใน Cold box

ภายใน Cold box ได้ติดตั้งหน่วยทำความเย็น (Cooling Unit) เป็น Evaporator แบบขดลวดชนิดมีครีบริบ และใช้พัดลมดูดให้อากาศเย็นไหลผ่านขดลวดขึ้นมาจากด้านล่าง พัดอากาศเย็นออกทางด้านหน้า โดยมีแผ่นเอียง (vane) ควบคุมทิศทางการไหลของอากาศให้พัดขึ้นด้านบนผ่านผิวของวัสดุแล้วตกลงสู่ด้านล่าง แต่เนื่องจากภายในห้องเย็นมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับแรงลมที่ใช้ (น้อยกว่า 300 fpm) จึงจำเป็นที่จะต้องลดขนาดของท่อลม และควบคุมทิศทางการไหลของอากาศเย็นให้ไปสัมผัสกับผิววัสดุบริเวณ Metering Area เท่านั้น โดยการใช้ท่อลมควบคุมทิศทางการไหลของอากาศ

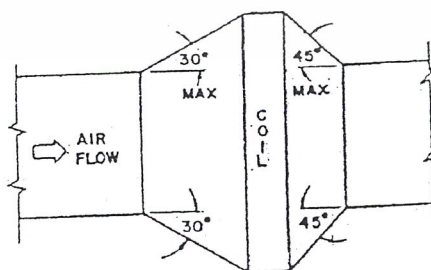
การออกแบบท่อลมถูกจำกัดด้วยขนาดของหน่วยทำความเย็น และ Metering Area ที่มีขนาดคงที่ และความยาวของท่อลมควรจะมีขนาดสั้นที่สุด โดยมีหลักการในการออกแบบดังนี้



1:7 สำหรับ High Velocity

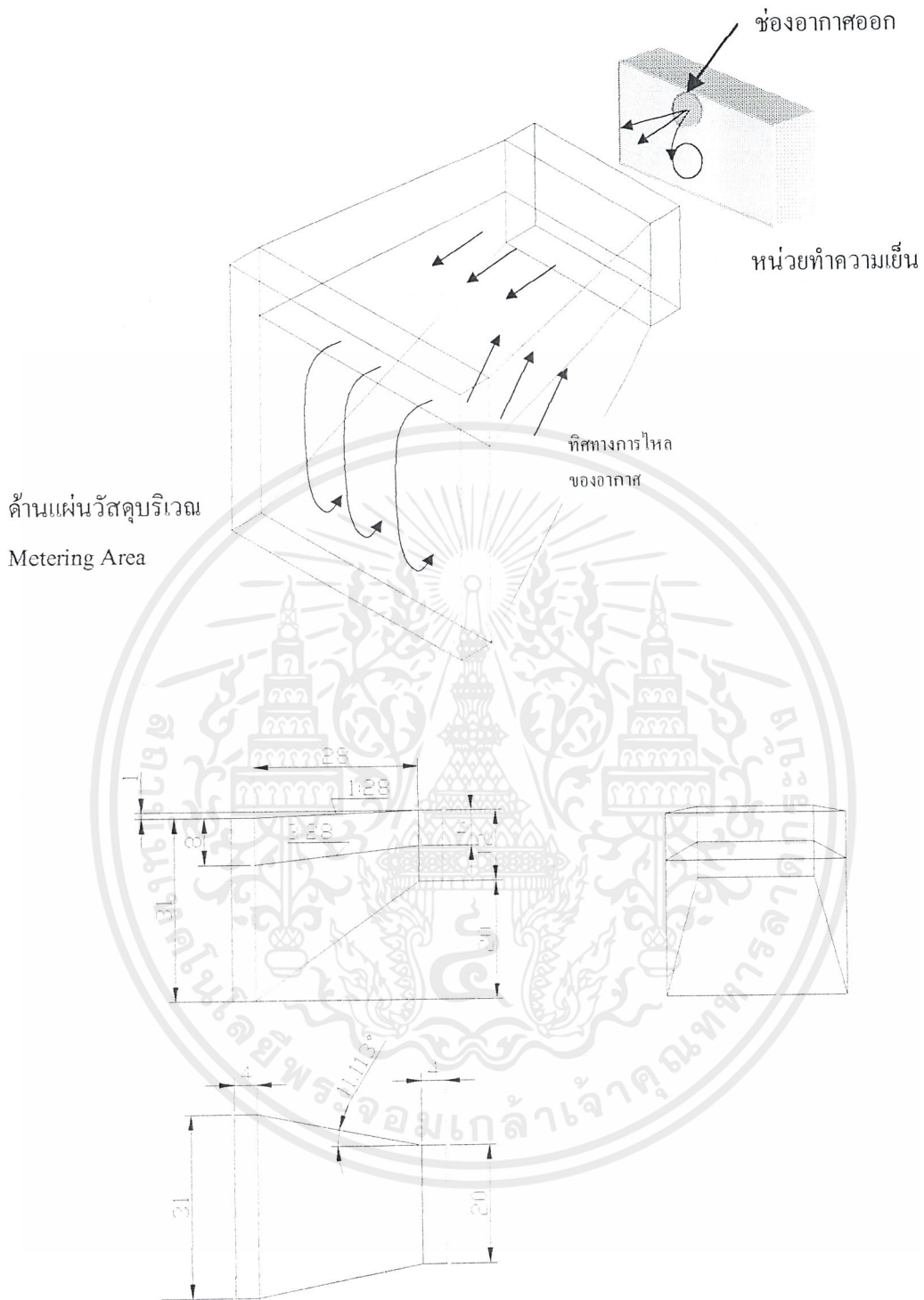
1:4 สำหรับ Low Velocity

NOTE: 1:7 slope is recommended for high velocity
1:4 slope for low velocity



การเพิ่มพื้นที่เพื่อเข้า coil
จะต้องระวังองศาการเพิ่ม-ลด
องศาสูงสุด 30° และ 45°

รูปที่ 3.4 หลักในการเพิ่ม-ลดขนาดท่อ



รูปที่ 3.5 ลักษณะและขนาดของท่อลม

3.4.1 การพิจารณาออกแบบท่อ (Duct Layout Consideration)

การเพิ่มลดขนาดพื้นที่หน้าตัด (Transformation)

ไม่ว่างานเดิมท่อในรูปใดก็ตาม จะต้องให้พื้นที่หน้าตัดดงที่เสมอ ถ้าต้องทำพื้นเอียง (Slope) ทำได้ในอัตรา 1:7 แต่ไม่เกิน 1:4 ในการหลบโครงสร้างอาคารลดขนาดพื้นที่ไม่มากกว่า 20%

- ขนาดของท่อที่เล็กที่สุด 8" × 10"
- การลดหรือเพิ่มขนาดแต่ละช่วงไม่ควรเกิน 2"
- หลีกเลี่ยงการให้ลมปะทะผนังหรือสิ่งกีดขวางโดยตรง

จากหลักเกณฑ์ดังกล่าว เมื่อพิจารณาท่อลมที่ออกแบบมา มีลักษณะที่เหมาะสมดังนี้

- พื้นเอียงด้านทางออกของท่อลมมี slope = 1:28 และ 3:28 ถ้าให้ท่อลมเป็นแบบ Low Velocity slope ที่ใช้น้อยกว่า 1:4 มาก และเป็นลักษณะเอียงลงอีกด้วย
- ขนาดของท่อลมที่เล็กที่สุดคือบริเวณทางออกของลมจากหน่วยทำความเย็น มีขนาด 6" × 20" ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าท่อลมขนาด 8" × 10" ท่อลมที่ใช้จึงมีขนาดเพียงพอ
- ขนาดของท่อลมที่ทางออกไปสัมผัสกับผิววัสดุมีขนาด 8" × 31" ซึ่งความสูงเพิ่มขึ้น 2" ไม่เกินขนาดที่กำหนดไว้ในหนึ่งช่วง
- การเพิ่มพื้นที่มีองศาการเพิ่ม 11.113° น้อยกว่า 30° จึงใช้ได้
- ภายในมีการติดตั้งสาย Thermocouple เพื่อวัดอุณหภูมิผิววัสดุ โดยวางสายขึ้นมาจากทางด้านล่าง จึงไม่กีดขวางทางอากาศ

3.5 การวัดอุณหภูมิผิวของชิ้นงานโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบวงแหวน

ในการวัดอุณหภูมิผิวของวัสดุทำโดยการใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ K สายไฟเบอร์กลาส เส้นลวด 4 เส้น ขนาด \varnothing 0.65 มม. จำนวนสาย 2 เส้น เดิมใช้จุดต่อที่ใช้วัดอุณหภูมิแบบจุดสัมผัสโดยการม้วนปลายสาย ทั้ง 2 เส้นเข้าด้วยกัน แล้วสัมผัสกับผิวของวัสดุโดยใช้กาวจับโคนสาย แต่เนื่องจากสายมีขนาดใหญ่เมื่อม้วนสายเข้าด้วยกันจึงมีขนาดจุดวัดที่ใหญ่มากจนสัมผัสกับผิววัสดุได้ไม่เต็มพื้นที่สัมผัส ทำให้มีส่วหนึ่งของจุดวัดที่อยู่ในลักษณะลอยอยู่ ทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก Temp Indicator มีค่าเปลี่ยนไป กล่าวคือมีอุณหภูมิอากาศเข้ามาเฉลี่ยด้วย เช่น อากาศมีอุณหภูมิ 30 °C ถ้าอุณหภูมิจริงที่ผิวของวัสดุมีค่า 28 °C อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จาก Temp Indicator จะเป็น 29 °C แทน เนื่องจาก Temp Indicator จะอ่านค่าอุณหภูมิจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองเส้นของเทอร์โมคัปเปิล ถ้าปลายสายสัมผัสกับผิววัสดุไม่เต็มพื้นที่จุดวัด จะเกิดการเฉลี่ยระหว่างศักย์ของอุณหภูมิผิวกับศักย์ของอุณหภูมิอากาศทำให้อุณหภูมิที่อ่านค่าได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จึงเปลี่ยนไปใช้จุดวัดแบบวงแหวนแทน เพราะจุดวัดแบบวงแหวนสามารถสัมผัสกับผิววัสดุได้ดีกว่าโดยการใช้สกรูหรือน็อตขันอัดให้แน่น ทำให้จุดวัดสัมผัสกับผิววัสดุได้ดีและอ่านค่าอุณหภูมิได้ถูกต้องยิ่งขึ้น แต่มีข้อบกพร่องที่จะต้องเจาะผิววัสดุเพื่อขันน็อต ทำให้สนามอุณหภูมิ

บริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในการทดลองจึงได้ทำการวัดอุณหภูมิทั้ง 2 วิธีเพื่อเปรียบเทียบกัน ลักษณะของจุดวัดแบบสัมผัสและแบบวงแหวนมีลักษณะดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

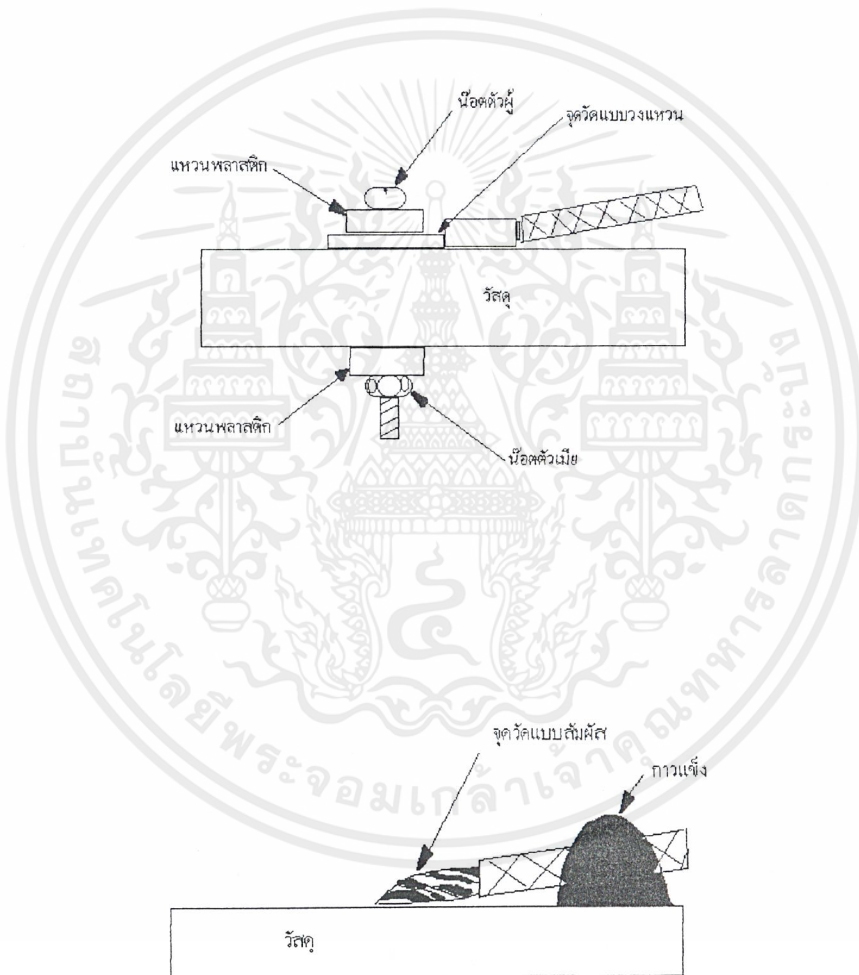


ก) จจุดวัดแบบสัมผัส



ข) จจุดวัดแบบวงแหวน

รูปที่ 3.6 ลักษณะของจจุดวัด

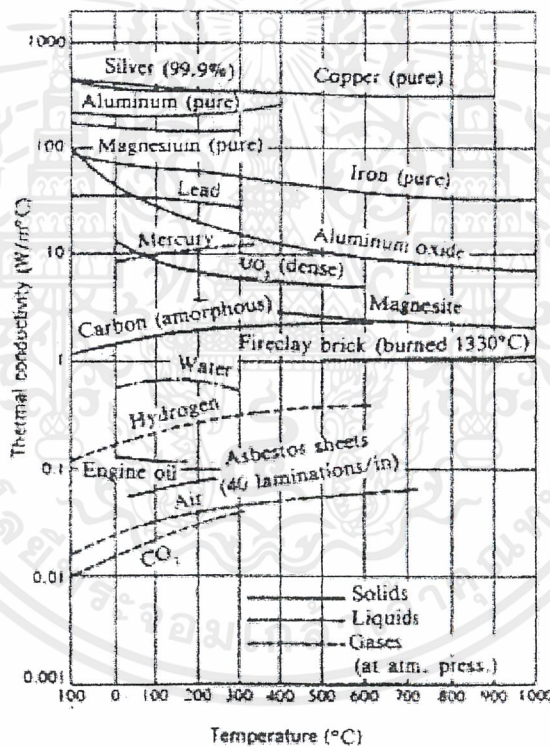


รูปที่ 3.7 การติดตั้งจจุดวัดอุณหภูมิบนผิววัสดุ

3.6 การทดสอบหาค่าการนำความร้อนเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุ

โดยปกติค่าการนำความร้อนที่ใช้คำนวณจะถือว่ามีความคงที่ แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าการนำความร้อนแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุด้วย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาและความหนาแน่นของวัสดุที่แปรเปลี่ยนตามความชื้นและอุณหภูมิด้วย โดยพิจารณาได้จากสมการการฟุ้งกระจายของความร้อน (heat diffusion equation) ในพิกัดคาร์ทีเซียน (รูปทั่วไป : general form) หรือที่เรียกว่า สมการความร้อน ที่กล่าวว่า “ที่จุดใดๆ ในตัวกลางอัตราการนำความร้อนสุทธิในปริมาตรหนึ่งหน่วย รวมกับอัตราการผลิตความร้อนเชิงปริมาตรต้องมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนของพลังงานความร้อนที่สะสมไว้ภายในปริมาตรนั้น” มีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$



รูปที่ 3.8 กราฟค่าการนำความร้อนของวัสดุที่อุณหภูมิต่างๆ

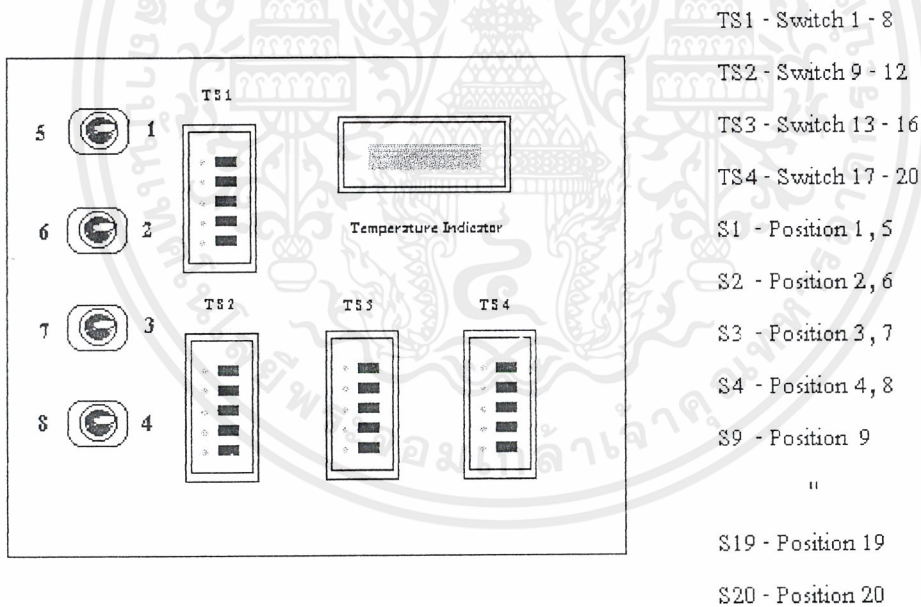
เนื่องจากค่าการนำความร้อนที่นำมาอ้างอิงนั้น ได้มาจากการทดลองที่อุณหภูมิค่าเพราะนำมาจากหนังสือต่างประเทศจากในทวีปยุโรปซึ่งมีอากาศหนาวเย็น ค่าอ้างอิงส่วนใหญ่ที่ใช้จึงทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ 20 °C ยกเว้นวัสดุที่เป็นฉนวนจะทดสอบที่อุณหภูมิสูง ในการทดสอบจึงต้องทำการทดสอบหาค่า

การนำความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุหลายๆ ค่า แล้วนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ ก็จะได้ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ถูกต้องและมีความละเอียด

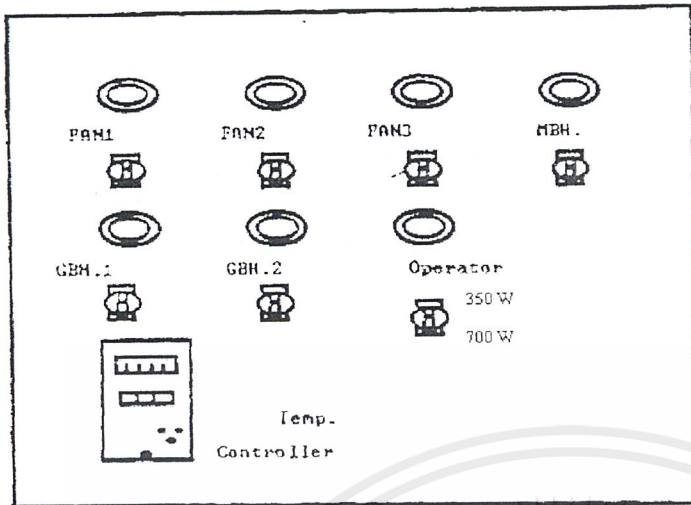
3.7 การปรับปรุงอื่นๆ

นอกจากการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อนของวัสดุที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมีการปรับปรุงอื่นๆ ที่เป็นรายละเอียดปลีกย่อยต่างๆ ดังนี้

- 1) จัดสายไฟภายในกล่องควบคุม (Control box) ให้เป็นระเบียบและง่ายต่อการซ่อมแซม
- 2) ต่อสวิทช์เพื่อวัดอุณหภูมิใน Metering Area เพิ่มขึ้นอีก 4 จุด คือวัดแบบจุดสัมผัส 4 จุดเปรียบเทียบกับจุดวัดแบบแหวน 4 จุด
- 3) ต่อหลอดไฟ (Lamp) ที่ Heater ใน Guarded box เพื่อช่วยในการควบคุมอุณหภูมิภายใน Guarded box
- 4) เปลี่ยนวงจรควบคุม Heater ภายใน Metering box ให้สามารถปรับกำลังความไฟฟ้าของ Heater ได้ 2 ระดับ คือ 350 วัตต์ และ 700 วัตต์ สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวน

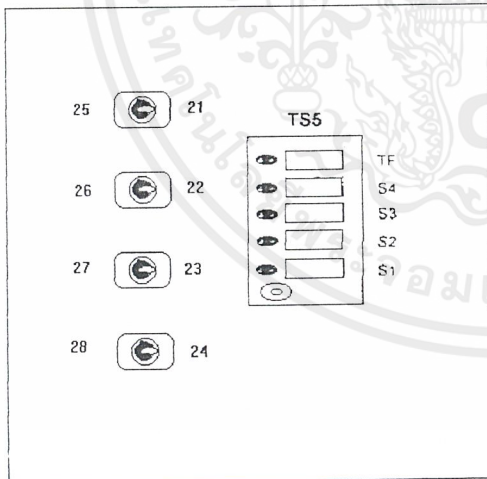


รูปที่ 3.9 กล่อง Temp Switch ที่ Hot box



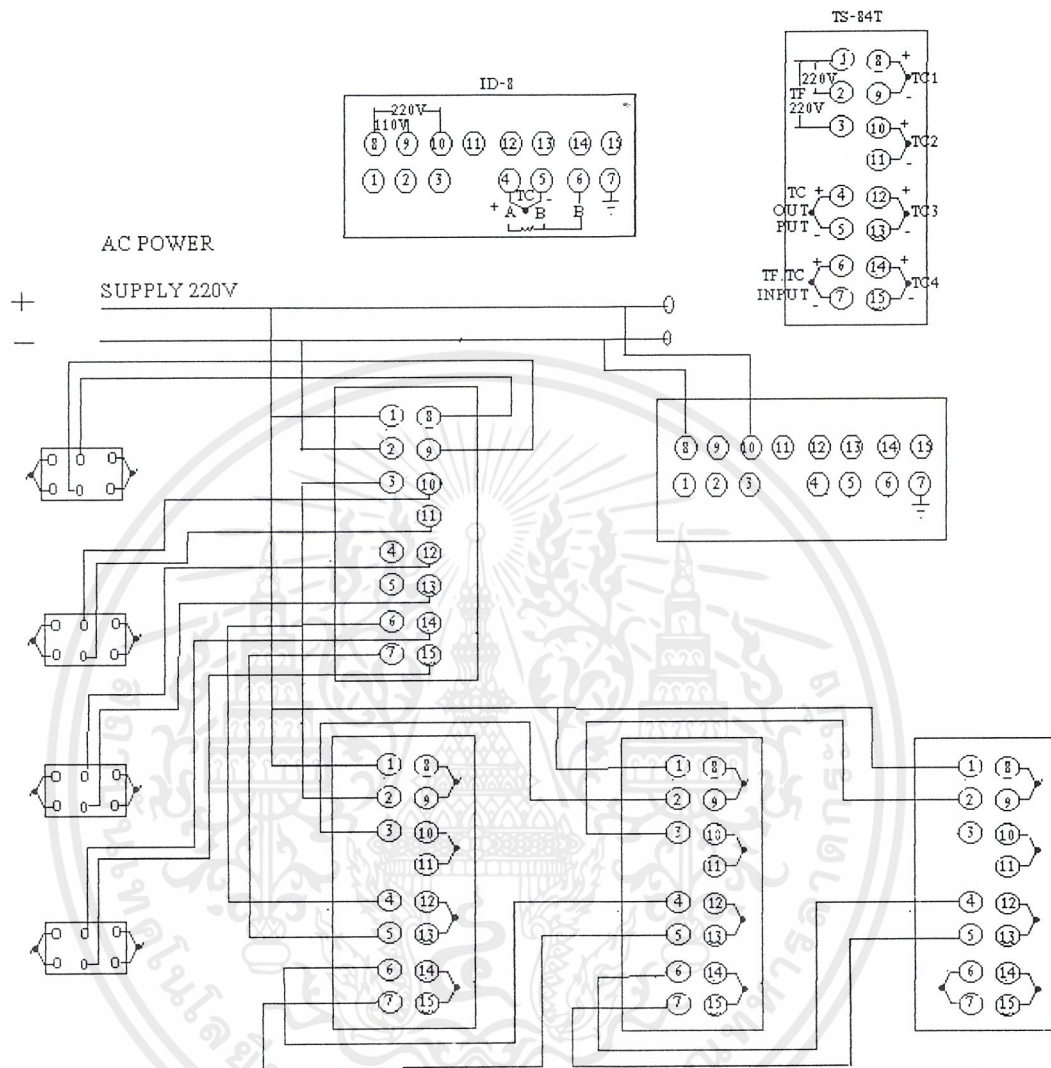
MBH.-Metering Box Heater
 GBH.1-Guarded Box Heater
 No.1(High Position)
 GBH.2-Guarded Box Heater
 No.2(Low Position)
 FAN1-Metering Box Fan
 FAN2-Guarded Box Fan
 (High Position)
 FAN3-Guarded Box Fan
 (Low Position)

รูปที่ 3.10 กล้องควบคุมที่ Hot box



TS5 - Temp. Switch 5

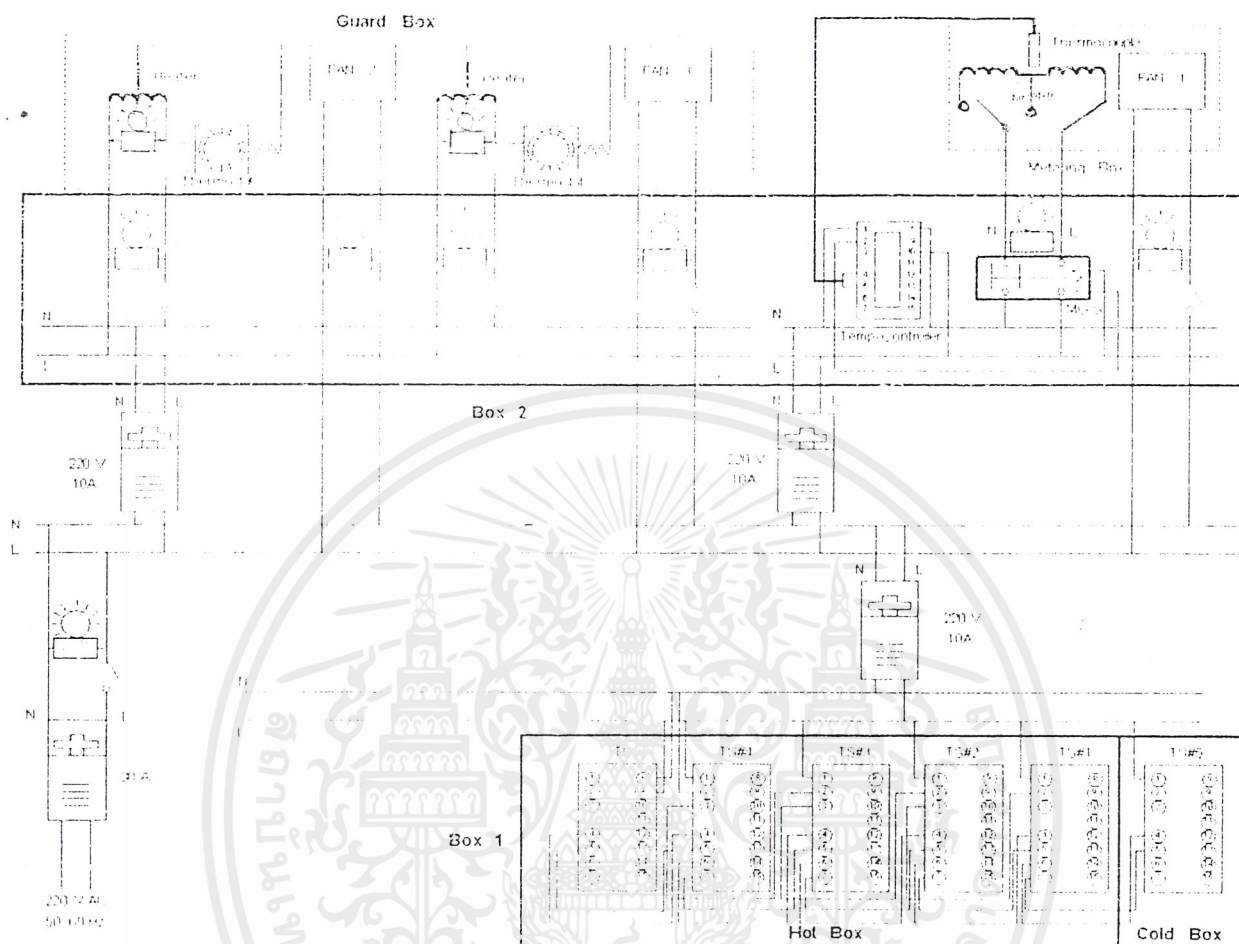
รูปที่ 3.11 กล้องควบคุมที่ Cold box



รูปที่ 3.12 การต่อสายไฟและสายเทอร์โมกับเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวงจรไฟฟ้าของเครื่อง



รูปที่ 3.13 วงจรไฟฟ้าของกล่อง Control box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

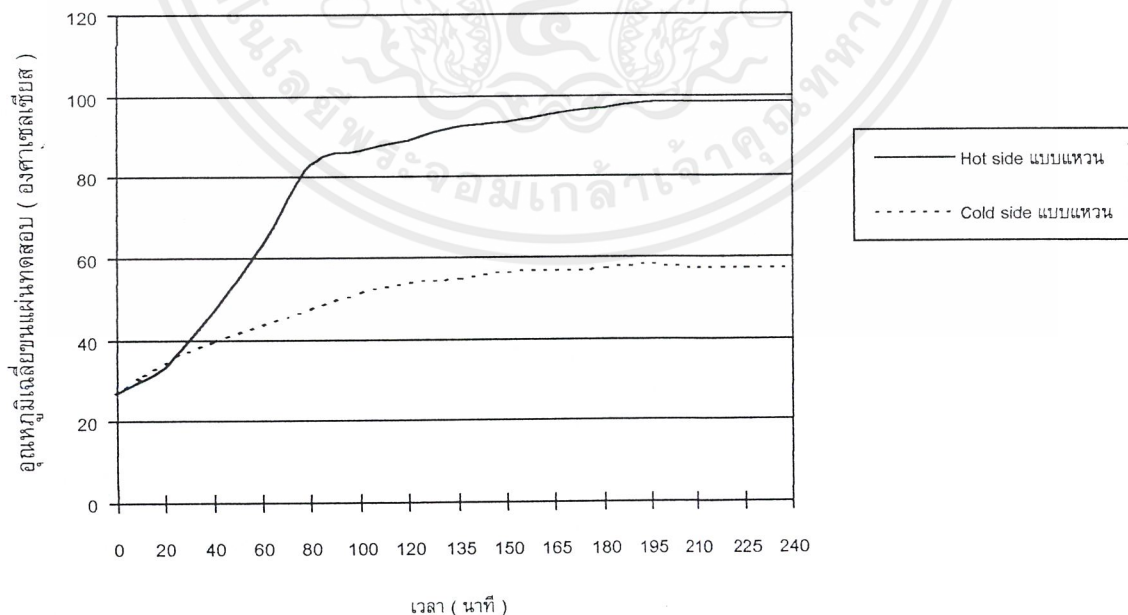
4.1 ผลการทดลองที่ 110 °C

ทดลองวัดค่าการนำความร้อนสามารถทำได้ โดยการวัดค่าอุณหภูมิของผิววัสดุ ซึ่งวัสดุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ คือ ไม้อัด , กระเบื้องแผ่นเรียบ , แผ่นยิปซัม ซึ่งได้แสดงค่าการนำความร้อนจากค่าอ้างอิงมาตรฐาน จากตารางข้อมูลในหนังสือต่างประเทศ ดังนี้

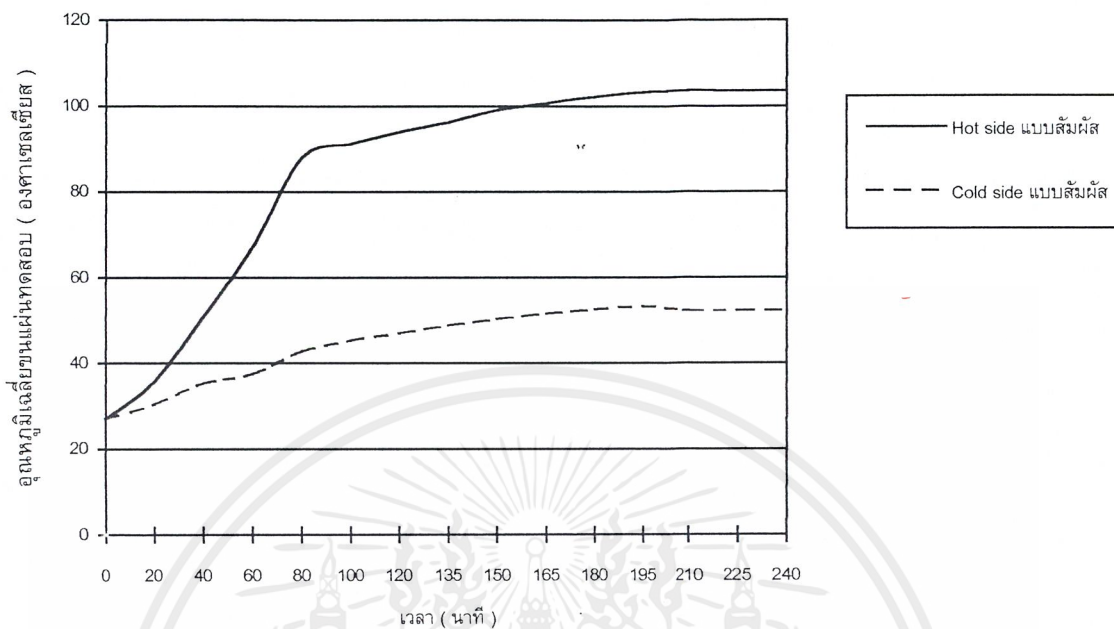
ชนิดของวัสดุ	ค่า k (W/m.°C)	ความหนา (mm.)	อุณหภูมิวัสดุ (°C)
ไม้อัด	0.12	10	20
กระเบื้องแผ่นเรียบ	0.37	4	20
แผ่นยิปซัม	0.16	9	20

แต่ในการทดสอบได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิอากาศใน Metering box 110 °C กำลังไฟฟ้าใน Heater = 350 Watts และผลการทดลองได้แสดงเป็นกราฟในสภาวะ Steady state ของอุณหภูมิเฉลี่ยของผิววัสดุที่ด้าน Hot box และ Cold box ดังนี้

กราฟ 4.1.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา จุดวัดแบบวงแหวน วัสดุทดสอบ แผ่นไม้อัดหนา 10 mm.

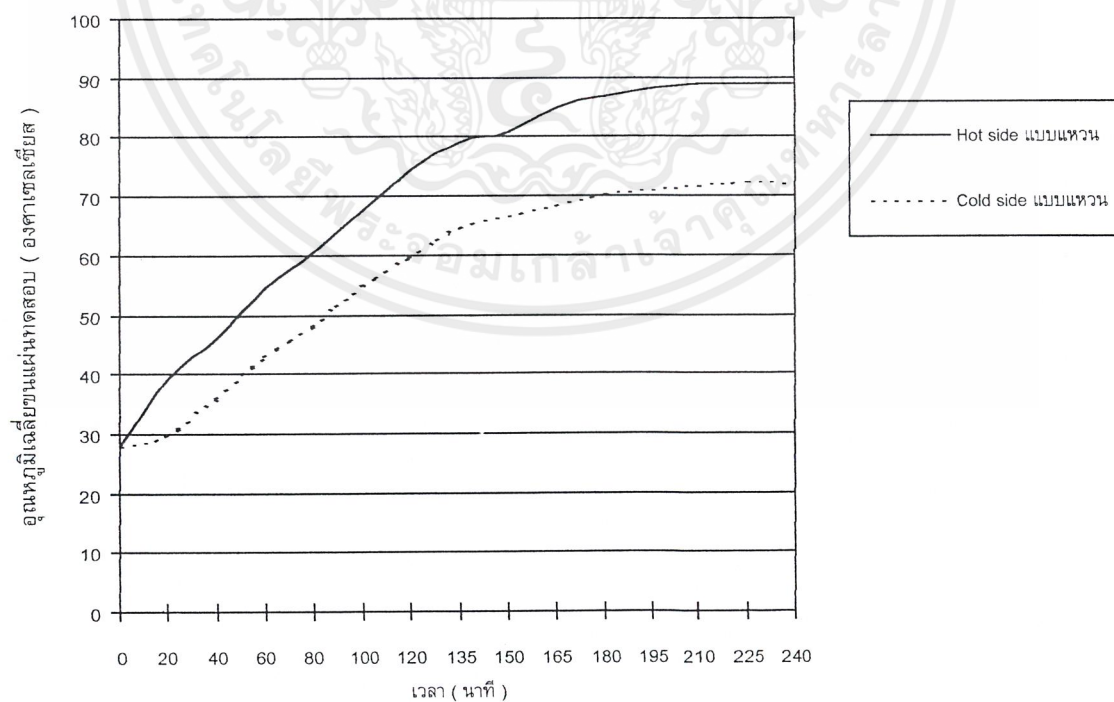


กราฟ 4.1.2 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา จุดวัดแบบสัมผัส



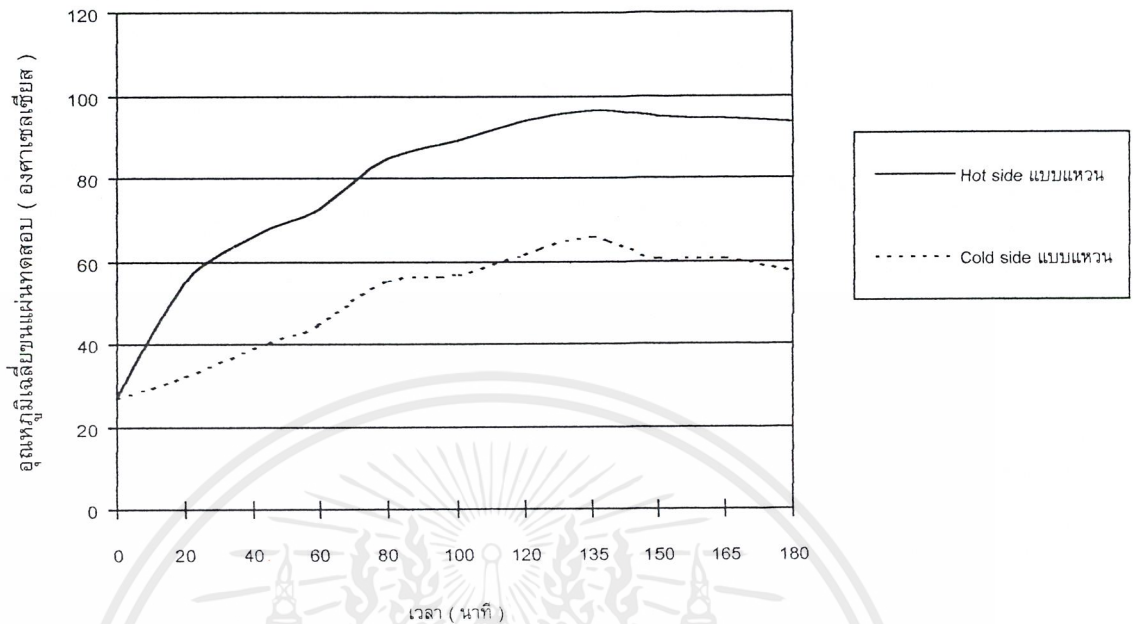
กราฟ 4.1.3 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา จุดวัดแบบวงแหวน

วัสดุทดสอบ แผ่นกระเบื้องหนา 4 mm.



กราฟ 4.1.4 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวซึ่งงานทดสอบเทียบกับเวลา แบบวงแหวน

วัสดุทดสอบ แผ่นอีป็อกซ์หนา 9 mm.



การคำนวณหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ

เมื่อทราบค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ทั้ง 8 จุดบนชิ้นงานทดสอบแล้วนำค่าอุณหภูมิมาหาค่าการนำความร้อนได้จากกฎของฟูริเยร์ ดังนี้

วัสดุทดสอบ แผ่นไม้อัดหนา 10 mm.

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

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

จะได้

โดย Δx = ความหนาของชิ้นงานทดสอบ , m.

A = พื้นที่ผิวของชิ้นงานทดสอบในส่วน Metering box , m²
 = 0.64 m²

T_L = อุณหภูมิเฉลี่ยด้าน Cold box = $\frac{T_{21} + T_{22} + T_{23} + T_{24}}{4}$

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

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน , W/m.°C

q = พลังงานความร้อนที่ได้จาก heater ใน Metering box

= 350 Watts (สมมติว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่าง Guard box และ Metering box)

และสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกทางผนัง Metering box ได้จากสมการสมดุลความร้อนในช่วง Transient condition ที่มีรูปแบบสมการดังนี้

$$350(W) - C_M A_{S,M} (T_M - T_G) - CA_M (T_M - T_{sur}) = \rho_{air} V c_p \frac{dT_M}{dt}$$

เมื่อ C คือ ค่า Thermal Conductance ของชิ้นงานทดสอบ = $k \times \Delta x$ $W/m^2 \cdot ^\circ C$

C_M คือ ค่า Thermal Conductance ของผนังกล่อง Metering Box = $0.754 W/m^2 \cdot ^\circ C$

$A_M, A_{S,M}$ คือ พื้นที่ Metering Area ของชิ้นงานทดสอบ และพื้นที่ผิวของผนังกล่อง Metering box ตามลำดับ = $0.64, 3.2 m^2$

T_M, T_G, T_{sur} คือ อุณหภูมิของผิวที่ผนังของ Metering box , Guarded box และอากาศบรรยากาศ

หรือในสถานะ Steady State $\rho_{air} V c_p \frac{dT_M}{dt} = 0$

$$350(W) - C_M A_{S,M} (T_M - T_G) - CA_M (T_M - T_{sur}) = 0$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ดังนี้

จากตาราง 4.1.1 ไม้อัด จุดวัดแบบวงแหวน

ที่จุด 1 - 4
$$T_H = \frac{99 + 96 + 97 + 102}{4} = 98.5^\circ C$$

ที่จุด 21 - 24
$$T_L = \frac{49 + 56 + 56 + 68}{4} = 57.5^\circ C$$

$$x = 1 \times 10^{-2} m.$$

แทนค่า \therefore
$$k = \frac{350 \times (1 \times 10^{-2})}{0.64 \times (98.5 - 57.5)} = 0.13338 W/m \cdot ^\circ C$$

จากตาราง 4.1.1 ไม้อัด จุดวัดแบบสัมผัส

ที่จุด 5 - 8
$$T_H = \frac{103 + 102 + 106 + 103}{4} = 103.5^\circ C$$

ที่จุด 24 - 28
$$T_L = \frac{39 + 58 + 44 + 56}{4} = 52.25^\circ C$$

$$x = 1 \times 10^{-2} m.$$

แทนค่า \therefore
$$k = \frac{350 \times (1 \times 10^{-2})}{0.64 \times (103.5 - 52.25)} = 0.10671 W/m \cdot ^\circ C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณความร้อนที่ถ่ายเทออกทางผนังที่สภาวะคงที่

$$q = C_M A_{S,M} (T_M - T_G) + CA_M (T_M - T_{sur})$$

$$q = 0.754 \times 3.2(106.4 - 104.8) + 0.13338 \times 0.01 \times 0.64(106.4 - 110)$$

$$\therefore q = 3.8574 \text{ W}$$

จากตาราง 4.1.2 กระเบื้องแผ่นเรียบ จุดวัดแบบวงแหวน

ที่จุด 1 - 4
$$T_H = \frac{85 + 89 + 87 + 94}{4} = 88.75^\circ \text{C}$$

ที่จุด 21 - 24
$$T_L = \frac{64 + 73 + 69 + 82}{4} = 72^\circ \text{C}$$

$$x = 4 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

แทนค่า \therefore
$$k = \frac{350 \times (4 \times 10^{-3})}{0.64 \times (88.75 - 72)} = 0.13059 \text{ W/m.}^\circ \text{C}$$

คำนวณความร้อนที่ถ่ายเทออกทางผนังที่สภาวะคงที่

$$q = C_M A_{S,M} (T_M - T_G) + CA_M (T_M - T_{sur})$$

$$q = 0.754 \times 3.2(106.2 - 107.8) + 0.13059 \times 0.004 \times 0.64(106.2 - 110)$$

$$\therefore q = -3.86175 \text{ W}$$

จากตาราง 4.1.3 ยิบซั่ม จุดวัดแบบวงแหวน

ที่จุด 1 - 4
$$T_H = \frac{95 + 92 + 90 + 97}{4} = 93.5^\circ \text{C}$$

ที่จุด 21 - 24
$$T_L = \frac{52 + 60 + 60 + 71}{4} = 60.75^\circ \text{C}$$

$$x = 9 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

แทนค่า \therefore
$$k = \frac{350 \times (9 \times 10^{-3})}{0.64 \times (93.5 - 60.75)} = 0.15029 \text{ W/m.}^\circ \text{C}$$

คำนวณความร้อนที่ถ่ายเทออกทางผนังที่สภาวะคงที่

$$q = C_M A_{S,M} (T_M - T_G) + CA_M (T_M - T_{sur})$$

$$q = 0.754 \times 3.2(106.2 - 102) + 0.15029 \times 0.009 \times 0.64(106.2 - 110)$$

$$\therefore q = 10.13047 \text{ W}$$

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นไม้อัด

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)														
	เวลา (นาที)														
	0	20	40	60	80	100	120	135	150	165	180	195	210	225	240
1	27	35	48	66	85	88	91	93	95	97	98	99	99	99	99
2	27	32	45	60	79	83	85	87	89	92	94	96	96	96	96
3	27	31	46	60	81	85	87	89	90	92	95	97	97	97	97
4	27	36	49	67	87	90	93	96	99	100	101	102	102	102	102
5	27	36	50	69	88	92	95	97	100	102	103	103	104	103	103
6	27	36	51	66	86	89	92	94	97	98	100	101	102	102	102
7	27	37	53	69	91	94	97	99	101	102	104	105	106	106	106
8	27	35	50	65	87	90	92	95	98	101	102	103	103	103	103
9	27	44	61	72	79	88	96	98	100	101	102	103	103	103	103
10	27	44	60	70	78	86	95	95	97	99	100	101	101	101	101
11	27	37	55	74	94	97	100	102	104	104	105	105	105	105	105
12	27	50	71	85	91	97	101	105	107	108	109	109	108	108	108
13	27	38	55	74	94	97	100	102	103	103	104	105	105	105	104
14	27	39	55	74	92	96	100	101	103	105	106	107	107	106	107
15	27	52	75	89	93	99	102	105	107	108	109	109	109	109	108
16	27	54	76	87	91	94	97	100	105	108	110	111	110	109	109
17	27	54	77	85	90	92	94	96	98	99	102	104	104	104	103
18	27	52	74	84	89	91	93	95	97	100	102	103	103	103	102
19	27	52	77	87	91	94	98	100	102	104	106	108	109	108	108
20	27	50	73	83	88	90	93	95	97	99	102	103	103	102	102
21	27	31	35	39	42	44	46	47	48	48	49	50	49	49	49
22	27	35	40	44	48	53	55	56	57	57	58	58	57	56	56
23	27	34	39	44	46	52	54	55	56	57	56	57	56	56	56
24	27	38	45	49	54	58	61	63	65	67	68	69	68	68	68
25	27	29	32	34	35	36	37	37	38	39	40	40	39	39	39
26	27	32	38	42	46	49	53	55	56	57	58	59	58	58	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27	27	30	35	38	40	41	41	42	43	44	45	45	44	44	44
28	27	31	36	40	43	46	49	51	53	55	57	56	56	56	56

หมายเหตุ: อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 27 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิกระเปาะเปียก 24 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นกระเบื้อง

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)														
	เวลา (นาที)														
	0	20	40	60	80	100	120	135	150	165	180	195	210	225	240
1	28	44	52	58	66	73	91	93	95	97	98	99	99	99	99
2	28	32	45	60	79	83	85	87	89	92	94	96	96	96	96
3	28	31	46	60	81	85	87	89	90	92	95	97	97	97	97
4	28	36	49	67	87	90	93	96	99	100	101	102	102	102	102
9	28	44	61	72	79	88	96	98	100	101	102	103	103	103	103
10	28	44	60	70	78	86	95	95	97	99	100	101	101	101	101
11	28	37	55	74	94	97	100	102	104	104	105	105	105	105	105
12	28	50	71	85	91	97	101	105	107	108	109	109	108	108	108
13	28	38	55	74	94	97	100	102	103	103	104	105	105	105	104
14	28	39	55	74	92	96	100	101	103	105	106	107	107	106	107
15	28	52	75	89	93	99	102	105	107	108	109	109	109	109	108
16	28	54	76	87	91	94	97	100	105	108	110	111	110	109	109
17	28	54	77	85	90	92	94	96	98	99	102	104	104	104	103
18	28	52	74	84	89	91	93	95	97	100	102	103	103	103	102
19	28	52	77	87	91	94	98	100	102	104	106	108	109	108	108
20	28	50	73	83	88	90	93	95	97	99	102	103	103	102	102
21	28	31	35	39	42	44	46	47	48	48	49	50	49	49	49
22	28	35	40	44	48	53	55	56	57	57	58	58	57	56	56
23	28	34	39	44	46	52	54	55	56	57	56	57	56	56	56
24	28	38	45	49	54	58	61	63	65	67	68	69	68	68	68

หมายเหตุ: อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 30 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิกระเปาะเปียก 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) เทียบกับเวลาที่จุดต่างๆ ของแผ่นยับยั้ง

จุดที่	อุณหภูมิที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)											
	เวลา (นาที)											
	0	20	40	60	80	100	120	135	150	165	180	
1	27	59	67	74	86	91	95	98	96	95	95	
2	27	59	64	71	83	88	92	96	94	96	92	
3	27	57	64	70	82	86	91	92	91	91	90	
4	27	64	69	76	88	92	97	99	98	98	97	
9	27	49	66	75	88	92	94	96	98	98	97	
10	27	50	65	74	88	91	92	94	95	96	96	
11	27	64	75	82	94	99	103	105	104	105	105	
12	27	72	79	86	98	102	107	107	107	108	108	
13	27	64	75	81	93	98	103	104	104	104	104	
14	27	71	77	84	95	100	105	106	105	106	106	
15	27	76	79	87	98	103	108	108	108	108	108	
16	27	53	74	82	96	100	102	104	105	106	106	
17	27	52	72	80	93	97	99	100	101	102	102	
18	27	51	70	77	91	94	96	97	99	100	99	
19	27	56	75	83	97	100	101	101	102	103	103	
20	27	50	70	77	90	94	96	98	99	100	100	
21	27	25	33	38	48	51	53	57	53	52	52	
22	27	32	37	43	54	57	61	67	62	60	60	
23	27	32	40	46	56	58	62	65	62	60	60	
24	27	40	46	52	63	66	71	76	72	71	71	

หมายเหตุ: อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 29 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิกระเปาะเปียก 25 องศาเซลเซียส

4.2 ค่าการนำความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิวัสดุ

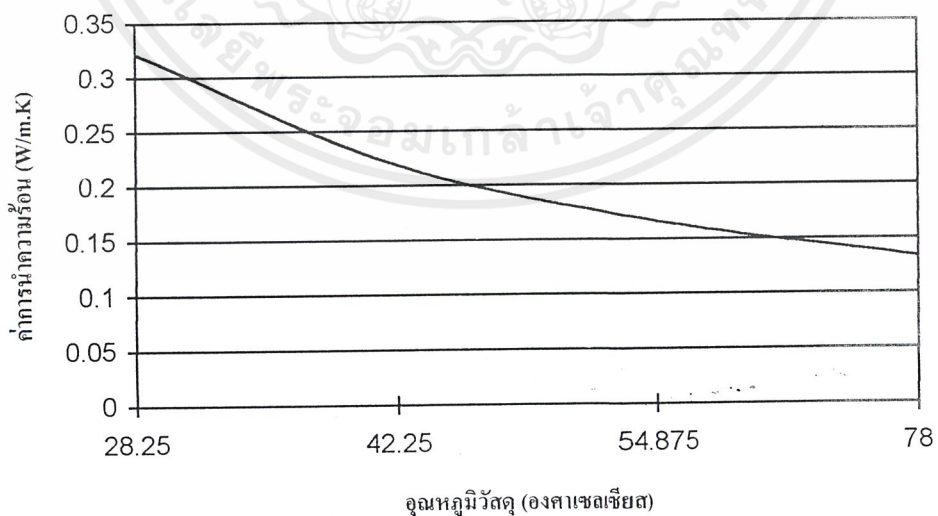
วัสดุไม้อัด หนา 10 มม.

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของไม้อัด

อุณหภูมิคู่อร้อน (°C)	40	60	80	110
อุณหภูมิผิวด้านร้อน (°C)	36.75	54.75	71.25	98.5
อุณหภูมิผิวด้านเย็น (°C)	19.75	29.75	38.5	57.5
ค่าการนำความร้อน (W/m.°C)	0.3216	0.2187	0.166	0.1334
อุณหภูมิวัสดุเฉลี่ย ($T_{\text{ผิวร้อน}} + T_{\text{ผิวเย็น}}$)/2 (°C)	28.25	42.25	54.875	78

กราฟ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุต่อ

อุณหภูมิ ของวัสดุไม้อัด หนา 10 มม.



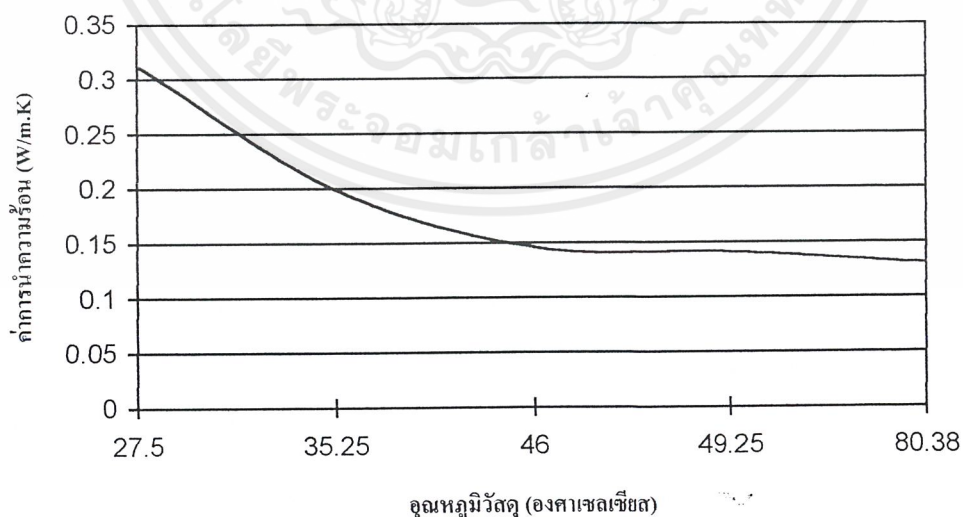
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุกระเบื้อง หน้า 4 มม.

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของกระเบื้อง

อุณหภูมิคู่อร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	40	50	70	80	110
อุณหภูมิผิวด้านร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	31	40.75	53.5	54.5	88.75
อุณหภูมิผิวด้านเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	24	29.75	38.5	44	72
ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.31245	0.1988	0.1458	0.1411	0.13058
อุณหภูมิวัสดุเฉลี่ย ($T_{\text{ผิวร้อน}} + T_{\text{ผิวเย็น}})/2$ ($^{\circ}\text{C}$)	27.5	35.25	46	49.25	80.38

กราฟ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุต่ออุณหภูมิ ของกระเบื้อง หน้า 4 มม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

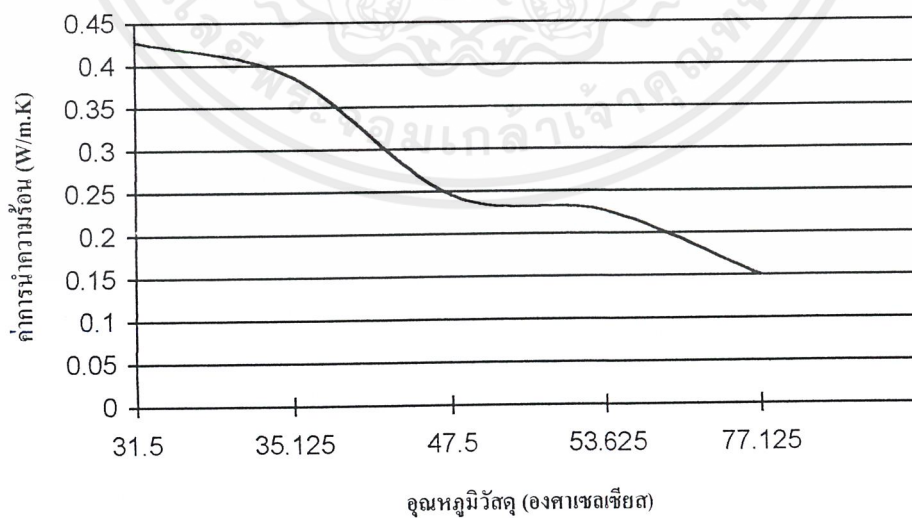
วัสดุยิบซั่มหนา 9 มม.

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของยิบซั่ม

อุณหภูมิคู่อร้อน (°C)	40	50	70	80	110
อุณหภูมิผิวด้านร้อน (°C)	37.25	41.5	57.5	64.5	93.5
อุณหภูมิผิวด้านเย็น (°C)	25.75	28.75	37.5	42.75	60.75
ค่าการนำความร้อน (W/m.°C)	0.4279	0.3859	0.2461	0.2263	0.15
อุณหภูมิวัสดุเฉลี่ย ($T_{\text{ผิวร้อน}} + T_{\text{ผิวเย็น}}$)/2 (°C)	31.5	35.125	47.5	53.625	77.125

กราฟ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุต่อ

อุณหภูมิ ของยิบซั่มหนา 9 มม.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทดลองแปรผกผันกับอุณหภูมิของวัสดุ กล่าวคือเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการนำความร้อนของวัสดุจะมีค่าลดลง หรือเป็นฉนวนความร้อนมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่คำนวณได้นี้กับค่าการนำความร้อนที่นำมาอ้างอิงจะพบว่า

ไม้อัด

$$\text{ค่าที่อ้างอิง} = 0.12 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ค่าที่คำนวณได้} = 0.1334 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \frac{0.1334 - 0.12}{0.12} \times 100\% \\ &= 11.16\% \end{aligned}$$

กระเบื้อง

$$\text{ค่าที่อ้างอิง} = 0.37 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ค่าที่คำนวณได้} = 0.31245 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \frac{0.31245 - 0.37}{0.37} \times 100\% \\ &= -15.55\% \end{aligned}$$

ยิบซัม

$$\text{ค่าที่อ้างอิง} = 0.16 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ค่าที่คำนวณได้} = 0.15 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าความคลาดเคลื่อน} &= \frac{0.16 - 0.15}{0.15} \times 100\% \\ &= 6.25\% \end{aligned}$$

จากผลการทดลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากไม่ถึง 16 % ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการทดสอบที่อุณหภูมิต่างกัน และเนื้อวัสดุที่แตกต่างกันด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

สำหรับเครื่องวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุนี้มีข้อบกพร่องอยู่อีกหลายจุดซึ่งควรปรับปรุงเพิ่มเติมได้แก่

1. การวัดอุณหภูมิต้องทำการเจาะแผ่นวัสดุก่อนจึงอาจทำให้อุณหภูมิที่วัดคลาดเคลื่อนได้เล็กน้อย อาจแก้ไขโดยทำส่วนวัดอุณหภูมิให้เคลื่อนไหวได้ในแนวระดับ ลักษณะเหมือนกระบอกสูบ

2. การประกอบเครื่องเพื่อทดสอบวัสดุทำได้ลำบากเพราะเครื่องมือมีขนาดใหญ่ ควรหาวิธีลดขนาดเครื่องมือ

3. การบันทึกผลค่าอุณหภูมิต้องบันทึกด้วยมือจึงทำให้เกิดความยุ่งยากและเกิดความคลาดเคลื่อนของเวลาได้ ควรจะนำระบบควบคุมแบบ Feed back Control มาใช้และบันทึกค่าและคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อความถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น





ภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Standard Test Method for Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box¹

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 reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

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.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-16 on Thermal Insulation and is the direct responsibility of Subcommittee C16.01 on Thermal Measurements.

Current edition approved Sept. 29, 1989. 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 Materials²
- C 177 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus²
- C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus²
- C 578 Specification for Preformed Cellular Polystyrene Thermal Insulation²
- C 976 Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box²
- C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements²
- E 178 Practice for Dealing With Outlying Observations³
- E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples⁴
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Study to Determine the Precision of Test Methods³

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:

- λ = thermal conductivity, W/(m·K),
- C = thermal conductance, W/(m²·K),
- h = surface conductance, W/(m²·K),
- U = thermal transmittance, W/(m²·K),
- q = heat flux (time rate of heat flow through Area A), W/m²,
- Q = time rate of heat flow, total input to the metering box, W,
- A = metering area normal to heat flow, m²,

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

TABLE 1 Conversion Factors for Thermal Conductivity^a

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

Thermal Conductance ^a						
	W/(m ² ·K) ^a	W/(cm ² ·K)	cal/(s·cm ² ·K)	kg-cal/(h·m ² ·K)	Btu/(h·ft ² ·°F)	
1 W·m ⁻² ·K ⁻¹ =	1.000	1.000 × 10 ⁻⁴	2.388 × 10 ⁻⁵	0.8598	0.1761	
1 W·cm ⁻² ·K ⁻¹ =	1.000 × 10 ⁴	1.000	0.2388	8598	1761	
1 cal·s ⁻¹ ·cm ⁻² ·K ⁻¹ =	4.187 × 10 ⁴	4.187	1.000	3.600 × 10 ³	7373	
1 kg-cal·h ⁻¹ ·m ⁻² ·K ⁻¹ =	1.163	1.163 × 10 ⁻⁴	2.778 × 10 ⁻⁵	1.000	0.2048	
1 Btu·h ⁻¹ ·ft ⁻² ·°F ⁻¹ =	5.678	5.678 × 10 ⁻⁴	1.356 × 10 ⁻⁴	4.882	1.000	

^a 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.
^b 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·m²/W.
- R = thermal resistance, K·m²/W.
- R_{tot} = overall thermal resistance, K·m²/W.
- t_h = average temperature of air 75 mm or more from the hot surface, K.
- t₁ = area weighted average temperature of hot surface, K.
- t₂ = area weighted average temperature of cold surface, K, and
- t_c = 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 3—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 nospiece 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

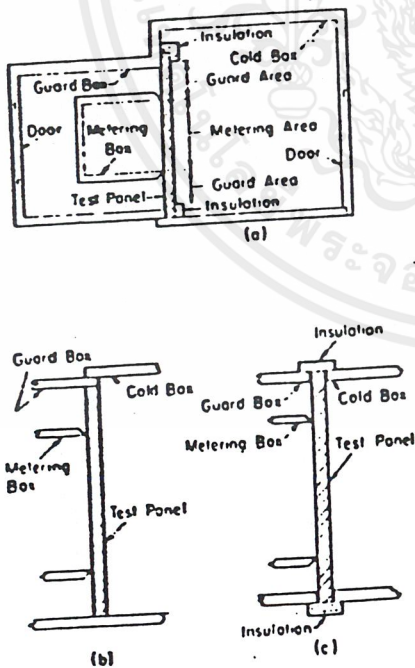


FIG. 1 General Arrangements of Test Box, Guard Box, Test Panel, and Cold Box

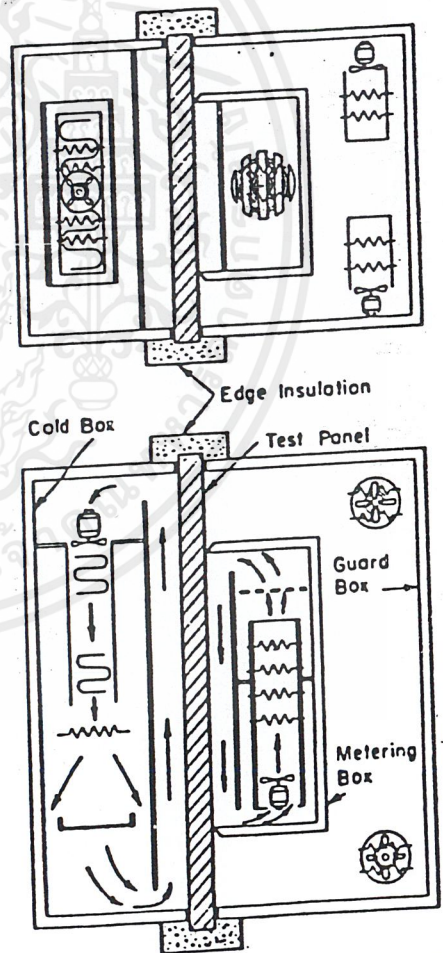


FIG. 2 Arrangement of Equipment During the Test

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 slot-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).⁵ 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

⁵ The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.

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/(m²·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

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 ± 0.25 K.

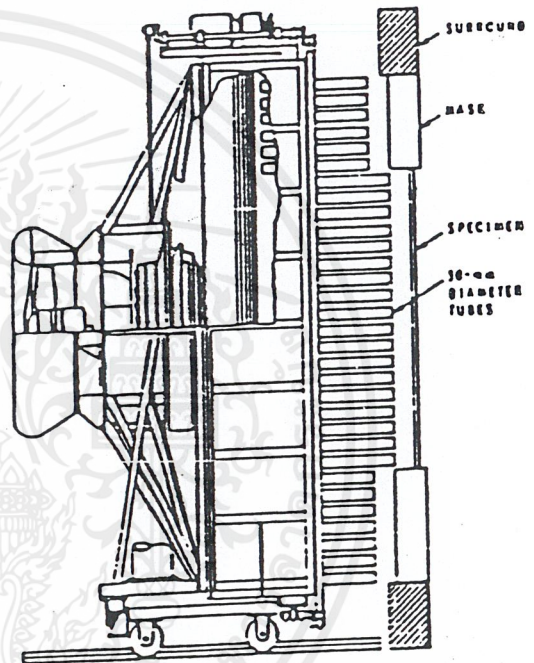
6.4.4 Air Circulation—High air velocities are permissible when their effect upon heat flow is to be determined. This may be accomplished by directing the airflow either parallel or perpendicular to the specimen cold surface. One method of obtaining parallel uniform velocity is to force air through a 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.

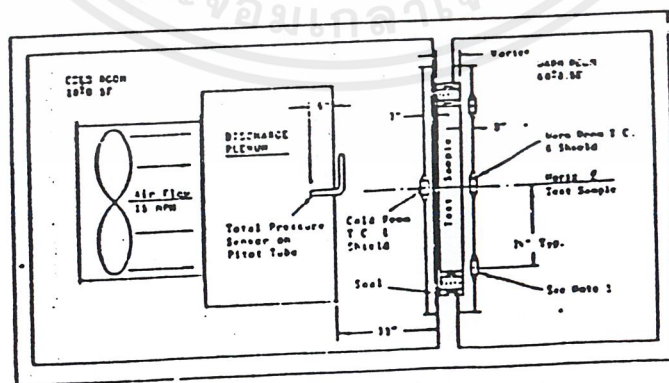
6.4.4.1 After construction of the air circulation system a velocity scan across the air curtain is required to verify that a uniform air curtain is formed. The apparatus should provide a means for determining air velocity past the specimen surface. One method is to locate velocity sensors directly in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

nect 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:

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

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 ± 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 $1.5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 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 overtaxing 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 K·m²/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 ±0.06°C (±0.1°F) and the average power in the meter area did not vary by more than ±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 %:

$$\begin{aligned}
 U &= Q/A(t_h - t_c) \\
 C &= Q/A(t_1 - t_2) \\
 R &= (t_1 - t_2)A/Q \\
 R_u &= (t_h - t_c)A/Q = r_c + R + r_h \\
 r_h &= (t_h - t_1)A/Q \\
 r_c &= (t_2 - t_1)A/Q \\
 h_h &= Q/A(t_h - t_1) \\
 h_c &= Q/A(t_2 - t_1) \\
 \lambda &= QL/A(t_1 - t_2)
 \end{aligned}$$

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_u*, 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 *λ*.

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/m³; spruce-pine-fir with a moisture content of 12 % and a dry density of 486 kg/m³).

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 10.1 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·m²/W (15.77 F ft²·h/Btu). The regression equation for the data set was:

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

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

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/m³ (1.26 to 1.49 lbs/ft³).

11.2 Precision—At a specimen thermal resistance of *R* = 2.78 K·m²/W (15.76 F ft²·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 a round-robin specimen is a thermal resistance of 2.81 K·m²/W (15.94 F ft²·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 0.5 to 2.1 K·m²/W (3 to 11.8 F ft²·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 ² /W (F ft ² ·h/Btu)	Reproducibility Interval, %	Change in <i>R</i> , K·m ² /W (F ft ² ·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_m) 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 ($A_b - A_m$). 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

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

where Q_r 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_r 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_r is evidently equal to the difference of the algebraic errors in Q_h and Q_m . The fractional error is given by

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

where (ΔQ_r) is the algebraic error in Q_r 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

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

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

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

where (ΔQ_{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 $(\Delta Q_m) / Q_m$ 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 $(\Delta Q_r) / Q_r$ is reduced as Q_m / Q_h is made small. Also, as Q_m is made small, the term $(\Delta Q_m) / Q_m$ is presumably also made less significant. Thus, the fractional systematic error possible in the determination of Q_r 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 Δ_t

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 Δt , indicated by its permanently installed thermocouples, are determined. The net mask heat flow Q'_m corresponding to Δt is calculated as $Q'_m(A_m/A_h)$ when the calibration is made before the aperture is cut, where A_m and A_h are as defined earlier, and as $(Q'_c - Q_{h1})$ for the calibrated-blank method where Q_{h1} 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_o 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

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

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, $m^2 \cdot K/W$,
- ΔT = heat flow metered area, m^2 ,
- T = temperature difference across specimen, K,
- E_o = 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:

$$Q_m = f(m, E) = mE + b \quad (X)$$

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 T 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

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:

$$Q_F + Q_H = -(mE + b) \quad (X)$$

XI.1.3 Set E to a value such that the fan wattage is at 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 is still negligible. Using m that was determined, Eq X1.3 yields b . The thermopile emf value that pertains to negligible net heat flow through the meter box walls E_o can then be calculated using Eq X1.2:

$$E_o = -(b/m) \quad (X)$$

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. I., *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-F Polyisocyanurate Foam," Thermal Insulation Board Proceedings of the ASHRAE/DOE-DEHL Conference on Thermal Performance of External Envelopes of Buildings, ASHRAE SP 28, 1 pp. 952-964.
- (7) Gerace, R. R., Derderian, G. D., Cirignano, P. C., Orlandi, R. and Shu, L. S., "An Operational Procedure for Guarded Hot Testing," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 15, No. 3, 1987, pp. 138-144.
- (8) Orlandi, R. D., Howanski, J. W., Derderian, G. D., and Shu, L. "Development of a Testing Procedure for a Guarded Hot Facility," *Symposium on Thermal Insulation, Materials, Systems for Energy Conservation in the 80's*, ASTM STP 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่การณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus¹

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 reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

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).² 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 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 (Reis. (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·m²/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 Insulations³
- C 168 Terminology Relating to Thermal Insulating Materials³

¹ 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 ϵ 2.

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

³ 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 Apparatus³
- C 519 Test Method for Density of Fibrous Loose-Fill Building Insulations³
- C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements³
- E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples⁴
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods⁵

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:

- = thermal conductivity, $W/m \cdot K$,
- = thermal conductance, $W/m^2 \cdot K$,
- = thermal resistance, $K \cdot m^2/W$,
- = heat flux density, W/m^2 ,
- = heat flux, W ,
- = area measured on a selected isothermal surface, m^2 ,
- = thickness of specimen measured along a path normal to isothermal surfaces, m ,
- = mean temperature, K ,
- = temperature difference, K ,
- = density of the material as tested, kg/m^3 ,
- = sensitivity of heat flow transducer $(W/m^2)/V$,
- = heat flow transducer output, V ,
- = temperature of hot plate surface, K , and
- = 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 ($T(\text{ambient}) = T(\text{mean}) \pm 1^\circ C$), and in the range of 10 to $40^\circ C$.

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

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

⁵ 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 ΔT 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.

1. 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 ± 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 μm 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 the 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/ft²) 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 30 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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, ΔL 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.
 - 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 ΔT (δQ , δA , δL , and $\delta \Delta T$) can be used to form the uncertainty $S\lambda$ 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.

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

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 a 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 ΔT , $\delta \Delta T$, 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 ΔT 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
ΔT	0.01 K	0.2 K	0.04	0.40
ΔL	0	0.1 mm	0	0.40
Transducer area	0	50 mm ²	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
λ	0.2 mW/m-K	0.3 mW/m-K	0.4	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 17 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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, ρ , 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 λ factor, that is, the average thermal conductivity of the specimen is calculated as follows:

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

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 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 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 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.

Thermocouple 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 %		a	
T ^a	-200 to 0	-328 to 32	±1 or ±1.5 %		a	
E ^a	-200 to 0	-328 to 32	±1.7 or ±1 %		a	
K ^a	-200 to 0	-328 to 32	±2.2 or ±2 %			

^a 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.

^b 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.

A3 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 ^a						
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} (^{\beta})$	$W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$cal \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$kg \cdot cal \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^{\circ}F^{-1}$	$Btu \cdot in \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^{\circ}F^{-1}$
1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} =$	1.000	1.000×10^{-2}	2.390×10^{-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	1.162×10^{-2}	2.778×10^{-3}	1.000	0.6720	8.064
1 $Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^{\circ}F^{-1} =$	1.730	1.730×10^{-2}	4.134×10^{-3}	1.488	1.000	12.00
1 $Btu \cdot in \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^{\circ}F^{-1} =$	0.1441	1.441×10^{-3}	3.445×10^{-4}	0.1240	8.333×10^{-2}	1.000

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

^a 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 J.
^β 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 ^a						
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} (^{\beta})$	$W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$cal \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$	$kg \cdot cal \cdot h^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^{\circ}F^{-1}$	$Btu \cdot in \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^{\circ}F^{-1}$
1 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} =$	1.000	1.000×10^{-2}	2.388×10^{-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	1.163×10^{-2}	2.778×10^{-3}	1.000	0.6720	8.064
1 $Btu \cdot h^{-1} \cdot ft^{-1} \cdot ^{\circ}F^{-1} =$	1.731	1.731×10^{-2}	4.134×10^{-3}	1.488	1.000	12.00
1 $Btu \cdot in \cdot h^{-1} \cdot ft^{-2} \cdot ^{\circ}F^{-1} =$	0.1442	1.442×10^{-3}	3.445×10^{-4}	0.1240	8.333×10^{-2}	1.000

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

^a 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.
^β 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

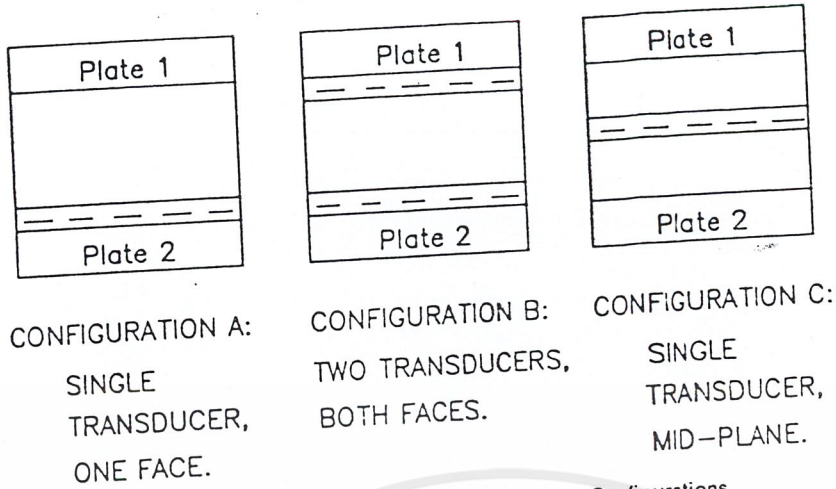


FIG. A2.1 Typical Heat Flow Meter Apparatus Configurations

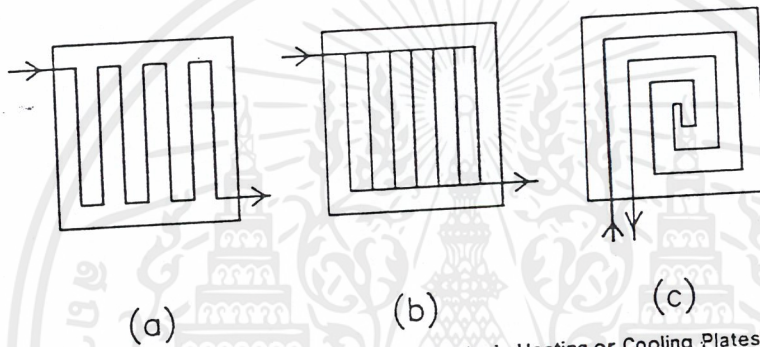


FIG. A2.2 Some Layouts of the Liquid Paths in Heating or Cooling Plates

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_h = hot plate temperature.

T_c = 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

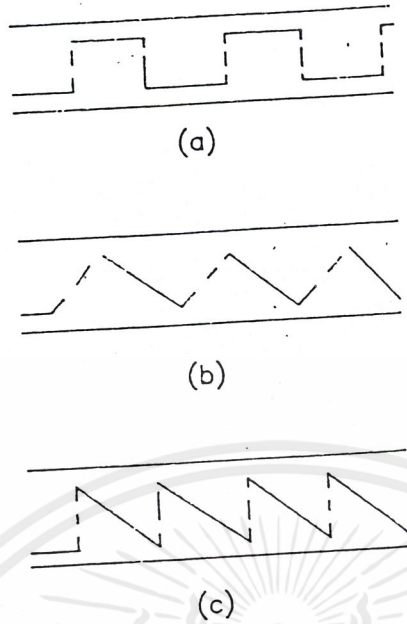


FIG. A2.3 Schematic Designs of Transducers

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, Kiarfield, 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. 68-529*, 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 Standard 1016 mm Guarded Hot Plate," *NBSIR 83-2674*, Washington, DC, 1983.
- (11) Marechal, J. C., "Metrologie et Conductivite Thermique," *Matériaux et Constructions*, Janvier-Fevrier 1974, No. 37, pp. 61-65.
- (12) Clulow, A., and Rees, W. H., "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 Apparatus¹

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 (ϵ) 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 Insulations²
- C 168 Terminology Relating to Thermal Insulating Materials²
- C 518 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus²
- C 687 Practice for Determination of the Thermal Resistance of Loose-Fill Building Insulation²
- C 1045 Practice for Calculating Thermal Transmission Properties from Steady-State Heat Flux Measurements²
- E 230 Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples³

2.2 Adjunct:

- Descriptions of Three Guarded-Hot-Plate Designs (C 177)⁵

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

¹ 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 - 76.⁴

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

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

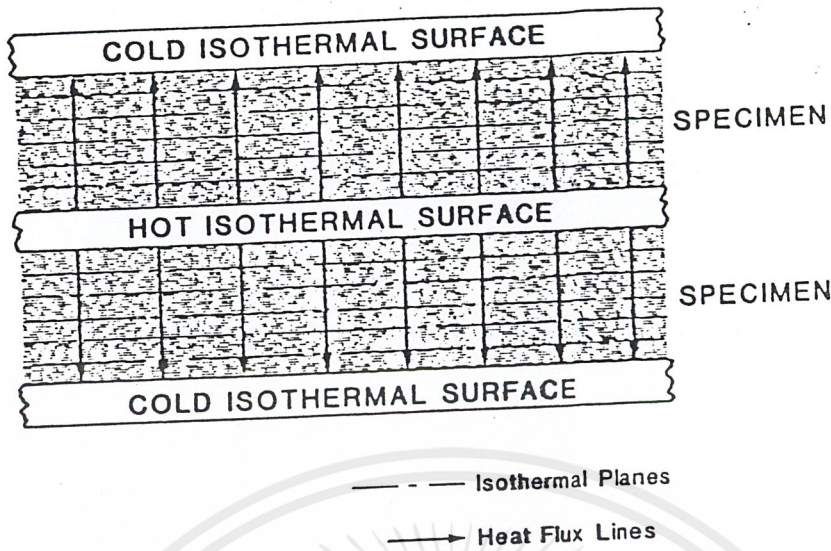


FIG. 1 Schematic of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

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

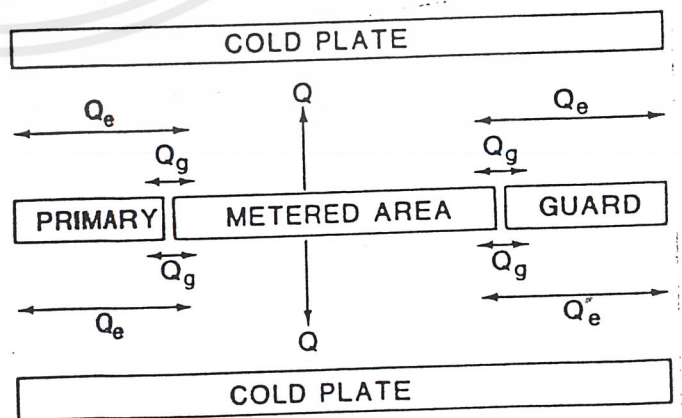


FIG. 2 Illustration of Specimen Heat Flux, Q , Gap Heat Flux, Q_g , and Edge Heat Flux, Q_e .

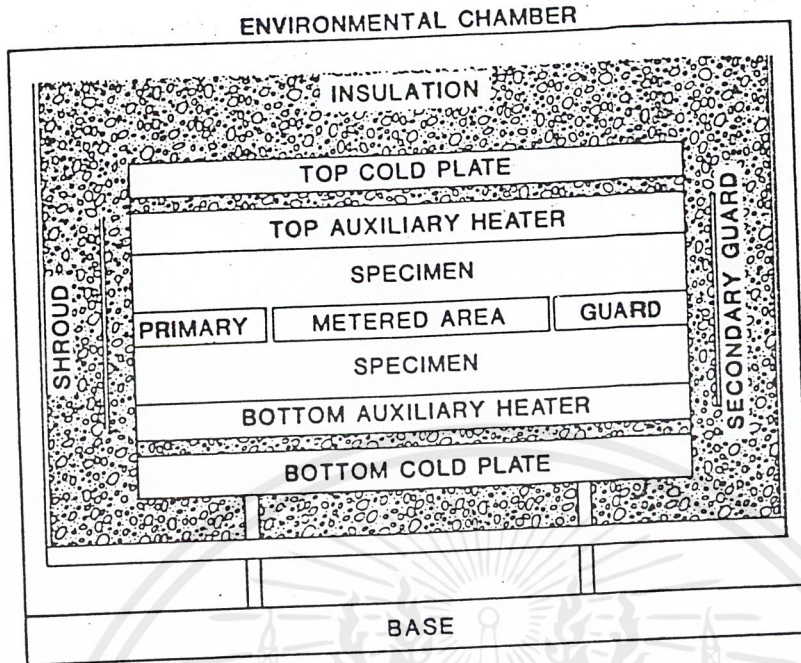


FIG. 3 General Arrangement of the Guarded-Hot-Plate Apparatus

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 heating 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),⁶ 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

⁶ 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 ΔT 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).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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:

$$Q = E \cdot I \tag{1}$$

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:

$$A = A_m + A_g/2 \tag{2}$$

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:

$$A = A_m + A_g \lambda_g / (2\lambda) \tag{2}$$

where:

λ_g = thermal conductivity of the material in the guard region, and

λ = 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, ρ is the following:

$$\rho = M/V \tag{4}$$

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 Bias⁷

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.

⁷ 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, δQ ,
- 9.2.2 Uncertainty in temperature difference, $\delta \Delta T = \delta (T_H - T_C)$,
- 9.2.3 Uncertainty in metered area, δA , and
- 9.2.4 Uncertainty in specimen thickness, δL .
- 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*, δ_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*, δ_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 ΔT 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, δQ_g , is linearly dependent on temperature unbalance, ΔT_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, δQ_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*, δT_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 ΔT 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 ΔT 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, λ , 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.

Test Number: _____				
Duration of Test: _____				
Operator: _____	Product name, manufacturers description			
Specimen Identification: _____	Unique characteristics such as degree of homogeneity or anisotropy, density (optimal)			
Specimen Characteristics: _____	Temperature, time, humidity			
Specimen Conditioning: _____	Before and after conditioning and after measurement			
Specimen Dimensions and Mass: _____	Size, shape, and orientation of plates			
Apparatus Description: _____	Single or double-sided operation, description of secondary guarding, unique procedures			
Experimental Results				
Variable	Measured Value	Systematic	Uncertainty	Random
Q, W				
T _H , K				
T _C , K				
T, K				
ΔT, K				
A, m ²				
L, m				
Fill gas pressure, P _a				
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

- 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.
- Brandeng, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Woodside, W., "Deviations from One-Dimensional Heat Flow in Guarded Hot Plate Measurements." *Review of Scientific Instruments*, Vol 28, 1956, pp. 1933-1937.
- Hust, J. G., "Thermal Anchoring of Wires in Cryogenic Apparatus." *Review of Scientific Instruments*, Vol 41, No. 5, May 1970, pp. 622-624.
- ASTM Subcommittee E20.04, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*, ASTM STP 470B, 1981, 285 pp.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Siu, M. C. I., "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.
- Siu, M. C. I. 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.
- Horlick, J., "National Voluntary Laboratory Accreditation Program, Proficiency Testing for Thermal Insulation Materials Laboratory Accreditation Program." *NBSIR 84-2890*, 1984, 17 pp.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

- (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 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.





Table A-3 Properties of nonmetals

Table A-3 Properties of nonmetals (continued)

Substance	Temp., °C	k , W/m·°C	ρ , kg/m ³	C , kJ/kg·°C	α , m ² /s $\times 10^{-7}$	Temp., °C	k , W/m·°C	ρ , kg/m ³	C , kJ/kg·°C	α , m ² /s $\times 10^{-7}$
Structural and heat-resistant materials										
Asphalt	20-55	0.74-0.76				-45	0.149	470-570	0.816	3.3-4
Brick:						0	0.154			
Building brick, common	20	0.69	1600	0.84	5.2	100	0.161			
Face	600	1.52	2000			51	0.165			
Carborundum brick	1400	11.1				38	0.057			
Chrome brick	200	2.32	3000	0.84	9.2	150	0.069			
	550	2.47			9.8	260	0.083			
	900	1.99			7.9	38	0.078			
Diatomaceous earth, molded and fired	200	0.24				150	0.095			
	870	0.31				260	0.112			
Fireclay brick, burnt	500	1.04				38	0.087			
2425°F	800	1.07	2000	0.96	5.4	93	0.100			
	1100	1.09				150	0.119			
Burnt SiC ² /P	500	1.28	2300	0.96	5.8	--	2.08			
	800	1.37				32	0.04	35		
	1100	1.40				32	0.064			
Missouri	200	1.00	2600	0.96	4.0	30	0.048			
	600	1.47				30	0.048	160		
	1400	1.77				32	0.045	45-120	1.88	2-5.3
Magnetite	200	3.81		1.13		32	0.043	150		
	650	2.77				0	0.051	320		
	1200	1.90	1500			30	0.088	130-200		
Cement, portland	23	0.29				30	0.052	330		
Mortar	23	0.76				20	0.048	240		
Concrete, cinder	20	1.37	1900-2300	0.88	8.2-6.8	23	0.038	24	0.7	22.6
Some 1:2:4 mix	20	0.78 (avg)	2700	0.84	3.4	32	0.144			
Glass, window	30-75	1.09	2200			30	0.035			
Corrosilite	20	0.48	1440	0.84	4.0	38	0.067	270		
Plaster, gypsum	20	0.47				93	0.071			
Metal lath	20	0.47				150	0.074			
Wood lath	20	0.28				204	0.080			
Stone:						32	0.040	160		
Granite	173-398		2640	0.82	8-18	32	0.040	64		
Limestone	126-133		2500	0.80	5.6-5.9	150	0.067			
Marble	2.07-2.94		2500-2700	0.80	10-13.6	260	0.087			
Sandstone	1.83		2160-2300	0.71	11.2-11.9	23	0.059			
Wood (across the grain):						32	0.024	140		
Balsa, 8.8 lb/ft ³	30	0.055	140			23	0.059			
Cypress	30	0.097	460	2.72	0.96					
Fir	23	0.11	420	2.4	1.28					
Maple or oak	30	0.166	540	2.8	0.82					
Yellow pine	23	0.147	640	2.8	0.82					
White pine	30	0.112	430							

¹ Adapted to SI units from A. I. Brown and S. M. Marco, "Introduction to Heat Transfer," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1958

Table 2-1 Insulation types and applications

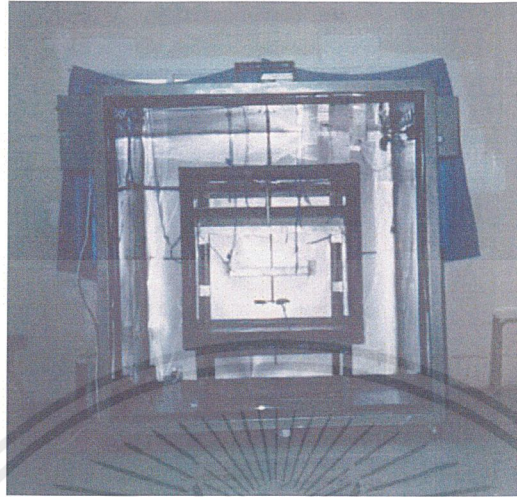
Type	Temperature range, °C	Thermal conductivity, mW/m·°C	Density, kg/m ³	Application
1 Linde evacuated superinsulation	-240-1100	0.0015-0.72	Variable	Many
2 Urethane foam	-180-150	16-20	25-48	Hot and cold pipes
3 Urethane foam	-170-110	16-20	32	Tanks
4 Cellular glass blocks	-200-200	29-108	110-150	Tanks and pipes
5 Fiber-glass blanket for wrapping	-80-290	22-78	10-50	Pipe and pipe fittings
6 Fiber-glass blankets	-170-230	25-86	10-50	Tanks and equipment
7 Fiber-glass preformed shapes	-50-230	32-55	10-50	Piping
8 Elastomeric sheets	-40-100	36-39	70-100	Tanks
9 Fiber-glass mats	60-370	30-55	10-50	Pipe and pipe fittings
10 Elastomeric preformed shapes	-40-100	36-39	70-100	Pipe and fittings
11 Fiber glass with vapor barrier blanket	-5-70	29-45	10-32	Refrigeration lines
12 Fiber glass without vapor barrier jacket	to 250	29-45	24-48	Hot piping
13 Fiber-glass boards	20-450	33-52	25-100	Boilers, tanks, heat exchangers
14 Cellular glass blocks and boards	20-500	29-108	110-150	Hot piping
15 Urethane foam blocks and boards	100-150	16-20	24-65	Piping
16 Mineral fiber preformed shapes	to 650	35-91	125-160	Hot piping
17 Mineral fiber blankets	to 750	37-81	125	Hot piping
18 Mineral wool blocks	450-1000	52-130	175-290	Hot piping
19 Calcium silicate blocks, boards	230-1000	32-85	100-160	Hot piping, boilers, chimney linings
20 Mineral fiber blocks	to 1100	52-130	210	Boilers and tanks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

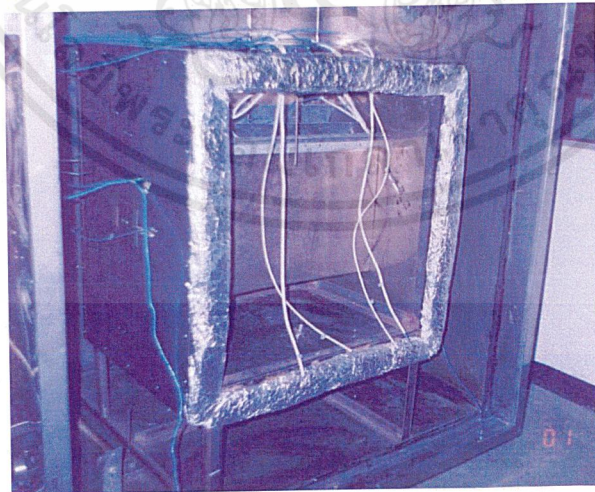


ภาคผนวก ค.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน⁶การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

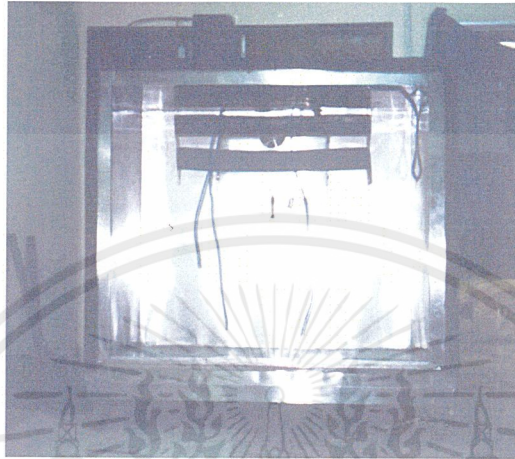


รูปที่ ค1 Hot Box

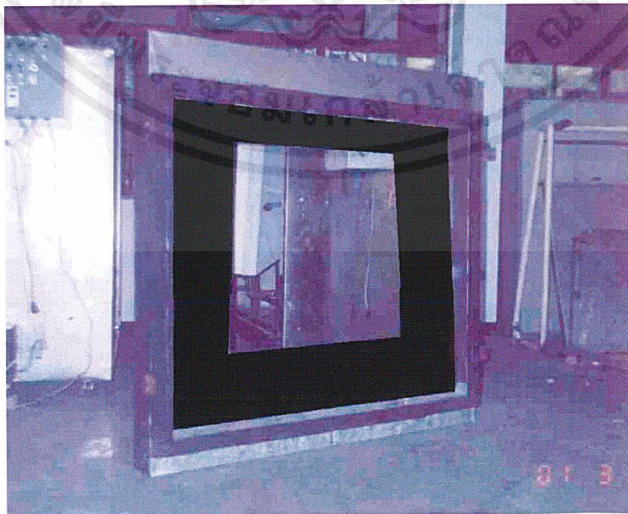


รูปที่ ค2 ปะเก็นใยแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 7 การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

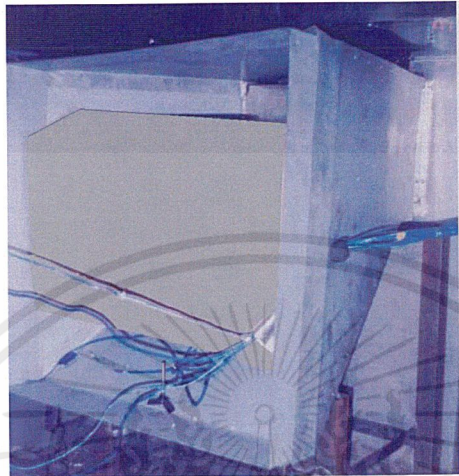


รูปที่ ค3 Cold Box



รูปที่ ค4 ฉนวนที่ Gasket

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

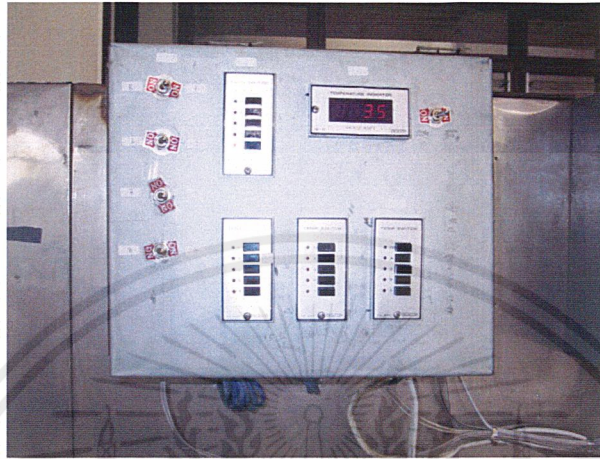


รูปที่ ค5 ท่อลม

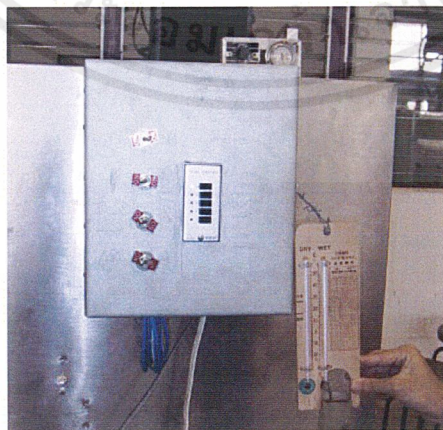


รูปที่ ค6 Lamp ที่ Temp Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ค้า การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓7 กล่อง Control Box ที่ Hot Box



รูปที่ ๓8 Control Box ที่ Cold Box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการตั้งให้ระบบทำงาน

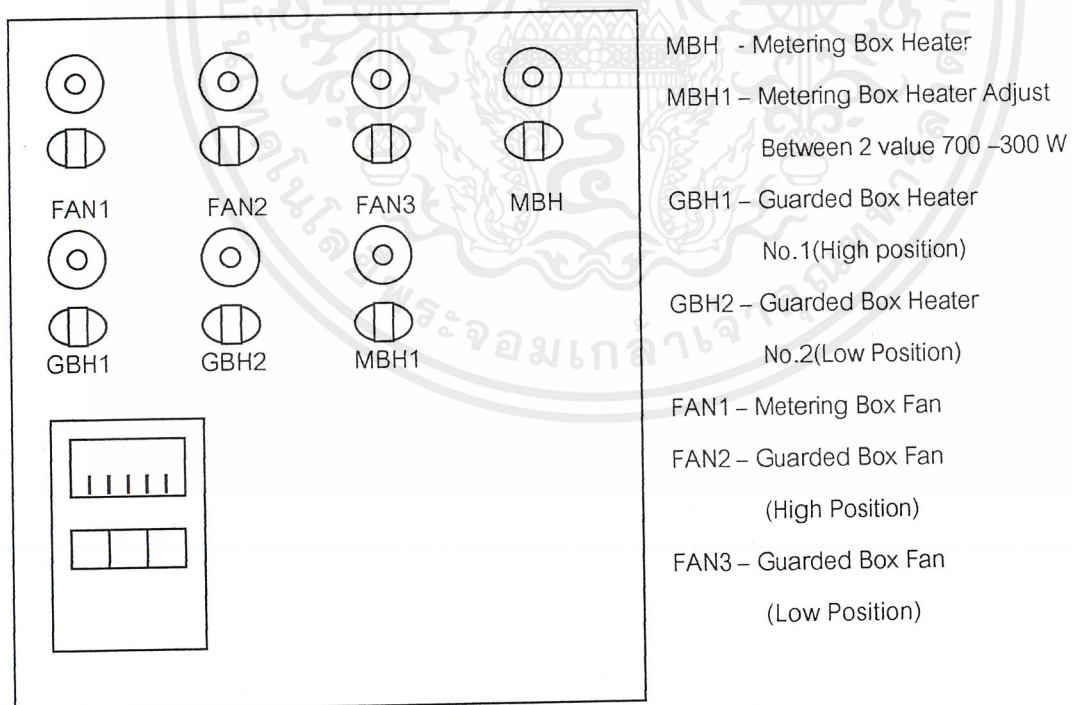
1. เสียบปลั๊กให้ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบและเสียบปลั๊กต่อระหว่าง Hot Box และ Cold Box แล้วเปิดให้ Breaker 30A และ 10A (ที่อยู่ในกล่อง Control Box)ให้อยู่ในตำแหน่ง on ซึ่งเมื่อสับ Breaker อยู่ในตำแหน่ง on จะทำให้ชุด Temperature Switch (TS) และ Temperature Indicator (TI) ทำงาน

2. ปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการให้ Heater ใน Hot Box ทำงานโดยภายใน Hot Box นั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

2.1 Heater ในส่วนของ Guarded Box จะทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการโดย Thermostat ที่ติดตั้งไว้ที่กล่องของพัดลมตัวที่ 2 และ 3

2.2 Heater ในส่วนของ Metering Box จะทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการโดย Temperature Control ที่ Control Box

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

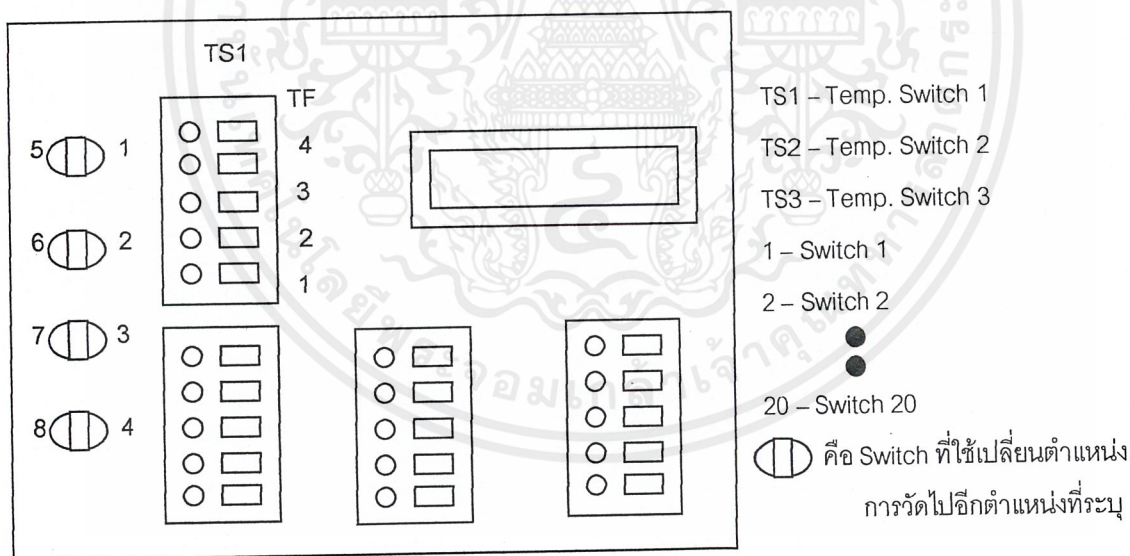


รูปที่ 1 ชุด Control Box พร้อม รายละเอียด

4. ปล่อยให้ระบบทำงานจนถึงสถานะเสถียร (ประมาณ 3 ชั่วโมง) โดยที่สถานะเสถียรสามารถสังเกตจากการที่อุณหภูมิที่จุดต่างๆใน Metering Box คงที่ และอุณหภูมิที่จุดต่างๆใน Guarded Box (ซึ่งปกติอุณหภูมิใน Metering Box และ Guarded Box ควรเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน) สำหรับการอ่านค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆใน Guarded Box , Metering Box และ Cold Box จะต้องใช้ TS1 – TS5 และ TI ซึ่งมีขั้นตอนการปฏิบัติงานในการใช้งาน TS1 – TS5 และ TI ดังนี้

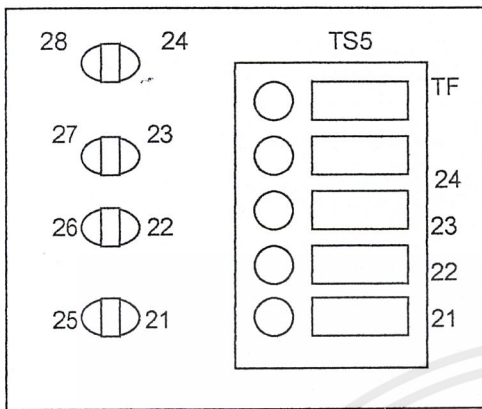
4.1 โดย TS นั้นจะแยกเป็น 2 ฝั่ง คือ ตั้งแต่ TS1 – TS4 จะอยู่ฝั่ง Hot Box ส่วน TS5 จะอยู่ฝั่ง Cold Box โดยจะมี Switch (HB) 1 ตัวเป็นตัวเปลี่ยนฝั่งการทำงาน

4.1.1 ถ้าหากเราต้องการทราบอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุฝั่ง Hot Box ก็ต้องทำการสับ Switch (HB) ไปทางฝั่ง Hot Box แล้วกดปุ่ม TS (ที่อยู่ใน TS1 – TS4) ของจุดที่ต้องการอ่านค่าอุณหภูมิตามหมายเลขที่เป็นตัวระบุตำแหน่งอุณหภูมิที่ต้องการทราบและ TS ตัวอื่นๆถูกกดอยู่ที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณจากจุดเราที่ต้องการอ่านค่าอุณหภูมิผ่านตัว TS ตัวอื่นๆไปได้โดยไม่มีกรรบกวนและเข้าสู่ TI เพียงจุดเดียว ฉะนั้นการอ่านค่าของเราจะอ่าน (แสดงผลที่ TI) ได้ครั้งละ 1 จุดเท่านั้น (เพราะฉะนั้นจะมี TI เพียง 1 ตัว) ดังรูปที่ 5 ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการอ่านค่าอุณหภูมิที่จุด 4 ซึ่งอยู่บน TS1 ก็จะต้องให้ TS2 – TS4 ถูกกดอยู่ที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณที่จุด 4 ซึ่งอยู่บน TS1 จาก TS2 → TS3 → TS4 → TS1 จนได้ค่าอุณหภูมิที่จุด 4 แสดงออกมาหรือถ้าต้องการอ่านค่าอุณหภูมิที่จุด 10 บน TS3 ก็จะต้องให้ TS1 , TS2 , TS4 และ TS5 ถูกกดอยู่ที่ปุ่ม TF เพื่อให้สัญญาณจากจุด 10 บน TS3 ถูกส่งผ่านไป TS5 TI เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิที่จุด 10 ออกมา



รูปที่ 2 ชุด Temperature Control Box ฝั่ง Hot Box

4.1.2 ถ้าหากว่าเราต้องการทราบอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุฝั่ง Cold Box ก็ต้องทำการสับ Switch (HB) ไปทางฝั่ง Cold Box แล้วกดปุ่ม TS (ที่อยู่ใน TS5) ของจุดที่ต้องการอ่านค่าอุณหภูมิตามหมายเลขที่เป็นตัวระบุตำแหน่งของอุณหภูมิที่ต้องการทราบ ตัวเลขของอุณหภูมิก็จะขึ้นที่ตัว TI เอยดังรูปที่ 3



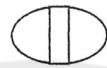
TS5 – Temp. Switch 5

21 – Switch 21

22 – Switch 22

23 – Switch 23

24 – Switch 24



คือ Switch ที่ใช้เปลี่ยนตำแหน่งการวัดไป
อีกตำแหน่งที่ระบุไว้

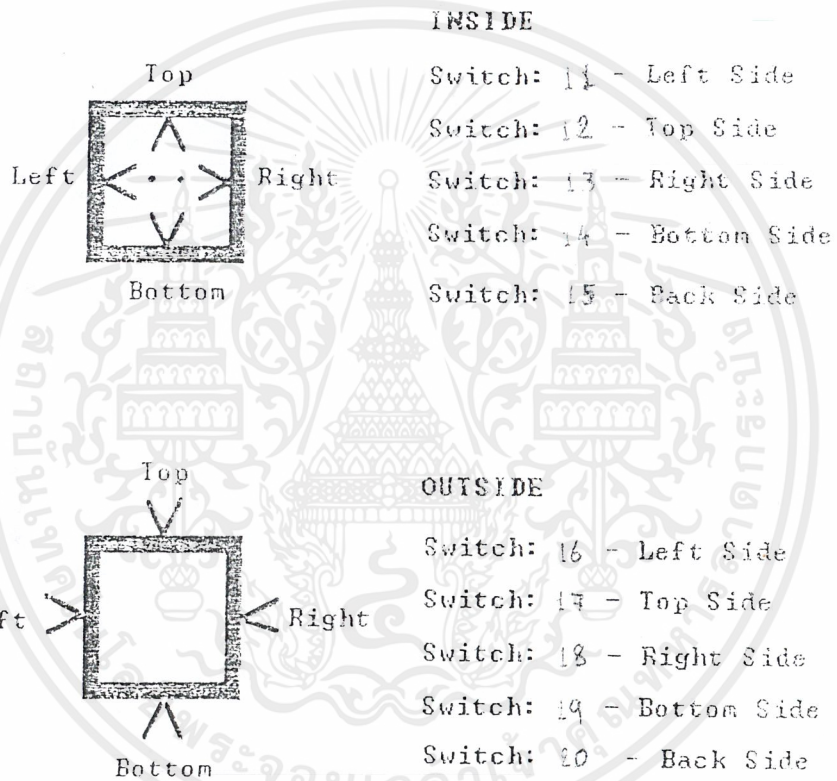
รูปที่ 3 ชุด Temperature Control Box ฝั่ง Cold Box

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

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

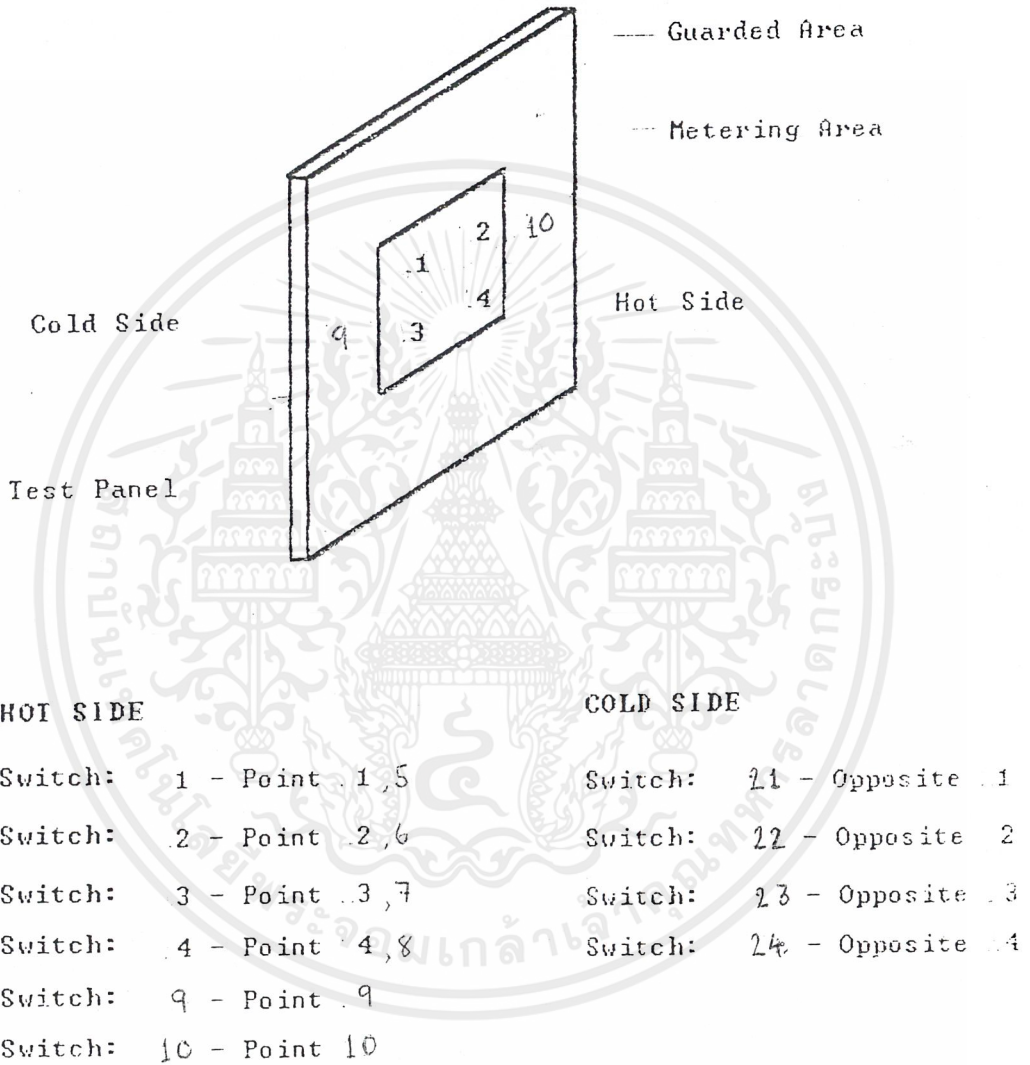
4.4 ถ้าเป็นการกด 2 ปุ่มบน TS เดียวกันจะไม่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ หรืออาจเป็นค่าที่อ่านได้ แต่เราไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นค่าอุณหภูมิที่จุดใด

METERING BOX



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TEST PANEL



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [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] อัครเดช สิ้นธุภัก : “การทำควมเย็น” , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] เกียรติขจร อริยะจรรยา, ชาญวิทย์ วงศ์รัตนพรกุล และ ลำบุญ สิมะขจรบุญ : “การพัฒนาเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อน” , ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537
- [6] บุรินทร์ ศรีทธาวาณิชย์, พุฒิพงศ์ ชัยณรงค์ และ สุคนธา เขี่ยมกุลวรพงษ์: “การพัฒนาต่อเนื่อของเครื่องมือสำหรับวัดความเป็นตัวนำความร้อน” , ปรินญาณิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538