

การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างด้วยหัววัดแบบฟิล์มบาง

ทัศนัย บุญเกิดรัตนสกุล¹ นริส ประทีนทอง² และ ณีฐัฐ กาศยปนนันท์³

Abstract

Boonkerdrattanasakul, T., Pratinthong, N. and Kasayapanand, N.
Measurement of the thermal conductivity of construction materials
using a thin film probe
Songklanakarin J. Sci. Technol., May 2007, Suppl 2 : 391-399

The objective of this research work was to develop a thin film thermal conductivity probe for measuring thermal property of construction materials. This probe was developed based on the line heat source principle. The thermal conductivity can be determined from the slope of linear relation between the temperature differences ΔT and logarithm of time $\ln(t)$. The probe was tested by measuring the thermal conductivity of three kinds of specimens comprising of polystyrene foam (PS), autoclaved aerated concrete (ACC) and gypsum board (GB) The range of electrical power supply rate for the probe was varied from 0.15 to 1.59 W. The thermal conductivity values obtained with this method were greater compared to the results obtained using the ASTM C 177. The difference of thermal conductivity between line two methods decreased with the increase of the power supply rate. The mean difference for PS, ACC and GB was 4.33%, 6.15% and 42.34% respectively. According to the restriction of minimum thickness requirement of specimen for testing with the guard hot plate apparatus (ASTM C 177), it was necessary to overlay one GB slab on another. As a result, the mean difference of thermal conductivity for GB was considerably high.

Key words : thermal conductivity, construction materials, line heat source

Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140 Thailand.

¹นักศึกษาระดับปริญญาโทหลักสูตร วศ.ม. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน ²Ph.D. (Physics) ³Ph.D. (Thermal Technology) คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail: tasanai09@hotmail.com

รับต้นฉบับ 21 เมษายน 2549 รับลงพิมพ์ 16 มกราคม 2550

บทคัดย่อ

ทัศนัย บุญเกิดรัตนสกุล นริส ประทินทอง และ ณัฐฐ์ กาศยปน์พนธ์
การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างด้วยหัววัดแบบฟิล์มบาง
ว. สงขลานครินทร์ วทท. พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2 : 391-399

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาหัววัดค่าการนำความร้อนแบบฟิล์มบางที่ใช้สำหรับวัดสมบัติทางความร้อนของวัสดุก่อสร้าง หัววัดนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการพื้นฐานการให้ความร้อนด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นเส้นลวด ค่าการนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากค่าความชันของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิกับค่าลอการิทึมของเวลา หัววัดที่พัฒนาขึ้นจะนำมาทดสอบโดยใช้หัววัดค่าการนำความร้อนของวัสดุตัวอย่าง 3 ชนิด คือ ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม คอนกรีตมวลเบาและยิปซัมบอร์ด ระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดจะเปลี่ยนแปลงตามวัสดุที่ใช้วัดจาก 0.15 ถึง 1.59 วัตต์ ค่าการนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณของหัววัดแบบฟิล์มบางจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวัดตามมาตรฐาน ASTM C 177 ค่าความแตกต่างของค่าการนำความร้อนที่ได้จากทั้ง 2 วิธี จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัด ค่าความแตกต่างเฉลี่ยของ ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม คอนกรีตมวลเบาและยิปซัมบอร์ด เท่ากับ 4.33% 6.15% และ 42.34% ตามลำดับ เนื่องจากข้อจำกัดของความหนาที่น้อยที่สุดของชิ้นงานที่ต้องการสำหรับใช้กับเครื่องมือวัดตามมาตรฐาน ASTM C 177 จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แผ่นยิปซัมบอร์ดมาซ้อนกันขณะวัดค่า ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความแตกต่างเฉลี่ยของค่าการนำความร้อนของยิปซัมบอร์ดมีค่าค่อนข้างสูง

ค่าการนำความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุก่อสร้างซึ่งเป็นวัสดุหลักของประเทศ แต่การทราบค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างที่ถูกต้องแม่นยำ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อสถาปนิก วิศวกรรวมทั้งนักวิจัยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบก่อสร้าง แต่ที่ผ่านมาข้อมูลเหล่านี้ยังมีไม่มากพอและมีความหลากหลายแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับมาตรฐานการวัด อีกทั้งบางกรณีไม่มีค่าจากผู้ผลิต หรือมีแต่ก็อาจมีค่าผิดพลาดได้ ทำให้บางครั้งนักออกแบบเองต้องใช้วิธีประมาณค่าแทนค่าจริงในการออกแบบ ซึ่งอาจทำให้การออกแบบอุปกรณ์และการทำนายค่าต่างๆ มีความผิดพลาด หรือต้องออกแบบเพื่อความผิดพลาดมากเกินไปจนไม่เป็นผลดีในหลายๆ ด้าน เช่น ต้นทุนที่สูงขึ้น คุณภาพของงานที่ด้อยลง

ในปัจจุบันเครื่องวัดค่าการนำความร้อนมีอยู่หลายชนิด เครื่องวัดที่เป็นที่นิยมแบ่งตามเทคนิคการวัด ได้แก่ แบบสภาวะคงที่ (steady state) ได้แก่ guard hot plate, heat flux meter (ASTM C 518, 2004) และแบบสภาวะไม่คงที่ (unsteady state) ได้แก่ hot wire probe หรือขดลวดร้อน (ASTM D 5334, 2004) เครื่องวัดแต่ละเครื่องมีข้อจำกัดต่างกัน ข้อดีที่เห็นได้ชัดของเครื่องมือวัด

แบบขดลวดร้อนคือสะดวกและรวดเร็ว ใช้เวลาในการวัดน้อยเมื่อเทียบกับแบบอื่นและสามารถพกพาได้ นอกจากนี้ยังไม่จำกัดขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้วัดค่าการนำความร้อนของวัสดุประเภทอื่นได้อีกด้วยนอกเหนือจากวัสดุก่อสร้าง อาทิ ดิน อาหารประเภทไอศกรีม เป็นต้น หัววัดค่าการนำความร้อนแบบขดลวดร้อนที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่หลายแบบ ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สะดวกในการวัดค่าตามลักษณะชิ้นงาน หัววัดค่าดังกล่าว ได้แก่ หัววัดค่าการนำความร้อนแบบเข็ม (อัจฉรา, 2541) อย่างไรก็ตามหัววัดค่าการนำความร้อนดังกล่าวยังสามารถปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่อง เช่น การตั้งเวลาระยะการให้ความร้อนที่เหมาะสมแก่ขดลวดร้อนที่ใช้วัดค่าการนำความร้อนของวัสดุแต่ละแบบ รวมไปถึงการวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนด้วยเทคนิคการคำนวณใหม่ที่ทำให้ความละเอียดและความน่าเชื่อถือที่สูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าการนำความร้อนแบบขดลวดร้อนบนฟิล์มบาง โดยอาศัยเทคนิคการใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นเส้นลวดเป็นตัวให้ความร้อน (line heat source)

หลักการหาค่าการนำความร้อนโดยวิธี Line heat source

การหาค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยอาศัยทฤษฎีแหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นเส้นลวดเป็นตัวให้ความร้อนที่มีความยาวมากๆ ได้ถูกนำเสนอโดย Caslaw และ Jaeger (1964) ภายใต้สมมติฐานดังนี้

1. ลวดให้ความร้อนมีความยาวมากๆ เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดและไม่มีการหดตัว หรือคลายตัว หรือเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ใช้งาน

2. ลักษณะของตัวอย่างที่นำมาวัดต้องมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) และมีขนาดใหญ่

จากหลักการดังกล่าว ได้มีการสร้างหัววัดและนำมาประยุกต์ใช้วัดกับวัสดุต่างๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีผู้วิจัยหลายท่าน เช่น Murakami และคณะ (1996) Blackwell (1954) ได้เสนอการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ของสมการที่นำมาใช้ในการหาค่าการนำความร้อน ซึ่งเป็นการพิจารณาการหาค่าการนำความร้อนที่สภาวะไม่คงที่ โดยที่แหล่งให้กำเนิดความร้อนมีขนาดเล็กมากและมีความยาวระยะอนันต์ อยู่ภายในตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันขนาดใหญ่มาก เมื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) จากแหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นเส้นลวดมีค่าคงที่ ค่าตอบจะอยู่ในรูปอนุกรมโดยมิได้ตัดทอน ดังนี้

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \left[-\frac{C_e}{2} - \ln(\beta) + \frac{\beta^2}{2(1!)} - \frac{\beta^4}{4(2!)} + \dots \right] \quad (1)$$

โดย T = อุณหภูมิที่จุดใดๆ ที่ห่างจากแหล่งให้ความร้อน (°C)

Q = อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดต่อความยาวของหัววัด (วัตต์/เมตร)

k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (วัตต์/เมตร°C)

C = Euler's constant (0.57721)

t = เวลา (วินาที)

r = ระยะห่างระหว่างแหล่งจ่ายความร้อนกับจุดที่พิจารณา (เมตร)

α_s = ค่าการแพร่กระจายความร้อนของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (ตารางเมตร/วินาที)

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}}$$

จากสมการที่ (1) เมื่อ r มีค่าน้อยมาก β ที่ได้จะมีค่าน้อยและเมื่อพิจารณาอนุกรม β ยกกำลัง จะเห็นได้ว่า β มีค่าน้อยมากสามารถละเลยได้ โดยสมการที่ตัดทอนแล้ว (truncated equation) จะอยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ดังนี้

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \left[-\frac{C_e}{2} - \ln(\beta) \right] \quad (2)$$

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่จุดคงที่ค่าหนึ่งทีห่างจากแหล่งให้ความร้อนในช่วงระยะเวลา t_1 และ t_2 และแทนค่า β ลงในสมการที่ (2) จะได้

$$T_1 = \frac{Q}{2\pi k} \left[-\frac{C_e}{2} - \ln\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t_1}}\right) \right] \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{Q}{2\pi k} \left[-\frac{C_e}{2} - \ln\left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t_2}}\right) \right] \quad (4)$$

นำสมการที่ (3) ลบกับสมการที่ (4) จะได้

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (5)$$

$$k = \frac{Q}{4\pi} \left(\frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{T_2 - T_1} \right) \quad (6)$$

$$k = \left(\frac{Q}{4\pi \text{ slope}} \right) \quad (7)$$

โดยที่ slope = ความชันของสมการเส้นตรงในสมการ

ที่ (5) มีค่าเท่ากับ $\frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$ (°C)

โดย T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นในการให้ความร้อน (°C)

T_2 = อุณหภูมิสุดท้ายในการให้ความร้อน (°C)

t_1 = เวลาเริ่มต้นในการวัดอุณหภูมิ (วินาที)

t_2 = เวลาสุดท้ายในการวัดอุณหภูมิ (วินาที)

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. หัววัดค่าการนำความร้อนแบบฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบหัววัดค่าการนำความร้อน โดยอาศัยหลักการของแหล่งกำเนิดความร้อนที่เป็นเส้นลวด ในการสร้างหัววัดจะใช้แผ่นทองแดงบางที่มีขนาดความหนา 0.006 มม. เพื่อนำมาทำเป็นลวดนำความร้อน โดยทำการลอกสายและกัดกรดให้ลายทองแดงเป็นรูปด้วยขนาดความกว้างของลายทองแดง 0.4 มม. ความยาว 90 มม. ระยะห่างระหว่างลายทองแดง 1.5 มม. ดังแสดงใน Figure 1 และใช้สายเทอร์โมคอปเปิล Type K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 มม. ติดตรงกึ่งกลางระหว่างลายทองแดง จากนั้นใช้แผ่นฟิล์มพอลิอิมายด์ (polyimide film) ความหนา 0.025 มม. ประกอบติดบนแผ่นลายทองแดง

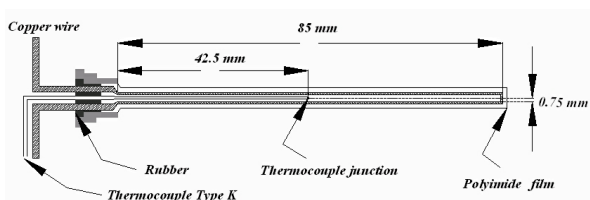


Figure 1. Thin film thermal conductivity probe

2. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)

เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจ่ายให้กับลวดความร้อนโดยใช้เครื่องของ Goodwill รุ่น GPR-6060D มีช่วงการปรับค่าความต่างศักย์ 0-60 V ช่วงการปรับกระแส 0-6 A ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมีค่าเพียง 0.01%

3. เครื่องวัดอุณหภูมิ

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าอุณหภูมิโดยต่อกับสายเทอร์โมคอปเปิลยี่ห้อฟลูค รุ่น 54 Series 2 ที่มีค่าความแม่นยำสูงคือ มีความแม่นยำระดับห้องทดลอง ± (0.05% + 0.3°C)

วิธีการทดลอง

วัดค่าการนำความร้อนของวัสดุโดยใช้หัววัดที่พัฒนาขึ้น

และนำค่าที่วัดได้จะนำมาสอบเทียบกับค่าที่วัดด้วยเครื่องมือวัดตามมาตรฐานแบบ guard hot plate (ASTM C 177 standard, 2004) และค่าจากเอกสารเผยแพร่แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างสำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (2547) วัสดุที่นำมาใช้วัดเพื่อสอบเทียบค่านี้นี้คือ ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม (polystyrene foam) คอนกรีตมวลเบา (autoclaved aerated concrete) และยิปซัมบอร์ด (gypsum board)

1. การทดลองหาค่าการนำความร้อน

ในการทดลองจะใช้ตัวอย่างชนิดเดียวกัน 2 ชิ้น วางซ้อนกันในลักษณะให้มีผิวสัมผัสระหว่างกันมากที่สุด หัววัดจะถูกจัดวางไว้ระหว่างตัวอย่างทั้งสองชิ้น และหัววัดจะต่อเชื่อมกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องวัดอุณหภูมิ ดังแสดงใน Figure 2, 3 โดยอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดในระดับที่ต้องการทดสอบ คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$I = \left(\frac{Q}{R''} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

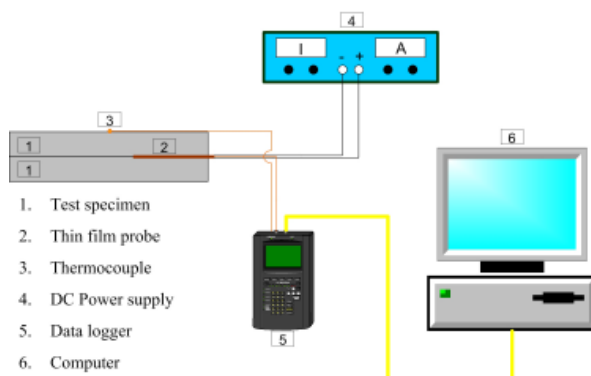


Figure 2. Diagram of system installation



Figure 3. Measurement setup

โดย I = กระแสไฟฟ้า (A)
 Q = อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดต่อความยาวของหัววัด (วัตต์/เมตร)
 R'' = ค่าความต้านทานต่อความยาวของหัววัด (Ω/m)

ในการบันทึกค่าจะเริ่มเมื่ออุณหภูมิของหัววัดและผิวของวัสดุมีค่าคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงเพียง $\pm 0.2^{\circ}C$ และจะทำกรบันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 180 วินาที จากนั้นปิดสวิตซ์เพื่อหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้า และทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิต่อ จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงจนใกล้ค่าเริ่มต้นและทำการหยุดบันทึก

ผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อนำค่าอุณหภูมิซึ่งแปรผันตามเวลาและปริมาณความร้อนที่จ่ายให้กับหัววัดที่วัดได้มาเขียนกราฟให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ซึ่งเป็นเส้นตรง ดังสมการที่ (5) จากนั้นหาค่าคงที่หรือความชันของกราฟเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการนำความร้อนของวัสดุได้โดยใช้สมการที่ (7)

1. ผลการทดสอบฉนวนโพลีสไตรีนโฟม

การทดลองวัดค่าการนำความร้อนของฉนวนโพลีสไตรีนโฟม จะใช้ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม ขนาดกว้าง ยาวและ

หนาเท่ากับ $12 \times 12 \times 1$ นิ้ว โดยจะทำการทดลองต่อเนื่องกัน 3 ครั้ง เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องรอให้อุณหภูมิภายในวัสดุและผิวของวัสดุกลับมาอยู่ที่จุดเดิมก่อน ก่อนที่จะเริ่มการทดลองใหม่ อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดในการวัดแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน ซึ่งมีค่าตามลำดับดังนี้คือ 0.147, 0.192 และ 0.243 วัตต์ ในการทดลองจะใช้เวลา 180 วินาที (นับตั้งแต่เริ่มเปิดสวิตซ์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัววัดจนกระทั่งปิดสวิตซ์) เมื่อทำการพล็อตค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบกับเวลา $\ln(t)$ ดังแสดงใน Figure 4 โดยเลือกเอาช่วงตั้งแต่ 60 วินาที เป็นต้นไป พบว่า กราฟที่ได้ค่อนข้างเป็นเส้นตรงที่มีค่า R^2 สูง ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัด และเมื่อคำนวณค่าการนำความร้อนของฉนวนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องวัดมาตรฐานโดยใช้วิธี guard hot plate และค่าจากเอกสารเผยแพร่แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างพบว่า มีค่าแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 4.3% ดังแสดงใน Table 1

ค่าการนำความร้อนของฉนวนโพลีสไตรีนโฟม ที่วัดด้วยหัววัดแบบฟิล์มบางเปรียบเทียบกับแบบ guard hot plate และค่าจากเอกสารเผยแพร่แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างแสดงใน Table 1 ผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงเมื่อระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดมีค่าน้อย นั่นหมายความว่า ถ้าทำการวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่ำจะทำให้ข้อมูลที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนในช่วงที่กว้างกว่าที่

Table 1. Comparison of the thermal conductivity of polystyrene foam as measured by the difference techniques

Rate of power supplied (W)	Thermal conductivity (k) W/m°C			
	ASTM C 177 ⁽¹⁾	Reference ⁽²⁾	Thin film ⁽³⁾	Error(%) ⁽⁴⁾
0.147	0.0323	0.035-0.038	0.0350	8.359%
0.192	0.0323	0.035-0.038	0.0333	3.1%
0.243	0.0323	0.035-0.038	0.0328	1.547%
Average	0.0323	0.035-0.038	0.0337	4.334%

⁽¹⁾ Thermal conductivity of materials according to measured guard hot plate standard (ASTM C 177)
⁽²⁾ Thermal conductivity of materials from publication (documentation of selection guidelines on construction material and electrical appliance and equipment for energy conservation)
⁽³⁾ Thermal conductivity of materials measured by the thin film probe
⁽⁴⁾ Deviation percentage of Measurement (compare between thin film probe and Guard Hot Plate)

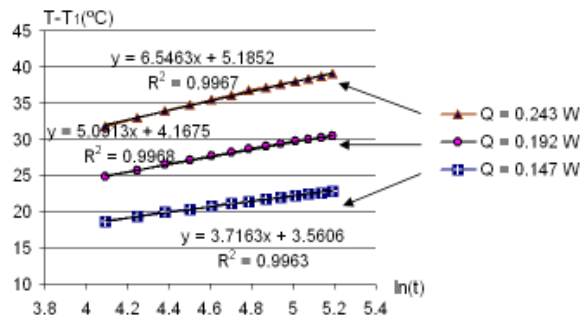


Figure 4. Variation of temperature difference in polystyrene foam, for three rates of power supplied

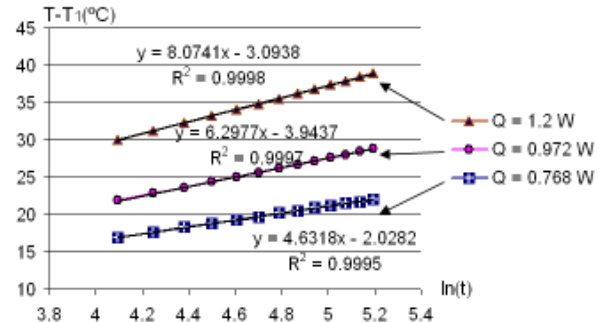


Figure 5. Variation of temperature difference in autoclaved aerated concrete, for three rates of power supplied

ระดับความร้อนที่สูงกว่า โดยระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมาใช้หาค่าความชันในแต่ละระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าควรเริ่มตั้งแต่วันที่ 60 เป็นต้นไป ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเทียบกับแบบ guard hot plate อยู่ที่ 1.547% ที่ระดับอัตราการจ่ายไฟฟ้าให้หัววัดที่ 0.243 วัตต์

2. ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบา

การทดลองวัดค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา จะใช้คอนกรีตมวลเบาขนาดกว้าง ยาวและหนา เท่ากับ 4.5x9x1 นิ้ว โดยการทดลองจะทำเช่นเดียวกับฉนวนโพลีสไตรีนโฟม โดยจะให้อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัด 3 ระดับคือ 0.768, 0.972 และ 1.2 วัตต์ ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้มีลักษณะคล้ายกับกรณีแรก โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบกับเวลา ln(t) ดังแสดงใน Figure 5 และผลสรุปเทียบกับวิธีมาตรฐาน และค่าจากเอกสารเผยแพร่แนวทางการเลือกวัสดุก่อสร้างใน Table 2

ผลการเปรียบเทียบ พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับฉนวนโพลีสไตรีนโฟม โดยค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของคอนกรีตมวลเบา (เทียบกับแบบ guard hot plate) อยู่ที่ 0.769% ที่ระดับอัตราการจ่ายไฟฟ้าให้หัววัดที่ 1.2 วัตต์

3. ผลการทดสอบยิปซัมบอร์ด

จากการทดลองวัดค่าการนำความร้อนของยิปซัมบอร์ด จะใช้ยิปซัมบอร์ดขนาดกว้าง ยาวและหนา เท่ากับ 8x8x0.354 นิ้ว พบว่า ผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับฉนวนโพลีสไตรีนโฟม และคอนกรีตมวลเบา ค่าความชันมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัด ดังแสดงใน Figure 6 และค่าการนำความร้อนของยิปซัมบอร์ดที่อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดที่ระดับต่างๆ ดังแสดงใน Table 3

จากการเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีเปอร์เซ็นต์สูงเนื่องจากเครื่องมือวัดค่าการนำ

Table 2. Comparison of the thermal conductivity of autoclaved aerated concrete as measured by the difference techniques

Rate of power supplied (W)	Thermal conductivity (k) W/m°C			
	ASTM C 177 ⁽¹⁾	Reference ⁽²⁾	Thin film ⁽³⁾	Error(%) ⁽⁴⁾
0.768	0.13	0.089-0.132	0.147	13.076%
0.972	0.13	0.089-0.132	0.136	4.615%
1.2	0.13	0.089-0.132	0.131	0.769%
Average	0.13	0.089-0.132	0.138	6.153%

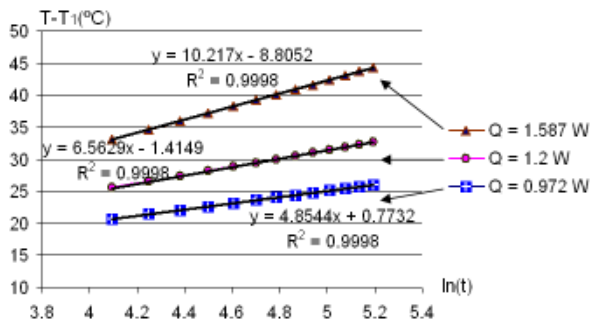


Figure 6. Variation of temperature difference in gypsum board, for three rates of power supplied

ความร้อนแบบ guard hot plate ต้องใช้ขนาดของวัสดุตามที่เครื่องมือกำหนดเท่านั้นคือ ขนาดกว้าง ยาวและหนา เท่ากับ 8×8×1 นิ้ว ซึ่งแผ่นยิปซัมบอร์ดที่มีขายและใช้งานกันในตลาดมีขนาดความหนาเพียง 9 มม. ทำให้ในการวัดค่าการนำความร้อนของแผ่นยิปซัมบอร์ดต้องนำแผ่นยิปซัมมาซ้อนกันเพื่อให้ได้ตามขนาดความหนาที่ต้องการ ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนที่วัดได้จากเครื่องวัดแบบ guard hot plate มีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ด้วยหัววัดแบบฟิล์มบางและจากค่าที่มีอยู่ในเอกสารเผยแพร่แนวทางการ

เลือกใช้วัสดุก่อสร้าง โดยค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของยิปซัมบอร์ด (เปรียบเทียบกับแบบ guard hot plate) อยู่ที่ 23.423% ที่ระดับอัตราการจ่ายไฟฟ้าให้หัววัด 1.587 วัตต์

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

หัววัดค่าการนำความร้อนที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาทดสอบวัดค่าการนำความร้อนกับวัสดุประเภทต่างๆ ทั้ง 3 ชนิดคือ ฉนวนโพลีสไตรีนโฟม คอนกรีตมวลเบา และยิปซัมบอร์ด ค่าที่ได้จะแปรผันตามอัตราการให้ความร้อนแก่หัววัด กล่าวคือค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าจากมาตรฐานจะมีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัด ทั้งนี้สาเหตุของค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อให้ระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดที่ต่ำเกินไป น่าจะมาจากผลของค่าความต้านทานความร้อนของแผ่นฟิล์มพอลิอิมายด์และสมบัติทางไฟฟ้าของสายทองแดงที่ใช้ทำหัววัด ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในวัสดุทดสอบเบี่ยงเบนไปจากทฤษฎี

จากการเปรียบเทียบผลดังแสดงใน Table 4 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (เปรียบเทียบกับแบบ guard hot plate) ที่ได้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ยกเว้นกรณีของ

Table 3. Comparison of the thermal conductivity of gypsum board as measured by the difference techniques

Rate of power supplied (W)	Thermal conductivity (k) W/m°C			
	ASTM C 177 ⁽¹⁾	Reference ⁽²⁾	Thin film ⁽³⁾	Error(%) ⁽⁴⁾
0.972	0.111	0.14-0.19	0.176	58.558%
1.2	0.111	0.14-0.19	0.161	45.045%
1.587	0.111	0.14-0.19	0.137	23.423%
Average	0.111	0.14-0.19	0.158	42.342%

Table 4. Summary of the thermal conductivity of three types of materials

Construction materials	Thermal conductivity (k) W/m°C			
	ASTM C 177 ⁽¹⁾	Reference ⁽²⁾	Thin film ⁽³⁾	Error(%) ⁽⁴⁾
Autoclaved aerated concrete	0.13	0.089-0.132	0.138	6.153%
Gypsum board	0.111	0.14-0.19	0.158	42.342%
Polystyrene foam	0.0323	0.035-0.038	0.0337	4.334%

แผ่นชิปซัมบอร์ดที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดของขนาดชิ้นงานที่ใช้เครื่องมือวัดตามมาตรฐานคงที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเทียบกับเอกสารเผยแพร่แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับ 5.333% ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก จึงอาจกล่าวได้ว่าหัววัดที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วัดค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างได้อย่างถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ข้อเสนอแนะ

ในการใช้หัววัดแบบฟิล์มบางวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุ ควรหาระดับอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดต่อความยาวของหัววัดที่เหมาะสม เพราะการให้พลังงานแก่หัววัดสูงเกินไปจะส่งผลให้อุณหภูมิของหัววัดสูงขึ้น ซึ่งหากสูงเกินไปจะทำให้หัววัดเกิดความเสียหายและค่าที่วัดได้อาจเกิดความคลาดเคลื่อน จากผลการทดสอบหัววัดพบว่า ลายทองแดงอาจขาดและไหม้ได้เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นจึงควรกำหนดค่าของอุณหภูมิที่ใช้วัดในแต่ละวัสดุว่าไม่ควรสูงเกินกว่า 70°C

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) Energy policy and planning office (EPPO) และทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

รายการสัญลักษณ์

- C_e = Euler's Constant (0.57721)
 I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, Ampere)
 k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (วัตต์/เมตรองศาเซลเซียส, W/m°C)
 Q = อัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหัววัดต่อความยาวของหัววัด (วัตต์/เมตร)
 R'' = ค่าความต้านทานต่อความยาวของหัววัด (โอห์ม/เมตร, Ω/m)

- T = อุณหภูมิที่จุดใด ๆ ที่ห่างจากแหล่งให้ความร้อน (°C)
 T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นในการให้ความร้อน (°C)
 T_2 = อุณหภูมิสุดท้ายในการให้ความร้อน (°C)
 t = เวลา (วินาที)
 t_1 = เวลาเริ่มต้นในการวัดอุณหภูมิ (วินาที)
 t_2 = เวลาสุดท้ายในการวัดอุณหภูมิ (วินาที)
 α_s = ค่าการแพร่กระจายความร้อนของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (ตร.เมตร/วินาที)

$$\beta = \text{ตัวแปรไร้มิติ} \text{ ซึ่งมีค่าเท่ากับ } \frac{r}{2\sqrt{\alpha_s t}}$$

เอกสารอ้างอิง

- สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ.). 2547. แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างและฉนวนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. เอกสารเผยแพร่แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, หน้า 16-53
- อัจฉรา นิตส์นุกุล. 2541. การพัฒนาหัววัดค่าการนำความร้อนของอาหารโดย Line Heat Source (Probe) Method ที่สภาวะจุดเยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 50-55
- ASTM C 177. 2004. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus, Vol. 04, No. 06, Annual Book of ASTM Standards, pp. 21-42.
- ASTM C 518. 2004. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, Vol. 04, No. 06, Annual Book of ASTM Standards, pp. 158-172.
- ASTM D 5334. 2004. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, Vol. 04, No 09, Annual Book of ASTM Standards, pp. 225-229.

Blackwell, J.H. 1954. A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk, *J Appli Phys*, 25(2) : 137-144.

Caslaw H.S. and J.C. Jaeger, 1964, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed, Oxford Press, 58-60, pp. 344-345.

Murakami, E.G., Sweat, V.E., Sastry, S.K. and Kolbe, E. 1996. Analysis of Various Design and Operating Parameters of the Thermal Conductivity Probe. *J Food Eng.*, 30(2): 209-225.