

การศึกษาการวัดสมบัติทางความร้อนของวัสดุอาคาร

อภิญญา หล้าเตจา¹

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

จงจิตร หิรัญลาภ² ศิริชัย เทพา³ Joseph Khedari²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Jean Khedari⁴

La Festinière, 23 Maisons Vieilles, 38770 La Mote d' Aveillans, France

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการวัดค่าสมบัติทางความร้อนของวัสดุอาคาร โดยมีจุดประสงค์หลัก เพื่อศึกษาถึงวิธีการวัดค่าการแผ่กระจายความร้อนตามวิธี Periodic Stationary Method

จากการทดสอบเพื่อหาค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัสดุอาคารตัวอย่าง ตามวิธี Periodic Stationary Method พบว่าคอนกรีตที่มีความหนา 1.5 เซนติเมตร เมื่อคำนวณโดยใช้ข้อมูลตัวเลขที่ได้จากเครื่องบันทึกอุณหภูมิโดยตรง ได้ค่าการแผ่กระจายความร้อนที่เกิดจากอัตราส่วนของแอมพลิจูดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1.5695 \pm 0.1834 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ และค่าการแผ่กระจายความร้อนที่ได้จากเฟสที่เปลี่ยนไปเท่ากับ $4.3953 \pm 0.1119 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$ ในทำนองเดียวกันที่ความหนา 2 เซนติเมตร จะได้ $1.0687 \pm 0.1667 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ และ $5.0304 \pm 1.0120 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$ และคำนวณโดยใช้ผลจากกราฟที่ความหนา 1.5 เซนติเมตรจะได้ค่าการแผ่กระจายความร้อน $1.3953 \pm 0.0381 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ และ $5.2931 \pm 0.3569 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$ และที่ความหนา 2 เซนติเมตรจะได้ค่าการแผ่กระจายความร้อน $1.1860 \pm 0.0667 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ และ $6.0586 \pm 1.2999 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$ ซึ่งจากผลของการทดสอบที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง พบว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยมากโดยเฉพาะค่าที่คำนวณจากเฟสที่เปลี่ยนไป

¹ นักวิชาการ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ

⁴ Director, Sunsyrr.

Measurement of Thermal Properties of Building Materials

Apinya Lateja¹

Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Jatujak, Bangkok 10900

Jongjit Hirunlabh², **Sirichai Thepa**³, **Joseph Khedari**²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Jean Khedari⁴

La Festinière, 23 Maisons Vieilles, 38770 La Mote d' Aveillans, France

Abstract

This study is concerned with the measurement of the thermal properties of building materials, namely, the thermal diffusivity by the Periodic Stationary Method.

Two tests for measuring the thermal diffusivity of the concrete materials by the Periodic Stationary Method were made by considering two thicknesses : 1.5 and 2.0 cm. In each case, the thermal diffusivity was estimated based on amplitude ratio and phase change. Determination was made graphically by using the recorded thermograms and, theoretically, based on the resulting sine waves. It was found that for 1.5 cm thickness the thermal diffusivity derived from the amplitude ratio was $1.5695 \pm 0.1834 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$ and that obtained from the phase change was $4.3953 \pm 0.1119 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$. For the sample of 2.0 cm thickness, the corresponding thermal diffusivities were $1.0687 \pm 0.1667 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$ and $5.0304 \pm 1.0120 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$ respectively. Based on the thermal sine waves obtained by graph plotting reveals that the 1.5 cm thickness material has thermal diffusivity measured by the amplitude ratio and the phase change of $1.3953 \pm 0.0381 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$ and $5.2931 \pm 0.3569 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$ respectively. Two centimeter thick materials has thermal diffusivity of $1.1860 \pm 0.0667 \times 10^{-6} m^2.s^{-1}$ and $6.0586 \pm 1.2999 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$. After comparing with the reference value, the difference is minimal, especially when thermal diffusivity was estimated based on phase change.

¹ Researcher, Industrial Metrology and Testing Service Center.

² Associate Professor, Division of Energy Technology School of Energy and Materials.

³ Assistant Professor, Division of Energy Technology School of Energy and Materials.

⁴ Director, Sunsy.

1. ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

นับแต่ปี 1973 ที่ทั่วโลกต้องประสบกับปัญหาคาบน้ำมันสูงขึ้นเป็นต้นมา เรื่องของการอนุรักษ์พลังงานก็ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในทุกๆ พื้นที่ที่มีการใช้พลังงาน [1] สำหรับประเทศไทยก็เช่นเดียวกัน หลายฝ่ายหันมาให้ความสำคัญต่อเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอนุรักษ์พลังงานภายในอาคาร ดังจะเห็นได้จากอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างของไทยมีการพัฒนามากขึ้นมีองค์กรต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนหันมาพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพและโครงสร้างของวัสดุ เพื่อให้มีสมบัติเหมาะสมต่อสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ซึ่งมีทั้งที่กำลังอยู่ในระหว่างการดำเนินการวิจัยและผลิตรอกวางจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ปัจจุบันนี้ได้มีวิธีการแก้ปัญหาที่มากขึ้นโดยใช้เทคนิคทางการก่อสร้างเข้าช่วย แต่ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จมากนัก เนื่องจากในการนำวัสดุอาคารเหล่านี้มาใช้งานออกแบบและวิเคราะห์หาค่าพลังงานนั้น ยังต้องนำเอาค่าสมบัติทางความร้อนของต่างประเทศมาใช้อ้างอิง โดยที่วัสดุดิบ มาตรฐานการผลิต และการนำมาใช้งานนั้นมีความแตกต่างจากต่างประเทศอย่างสิ้นเชิง จึงทำให้การออกแบบอาคารและวิเคราะห์ค่าพลังงานนี้อาจไม่เหมาะสม ทั้งนี้อาจเนื่องจากประเทศไทยมีเครื่องมือวัดและวิธีการหาค่าสมบัติทางความร้อนอยู่ในวงแคบและเครื่องมือที่มีอยู่ก็มีข้อจำกัดในการใช้ รวมทั้งมีราคาสูง จึงไม่สะดวกในการหาค่าสมบัติทางความร้อนที่แท้จริงของวัสดุอาคารที่ผลิตขึ้นภายในประเทศ จากเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงพยายามแก้ปัญหา โดยทำการศึกษาวิธีการวัดและหาค่าสมบัติทางความร้อนของวัสดุอาคาร เพื่อเป็นการช่วยลดปัญหาการสิ้นเปลืองพลังงานภายในอาคารโดยตรงอีกทางหนึ่ง

วิธีการวัดค่าสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในการศึกษาครั้งนี้ได้ยึดแนวทางตามวิธี Periodic Stationary Method ซึ่งวิธีการนี้มีการนำเสนอครั้งแรก เพราะเป็นวิธีการที่มีลักษณะสำคัญหลายประการด้วยกัน คือ ใช้เวลาในการทดสอบสั้น สามารถตรวจสอบความถูกต้องภายในได้ (Cross Check) สามารถทำการทดสอบใหม่ได้ (Reproducibility) สามารถทดสอบกับวัสดุที่มีขนาดเล็กได้ และสามารถหาพารามิเตอร์ทางความร้อนหลายๆ ตัวพร้อมกันจากการทดสอบเพียงครั้งเดียว [2] โดยหลักการของวิธีนี้สามารถหาค่าสมบัติทางความร้อนของวัสดุได้สองวิธีคือ จากเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปและจากอัตราส่วนของแอมพลิจูดของคลื่นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบรูปไซน์ จากสองวิธีนี้เมื่อค่าสมบัติทางความร้อนที่ได้มีค่าเท่ากัน ก็แสดงว่าการทดสอบนี้มีความถูกต้อง [3] ซึ่งจากหลักการดังกล่าวได้มีผู้พัฒนาวิธีการวัดค่าสมบัติทางความร้อนที่สามารถวัดค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนและค่าการแผ่กระจายความร้อนพร้อมกันของวัสดุที่เป็นของแข็งและของไหลที่อุณหภูมิสูงจากการทดลองเพียงการทดลองเดียว [2] และมีผู้พัฒนาโดยสร้างเครื่องมือวัดค่าการแผ่กระจายความร้อนที่อุณหภูมิสูง [4], [5] เครื่องมือวัดค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัสดุอาคารที่อุณหภูมิแวดล้อมขึ้น [3] จากหลักการและแนวทางดังกล่าว งานวิจัยนี้

จึงนำมาศึกษาและทำการพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Chamber) เพื่อวิเคราะห์หาค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัสดุอาคารตัวอย่าง ณ อุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งผลจากการศึกษาและการวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย และนักศึกษาหรือผู้ที่สนใจ สำหรับเป็นข้อมูลค้นคว้าออกแบบและพัฒนาต่อไป

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยและทำการประยุกต์วิธีการวัดต่างๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ตามสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีด้วยกันหลายแนวทาง

ช. โชติวงศ์ เพ็ชฌัญไพศิษฐ์ ฐนะศักดิ์ โตจำเจริญ และ วรพจน์ สุภรัตน์เมธา [6] ได้ศึกษาสมบัติการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างและวัสดุอื่นๆ ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยวิธีการวัดแบบ Guard Hot Box สำหรับเครื่องทดสอบที่ใช้ในการวิจัยที่สร้างขึ้นนั้น ได้ประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C-236 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ Hot Box และ Cold Box โดย Hot Box ประกอบด้วย Metering Box ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นทดสอบ และ Guard Box ทำหน้าที่ควบคุมมิให้ความร้อนผ่านผนัง Metering Box ส่วน Cold Box นั้นมีหน่วยความเย็น ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนออกจากชั้นทดสอบ และได้มีการควบคุมอุณหภูมิภายใน Guard Box ให้เท่ากับอุณหภูมิภายใน Metering Box เพื่อให้ความร้อนไหลผ่านชั้นทดสอบในทิศทางเดียวคือทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ในการทดลองจะวัดปริมาณความร้อนที่ Metering Box ไว้เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนภายใน Metering Box, Guard Box และ Cold Box เป็นการพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นตัวกลาง จากค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างผิวทั้งสองของชั้นทดสอบ ความหนาของชั้นทดสอบ และค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท สามารถนำมาหาค่าการนำความร้อนของชั้นทดสอบ โดยพบว่าค่าการนำความร้อนของ Polystyrene Foam ซึ่งมีความหนาแน่น 16.02 kg.m^{-3} ที่อุณหภูมิเฉลี่ย $44.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ค่าการนำความร้อน $0.0425 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากที่บริษัทผู้ผลิตระบุไว้ประมาณร้อยละ 9.25

Ambrosonce, G., Beccali, G., Catalanotti, S., Cuomo, V., Silvestrini, G., Silvestrini, V., and Trapani, S. [7] ได้พัฒนาวิธีการสำหรับการคำนวณองค์ประกอบของการลดแอมพลิจูด (Amplitude Decrement Factor) และลักษณะของเวลาหน่วง (Time Lag) ของชั้นส่วนวัสดุอาคารที่มีองค์ประกอบเนื้อเดียวแต่ solution ยังมีข้อจำกัดให้เป็นกรณีของอุณหภูมิอากาศภายในที่คงที่เหมือนกับเงื่อนไขขอบเขต และมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์มาก สำหรับการประยุกต์ทั่วไปของทฤษฎี Periodic Heat Flow ส่วนใหญ่เป็น solution ที่ใช้กับเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ไป คือจะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละด้านของวัสดุ

Kamsah, B.K. and Kannan, K. S. [8] ได้ศึกษาการวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุอาคารโดยวิธี Guard Hot Plate เครื่องมือที่ใช้ได้ยึดตามแนวของ The American Society for Testing and Material (ASTM) Designation C-177 (1976) โดยทำการทดสอบคอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา (Lightweight

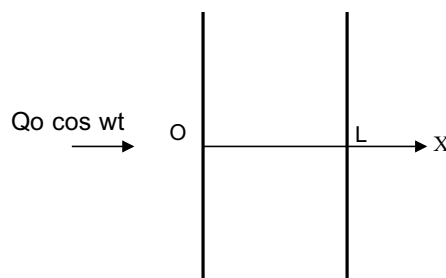
Concrete) ซึ่งมีความหนาแน่น 800 kg.m^{-3} ผลที่ได้จากการทดสอบนี้มีค่าความไม่แน่นอนประมาณร้อยละ 2.8 และพบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดมีอยู่ 2 ประการ คือ ความไม่สมดุลของอุณหภูมิของ plate ทั้งสอง และเกิดการสูญเสียความร้อนที่ปลายของชิ้นทดสอบ โดยไม่ทราบปริมาณที่ผิดพลาดนั้นได้

Van Geem, M.G. [9] ได้ประยุกต์วิธีการจากมาตรฐาน ASTM C-976 เพื่อใช้ทดสอบสมบัติทางความร้อนของผนังภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแบบ Dynamics (Periodically Varying) และในปี 1979 ได้ประยุกต์ไซเคิลของอุณหภูมิ เพื่อใช้ในการทดสอบผนังถึง 25 ชนิด

Rouaualt, R., Khedari, J., Arzoutumanam, C., and Rogez, J. [4] ได้นำเอา Adiabatic Calorimeter รูปทรงกระบอกมาดัดแปลงเพื่อวัดค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัตถุที่อุณหภูมิสูงด้วยวิธี The Periodic Stationary Method โดยวัตถุที่ใช้ในการทดลองมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.6 มิลลิเมตร สูง 70 มิลลิเมตร โดยมีความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นรูปไซน์ไหลผ่านในแนวรัศมี วัตถุตัวอย่างจะถูกติดตั้งภายในเครื่องกำบังความร้อน ซึ่งประกอบด้วยท่อโมลิบดีนัม (Molybdenum shell) และเตาขนาดเล็ก (Micro Furnace) ซึ่งถูกควบคุมอุณหภูมิโดยแรงขับจาก output ของเทอร์โมคัปเปิล การวัดค่าการแผ่กระจายความร้อนของชิ้นทดสอบนี้พิจารณาจากเฟสที่เปลี่ยนไปของอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิที่แกนกลางของวัตถุตัวอย่าง ในการทดสอบนี้สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1800 K

3. ทฤษฎี

การวัดค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ [2] ในการคำนวณชิ้นทดสอบตัวอย่างถูกกำหนดให้มีรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความยาวเป็น infinity และมีความหนาเป็น L คลื่นความร้อนจะผ่านผิวของชิ้นทดสอบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปทรงสี่เหลี่ยมจตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวเป็นอินฟินิตี้

จากสมการการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ $T(x, t)$ คืออุณหภูมิที่ระยะ x เมื่อเวลา t

a คือค่าการแผ่กระจายความร้อนของชั้นทดสอบ, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

จากเงื่อนไขขอบเขตสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{ที่ระยะ } x = 0 : T_1 = T_i = \theta_1 \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$\text{ที่ระยะ } x = L : T_2 = T_i = \theta_2 \cos(\omega t - \phi) \quad (3)$$

เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุม T_1 และ $T(x, 0)$ คืออุณหภูมิเริ่มต้น

สิ่งสำคัญคือการหาอัตราส่วนของแอมพลิจูด (amplitude ratio) (θ)

เมื่อ $\theta = \theta_2 / \theta_1$

และเฟสที่เปลี่ยนไป (phase change) , ϕ

การแก้ปัญหาที่สภาวะสม่ำเสมอ (steady state) เป็น periodic complex function ของระยะทางและเวลาได้ดังนี้

$$T(x, t) = \theta(x) \exp(i\omega t) \quad (4)$$

ดังนั้นจาก (1) สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \alpha^2 \theta = 0 \quad (5)$$

เมื่อ $\alpha = (1+i)\sqrt{\omega/2a}$ และ k คือพารามิเตอร์เฉพาะตัว $= L\sqrt{2a/\omega}$

ซึ่งรูปทั่วไปของสมการที่ (5) คือ

$$\theta_{(x)} = A \exp(\alpha x) + B \exp(-\alpha x) \quad (6)$$

ซึ่งค่าคงที่ A และ B พิจารณาได้จากเงื่อนไขขอบเขต

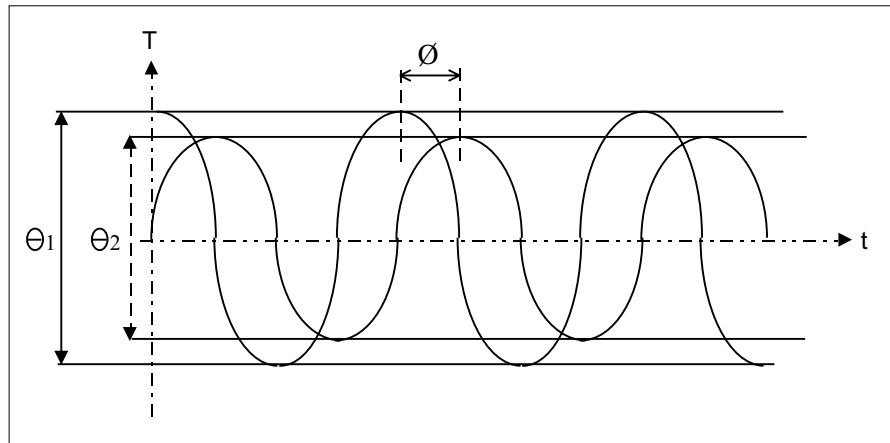
$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } x \Rightarrow \infty, B &= \theta_0, A = 0 \\ x = 0, B &= 0 \end{aligned}$$

และทำยสุดสมการของอุณหภูมิสามารถเขียนได้เป็น

$$T = C \cos \omega t + D \sin \omega t \quad (7)$$

ซึ่ง C และ D เป็น exponential terms

การวัดเฟสที่เปลี่ยนไป (ϕ) และอัตราส่วนของแอมพลิจูด ($\theta = \theta_2 / \theta_1$) ระหว่างอุณหภูมิผิวด้านนอก T_1 และอุณหภูมิผิวด้านใน T_2 ช่วงของคลื่นความร้อนจะให้ค่าการแผ่กระจายความร้อน (a) เฟสที่เปลี่ยนไปพิจารณาได้จากระยะปลายกราฟ ของ $T(0, t)$ และที่ปลายกราฟ ของ $T(L, t)$ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การพิจารณาเฟสที่เปลี่ยนไปและอัตราส่วนของแอมพลิจูด

เฟสที่เปลี่ยนไปหาได้จาก

$$\phi = \arctan\left(\frac{D}{C}\right) = \arctan(\tan(k)) \quad (8)$$

อัตราส่วนของแอมพลิจูดหาได้จากการวัดแอมพลิจูด θ_1 ที่ $T(0,t)$ และแอมพลิจูด θ_2 ที่ $T(L,t)$ ซึ่งเหมือนกับสมการที่ (7) ที่ให้อัตราส่วนของแอมพลิจูดดังนี้คือ

$$\theta = \sqrt{C^2 + D^2} = \sqrt{\exp(-2 * k)} \quad (9)$$

ดังนั้นค่าการแผ่กระจายความร้อนสองค่าจะอธิบายได้จาก

a_ϕ จากเฟสที่เปลี่ยนไป และ
 a_θ จากอัตราส่วนของแอมพลิจูด

โดยพิจารณาได้จาก

$$a = (\omega / 2) \left(\frac{L}{k} \right)^2 \quad (10)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi / P$

เมื่อ P คือ คาบของคลื่นรูปไซน์

L คือ ความหนา, m

$$k_\theta = \ln\left[\frac{\theta^2}{-2}\right]$$

$$k_\theta = \phi$$

4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

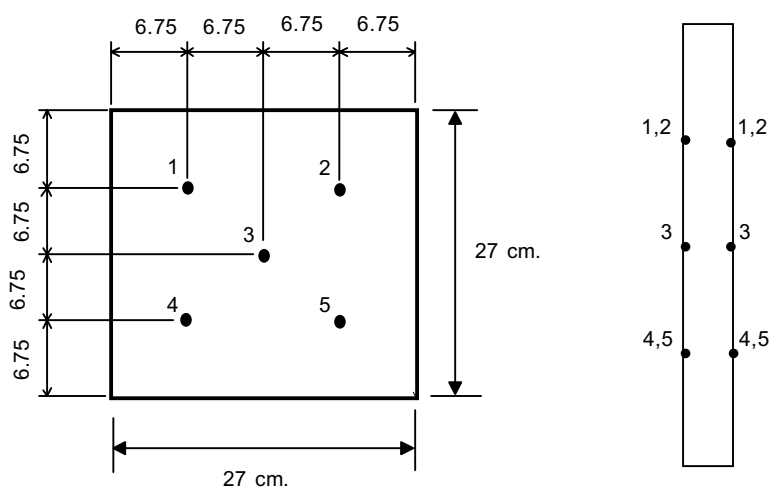
ชั้นทดสอบทำจากปูนสำเร็จรูป TPI ซึ่งมีสมบัติสำหรับฉาบ โดยทำการผสมปูนกับน้ำ ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ หลังจากนั้นนำมาเทลงในแบบที่เตรียมไว้ ซึ่งมีขนาดกว้างและยาวด้านละ 27 เซนติเมตร มีความหนา 1.5 เซนติเมตร และ 2.0 เซนติเมตร ทิ้งไว้ในที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก เป็นเวลา 2 สัปดาห์

นำชั้นทดสอบมาวัดหาค่าการนำความร้อนตามวิธี Hot Wire Method โดยใช้เครื่อง Quick Thermal Conductivity รุ่น QTM-500 ที่ได้รับการปรับเทียบเรียบร้อยแล้ว

หลังจากนั้นนำมาหาค่าความหนาแน่นของชั้นทดสอบตามวิธี Specific Gravity

ส่วนค่าความร้อนจำเพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำค่าจากเอกสารอ้างอิงมาใช้ประกอบ

ในขั้นตอนสุดท้ายนำวัสดุอาคารตัวอย่างมาทดสอบและคำนวณค่าการแผ่กระจายความร้อนตามวิธี Periodic Stationary Method โดยนำชั้นทดสอบมาติดสายเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิผิวทั้งสองด้าน ด้านละ 5 จุด โดยแต่ละจุดจะห่างกัน 6.75 เซนติเมตร ซึ่งอาศัยระยะห่างเท่าๆ กัน และมีตำแหน่งตรงกันทั้งสองด้าน เพื่อดูพฤติกรรมของการแผ่กระจายความร้อนผ่านวัสดุ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดสายเทอร์โมคัปเปิลบนผิวชั้นทดสอบ

หลังจากนั้นนำชั้นทดสอบที่ได้ไปวางไว้บนกล่องควบคุมอุณหภูมิ (micro furnace) โดยให้ห่างจากขอบของกล่องด้านละ 1.5 เซนติเมตร แล้วนำฉนวนมาวางกันระหว่างขอบของ ชั้นทดสอบทั้งสี่ และขอบของกล่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนไหลผ่านชั้นทดสอบทางด้านข้าง สอดปลายอีกด้านหนึ่งของสายเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 5 เส้น ที่ติดผิวของชั้นทดสอบด้านล่างออกมาตามช่องเปิดด้านข้างที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นนำฉนวนใยแก้วมาอุดที่ช่องเปิดนี้

หลังจากนั้นนำกล่องควบคุมอุณหภูมิพร้อมกับชั้นทดสอบที่เตรียมไว้ไปวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิอีกชั้นหนึ่ง โดยวางไว้ ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของตู้พร้อมกันนี้ให้สอดปลายสายเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดออกมาภายนอกตามช่องเปิดทางด้านขวาของตู้ และต่อเข้ากับช่องรับสัญญาณของเครื่องบันทึกอุณหภูมิ และนำฉนวนใยแก้วมาอุดที่ช่องเปิดนี้พร้อมกับปิดทับด้วยฟอยล์กาวอีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันการถูกรบกวนของอากาศภายนอก ปิดตู้เริ่มทำการทดสอบ ซึ่งเริ่มโดยกำหนดให้ตู้ควบคุมอุณหภูมิมีกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบคลื่นรูปไซน์ตลอดเวลา คือกำหนดให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มสูงขึ้นเป็น 70 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 20 นาที และเปลี่ยนกลับลดลงมาอยู่ที่ 40 องศาเซลเซียส เหมือนเดิมภายในเวลา 20 นาที เช่นเดียวกัน โดยให้ตู้ควบคุมอุณหภูมิทำงานในลักษณะนี้เป็นเวลาทั้งสิ้น 4 ชั่วโมงหรือมากกว่า พร้อมกันนี้ที่กล่องควบคุมอุณหภูมิจำลองทำการควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องให้มีค่าคงที่อยู่ที่ระดับ 40 องศาเซลเซียส ตลอดเวลาของการทดสอบ และทำการบันทึกอุณหภูมิผิวของชั้นทดสอบทั้งสองด้านพร้อมกับอุณหภูมิของอากาศภายในตู้ และควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในกล่องควบคุมอุณหภูมิตลอดเวลา 2 นาที จนเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 4 การวัดการแผ่กระจายความร้อนโดยวิธี Periodic Stationary Method

ทำการทดลองเช่นเดียวกันทั้งสองขนาดของชั้นทดสอบ ซึ่งแต่ละชั้นทำการทดสอบ 4 ครั้ง และคำนวณหาค่าการแผ่กระจายความร้อนทั้งจากเฟสที่เปลี่ยนไปและจากอัตราส่วนของ แอมพลิจูดตามหลักการของวิธี Periodic Stationary Method แล้วหาค่าเฉลี่ยของค่าการแผ่กระจายความร้อนจากทั้งสองวิธี

5. ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการทดสอบวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุตัวอย่าง ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $0.66394 W.m^{-1}.K^{-1}$ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ $2033.06 Kg.m^{-3}$ สำหรับค่าความจุความร้อนจำเพาะได้เลือกนำค่าของวัสดุประเภทเดียวกันและมีสมบัติใกล้เคียงจาก ASHRAE HANDBOOK [10] เป็นข้อมูลอ้างอิง โดยมีสองค่าคือ

1. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Clinker Cement)

$$C_p = 670 J.kg^{-1}.K^{-1}$$

2. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของคอนกรีต (Stone Concrete)

$$C_p = 653 J.kg^{-1}.K^{-1}$$

เมื่อนำมาคำนวณหาการแผ่กระจายความร้อนที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยนี้ มีค่าประมาณ $4.874 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$ และ $5.0011 \times 10^{-7} m^2.s^{-1}$

จากการทดสอบเพื่อหาค่าการแผ่กระจายความร้อนของวัสดุอาคารตัวอย่างตามวิธี Periodic Stationary Method โดยแยกการคำนวณออกเป็น 2 วิธีตามประเภทของข้อมูลคือ จากตัวเลขของข้อมูลและจากขนาดของกราฟ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการแผ่กระจายความร้อนอ้างอิงและค่าการแผ่กระจายความร้อนโดยวิธี Periodic Stationary Method

ความหนา (cm.)	ค่าการแผ่กระจาย- ความร้อนอ้างอิง ($m^2.s^{-1}$) $a \times 10^{-7}$	ค่าการแผ่กระจายความร้อนที่วัดโดยวิธี Periodic Stationary method			
		ขนาดของกราฟ ($m^2.s^{-1}$)		ข้อมูลตัวเลข ($m^2.s^{-1}$)	
		$a_\theta \times 10^{-6}$	$a_\phi \times 10^{-7}$	$a_\theta \times 10^{-6}$	$a_\phi \times 10^{-7}$
1.5	1. 4.8742	1.3953	5.2931	1.5695	4.3953
	2. 5.0011	± 0.0381	± 0.3569	± 0.1834	± 0.1119
2.0	1. 4.8742	1.1860	6.0586	1.0687	5.0304
	2. 5.0011	± 0.0667	± 1.2999	± 0.1667	± 1.0120

จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าการแผ่กระจายความร้อนที่ได้มีความแตกต่างจากค่าอ้างอิงไม่มาก ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่ามีความถูกต้องสูง

6. สรุป

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถใช้กับหลักการของวิธี Periodic Stationary Method ได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จากผลของการทดสอบ ทั้งที่คำนวณจากข้อมูลที่เป็นตัวเลขและจากขนาดของกราฟของชั้นทดสอบทั้งสองขนาดความหนา จะให้ค่าการแผ่กระจายความร้อนใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมาก แม้ว่าค่าที่ได้จากอัตราส่วนของแอมพลิจูด จะมีความแตกต่างจากค่าอ้างอิงมากกว่าค่าที่ได้จากเฟสที่เปลี่ยนไปก็ตาม

7. ข้อเสนอแนะ

ตามหลักการของวิธี Periodic Stationary Method ผลที่ได้จากการทดสอบที่ได้จากการคำนวณเฟสที่เปลี่ยนไปและจากอัตราส่วนของแอมพลิจูดจะต้องมีค่าเท่ากัน แต่จากผลการทดสอบของงานวิจัยนี้พบว่าค่าที่ได้จากอัตราส่วนของแอมพลิจูดยังมีความผิดพลาดอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากช่วงเวลาที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 2 นาทีต่อครั้ง จึงทำให้ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของอุณหภูมิที่ได้มีความผิดพลาดอยู่ภายในเวลา ± 2 นาที ดังนั้นหากมีการปรับปรุงให้ใช้เวลาในการบันทึกที่ละเอียดกว่านี้ ก็จะช่วยให้อุณหภูมิที่มีความถูกต้องมากขึ้น และผลของการคำนวณก็จะใกล้เคียงกันหรือเท่ากันตามหลักการของวิธีนี้

8. รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่, m^2
a	ค่าการแผ่กระจายความร้อน, ms^{-1}
B	ค่าคงที่
C	exponential term
D	exponential term
k	พารามิเตอร์เฉพาะตัว (characteristic parameter)
k_0	พารามิเตอร์เฉพาะตัวที่ได้จากอัตราส่วนของแอมพลิจูด (characteristic parameter based on the amplitude ratio)
k_ϕ	พารามิเตอร์เฉพาะตัวที่ได้จากเฟสที่เปลี่ยนไป (characteristic parameter based on the phase change)
L	ความหนา ,ม.
P	คาบ, วินาที
T_1	อุณหภูมิผิวชั้นทดสอบด้านนอก, $^{\circ}C$
T_2	อุณหภูมิผิวชั้นทดสอบด้านใน, $^{\circ}C$

T_i	อุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิที่เริ่มต้น, °C
$T(x, t)$	อุณหภูมิที่ระยะ x เมื่อเวลา t , °C
t	เวลา, วินาที
x	ระยะทาง, ม.
α	พารามิเตอร์เฉพาะตัว (characteristic parameter)
ρ	ค่าความหนาแน่น, kg.m^{-3}
θ	อัตราส่วนแอมพลิจูด
θ_1	แอมพลิจูดของอุณหภูมิผิวด้านนอก, °C
θ_2	แอมพลิจูดของอุณหภูมิผิวด้านใน, °C
ϕ	เฟสที่เปลี่ยนไปของอุณหภูมิ, วินาที
ω	ความเร็วเชิงมุม, rad/s

9. เอกสารอ้างอิง

1. Wijesundera, N.E. and Hawlader, M.N.A., 1988, "Thermal Transmittance Property Evaluation of Insulation Systems," *RERIC International Energy Journal*, Vol. 10, No.1, pp. 45-60
2. Filippov, L.P., 1965, "Methods of Simultaneous Measurement of Heat Conductivity, Heat Capacity and Thermal Diffusivity of Solid and Liquid Metals at High Temperatures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 681-691.
3. Khedari, J., 1993, "A Method for Diffusivity Measurement of Construction Solid Materials by the Periodic Stationary Method," *Internal Report, KMITT*, pp. 1-7.
4. Rouaualt, R., Khedari, J., Arzoutumanuanm, C., and Rogez, J., 1987, "High Temperature High Pressure," *The 10th ETPC Proceedings*, Vol. 19, pp. 357-363.
5. Khedari, J., Benigni, P., Rogez, J. and Mathieu, J.C., 1995, "New Apparatus for Thermal Diffusivity Measurements of Refractory Solid Materials by the Periodic Stationary Method," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 66, No. 1, pp. 193-198.
6. ช. โชติวงศ์ เพ็ชฌุไฟศิษฏ์, ธนะศักดิ์ โตจำเริญ และ วรพจน์ สุภรัตน์เมธา, 2532, เครื่องมือวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขา วิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28-35.

7. Ambrosone, G., Beccali, G., Catalanotti, S., Cuomo, V., Silvestrini, G., Silvestrini, V., and Trapani, S., 1978, *Heat Flow through the Walls*, Permanent School on Solar Energy Processes, Vol. 9, No. 6, pp. 27-43.

8. Kamsah, B.K. and Kannan, K. S., 1988, "Measurement of Thermal Conductivity of Building Materials," *Proceedings of the First National Conference on Thermal Engineering*, 4-6 April, pp. 19-27.

9. Van Geem, M.G., 1987, "Measuring Thermal Performance of Wall Assemblies under Dynamics Temperature Conditions," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol, 15, No. 3, pp. 178-187

10. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1993, *Physical Properties of Materials*, SI edition, Atlanta, ASHRAE, p. 36.3.