

# แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อน และความชื้นในบ้านที่ใช้ผนังคอนกรีตมวลเบา ภายใต้สภาวะอากาศของประเทศไทย\*

โยธิน อึ้งกุล<sup>1,3</sup> พิชัย นามประกาย<sup>1</sup> นริส ประทินทอง<sup>1</sup> และ รังสิต ศรจิตติ<sup>2</sup>

- <sup>1</sup>สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เลขที่ 91 ถ. ประชาอุทิศ บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
- <sup>2</sup>บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาการจัดการเทคโนโลยีในอาคาร มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต เลขที่ 110/1- 4 ถ. ประชาชื่น หลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
- <sup>3</sup>ศูนย์วิจัยพัฒนา บริษัท ซุปเปอร์บล็อก จำกัด (มหาชน) เลขที่ 9/1 หมู่ 11 ถ. สิงห์บุรี-ปากดงบางระจัน อ.ค่ายบางระจัน สิงห์บุรี 16150

Email: yothinu@yahoo.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมรรถนะทางความร้อนของบ้านที่ใช้ผนังคอนกรีตมวลเบาภายใต้สภาวะอากาศของประเทศไทย ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำผลจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของบ้านแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดประมาณ 13 m<sup>3</sup> ผนังของบ้านใช้คอนกรีตมวลเบาแบบบอบอ่อน (AAC) แบบเปลือยไม่ฉาบปูนทั้งภายในและภายนอก ผนังทั้ง 4 ด้านมีขนาดพื้นที่แต่ละด้านเท่ากับ 2.4 ม. X 2.3 ม. และความหนา 0.07 ม. หลังคาทำจากกระเบื้องคอนกรีตสีเทา ทำมุมเอียง 30 องศาจากแนวนอน และติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมฟอยด์สะท้อนความร้อนห้องใต้หลังคา เพดานยิบฉั่มซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนอย่างดี เพื่อป้องกันความร้อนจากใต้หลังคาเข้าสู่ภายในบ้านทดสอบ ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของผนังบ้านที่ใช้การศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิบนผนังภายนอก ตรงกลางและบนผนังภายในของบ้านทั้งสี่ด้าน อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นจำเพาะ ของอากาศภายในบ้านทดลอง

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดลอง พบว่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ทำนายสมรรถนะทางความร้อนของบ้านภายใต้สภาวะอากาศที่แตกต่างกันได้

**คำสำคัญ** : คอนกรีตมวลเบาแบบบอบอ่อน (AAC) แบบจำลองคณิตศาสตร์ ความชื้น อุณหภูมิ

\* รับผิดชอบเมื่อวันที่ 9 มีนาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 16 มิถุนายน 2549

# A mathematical model on heat transfer and humidity in a house with Aerated Concrete Wall under the climate of Thailand<sup>\*</sup>

Yothin Ungkoon<sup>1,3</sup> Pichai Namprakai<sup>1</sup> Naris Pratinthong<sup>1</sup> and Rangsit Sarachitti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Department of Energy Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod Rasburana, 91 Pracha U-thit Rd., Thungkru, Bangkok 10140,

<sup>2</sup>) Graduate Program in Building Technology Management, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachacheun Road Laksi Bangkok 10210.

<sup>3</sup>) Research Development Center, Superblock Public Company Limited, 9/1 Moo 11, Singburi Pak Dong Rord., Bangrachan, Kai Bangrachan, Singburi 16150

Email: yothinu@yahoo.com

## ABSTRACT

This paper aimed to study a mathematical model on the thermal performance of a house with aerated concrete wall under the climate of Thailand. First the mathematical model was developed, and then compared its calculations with the result from the experimental house of 13 m<sup>3</sup> area. House wall was autoclaved aerated concrete (AAC) with unplastered concrete on both internal and external sides. Each wall area was about 2.4m x 2.3 m with thickness of 0.07 m. Roof was made of gray color concrete tiles with inclination angle of 30° to the horizontal. Aluminum foil sheets were constructed to reflect heat in sunroof room. Gypsum ceiling were well insulated to minimize the heat from the sunroof room transferring into the experimental room. The studied parameters in the experimental house consisted of external wall temperature, middle wall temperature, internal wall temperature, air temperature, relative humidity and the specific humidity of air in the experimental room.

According to the comparison between the calculation and the experiment, it was found that the results were in close agreement. So this mathematical model could predict well the thermal performance of a house under difference conditions.

**Keywords :** Autoclaved Aerated Concrete (AAC), Mathematical model, humidity; Temperature

---

\* Original manuscript submitted: March 8, 2006 and Final manuscript received: June 12, 2006

## บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตอากาศร้อนชื้นซึ่งมีสภาพอากาศร้อนสลับฝนตลอดปี (Khedari, 2001) การสร้างบ้านพักอาศัยหรืออาคารโดยส่วนใหญ่ผนังนิยมใช้ไม้ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันนี้ไม้หายากและมีราคาแพงมากจึงหันมาใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูนที่หาซื้อได้ง่าย ผนังก่ออิฐฉาบปูนมีคุณสมบัติในการต้านทานค่าความร้อนผ่านผนังและความชื้นสะสมเข้าสู่ภายในบ้านพักอาศัยน้อยมาก ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในบ้านสูงและส่งผลต่อความรู้สึกสบายของผู้พักอาศัย ต่อมาได้มีการศึกษาทดสอบบ้านสามหลังมีขนาด 13 m<sup>3</sup> และใช้วัสดุผนังแตกต่างกันได้แก่ คอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete : AAC) คอนกรีตมวลเบาแบบไม่อบไอน้ำ (Non-Autoclaved Aerated Concrete : Non-AAC) และก่ออิฐฉาบปูน (Red Clay Brick: RB) โดยโยธิน และคณะ จากการทดสอบบ้านทั้งสามหลังพบว่า บ้านที่สร้างด้วยผนังคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำสามารถลดความร้อนผ่านผนังได้ดีกว่า ผนังคอนกรีตมวลเบาแบบไม่อบไอน้ำและผนังก่ออิฐฉาบปูน ผนังคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำสามารถลดความชื้นสะสมภายในและความร้อนที่เข้าสู่ภายในบ้านได้ดี ต่อมา Porta-Gándara และคณะ ได้ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศภายในบ้าน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และได้มีการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายความชื้นที่ผิวด้านใน อุณหภูมิของหลังคาแบบโดมโดย Bahadori และ Jayamaha และคณะ ได้ทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของบ้าน ภายใต้สภาวะอากาศร้อนชื้นที่เกิดจากฝนภายนอกเพื่อศึกษาพฤติกรรมกรถ่ายเทความร้อนและความชื้นผ่านผนังสู่ภายในอาคาร ต่อมา Thepa และคณะ ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรียน



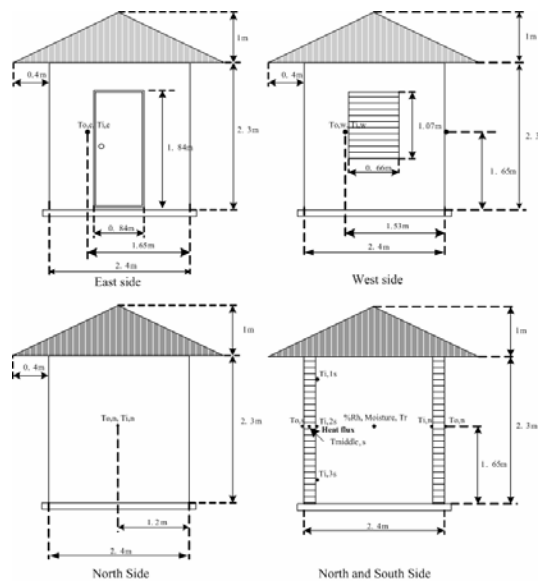
รูปที่ 1. บ้านทดลอง

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำผลจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของบ้านแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีขนาดประมาณ 13 m<sup>3</sup> ผนังของบ้านใช้

คอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ (AAC) ซึ่งจะประกอบด้วยค่าอุณหภูมิบนผนังภายนอก ตรงกลางและบนผนังภายในของบ้านทั้งสี่ด้าน อุณหภูมิอากาศ ความชื้นจำเพาะของอากาศภายในบ้านทดลอง (รูปที่ 1)

## อุปกรณ์การทดลอง

บ้านทดลองสร้างขึ้น ณ. บริเวณพื้นที่ของโรงงานของบริษัทซูเปอร์บล็อค จำกัด (มหาชน) จังหวัด สิงห์บุรี ดังแสดงในรูปที่ 1 บ้านจำลองใช้ผนังคอนกรีตมวลเบาแบบอบไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete: AAC) มีขนาดพื้นที่ผนังเท่ากับ  $2.4 \times 2.3 \text{ m}$  มีความหนา  $0.07 \text{ m}$  แบบผนังเปลือยไม่ฉาบปูนทั้งภายในและภายนอก สำหรับโครงสร้างหลังคาใช้กระเบื้อง CPAC สีเทา ทำมุมเอียง  $30$  องศา และบุด้วยแผ่นฉนวนใยหินเพื่อสะท้อนความร้อน เพดานเป็นแผ่นยิปซัม ความหนา  $0.01 \text{ m}$  และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนอย่างดี เพื่อป้องกันความร้อนจากห้องใต้หลังคาเข้าสู่ภายในห้องทดลอง บ้านทดลองมีประตูไม้้อัดขนาดเท่ากับ  $1.84 \times 0.84 \text{ m}$  หนา  $0.045 \text{ m}$  ติดตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันตกและมีหน้าต่างกระจกใสบานเกล็ดขนาดเท่ากับ  $1.07 \times 0.664 \text{ m}$  หนา  $0.005 \text{ m}$  ติดตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันออก



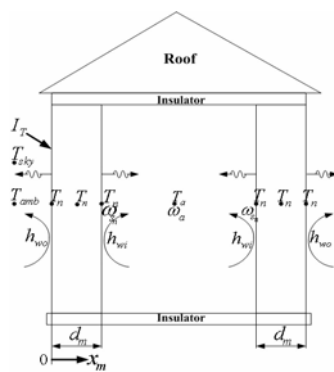
รูปที่ 2. ขนาดของบ้านทดลองและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด

การติดตั้งจุดวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (ค่าความถูกต้อง  $\pm 0.5$  %) วัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ดังนี้ บนผนังทั้งภายในและภายนอกของผนังทั้งสี่ด้าน จำนวน 10 จุด ( $To,s, Ti,1s, Ti,2s, Ti,3s, To,n, Ti,n, To,e, Ti,e, To,w, Ti,w$ ) ตรงกลางเฉพาะผนังด้านทิศใต้ จำนวน 1 จุด ( $T_{middle}$ ) อุณหภูมิอากาศภายในบ้านและสิ่งแวดล้อม จำนวน 2 จุด ( $Ta, Tamb$ ) และค่าความเข้มแสงของรังสีอาทิตย์วัดโดยไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp & Zonen pyranometer (ช่วงการวัด  $1-1400 \text{ W/m}^2$  ค่า

ความถูกต้อง  $\pm 5\%$ ) ค่าอุณหภูมิและความเข้มแสงรังสีอาทิตย์ จะบันทึกในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data recorder) ยี่ห้อ Hioki รุ่น 8422-51 (ค่าความถูกต้อง  $\pm 0.8\%$ ) วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในบ้านและสิ่งแวดล้อม จำนวน 2 จุด ใช้เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ยี่ห้อ Testo รุ่น 175-H1 (ช่วงการวัด 0-100% ค่าความถูกต้อง  $\pm 3\%$ ) การติดตั้งเครื่องมือวัดค่าทดสอบต่างๆ ของบ้านที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 2 ค่าความชื้นของอากาศภายในบ้านและสิ่งแวดล้อมจะใช้วิธีการคำนวณโดย Devres และ Relative Humidity Equations การทดลองจะเริ่มบันทึกข้อมูลตั้งแต่เวลา 00.00 น. จนถึงเวลา 00.00น (24 ชั่วโมง) ของอีกวัน เก็บบันทึกข้อมูลทุกๆ 10 นาที ช่วงเดือนพฤษภาคม 2548 ซึ่งจะมีสภาวะอากาศหนาว

### การวิเคราะห์ความร้อนและความชื้นที่เกิดขึ้นภายในบ้าน

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนผนังทำให้เกิดการสะสมความร้อนที่ผิวภายนอก เกิดการสูญเสียความร้อนของผนังโดยการพาความร้อน การแผ่ความร้อนบางส่วนให้กับสิ่งแวดล้อม ความร้อนที่สะสมที่ผิวภายนอกจะถ่ายเทความร้อนผ่านความหนาของผนัง โดยการนำความร้อนสู่ผิวภายในทำให้เกิดการพาความร้อน การแผ่ความร้อนจากผนังด้านในไปตกกระทบกับวัสดุภายในบ้านเกิดการสะสมความร้อน ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนโดยการพาให้กับอากาศภายในบ้าน การถ่ายเทความร้อนผ่านผิวที่เกิดจากการถ่ายเทความชื้น สามารถอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์และความร้อนแฝง กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความแตกต่างของความดันไอน้ำ ที่ถ่ายเทจากบริเวณที่ความดันไอน้ำสูงไปสู่บริเวณที่ความดันไอน้ำต่ำกว่า ทำให้เกิดการระเหยของความชื้นจากผนังด้านที่ร้อนและผนังด้านที่เย็นสะสมความชื้น ผนังที่มีความชื้นสูงจะเกิดจากการระเหยตัวของไอน้ำที่บริเวณผิวผนังภายใน



รูปที่ 3. รูปแสดงการไหลของความร้อนผ่านผนังเข้าสู่ภายในบ้านพักอาศัย

เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทจากผิวภายนอกสู่ภายในทำให้อุณหภูมิผิวภายในสูงขึ้น ความชื้นที่สะสมบริเวณผิวภายในของผนัง เกิดการระเหยสู่อากาศภายในห้อง ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ

อุณหภูมิอากาศและความชื้นภายในบ้าน การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยตั้งข้อสมมติฐาน (Diffie, 1980 และ ASHRAE Handbook of Fundamentals, 2001) ดังต่อไปนี้

- การถ่ายเทความร้อนเป็นไปในทิศทางเดียว
- พิจารณาเฉพาะค่าความชื้นที่เกิดขึ้นบนผิวของผนังด้านในทั้งสี่ด้าน
- วิเคราะห์อุณหภูมิของท้องฟ้าเสมือนอุณหภูมิแวดล้อม
- คุณสมบัติของวัสดุไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและคุณสมบัติของอากาศขึ้นกับอุณหภูมิ
- สามารถพิจารณาท้องฟ้าเสมือนวัตถุดำ(black-body) สำหรับการแผ่รังสีอาทิตย์
- การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในสภาวะที่ไม่คงที่และไม่มีกำบังแสงบนผนังของบ้านทั้งสี่ด้าน
- ไม่มีฝุ่นและความสกปรกบนผนัง
- ไม่คิดผลของความร้อนจาก หลังกา หน้าต่างและประตู ผนังบ้านที่เข้าสู่ภายในบ้าน คิดเฉพาะความร้อนที่เข้าทางผนังของบ้านทั้งสี่ด้าน

ผนังบ้านด้านทิศใต้ (s-n)

$$\text{At } x_m = 0: \alpha_w \cdot I_T + h_{wo}(T_{amb} - T_1) + \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_1^4) + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{At } 0 < x_m < d_m: \frac{\partial T_m}{\partial t}(x, t) = \partial_m \cdot \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\text{At } x_m = d_m: h_{wi}(T_a - T_3) + \frac{\sigma(T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad (3)$$

ผนังบ้านด้านทิศเหนือ (n-s)

$$\text{At } x_m = 0: h_{wi}(T_a - T_4) + \frac{\sigma(T_3^4 - T_4^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_4}{\partial t} \quad (4)$$

$$\text{At } 0 < x_m < d_m: \frac{\partial T_m}{\partial t}(x, t) = \partial_m \cdot \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$\text{At } x_m = d_m: \alpha_w \cdot I_T + h_{wo}(T_{amb} - T_6) + \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_6^4) + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_6}{\partial t} \quad (6)$$

ผนังบ้านด้านทิศตะวันออก (e-w)

$$\text{At } x_m = 0: \alpha_w \cdot I_T + h_{wo}(T_{amb} - T_7) + \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_7^4) + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_7}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{At } 0 < x_m < d_m: \frac{\partial T_m}{\partial t}(x, t) = \partial_m \cdot \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \quad (8)$$

$$\text{At } x_m = d_m: h_{wi}(T_a - T_9) + \frac{\sigma(T_9^4 - T_{10}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_9}{\partial t} \quad (9)$$

ผนังบ้านด้านทิศตะวันตก (w-e)

$$\text{At } x_m = 0: \quad h_{wi}(T_a - T_{10}) + \frac{\sigma(T_9^4 - T_{10}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_{10}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\text{At } 0 < x_m < d_m: \quad \frac{\partial T_m}{\partial t}(x, t) = \partial_m \cdot \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} \quad (11)$$

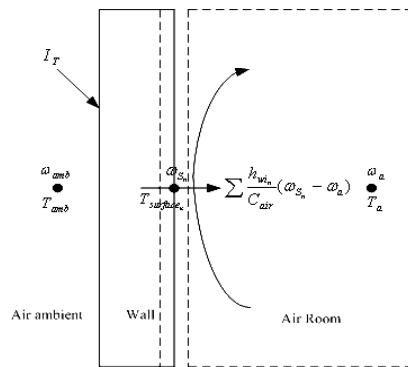
$$\text{At } x_m = d_m: \quad \alpha_w \cdot I_T + h_{wo}(T_{amb} - T_{12}) + \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_{sky}^4 - T_{12}^4) + k_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial x_m} = \rho_m \cdot C_m \cdot \frac{\Delta x_m}{2} \cdot \frac{\partial T_{12}}{\partial t} \quad (12)$$

อุณหภูมิอากาศภายในบ้าน

$$h_{wi}(T_3 - T_a) + h_{wi}(T_4 - T_a) + h_{wi}(T_9 - T_a) + h_{wi}(T_{10} - T_a) + \rho_{amb} \cdot V_{rate} \cdot C_{p_{amb}}(T_{amb} - T_a) = \rho_{air} \cdot C_{air} \cdot V_a \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (13)$$

สมดุลความชื้นของอากาศภายในห้อง

$$\rho_{air} \cdot V_{rate} \cdot (\omega_{amb} - \omega_a) + \sum \frac{h_{wi_n}}{C_{air}} (\omega_{s_n} - \omega_a) = \rho_{air} \cdot V_r \cdot \frac{\partial \omega_a}{\partial t} \quad (14)$$



รูปที่ 4. สมดุลอัตราการระเหยความชื้นที่ผิวผนังด้านในสู่อากาศภายในบ้าน

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยลม  $h_{wo}$  มีค่าดังสมการ (Diffie, 1980)

$$h_{wo} = 2.8 + 3V_{amb} \quad (15)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผนังภายในห้อง  $h_{wi_n}$  มีค่าดังสมการ (Holman, 1992)

$$h_{wi_n} = \frac{N_U \cdot k_f}{H} \quad (16)$$

สำหรับ  $R_a < 10^9$

$$N_U = 0.68 + \frac{0.67R_a^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{P_r}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (17)$$

สำหรับ  $10^9 < R_a < 10^{12}$  (18)

$$N_U = 0.825 + \frac{0.67R_a^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{P_r}\right)^{9/16}\right]^{8/27}}$$

$R_a$  คือ Rayleigh number ของระนาบในแนวดิ่ง

$$R_a = \frac{g\beta'(T_{win} - T_a).H^3.P_r}{\nu^2} \quad (19)$$

ความชื้นจำเพาะที่ผิวบนผนังภายใน (Jayamaha, 1975)  $\omega_{s_n}$

$$\omega_{s_n} = 0.62198 \cdot \frac{P_{surface}}{P_{atm} - P_{surface}} \quad (20)$$

ความดันที่ผิวของวัสดุที่มีลักษณะเป็นรูพรุน

$$P_{surface} = \exp\left(23.5771 - \frac{4042.9}{T_{surface} - 37.58}\right) \quad (21)$$

จากข้อสมมติฐานดังกล่าวสามารถสร้างสมการสมดุลพลังงานของแต่ละด้านผนังของบ้านทั้งสี่ด้านโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข(Difference method) แบบวิธีเอ็กซพลิตซิท (Explicit method) (Incropera,1996) ดังรูปที่ 3-4. จะได้สมการหลัก (1)-(12) และสมดุลอุณหภูมิและความชื้นจำเพาะของอากาศภายในห้องจากสมการหลัก (13)-(14) โดยป้อนข้อมูลจากการทดลองได้แก่ ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ค่าตัวแปรต่าง ๆ จากตารางที่ 1. และใช้ค่าความเร็วลมสิ่งแวดล้อมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณการออกแบบจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิบนผนังในจุดต่างๆ ของบ้านทั้งสี่ด้าน อุณหภูมิและความชื้นจำเพาะของอากาศภายในห้อง นำค่าที่ได้จากผลการคำนวณกับการทดลองมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลโดยสมการมาตรฐาน RMSE (Root Mean Square Error) ด้วยสมการ (22)

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum (C_i - M_i)^2}{m} \right\}^{0.5} \quad (22)$$

เมื่อ  $C_i$  เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของสมการ,  $M_i$  เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง และ  $m$  เป็นจำนวนข้อมูล

Density, (kg/m <sup>3</sup> )	700
Thermal Conductivity, (W/m.K)	0.087
Specific Heat Capacity, (J/kg.K)	1,000
Solar Absorptance	0.38
Thermal Emittance	0.62
thickness, m	0.07

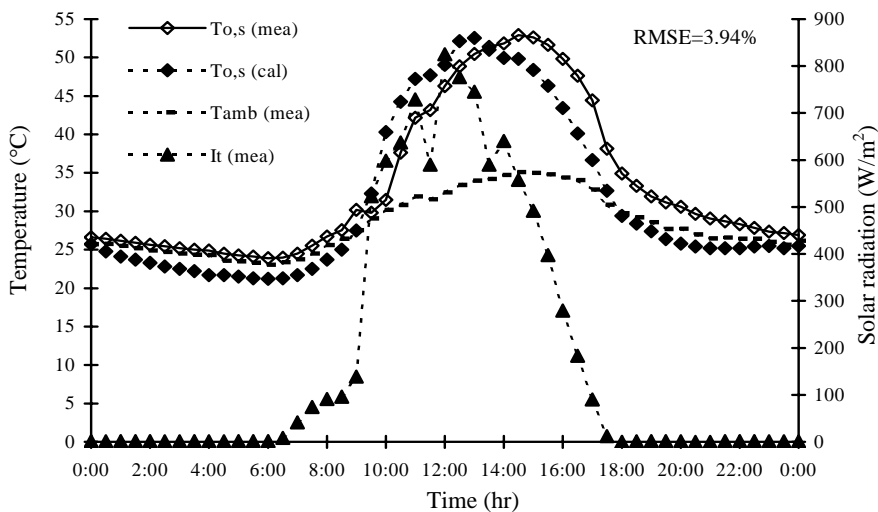
ตารางที่ 1. คุณสมบัติทางความร้อนของ AAC (Ungkoon)



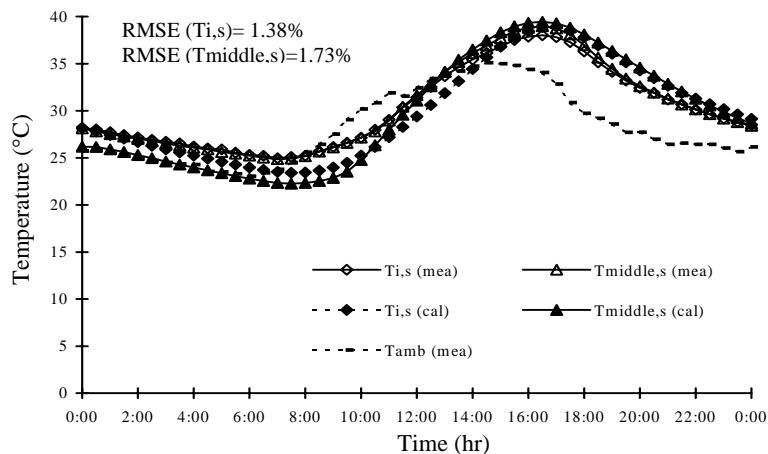
## ผลการทดลอง

### 1. ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบนผนังทั้งสองด้าน

จากรูปที่ 5-6 ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผนังด้านนอก ( $T_{o,s}$ ) อุณหภูมิตรงกลาง ( $T_{middle,s}$ ) ด้านใน ( $T_{i,s}$ ) ของบ้านที่หันไปทางทิศใต้ผนังที่ใช้ทดสอบแบบเปลือยไม่ฉนวนปูน จากการทดสอบพบว่าในช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิผนังด้านนอก ( $T_{o,s}$ ) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) จะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิตรงกลางผนัง ( $T_{middle,s}$ ) และผนังด้านใน ( $T_{i,s}$ ) เพราะที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องสูงกว่าสิ่งแวดล้อม และช่วงเวลากลางวันจะมีค่าความเข้มแสงของรังสีอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ  $825 \text{ W/m}^2$  พบว่าค่าอุณหภูมิผนังด้านนอก ( $T_{o,s}$ ) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิตรงกลางผนัง ( $T_{middle,s}$ ) ผนังด้านใน ( $T_{i,s}$ ) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) ประมาณ  $2 \sim 16^\circ\text{C}$  และมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผนังด้านนอก ( $T_{o,s}$ ) และผนังด้านใน ( $T_{i,s}$ ) เนื่องจากผนังด้านทิศใต้สามารถรับแสงรังสีอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน ดังนั้นสรุปได้ว่าผนังคอนกรีตมวลเบาที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่มีความต้านความร้อนได้มาก ผลเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์จะมีค่า RMSE ประมาณ 1.38-3.94 โดยหาจากค่าเฉลี่ยในการทดลอง

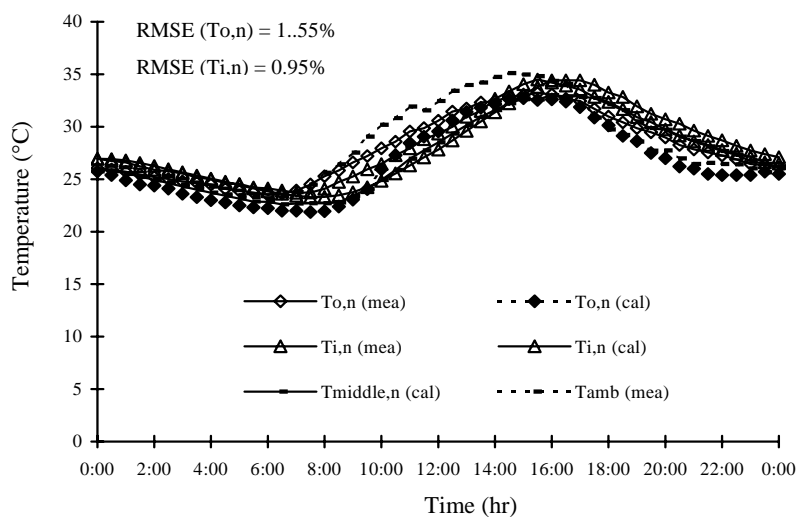


รูปที่ 5. การเปรียบเทียบอุณหภูมิบนผิวผนังภายนอกของบ้านทางด้านทิศใต้ระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)

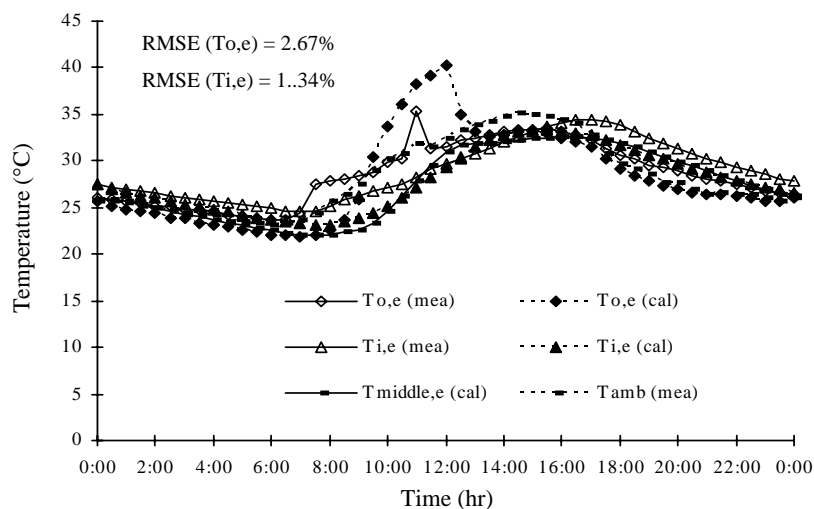


รูปที่ 6. การเปรียบเทียบอุณหภูมิบนผิวผนังภายในและตรงกลางผนังของบ้านทางด้านทิศใต้ระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)

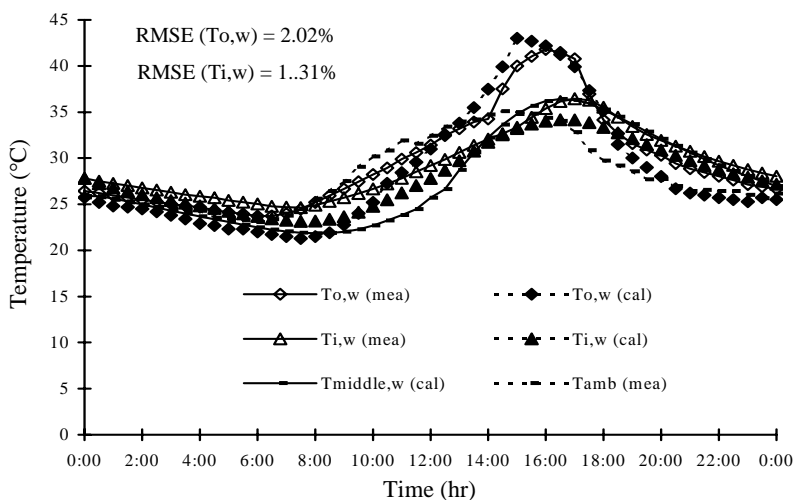
รูปที่ 7 ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของผนังด้านนอก (To,n)และด้านใน (Ti,n) ของบ้านที่หันไปทางทิศเหนือ จากการทดสอบพบว่า อุณหภูมิบนผนังทั้งด้านนอกและด้านในจะมีค่าไม่แตกต่างกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Tamb) เพราะว่าผนังของบ้านที่อยู่ทางทิศเหนือนั้น จะมีร่มเงาบางส่วนจากหลังคาและได้รับเพียงรังสีกระจาย ทำให้อุณหภูมิบนผนังมีค่าต่ำกว่าผนังทางด้านทิศอื่นๆของบ้าน ผลเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองกับผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ จะมีค่า RMSE ประมาณ 0.95-1.55 โดยหาจากค่าเฉลี่ยในการทดลอง



รูปที่ 7. การเปรียบเทียบอุณหภูมิบนผนังของบ้านทางด้านทิศเหนือระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)



รูปที่ 8. การเปรียบเทียบอุณหภูมิบนผนังของบ้านทางด้านทิศตะวันออกระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)



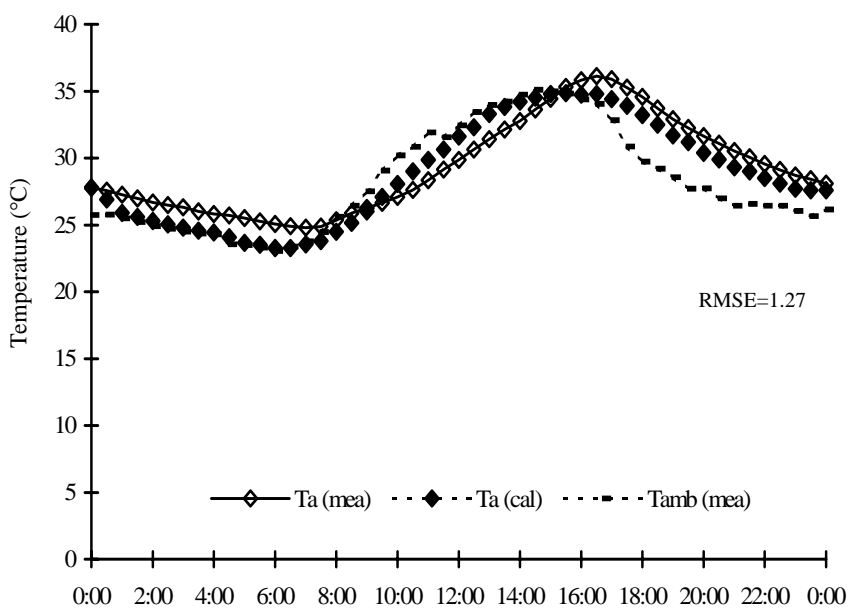
รูปที่ 9. การเปรียบเทียบอุณหภูมิบนผนังของบ้านทางด้านทิศตะวันตกระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)

จากรูปที่ 8-9 ผลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผนังที่หันทางทิศตะวันออกและทางทิศตะวันตก ระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ จากรูปที่ 8 อุณหภูมิของผนังด้านนอก ( $T_{o,e}$ ) และด้านใน ( $T_{i,e}$ ) ของบ้านที่หันไปทางทิศตะวันออก จะพบว่าในช่วงเวลา 7.00-13.00น. มีค่าอุณหภูมิของผนังด้านนอก ( $T_{o,e}$ ) สูงกว่าผนังด้านใน ( $T_{i,e}$ ) ประมาณ 2~7°C เพราะได้ค่าเข้มแสงรังสีอาทิตย์ และจากรูปที่ 9 อุณหภูมิของผนังด้านนอก ( $T_{o,w}$ ) และด้านใน ( $T_{i,w}$ ) ของบ้านที่หันไปทางทิศตะวันตก ช่วงเวลา 13.00-18.00น. พบว่าอุณหภูมิของผนังด้านนอก ( $T_{o,w}$ ) สูงกว่าผนังด้านใน ( $T_{i,w}$ ) และอุณหภูมิล้างแวล้อม

( $T_{amb}$ ) เพราะว่าผนังจะได้ค่าความเข้มแสงรังสีอาทิตย์ และในช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิบนผนังด้านนอกของบ้านที่หันทางทิศตะวันออกและทางทิศตะวันตกจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) และต่ำกว่าอุณหภูมิผนังด้านในของบ้าน เปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองกับผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของผนังด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก จะมีค่า RMSE โดยผนังทิศตะวันออกประมาณ 1.34 -2.67 และผนังทิศตะวันตกประมาณ 1.31 -2.02 จากค่าเฉลี่ยในการทดลอง

## 2. ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในบ้าน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในบ้าน (ดังรูปที่ 10) จะพบว่าในช่วงเวลากลางวัน (9.00 - 15.00 น) เนื่องจากผนังของบ้านมีคุณสมบัติต้านทานความร้อนที่ดีจึงทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบนผนัง ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายใน ( $T_a$ ) ต่ำกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) และช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิอากาศภายใน ( $T_a$ ) สูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $T_{amb}$ ) ผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณของอุณหภูมิอากาศภายในบ้าน จะมีค่า RMSE ประมาณ 1.27 จากค่าเฉลี่ยในการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าสมการการคำนวณสามารถใช้ประมาณค่าอุณหภูมิอากาศภายในบ้านได้

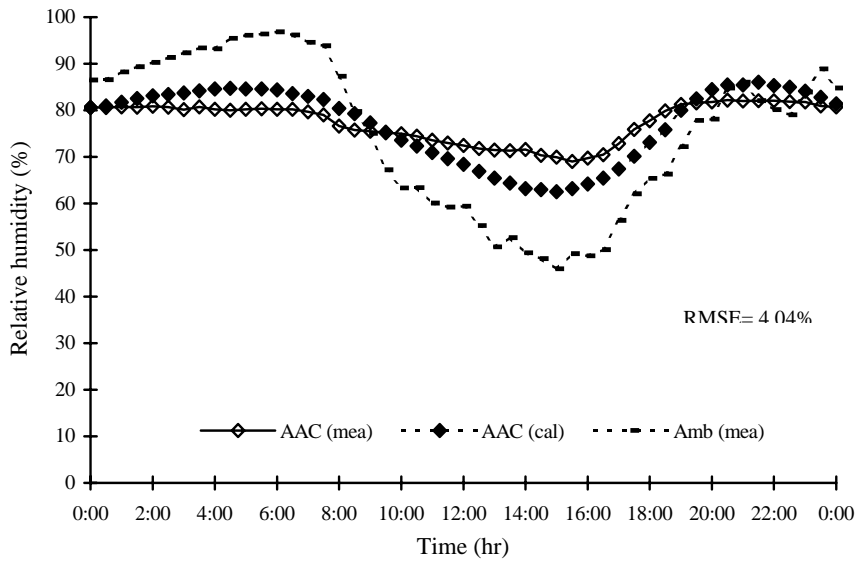


รูปที่ 10. การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศภายในบ้านระหว่างการทดลองกับการคำนวณ

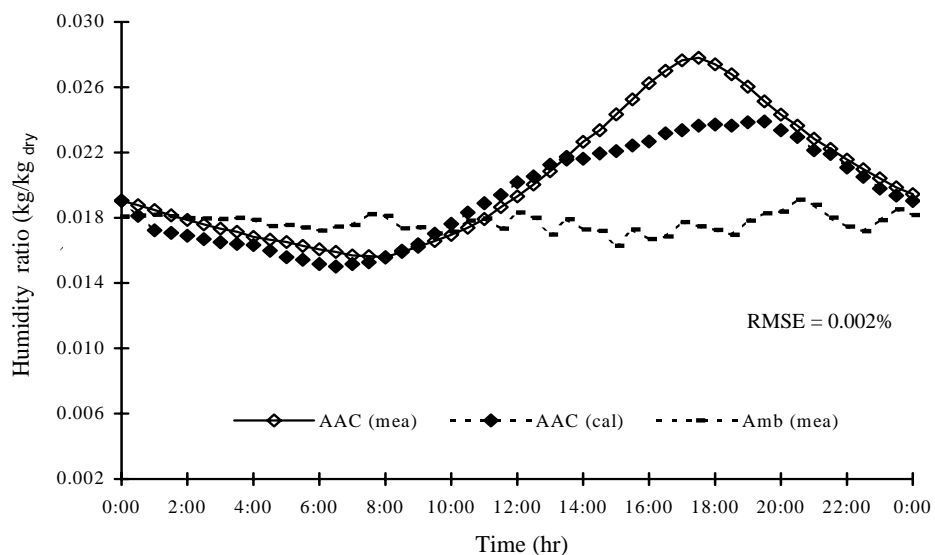
(30 พฤศจิกายน 2548)

จากรูปที่ 11-12 การเปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นจำเพาะของอากาศภายในบ้านระหว่างการทดลองกับการคำนวณและสิ่งแวดล้อม (30/11/05) พบว่าความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นของอากาศเกิดความแตกต่างตามสภาพอากาศภายในห้องและบรรยากาศ ความชื้นในอากาศส่งผ่านผนังจากภายนอกเข้าสู่ภายในบ้าน (เข้าและออก) ซึ่งจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันเนื่องจากการระเหยตัวของไอน้ำ

น้ำในอากาศตามธรรมชาติและจะลดลงในช่วงกลางคืนเนื่องจากกลั่นตัวเป็นน้ำ จากผลการทดลองเมื่ออุณหภูมิอากาศภายในห้องเพิ่มขึ้นความชื้นสัมพัทธ์ลดลงและถ้าอุณหภูมิอากาศภายในห้องลดลงความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้น เพราะความดันไอน้ำอิ่มตัวมีค่าแปรผันตรงกันอุณหภูมิของอากาศ (รูปที่ 10-12)



รูปที่ 11. การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในบ้านระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)



รูปที่ 12. การเปรียบเทียบความชื้นจำเพาะของอากาศภายในบ้านระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ (30 พฤศจิกายน 2548)

ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณ มีค่า RMSE ประมาณ 1.27%, 4.04%, 0.002% และผลที่ได้จากการทดลองแตกต่างกับผลการคำนวณนั้น เนื่องจากสภาพท้องฟ้า เช่น ทิศทางของลมและการเกิดเมฆบังผนังของบ้านทดลอง ซึ่งไม่ได้นำมาพิจารณารวมอยู่ในแบบจำลองคณิตศาสตร์ และผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ทำนายสมรรถนะทางความร้อนของบ้านภายใต้สภาวะอากาศที่แตกต่างกันได้

## สรุป

การคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอุณหภูมิบนผนังของบ้านทั้งสี่ด้าน อุณหภูมิอากาศภายในบ้าน ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นจำเพาะของอากาศภายในบ้าน ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขนี้ประมาณค่า ตัวแปรดังกล่าวภายในบ้านได้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ บริษัท ซุปเปอร์บล็อก จำกัด (มหาชน) เลขที่ 170/86 ชั้น 31 อาคารไอเซี่ยน ทาวเวอร์ 1 สุขุมวิท 16 (สามมิตร) คลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110 โทร 02-261-3165 โทรสาร 02-261-3619 [www.superblock.co.th](http://www.superblock.co.th) ที่มีส่วนสนับสนุนงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- ASHRAE Handbook of Fundamentals, 2001. **American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers**. Inc., Atlanta, USA, pp. 6.1-6.17.
- Bahadori, M. N and Haghighat, F., 1986. Thermal performance of adobe structures with domed roofs and moisture internal surface. **Journal Solar Energy**. , 36: pp. 365-375.
- Devres, Y, O., (1994). Pychrometric Property of Humid Air: Calculation Procedures. **Journal of Applied Energy**. , 48: pp.1-18.
- Diffie, J.A. and Beckmann, W.A. 1980. **Solar Engineering of Thermal Process**. , New York, John Wiley & Son.
- Chapra, S. C., Canale, R. P., 1990. **Numerical Method for Engineers**. 2<sup>nd</sup> edition. , McGraw-Hill Book Co, New York.
- Holman, J.P., 1992. **Heat Transfer**, 7<sup>th</sup> ed., London, McGraw-Hill, pp. 340-341, 654-659.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., 1996. **Fundamental of Heat and Mass Transfer**. , John Wiley & Sons, New York
- Jayamaha, S. E., Wueysundera, N. E and Chou, S. K., 1997. Effect of rain on the heat gain though building walls in tropical climate. **Journal Building and Environment**. , 32: pp. 465-477.
- Khedari, J., Sangprajak, A., Hirunlabh, J. 2001, Thailand climatic zones, **Journal of Renewable Energy**. , 25: pp.267-280.
- Por ta-Gándara, M. A., Robio, E., Fernández, J. L and Muñoz, V. G. 2002. Effect of passive techniques on interior temperature in small house in the dry, hot climate of northwestern Mexico. **Journal Renewable Energy**. , 26: pp. 121-135.
- Relative Humidity Equations, [www.uswcl.ars.ag.gov/exper/relhumeq.htm](http://www.uswcl.ars.ag.gov/exper/relhumeq.htm).

- Thepa, S., Kirtikara, K., Hirunlabh, J and Khedari, J. 1999. Improving indoor conditions of a Thai-style mushroom house by means of an evaporative cooler and continuous ventilation. **Journal Renewable Energy** ., 17: pp. 359-369.
- Ungkoon, Y., Shin, U-C., Hirunlabh, J., Zeghmami, B., Yodovard, P., Khedari, J., (2005). A preliminary study of hygrothermal performance of autoclaved aerated concrete blocks under hot humid climate of Thailand. **Proceeding of International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (PLANCE 2005)**. 19-21 May 2005 Santorini, Greece, pp.493-499.
- Ungkoon, Y, Shin, U-C, Hirunlabh, J, Yodovard, P, Khedari, J., 2005. A comparison between thermal, physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete blocks and commercial construction materials. **Proceeding of the Tenth National Convection on Civil Engineering**. 2-4 May 2005, Ambassador City, Jomtien, Chonburi, Thailand, MAT. 138-143.

### สัญลักษณ์

$C_{air}, C_w$	ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ของอากาศ และผนัง, J/kg.K
$d_m, x_m$	ค่าความหนาของผนัง m
$H$	ความสูงของผนังบ้าน, m
$h_{wi_n}, h_{wo}$	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผนังภายในห้องและภายนอกของห้อง, W/m <sup>2</sup> .K
$I_T$	ค่าความเข้มแสงเฉลี่ยที่ตกกระทบบนผนังของบ้าน, W/m <sup>2</sup>
$k_f, k_m$	ค่าการนำความร้อน (Conductivity) อากาศ และของผนัง, W/m.K
$N_U, P_r$	ค่าเลขนัสเซิลท์และ Prandtl number
$R_a, t$	Rayleigh number และเวลา, s
$P_{atm}, P_{surface}$	ความดันบรรยากาศ (101.325 N/m <sup>2</sup> ) และความดันอากาศบริเวณที่ผิวของผนังภายใน, N/m <sup>2</sup>
$T_{amb}, T_a$	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และอุณหภูมิอากาศภายในบ้านพักอาศัย, K
$T_{surface_n}$	อุณหภูมิของตำแหน่งต่างๆ ภายในผนังและที่ผิวภายในของผนังห้อง, K
$T_{sky}$	อุณหภูมิท้องฟ้า $0.0552 * T_{amb}^{1.5}$ , K
$T_1, T_2, T_3$	อุณหภูมิบนผิวผนัง ภายนอก ตรงกลาง ภายในของบ้านด้านทิศใต้, K
$T_4, T_5, T_6$	อุณหภูมิบนผิวผนัง ภายนอก ตรงกลาง ภายในของบ้านด้านทิศเหนือ, K
$T_7, T_8, T_9$	อุณหภูมิบนผิวผนัง ภายนอก ตรงกลาง ภายในของบ้านด้านทิศตะวันออก, K
$T_{10}, T_{11}, T_{12}$	อุณหภูมิบนผิวผนัง ภายนอก ตรงกลาง ภายในของบ้านด้านทิศตะวันตก, K
$T_i, T_{middle}, T_o$	อุณหภูมิบนผิวผนังภายใน ตรงกลาง ภายนอกของบ้าน, K
$T_{mv}, T_n$	อุณหภูมิตรงกลางของผนัง และตำแหน่งต่างๆ บนผนัง, K
$V_a$	ปริมาตรของห้อง, m <sup>3</sup>
$V_{amb}$	ความเร็วลมสิ่งแวดล้อม, m/s

$V_{rate}$	อัตราการไหลของอากาศรั่วซึมภายในบ้าน, $m^3/s$
$\alpha_w$	ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์บนผนังของบ้าน
$\epsilon_w$	ค่าการแผ่รังสีความร้อน (emissivity) ของผนัง
$\sigma$	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์แมน(Stefan-Bolzman constant) เท่ากับ $5.669 \times 10^{-8}$ , $W/m^2.K$
$\rho_{air} \cdot \rho_w$	ค่าความหนาแน่น (Density) ของอากาศ และผนัง, $kg/m^3$
$V$	ค่าความหนืดจลน์, $m^2/s$
$\beta'$	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ( $= \frac{1}{T_a}$ ), $K^{-1}$
$\omega_a \cdot \omega_{amb} \cdot \omega_{S_n}$	ความชื้นจำเพาะของอากาศภายในบ้าน และสิ่งแวดล้อม และที่ผิวผนังด้านใน, $kg/kg_{dry\ air}$
i, o	ตำแหน่งที่ผิวภายนอก และตำแหน่งที่ผิวภายใน
e, n, s, w	ด้านทิศตะวันออก เหนือ ใต้ ตก