

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังไม้จริงตัดขวาง

นางสาวจุฑิตรีรัตน์ ลิ้มปีย์พันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์  
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้และปีการศึกษานี้จะหาได้ในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย



The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

# Thermal Performance Comparison of Walls Made of Horizontal Cut Massive Wood

Miss Thitirat Limpiyapun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Architecture Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University



ฐิติรัตน์ ลิ้มปิยพันธ์ : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังไม้จริงตัดขวาง

(Thermal Performance Comparison of Walls Made of Horizontal Cut Massive Wood)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร, 85 หน้า

ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีพลังงานสะสมรวมต่ำกว่าวัสดุก่อสร้างอื่นๆ และเป็นวัสดุที่ทดแทนได้จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ยั่งยืนในระยะยาว เหมาะสมกับบ้านพักอาศัยในเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทยที่ใช้งานในเวลากลางคืนที่ไม่ควรสะสมความร้อน การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน และระยะเวลาในการคายความร้อนของผนังไม้จริงซึ่งมีความหนาต่างๆกัน โดยศึกษาระหว่างวัสดุผนังไม้จริงที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยโฟม คอนกรีต และไม่ปิดช่องว่างด้วยอะไรเลย เปรียบเทียบกับวัสดุผนังคอนกรีตแบบที่ใช้ในบ้านพักอาศัยทั่วไป

กระบวนการวิจัยประกอบด้วยส่วนที่เป็นการทดลองด้วยกล่องทดลองในสภาพคล้ายการใช้งานจริง โดยใช้กล่องทดลองขนาด 60x60x60 เซนติเมตร วางวัสดุต้นแบบในระนาบตั้ง และใช้หลอดไฟอินฟราเรดขนาด 500 วัตต์จำนวน 2 ดวงส่องในแนวระนาบ โดยเปิดไฟให้ความร้อนสูงขึ้นจนอุณหภูมิคงที่ใช้เวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที และปล่อยให้เย็นลงอีก 4 ชั่วโมง เก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 2 นาที เพื่อนำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ดังกล่าวมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการคายความร้อนของวัสดุต้นแบบ อีกส่วนคือการทดลองในห้องปฏิบัติการภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญเพื่อหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity) ภายใต้มาตรฐาน ASTM C518 และนำผลการทดลองดังกล่าวไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางด้านความร้อนเมื่อนำวัสดุต้นแบบดังกล่าวไปใช้ในอาคารที่พักอาศัยที่ใช้งานช่วงกลางคืนเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงความคุ้มค่าในด้านการลงทุนในระยะยาว ผลการศึกษาในครั้งนี้จะนำไปสู่การสร้างแนวทางในการเลือกใช้วัสดุผนังชนิดใหม่ที่ใช้ไม้จริงเป็นส่วนประกอบหลักเพื่อการออกแบบที่ประหยัดพลังงานและเหมาะสมต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารต่อไปในอนาคต

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยกล่องทดลอง เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคายความร้อนของวัสดุต้นแบบ พบว่าผนังต้นแบบทั้ง 9 ประเภทมีความสามารถในการคายความร้อนได้ดีกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูน โดยผนังไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยโฟมโพลีสไตรีนจะหน่วงเหนี่ยวความร้อนในช่วงแรกได้ดีกว่าผนังไม้ที่ไม่มีปิดช่องว่าง โดยที่ยังสามารถคายความร้อนได้เร็ว และจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE พบว่าบ้านที่ใช้วัสดุผนังไม้ทั้ง 9 แบบใช้พลังงานในการทำมาความเย็นน้อยกว่าบ้านที่ใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูนประมาณร้อยละ 36 โดยวัสดุที่ใช้พลังงานในการทำมาความร้อนต่ำที่สุด และคืนทุนเร็วที่สุดก็คือผนังไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้วซึ่งคืนทุนในเวลา 8 เดือน

ภาควิชา .....สถาปัตยกรรมศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา .....สถาปัตยกรรม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา ....2555.....

## 5573359225 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS : THERMAL CONDUCTIVITY/ MASSIVE WOOD/ RESIDENTIAL

THITIRAT LIMPIYAPUN : THERMAL PERFORMANCE COMPARISON OF WALLS MADE OF HORIZONTAL CUT MASSIVE WOOD. ADVISOR: ASST.PROF.ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D, 85 PP.

Wood has less Embodied Energy than the other materials. It's a renewable resource and sustainable material. Moreover, it is suitable for using in resident buildings in hot and wet weather like in Thailand because it can transfer heat rapidly. The objective of this research is to study thermal performance of solid wood walls which have different thickness values and different kinds of leak prevention materials such as polystyrene foam, concrete and those without leak prevention materials, and compare them to normal plastered brick wall.

The research methodology is comprised of two parts. The first part is the testing of prototype materials by using a 60x60x60 cm test box, which resembles the real condition. This prototype material is vertically installed in the test box and heated by two 500 watt infrared lamps for 3 hours and a half, then turned off and wait about 4 hours until the material cools down. The temperature is collected every 2 minutes by using a thermal data logger and then analyzed for heat-discharge performance and lag-time of the materials. The second part is conducted in the laboratory under expert supervision following the ASTM C518 standard method. After that, the thermal conductivity results from the laboratory are implemented in a computer-simulation program "Visual DOE 4.1" for simulating the energy performance and value of economics. This research will propose the alternative way of using wood as the main component in walls which is suitable for the weather in Thailand.

The prototype materials were tested by using the test box and then analyzed for heat-discharge performance and lag-time of the materials, the conclusion is as follows: The 9 prototype materials can discharge the heat faster than normal plastered brick walls. The massive wood walls with polystyrene foam leak prevention can delay the heat slower than the massive wood walls without leak prevention and it still good at discharging the heat. From the computer-simulation result, the massive wood walls with polystyrene foam used for leak prevention used the least amount of energy for the cooling system and the fastest recuperation.

Department .....Architecture..... Student's Signature .....

Field of Study .....Architecture..... Advisor's Signature .....

Academic Year .....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์อย่างยิ่ง ของ อาจารย์อรรจน์ เศรษฐบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และให้คำปรึกษามาโดยตลอด ตั้งแต่ต้นจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจอยู่เสมอ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน ตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.กรองทิพย์ ดร.จิตตกานต์ ดร.อัจฉราวรรณ ข้าราชการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ และคำปรึกษา รวมถึงให้การสนับสนุนเครื่องมือที่จำเป็นต่องานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ และให้คำแนะนำในการใช้ต่อผู้วิจัยเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญแผนภูมิ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	5
1.6 สมมุติฐานของการวิจัย.....	6
1.7 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	6
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารหรือออกจากอาคาร.....	8
2.2 พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน.....	10
2.3 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน.....	12
2.4 หลักการวัดค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity).....	16
2.5 ลักษณะทางกายภาพของยางพารา.....	18
2.6 การปลูกยางพาราในประเทศไทย.....	19
2.7 กระบวนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> Emissions).....	23
2.8 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA).....	25
2.9 คุณสมบัติของวัสดุ.....	32
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 ตัวแปรที่กำหนด.....	38
3.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างและเครื่องมือที่เลือกใช้ในการวิจัย .....	38
3.3 ขั้นตอนการผลิตวัสดุต้นแบบ .....	43
3.4 ช่วงการทดลอง (กล่องทดลอง) .....	46
3.5 ช่วงการทดลอง (การทดสอบในห้องทดลอง และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์).....	50
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	52
4.1 ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง.....	52
- ข้อจำกัดในการวิจัย.....	53
- ผลการทดลอง.....	53
- วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	63
4.2 ส่วนการทดสอบในห้องทดลอง และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	64
4.2.1 ส่วนการทดสอบในห้องทดลอง.....	64
4.2.2 ส่วนการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	64
- ผลการทดสอบ.....	65
- วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	68
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 บทสรุป.....	71
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดง Embodied Energy ของวัสดุประเภทต่างๆ (based on AIA ERG).....	2
ตารางที่ 2.1 พื้นที่ปลูกยางพาราในภาคใต้.....	21
ตารางที่ 2.2 พื้นที่ปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ.....	22
ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้พลังงาน และปริมาณการปล่อยคาร์บอนของวัสดุต่างๆ.....	27
ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติด้านความร้อนของไม้ประเภทต่างๆ.....	33
ตารางที่ 4.1 สรุปอุณหภูมิจากการทดลองวัสดุผนังทั้งหมด.....	60
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาคุณสมบัติในการนำความร้อน และการต้านทานความร้อน ของวัสดุในห้องทดลอง.....	65
ตารางที่ 5.1 สรุปผลพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นและค่าใช้จ่ายจากการจำลองด้วยโปรแกรม คอมพิวเตอร์.....	72
ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาคุ้มทุนของวัสดุแต่ละชนิดเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูน.....	73
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการใช้พลังงานในการทำความเย็นใน 24 ชั่วโมง ของวันที่ 21 มีนาคม.....	75
ตารางที่ 5.4 สรุปประสิทธิภาพของผนังแต่ละแบบ.....	77

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ลักษณะของเซลล์โลสในเนื้อไม้.....	3
รูปที่ 2.1 รูปตัดแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องวัดแบบ Heat Flow Meter.....	17
รูปที่ 2.2 เครื่อง NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda ที่ใช้หลักการแบบ Heat Flow Meter.....	17
รูปที่ 2.3 แผนภูมิของวัฏจักรคาร์บอน.....	23
รูปที่ 3.1 หลอดไพอินฟราเรดที่ใช้ในการให้ความร้อนกับวัสดุในการทดลอง.....	39
รูปที่ 3.2 หม้อแปลงและพัดลมระบายอากาศ.....	40
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบภายนอกของ HOBO Data Logger temp/RH/2 ext channels.....	40
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ HOBO ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในกล่องทดลอง.....	41
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม Testo 400.....	41
รูปที่ 3.6 หัวโพรบสำหรับวัดความเร็วลม.....	42
รูปที่ 3.7 โพรบสำหรับวัดความเร็วลมที่ต่อเข้ากับขาตั้ง.....	42
รูปที่ 3.8 วัสดุไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้.....	44
รูปที่ 3.9 วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดยางโฟมโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว.....	44
รูปที่ 3.10 วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต.....	45
รูปที่ 3.11 วัสดุต้นแบบที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	45
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างผนังก่ออิฐฉาบปูนขนาด 30 x 30 เซนติเมตร.....	46
รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการเจาะของกล่องทดลอง และตำแหน่งที่วางวัสดุต้นแบบ.....	47
รูปที่ 3.14 การติดตั้งเซอร์ของเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิเข้ากับวัสดุ.....	48
รูปที่ 3.15 แสดงการวัดความเร็วลมของพัดลมระบายอากาศเพื่อคำนวณหา CFM.....	49
รูปที่ 3.16 ลักษณะการตั้งกล่องทดลอง และตำแหน่งของไพอินฟราเรด.....	50
รูปที่ 3.17 กล่องทดลองเมื่อเปิดไฟ.....	50
รูปที่ 3.18 รูปแบบอาคารอ้างอิง (Reference Building) ที่ใช้ในการศึกษา.....	51

## สารบัญแผนภูมิ

	หน้า
แผนภูมิที่ 3.1 แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิออก (Delta T) ของวัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ที่มีการให้ความร้อนเป็นเวลา 7 ชั่วโมง.....	49
แผนภูมิที่ 4.1 เปรียบเทียบผนังหนา 4 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน.....	54
แผนภูมิที่ 4.2 เปรียบเทียบผนังหนา 6 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน.....	55
แผนภูมิที่ 4.3 เปรียบเทียบผนังหนา 8 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน.....	56
แผนภูมิที่ 4.4 เปรียบเทียบผนังไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 ซม. ....	57
แผนภูมิที่ 4.5 เปรียบเทียบผนังไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้วที่มีความหนา 4, 6 และ 8 ซม.....	58
แผนภูมิที่ 4.6 เปรียบเทียบผนังไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 ซม.....	59
แผนภูมิที่ 4.7 แสดงปริมาณพลังงานสะสมทั้งปีที่ใช้ในบ้านพักอาศัยต้นแบบ เมื่อใช้ผนังประเภทต่างๆเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐมวลเบาคึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ.....	66
แผนภูมิที่ 4.7 แสดงค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานเป็นเวลา 1 ปีของบ้านพักอาศัยต้นแบบ เมื่อใช้ผนังประเภทต่างๆเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐมวลเบาคึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ.....	67
แผนภูมิที่ 5.1 เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานในการทำความเย็นใน 24 ชั่วโมงของวันที่ 21 มีนาคม ของผนังประเภทต่างๆ.....	76

## บทที่ 1

### บทนำ

ไม่เป็นวัสดุที่กล่าวได้ว่ามีค่า Embodied Energy ต่ำกว่าวัสดุอื่นๆ และไม่ยังเป็นวัสดุที่สามารถปลูกทดแทนได้ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ยั่งยืนในระยะยาว และยังสามารถเหมาะกับบ้านพักอาศัยในเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทยที่ใช้งานในเวลากลางคืนจึงควรจะสามารถถ่ายเทความร้อนออกไปได้อย่างรวดเร็ว โดยการวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน และระยะเวลาในการคายความร้อนของผนังไม้จริงซึ่งมีความหนาต่างๆกัน โดยศึกษาระหว่างวัสดุผนังไม้จริงที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยโฟม คอนกรีต และไม่ปิดช่องว่างด้วยอะไรเลย เปรียบเทียบกับวัสดุผนังคอนกรีตแบบที่ใช้ในบ้านพักอาศัยทั่วไป

กระบวนการวิจัยประกอบด้วยส่วนที่เป็นการทดลองด้วยกล่องทดลองในสภาพคล้ายการใช้งานจริง โดยใช้กล่องทดลองขนาด 60x60x60 เซนติเมตร วางวัสดุต้นแบบในระนาบตั้ง และใช้ไฟอินฟราเรดขนาด 500 วัตต์จำนวน 2 ดวงส่องในแนวระนาบ โดยเปิดไฟให้ความร้อนจนความร้อนอิ่มตัวเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นลงอีก 4 ชั่วโมง และเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 2 นาที เพื่อนำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ดังกล่าวมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการคายความร้อนของวัสดุต้นแบบ อีกส่วนคือการทดลองในห้องปฏิบัติการภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญเพื่อหาค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity) ภายใต้มาตรฐาน ASTM C518 และนำผลการทดลองดังกล่าวไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE 4.1 เพื่อดูประสิทธิภาพเมื่อนำวัสดุต้นแบบดังกล่าวเมื่อนำไปใช้ในอาคารประเภทที่พักอาศัยที่การใช้งานอยู่ในช่วงกลางวันเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงความคุ้มค่าในด้านการลงทุนในระยะยาว ผลการศึกษาในครั้งนี้จะนำไปสู่การสร้างแนวทางในการเลือกใช้วัสดุผนังชนิดใหม่ที่ใช้ไม้จริงเป็นส่วนประกอบหลักเพื่อการออกแบบที่ประหยัดพลังงานและเหมาะสมต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารต่อไปในอนาคต

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาสภาพอากาศ และภัยพิบัติที่รุนแรงขึ้นกลายเป็นปัญหาใหญ่ปัญหาหนึ่ง ซึ่งสืบเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป หนึ่งในสาเหตุสำคัญคือก๊าซเรือนกระจก หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขึ้นไปทำลายชั้นบรรยากาศจนเกิดภาวะเรือนกระจกที่ทำให้โลกร้อนขึ้น ในขั้นตอนการผลิตวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งออกมาจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างกระบวนการผลิตและขนส่ง เรียกว่าเป็นคาร์บอนที่เกิดระหว่างการแปรรูป และคาร์บอนอีกส่วนที่จะแผ่ออกมาตลอดการใช้งานเรียกว่าคาร์บอนที่เก็บอยู่ในวัสดุนั้นๆ ไม่เป็นวัสดุที่ปล่อยคาร์บอนออกมาในปริมาณที่ต่ำมากเมื่อ

เทียบกับวัสดุประเภท อีฐ อลูมิเนียม เหล็ก และคอนกรีต เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการเจริญเติบโตอีกด้วยเมื่อนำมาหักลบกับปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในการแปรรูปและขนส่งจึงถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ปล่อยคาร์บอนออกมาในปริมาณน้อยมาก[1] และไม้ก็ถือได้ว่าเป็นวัสดุที่ผูกพันกับคนไทยมาช้านาน เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่นช่วยให้สามารถลดพลังงานในการขนส่งได้ อีกทั้งมีความแข็งแรงคงทน และยังมีคุณสมบัติสามารถระบายความร้อนได้เร็วจึงเหมาะสมกับสภาพอากาศที่ร้อนชื้นของประเทศไทย

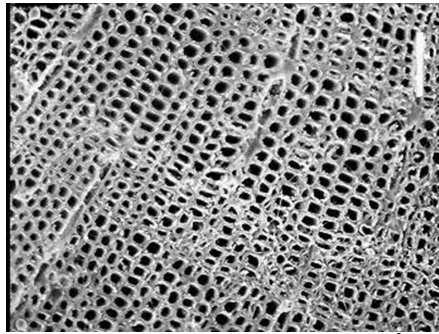
*ตารางที่ 1.1 แสดง Embodied Energy ของวัสดุประเภทต่างๆ (based on AIA ERG)*

Material	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/kg
Timber	1,380	2.5
Hardboard	13,310	24.2
MDF	8,330	11.9
Concrete (30 Mpa)	3,180	1.3
Brick	5,170	2.5
Aluminum (recycled)	21,870	8.1
Aluminum	515,700	227
Steel (recycled)	37,210	8.9
Steel	251,200	32
Glass	37,550	15.9
Zine	371,280	51
PVC	93,620	70
Polystyrene Insulation	3,770	117
Gypsum wallboard	5,890	6.1

(ที่มา: University of BATH, Inventory of Carbon & Energy (ICE) version 1.6a)

\*หมายเหตุ : แถบสีเหลืองคือไม้จริงอบแห้งแต่งผิว / แถบสีเทาคือวัสดุที่มีไม้เป็นส่วนประกอบ

ลักษณะของไม้จะมีรูพรุนของเซลลูโลสในเนื้อไม้อยู่ภายในตามธรรมชาติอยู่แล้ว[2] ทำให้ไม่เกิดการสะสมของความชื้นในวัสดุ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในด้านความเป็นฉนวนที่ดี แต่เนื่องจากป่าไม้ในปัจจุบันมีจำนวนเหลือน้อยลง การนำไม้จากป่าธรรมชาติมาเพื่อการก่อสร้างจึงเป็นสิ่งที่ไม่ควรทำอย่างยิ่ง ไม้จากป่าปลูกจึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับไม้คุณภาพโดยไม่ต้องทำลายป่าธรรมชาติ ในประเทศไทยป่าปลูกยังเป็นสิ่งที่ไม่แพร่หลายนัก แต่หากพูดถึงการทำสวนยางประเทศไทยปัจจุบันมีพื้นที่ปลูกยางพารามากถึง 12.3 ล้านไร่ ซึ่งปลูกมาเป็นอันดับสองรองจากประเทศอินโดนีเซีย โดยปลูกมากในภาคใต้ โดยมากถึง 85.3% ของพื้นที่ทั้งหมด ใน พ.ศ. 2454 ได้ขยายการปลูกมาทางจังหวัดจันทบุรี ทางภาคตะวันออกของไทย และขยายตัวมาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือในปี พ.ศ. 2534 [3, 4]



รูปที่ 1.1 ลักษณะของเซลลูโลสในเนื้อไม้

ที่มา <http://www.fibersonixx.com/images/wood%20sem%20.jpg>

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีการโค่นล้มโดยมีการปลูกทดแทนประจำ เนื่องจากเมื่ออายุต้นประมาณ 25 ปีก็จะไม่สามารถให้น้ำยางที่มีคุณภาพได้แล้ว ปริมาณไม้จึงมีมากพอทุกปีเนื่องจากการโค่นสวนยางประมาณ 3 แสนกว่าไร่ แล้วปลูกทดแทน ขึ้นมาใหม่ คิดเป็นเนื้อไม้ประมาณ 8 ล้านลูกบาศก์กิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบไม้ยางพารากับไม้สัก น้ำหนักและความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก จะอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน การแตกเสียหายจากการอบมีน้อย ในด้านการหดตัวของไม้ยางพาราในด้านรัศมีและด้านสัมผัส จะใกล้เคียงกับไม้สัก และการคงรูปขณะใช้งานของไม้ยางพาราก็อยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ ความยากง่ายในการตกแต่งด้วยเครื่องจักร ไม้ยางพารานับเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง ซึ่งสามารถแปรรูปหรือเลื่อยตัด หรือไสได้ง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ไม้ยางพาราเป็นไม้ปลูกอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมแก่การนำมาแปรรูปเพื่อใช้ในการก่อสร้าง[3] อีกทั้งการใช้วัสดุในท้องถิ่นยังเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อธรรมชาติจากการก่อสร้างได้อีกด้วย[5]

ไม้ที่ใช้ในการผลิตผนังต้นแบบ ตัดไม้ยางแบบตามขวาง แล้วนำมาประกบกันเป็นแผ่นแทนที่จะตัดตามขวางในแบบที่ใช้ในท้องตลาด เนื่องจากการตัดไม้ตามขวางแทบไม่เหลือเศษไม้จากการแปรรูป อีกทั้งไม้ที่ใช้ยังไม่จำเป็นต้องเป็นไม้ขนาดใหญ่ที่อายุการปลูกมาก สามารถใช้ไม้ปลูกขนาดเล็กมาประกอบเป็นผนังได้

จากงานวิจัยหลายชิ้นที่ผ่านมาได้มีการนำเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้มาผสมกับวัสดุอื่นๆเพื่อทำเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่ซึ่งอาจทำให้เสียคุณสมบัติของเซลลูโลสที่เป็นคุณลักษณะที่เป็นฉนวนของไม้ แต่กลับไม่มีการทดลองใช้เศษไม้จริงที่ยังไม่ย่อยเป็นเศษเล็กๆซึ่งน่าจะมีความหนาแน่นและยังคงคุณสมบัติของไม้ไว้ได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความสนใจที่จะนำไม้ยางพารามาตัดเป็นท่อนในลักษณะตามขวางเพื่อให้ได้ความหนาเท่าที่ต้องการ (4 ซม. 6 ซม. และ 8 ซม.) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ไม้ขนาดใหญ่ มาทำเป็นผนังอาคารเพื่อทดสอบว่าความหนาของไม้มีผลทำให้ประสิทธิภาพในด้านความร้อนเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรบ้าง และทดสอบใช้ โฟมโพลีสไตรีนที่ใช่แล้ว และคอนกรีต มาเป็นวัสดุที่ใช้ปิดช่องว่างระหว่างไม้ เพื่อพิจารณาว่าวัสดุดังกล่าวมีผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนอย่างไรบ้าง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน และระยะเวลาในการคายความร้อนของผนังไม้จริงซึ่งมีความหนาต่างๆกัน และใช้วัสดุที่ใช้ปิดช่องว่างระหว่างไม้(โฟม คอนกรีต)ที่แตกต่างกัน
2. ศึกษาและเปรียบเทียบว่าวัสดุที่ใช้ปิดช่องว่างระหว่างไม้ (โฟม คอนกรีต) มีผลต่อประสิทธิภาพในด้านความร้อนมากน้อยเพียงใด และมีแนวโน้มอย่างไรบ้าง
3. ศึกษาในเชิงเปรียบเทียบกับวัสดุผนังที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ ผนังก่ออิฐฉาบปูนเรียบ
4. สร้างแนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุ ที่เหมาะสมต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารต่อไปในอนาคต

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากกล่องทดลองนำไปใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน และการคายความร้อนของวัสดุต้นแบบแต่ละประเภทเท่านั้น
2. วัสดุที่สามารถนำมาทำเป็นผนังเพื่อป้องกันความร้อนมีหลายประเภท และคุณสมบัติ ในการวิจัยนี้มีขอบเขตการเปรียบเทียบประเภทของวัสดุดังนี้
  - 2.1 ทำการศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางผนัง และระยะเวลาในการคายความร้อนของวัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4, 6, และ 8 เซนติเมตร
  - 2.2 ทำการศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางผนัง และระยะเวลาในการคายความร้อนของผนังไม้จริงที่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้เป็น โฟม และ คอนกรีต โดยทั้งหมดเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนเรียบทั่วไปความหนา 8 เซนติเมตร

3. เนื่องจากอาคารแต่ละประเภทมีช่วงเวลาในการใช้งานที่แตกต่างกัน และยังมีความต้องการลักษณะการป้องกันความร้อนและการคายความร้อนแตกต่างกันด้วย การจำลองการใช้พลังงานของอาคารอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จึงจำลองการใช้พลังงานเฉพาะในอาคารประเภทพักอาศัยที่มีช่วงเวลาในการใช้งานช่วงกลางวันเป็นส่วนใหญ่เท่านั้น โดยอยู่ภายใต้สภาพอากาศของประเทศไทย

4. การจำลองการใช้พลังงานของอาคารอ้างอิงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้ค่าการถ่ายเทความร้อน (U factor) และค่าการคายความร้อน ( $\epsilon$ ) ที่วัดได้จากห้องทดลอง มาใช้แทนค่าในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

#### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยการจำลองสภาพแวดล้อมโดยการสร้างกล่องทดลอง โดยกล่องทดลอง ไฟที่ให้ความร้อน และเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลเป็นชุดเดียวกันในการทดสอบกับวัสดุต้นแบบแต่ละชิ้น

2. สถานที่ที่ใช้วางกล่องทดลองเป็นสถานที่เดียวกันในทุกการทดสอบ และห้องที่ใช้เป็นห้องที่มีลักษณะค่อนข้างเป็นระบบปิด ทำให้สามารถควบคุมผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่มีต่อกล่องทดลองได้

3. การเก็บข้อมูลต่อการทดสอบวัสดุต้นแบบ 1 ชิ้น จะทำให้เสร็จในวันเดียวกัน

#### 1.5 ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการทดลองสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองด้วยกล่องทดลองเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพคล้ายการใช้งานจริง และส่วนที่สองเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ และนำผลการทดลองดังกล่าวไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูประสิทธิภาพเมื่อนำวัสดุต้นแบบดังกล่าวไปใช้ในอาคารประเภทพักอาศัย รวมทั้งความคุ้มค่าในด้านการลงทุนในระยะยาว ผลการศึกษาในครั้งนี้จะนำไปสู่การสร้างแนวทางในการเลือกใช้วัสดุผนังชนิดใหม่ที่ใช้ไม่จริงเป็นส่วนประกอบเพื่อการออกแบบที่ประหยัดพลังงานและเหมาะกับภาวะนำสบายต่อไปในอนาคต

ขั้นตอนในการทดลองจะแบ่งเป็นช่วงเตรียมวัสดุต้นแบบ และช่วงการทดลอง ในช่วงการทดลองจะมีส่วนของการทดลองด้วยกล่องทดลอง และส่วนของการทดสอบความอัตราการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity : k) ในห้องทดลองภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ



## 1.6 สมมุติฐานของการวิจัย

1. ความหนาของผนังมีผลต่อความสามารถในการป้องกันความร้อน และคายความร้อนของผนัง
2. วัสดุที่นำมาปิดช่องว่างระหว่างไม้ ได้แก่ โฟม คอนกรีต มีผลต่อความสามารถในการป้องกันความร้อน และคายความร้อนของผนังไม้จริง ทำให้ระยะเวลาในการป้องกันความร้อน และคายความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามประสิทธิภาพด้านความร้อนดั้งเดิมของวัสดุที่นำมาปิดช่องว่าง

## 1.7 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

*อัตราการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity)* หมายถึง คุณสมบัติหนึ่งของวัสดุที่บ่งบอกถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่บดกันที่มีเนื้อเดียวกัน ถูกกำหนดค่าเป็น  $k$  คือ จำนวน British Thermal Unit ต่อชั่วโมง (Btu/h) ที่ถ่ายเทผ่านวัสดุขนาด 1 ตารางฟุตที่มีความหนา 1 นิ้ว เมื่อผ่านไปวัสดุนี้อุณหภูมิลดลง  $1^{\circ}\text{F}$  ภายใต้สภาพการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Steady State Conditions) [3]

*พลังงานสะสม (Embodied Energy)* คือ การประเมินค่าพลังงานที่ต้องการในการสกัดวัตถุดิบจากธรรมชาติ รวมถึงพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตทั้งช่วงปฐมภูมิ และช่วงทุติยภูมิ เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เล็กจนใหญ่ ส่วนในอาคารนั้น พลังงานสะสมรวมที่ใช้ในวัสดุก่อสร้าง โดยการใช้การแปลงค่าและใช้โมเดลช่วยเปรียบเทียบถึงการผลิตในกระบวนการนั้นๆ

*ไม้* น. คำรวมเรียกพืชทั่วไป โดยปรกติมีราก ลำต้น กิ่ง ก้าน และใบ, เรียกเนื้อของต้นไม้ที่ใช้ทำสิ่งของต่าง ๆ มีลักษณะเป็นท่อน แผ่น หรือดุ้น เป็นต้น, คำประกอบหน้าสิ่งของบางอย่างที่มีลักษณะยาวซึ่งทำด้วยไม้หรือเดิมทำด้วยไม้ เช่น ไม้กวาด ไม้พาย ไม้เท้า ไม้จิ้มฟัน, คำนำหน้าบอกประเภทต้นไม้ เช่น ไม้ยาง ไม้ดำ ไม้แดง ; เรียกลักษณะของสถาปัตยกรรมและศิลปกรรมไทยที่ย่อตรงมุมของฐานแท่น เสา หรือเครื่องยอดเป็นมุมเล็ก ๆ มุมละ ๓ มุม รวม ๔ มุมใหญ่ ได้ ๑๒ มุมเล็กกว่า ย่อไม้สิบสอง หรือ ย่อมุมไม้สิบสอง แม้ย่อมากกว่ามุมละ ๓ ก็ยังเรียกว่าย่อไม้สิบสอง หรือ ย่อมุมไม้สิบสอง [6]

*คอนกรีต* น. วัสดุก่อสร้าง ประกอบด้วยซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ ผสมเคล้าเข้าด้วยกัน เมื่อแห้งแข็งตัวแล้วจะเป็นวัสดุที่แข็งมาก. (อ. Concrete) [6]

(กฎ) หมายความว่า วัสดุที่ประกอบขึ้นด้วยส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลผสมละเอียด เช่น ทราย เป็นต้น มวลผสมหยาบ เช่น หิน หรือกรวด เป็นต้น และน้ำ ทั้งนี้ ให้หมายความรวมถึง

คอนกรีตกำลังปกติ คอนกรีตกำลังสูง และคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ [7]

บ้าน น. ที่อยู่ เช่น เลขบ้าน เจ้าบ้าน, สิ่งปลูกสร้างสำหรับเป็นที่อยู่อาศัย เช่น บ้านพักตากอากาศ บ้านเช่า, บริเวณที่เรือนตั้งอยู่ เช่น เขตบ้าน, หมู่บ้าน เช่น ผู้ใหญ่บ้าน, ถิ่นที่มนุษย์อยู่ เช่น สร้างเป็นบ้านเป็นเมือง [6]

อาคารอยู่อาศัย หมายความว่า อาคารซึ่งโดยปกติบุคคลใช้อาศัยได้ทั้งกลางวันและกลางคืน ไม่ว่าจะเป็นการอยู่อาศัยอย่างถาวรหรือชั่วคราว [7]

## 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยเป็นการประเมินประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน และการคายความร้อนของวัสดุผนังที่เกิดจากการผสมผสานระหว่างไม้จริงและวัสดุอื่น ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ต่อไป ดังนี้

1. เป็นการพัฒนาวัสดุผนังชนิดใหม่ที่เกิดจากวัสดุที่ใช้ไม้จริงจากป่าปลูกเป็นส่วนประกอบหลัก ผสมกับวัสดุอื่นซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านการป้องกันความร้อนบางประการของวัสดุ ซึ่งการใช้ไม้และวัสดุรีไซเคิลเป็นการลดการใช้วัสดุที่มีปริมาณการปล่อยคาร์บอนสูงอีกทางหนึ่งอีกด้วย
2. สามารถนำความรู้ความเข้าใจที่ได้จากการวิจัยนำมาใช้ออกแบบวัสดุชนิดใหม่ที่ใช่ไม้จริงเป็นส่วนประกอบ อีกทั้งเป็นการประยุกต์นำวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศมาใช้ทำให้ลดพลังงานในการขนส่งและการแปรรูปวัสดุ
3. นำเสนอแนวทางในการออกแบบที่ประหยัดพลังงาน และทำให้อาคารประเภทพักอาศัยเหมาะสมกับภูมิอากาศที่ร้อนชื้นของประเทศไทย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารหรือออกจากอาคาร

สามารถแบ่งปัจจัยออกได้เป็น 4 ปัจจัย ได้แก่

ดวงอาทิตย์ (Sun)

อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

ความชื้น (Humidity)

ลม (Wind)

##### 2.1.1 รังสีดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีคุณสมบัติการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งทะลุผ่าน โลกรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ได้ 2 ทางด้วยกัน คือ

*รังสีคลื่นสั้น (Short Wave Radiation)* เป็นรังสีที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศเข้าสู่สภาพแวดล้อม มีคุณสมบัติสามารถทะลุผ่านกระจกใสได้ และถูกดูดซับได้โดยวัสดุที่มีมวลสาร โดยเฉพาะวัสดุที่มีสีเข้ม

*รังสีคลื่นยาว (Long Wave Radiation)* เกิดจากการสะสมของรังสีคลื่นสั้นที่ถูกดูดกลืนไว้ที่วัสดุที่มีมวลสาร โดยจะถูกคายออกมาในรูปของรังสีคลื่นยาว รังสีคลื่นยาวนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกระจกใสได้ พลังงานเกือบทั้งหมดมีความยาวอยู่ในช่วงคลื่นที่ตาสามารถมองเห็นได้ และในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดที่เกือบมองเห็น (บางครั้งเรียกว่าช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด) โลกมีอัตราส่วนรังสีสะท้อน (Albedo) ประมาณ 30% ของรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงมา ที่เหลือ 70% จะถูกดูดซับไว้ ทำความอบอุ่นให้แก่พื้นดิน บรรยากาศ และมหาสมุทร ชั้นบรรยากาศที่มีสิ่งต่างๆอยู่มากมาย เช่น เมฆ ฝุ่นละออง และก๊าซต่างๆ เหล่านี้มีผลกระทบต่อกระสะท้อนกลับ (Scatter) และการดูดกลืนของรังสี (Absorption) ทำให้รังสีจากดวงอาทิตย์ส่วนหนึ่งถูกสะท้อนกลับออกไปนอกชั้นบรรยากาศ ส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่เข้ามาในชั้นบรรยากาศ สามารถจำแนกลักษณะของรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาบนพื้นผิวโลกได้ดังนี้ [8]

- *รังสีโดยตรง (Direct Radiation)* เป็นรังสีดวงอาทิตย์ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกโดยตรง

- *รังสีกระจาย (Diffuse Radiation)* เป็นรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกทำให้กระจัดกระจายโดยโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำ และฝุ่นละอองในบรรยากาศจึงมีทิศทางที่ไม่แน่นอน ผลรวมของรังสีโดยตรง และ

รังสีกระจาย เรียกว่า รังสีรวม (Global Radiation)

- *รังสีสะท้อน (Reflected Radiation)* เป็นรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวข้างเคียงของอาคารแล้วสะท้อนเข้าสู่อาคาร โดยรังสีของคลื่นสั้นจะเปลี่ยนเป็นรังสีคลื่นยาวในรูปของพลังงานความร้อน พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทความร้อนออกไปในรูปแบบของการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

### 2.1.2 อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)

อุณหภูมิอากาศเป็นการวัดระดับความรู้สึก หมายถึง ระดับความร้อนและความหนาวเย็นเป็นความหมายที่เกี่ยวข้องกับความร้อนหนาวของบรรยากาศโดยทั่วไปของอุณหภูมิ เป็นมาตรวัดพื้นฐานต่อสภาวะน่าสบายของมนุษย์ อุณหภูมิอากาศเป็นปัจจัยพื้นฐานในการศึกษาสภาพอากาศ (Weathering) อุณหภูมิอากาศแปรเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา เช่น ปี ฤดูกาล เดือน วัน และแม้กระทั่งรายชั่วโมง ดังนั้นผู้ออกแบบควรนำมาใช้พิจารณาประกอบการออกแบบเพื่อให้การออกแบบตอบสนองต่อสภาพอากาศ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้[9]

1. ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของปี (Yearly Mean Temperature) ประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวัน (Daily Mean Temperature) ค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดของวัน

2. อุณหภูมิช่วงเวลากลางวันและกลางคืน (Diurnal Temperature Swing) เป็นสาเหตุสำคัญที่สุดในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในรอบวัน กล่าวคือ การหมุนรอบตัวเองของโลกซึ่งทำให้มุมที่แสงอาทิตย์ตกกระทบผิวโลกเปลี่ยนแปลงไป ในช่วงเวลาที่เที่ยงวันดวงอาทิตย์อยู่สูงเหนือขอบฟ้ามากที่สุด แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นโลกเป็นมุมฉาก ลำแสงมีความเข้มข้น ในช่วงเวลาเช้าและเย็น แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นโลกเป็นมุมเอียงลำแสงครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่าแต่ความเข้มข้นของแสงมีน้อยกว่าอีกประการหนึ่งคือในช่วงเวลาที่เที่ยงแสงอาทิตย์ส่องผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางน้อยกว่าในช่วงเวลาเช้าและเย็นซึ่งแสงเดินทางเป็นมุมเอียงมีระยะทางในการเดินทางมากกว่า ความเข้มข้นของแสงจึงถูกชั้นบรรยากาศกรองให้ลดน้อยลง

### 2.1.3 ความชื้น (Humidity)

หมายถึงปริมาณไอน้ำที่ปะปนอยู่ในอากาศที่มีอยู่ อุณหภูมิที่สูงจะสามารถรับไอน้ำได้มากกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ความชื้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

*ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity)* อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำในอากาศกับปริมาตรอากาศ มีหน่วยเป็นปอนด์

*ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH)* คือเปอร์เซ็นต์ของไอน้ำในอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับปริมาณของไอน้ำสูงสุดที่สามารถอยู่ได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% อากาศจะอยู่ในจุดอิ่มตัวไม่สามารถรับปริมาณไอน้ำได้อีก

#### 2.1.4 ลม (Wind)

ลมเป็นปัจจัยสำคัญด้านภูมิอากาศที่มีอิทธิพลต่อความรู้สึกร้อนหนาวของมนุษย์ โดยในสภาพอากาศแบบร้อนชื้นที่อุณหภูมิและความชื้นอยู่ในเกณฑ์สูง และมีไอน้ำอยู่ในอากาศปริมาณมาก จะทำให้เหงื่อที่ผิวระเหยกลายเป็นไอเพื่อระบายความร้อนออกจากร่างกายนั้นเป็นไปได้ยาก เมื่อมีลมพัดจะช่วยให้การระเหยของเหงื่อที่ผิวได้ดีขึ้น ทำให้รู้สึกเย็นลงแม้ว่าอุณหภูมิจะไม่ได้ลดลงก็ตาม นอกจากนี้ลมยังช่วยลดความรู้สึกไม่สบายจากสภาพอากาศที่มีความชื้นสูง และกระแสลมที่ไม่สม่ำเสมอจะมีผลต่อความรู้สึกเย็นสบายมากกว่ากระแสลมที่สม่ำเสมอ ข้อมูลของลมที่ต้องนำมาวิเคราะห์ในการออกแบบได้แก่[9]

ทิศทางของกระแสลม (Wind Direction)

ความเร็วลม (Wind Speed)

ความถี่ที่เกิด (Wind Frequency)

## 2.2 พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน คือการเคลื่อนที่หรือการแลกเปลี่ยนความร้อนจากจุดหรือที่ใดไปอีกที่หนึ่ง โดยปกติแล้วการถ่ายเทความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ ดังนั้นเมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของอาคารอยู่ในที่ที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในจะเกิดการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น สำหรับในประเทศไทยที่มีอุณหภูมิสูงเกือบตลอดทั้งปี การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารสามารถผ่านกรอบอาคารได้ 3 วิธี คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation)

**2.2.1 การนำความร้อน (Heat conduction)** คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน

การนำความร้อนเป็นกระบวนการ ที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ในของเหลวและของแข็งที่มีสภาพการนำความร้อนต่ำเป็นผลมาจากการสั่นของโมเลกุลข้างเคียง วัสดุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(k) [10]

อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำขึ้นอยู่กับการนำปัจจัย 4 ประการ คือ

- พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน โดยวัดตั้งฉากกับทิศทางที่ความร้อนไหล หน่วยวัดเป็น ตาราง เมตร
- ความหนาของวัสดุ คือ ระยะทางที่ความร้อนไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หน่วยวัดเป็น เมตร
- ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุด 2 จุด คือ ผิวด้านตรงข้ามกันของวัสดุ เช่น อุณหภูมิผิวภายในกับอุณหภูมิผิวภายนอก หน่วยวัดเป็นองศาเซลเซียส
- ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุที่บ่งบอกถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่บดตันที่มีเนื้อเดียว ถูกกำหนดค่าเป็น  $k$  คือจำนวน Britishthermal Unit ต่อชั่วโมง (Btu/hr) ที่ถ่ายเทผ่านวัสดุขนาด 1 ตารางฟุตที่มีความหนา 1 นิ้ว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงผ่านวัสดุนี้  $1^{\circ}\text{F}$  ภายใต้สภาวะการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Steady State Condition) หน่วยของค่า  $k$  คือ  $\text{Btu/h ft }^{\circ}\text{F}$  เทียบเท่ากับระบบเมตริก คือ  $\text{W/m }^{\circ}\text{C}$  ค่า  $k$  ที่มีค่าน้อย หมายถึงคุณสมบัติการเป็นฉนวนที่ดี

**2.2.2 การพาความร้อน (Heat convection)** เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสสารโดยอาศัยตัวกลางที่มีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ การเคลื่อนที่ของความร้อนในลักษณะการพานี้ตัวกลางจะเป็นตัวจัดการทั้งหมดเมื่อมีปริมาณความร้อนเข้าไปในของไหล ของไหลที่บรรจุความร้อนจะเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ตัวกลางที่มีความร้อนจะเคลื่อนที่ไหลเวียนไปโมเลกุลที่อุณหภูมิสูงจะลอยตัวขึ้น ส่วนโมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะตกลงมาข้างล่างทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศขึ้น อัตราการส่งผ่านความร้อนในระบบการพาส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบใหญ่ คือ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างตัวกลางกับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า สามารถใช้คุณสมบัตินี้ในการระบายอากาศให้เย็นลงได้

**2.2.3 การแผ่รังสี (Radiation)** เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่นการนำความร้อน และการพาความร้อน เป็นการเดินทางผ่านที่ว่างโดยตรงของพลังงาน พลังงานรังสีจะเดินทางในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและถูกดูดซับเข้าไป วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น ส่วนวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว ในการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุนั้น วัตถุต้องดูดความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกเสียก่อนที่จะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมาได้ในลักษณะ "การเปล่งรังสีความร้อน" ออกไป การดูดความร้อนของวัสดุแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนการสะท้อนความร้อนออกไป

ส่วนการดูดซับความร้อนไว้

การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับอาคารจะแปรเปลี่ยนรังสีคลื่นสั้นกลายเป็นความร้อนที่สะสมบนผิวอาคารแล้วเกิดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารทั้งทางผนังและหลังคา ดังนั้นกรอบอาคารมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปริมาณความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ดังนั้นหากใช้วัสดุที่มีการสะสมความร้อนน้อยก็จะช่วยให้ระบบปรับอากาศไม่ต้องทำงานหนักทำให้ช่วยประหยัดพลังงานได้

## 2.3 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ผนังแต่ละชนิดมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำแตกต่างกันเนื่องมาจากหลายองค์ประกอบ ได้แก่

ความจุความร้อนของวัสดุ

การหน่วงเหนี่ยวความร้อนของผนัง (Time Lag)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุ (U)

ความต้านทานความร้อน

### 2.3.1 ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity)

ค่าความจุความร้อนคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือพื้นที่ผิวมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศา มีหน่วยเป็น  $\text{Kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$  สำหรับกรณี que คิดค่าความจุความร้อนของวัสดุในหน่วยปริมาตร (CV) และมีหน่วยเป็น  $\text{Kcal/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  วัสดุที่มีค่าความจุความร้อนสูงจะเก็บกักความร้อนไว้ได้มากกว่า ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งช้าลง มีผลทำให้อุณหภูมิผิวของวัสดุที่มีค่าความจุความร้อนแตกต่างกันมีค่าต่างกัน โดยส่วนใหญ่วัสดุที่มีความหนาแน่นมาก (มวลสารมาก) เช่น อิฐ คอนกรีต หิน มักมีความจุความร้อนสูงกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ (มวลสารน้อย) วัสดุที่มีค่าความเก็บความร้อนสูงจะกักเก็บความร้อนไว้ได้มาก ทำให้ความร้อนที่ไหลผ่านผนังนั้นช้าลงสำหรับการคิดค่าความจุความร้อนของผนัง ( $C_w$ ) ค่าความจุความร้อนของวัสดุสามารถหาได้จากสมการ

$$C = \rho \cdot S$$

โดยที่

C = ค่าความจุความร้อนของวัสดุหรือของผนัง ( Kcal/m<sup>3</sup> °C หรือ Kcal/m<sup>2</sup> °C)

$\rho$  = ความหนาแน่นของวัสดุหรือของผนัง (kg/m<sup>3</sup> หรือ kg/m<sup>2</sup>)

S = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) หน่วยเป็น Kcal/kg °C

จากสูตรการหาค่าความจุความร้อนที่ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่นของวัสดุนั้น จะเห็นได้ว่า ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุใดๆจะมีค่าในช่วงที่แตกต่างกันไม่มากนัก ในขณะที่ค่าความหนาแน่นของวัสดุต่างๆจะมีช่วงที่แตกต่างกันมาก โดยจะขึ้นอยู่กับมวลสารของวัสดุนั้นๆเป็นหลัก จึงอาจกล่าวได้ว่า ค่าความจุความร้อนของวัสดุใดๆจะแปรผันตามมวลสารของวัสดุนั้นๆเป็นส่วนใหญ่

### 2.3.2 การหน่วงเหนี่ยวความร้อนของผนัง (Time-lag)

โดยปกติแล้ววัสดุที่มีมวลสารมากจะมีค่าการหน่วงเหนี่ยวความร้อนไว้ได้นานกว่าวัสดุที่มีมวลสารน้อยกว่า แต่ในสภาพการใช้งานจริงการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ และที่สำคัญคือปริมาณความร้อนที่มากพอที่จะทำให้วัสดุในแต่ละชั้นร้อนจนถึงจุดอิ่มตัว (Fill up the heat capacity) ก่อนที่จะถ่ายลงในชั้นต่อไป ความร้อนที่กระทำด้านนอก ผิวผนังอาคารจะเกิดการถ่ายเทความร้อน (Heat Transmission) เข้าสู่ผนังอาคารส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ดังนี้ คลื่นความร้อนจะจางลง ปริมาณความร้อนผ่านเข้ามาได้บางส่วน ปรากฏการณ์นี้ได้จากคุณสมบัติความเป็นฉนวนของวัสดุที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) ค่า U ยิ่งต่ำก็ยิ่งมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีมากขึ้นเท่านั้น

เกิดช่วงเวลาที่ได้จากการหน่วงความร้อนของวัสดุด้านตรงข้ามจะไม่ร้อนทันทีที่ถูกความร้อนกระทำด้านนอก และจะกินเวลาชั่วระยะเวลาหนึ่งแล้วแต่คุณสมบัติของวัสดุ การเก็บกักความร้อนยิ่งมากเท่าไรเวลาในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น วัสดุที่มีความจุความร้อนมากจะสามารถเก็บสะสมความร้อนไว้ในเนื้อวัสดุได้มากจึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่าวัสดุที่มีความจุความร้อนน้อย[28] โดยอัตราในการถ่ายเทความร้อนของวัสดุนั้นจะแสดงออกมาในรูปของค่าการหน่วงเวลาหรือการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{Time-lag} = 1.3 \times \text{thickness} \sqrt{(\text{heat capacity} / \text{conductivity})}$$

โดยที่

thickness = ความหนา (ฟุต)

heat capacity = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Btu/Ft<sup>3</sup> °F)

conductivity = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Btu-Ft/ hr.Ft<sup>2</sup> °F)



### 2.3.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุ

### หรืออัตราการนำความร้อนของวัสดุ

(Thermal Conductivity : k)

อัตราการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity) คือ คุณสมบัติหนึ่งของวัสดุที่บ่งบอกถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่บดตันที่มีเนื้อเดียวกัน ถูกกำหนดค่าเป็น k คือ จำนวน British Thermal Unit ต่อชั่วโมง (Btu/h) ที่ถ่ายเทผ่านวัสดุขนาด 1 ตารางฟุตที่มีความหนา 1 นิ้ว เมื่อผ่านไปวัสดุนี้ อุณหภูมิลดลง  $1^{\circ}\text{F}$  ภายใต้สภาวะการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Steady State Conditions) หน่วยของค่า k คือ Btu/h ft  $^{\circ}\text{F}$  เทียบเท่ากับระบบเมตริกคือ จำนวนวัตต์ถ่ายเทผ่านวัสดุขนาด 1 ตารางเมตรเมื่ออุณหภูมิลดลง  $1^{\circ}\text{C}$  หน่วยของระบบเมตริกคือ  $\text{W/m}^{\circ}\text{S}$

### 2.3.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Thermal Conductance : C)

อัตราการถ่ายเทความร้อนในเวลา 1 ชั่วโมงต่อความหนาวัสดุ 1 นิ้ว ค่า Conductance กำหนดเป็นค่า C เมื่ออุณหภูมิลดลง  $1^{\circ}\text{F}$  หน่วยของค่า C คือ Btu/h ft  $^{\circ}\text{F}$  เทียบเท่ากับระบบเมตริกคือ  $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  สูตรในการคำนวณคือ

$$C = K / \text{ความหนาวัสดุ (m)}$$

### 2.3.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Thermal Transmittance หรือ U-Value)

สูตรในการคำนวณคือ

$$U = 1 / \Sigma R$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม เป็นค่าที่บอกความสามารถของวัสดุในการยอมให้ความร้อนถ่ายเทผ่านเนื้อวัสดุจากฟิล์มอากาศด้านที่ติดผิวด้านหนึ่งไปยังฟิล์มอากาศด้านที่ติดผิวผนังอีกด้านหนึ่งของวัสดุ มีค่าเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การต้านทานความร้อน (R) มีหน่วยเป็น  $\text{W/m}^2$   $^{\circ}\text{C}$  โดยเราสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าผนังได้โดยการคำนวณดังสูตร เมื่อทราบค่าตัวแปรทั้งสามจะสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = U * A * \Delta T \quad \dots\dots\dots(1)$$

และ

$$Q = U * A * CLTD \quad \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่

$U$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (BTU/hr.SqFt.F°)

$A$  = พื้นที่ของส่วนที่ถ่ายเทความร้อน (SqFt.)

$\Delta T$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก (F°)

CLTD = ภาวะความแตกต่างความร้อนเทียบเท่า หรือ Cooling Load Temperature Difference (F°)

สมการที่ 1 จะใช้ในกรณีที่ไม่มีอิทธิพลของแสงแดดมาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและภายในมีค่าคงที่ (Steady State Condition) หรือในอีกกรณี คือเพื่อความสะดวกในกรณีที่ให้มีอัตราเสี่ยงต่ำในการคำนวณค่า Heat Load ของอาคารเมืองหนาว ซึ่งถือว่าอิทธิพลจากมวลสาร การหน่วงเวลา หรืออื่นๆ เป็นเสมือนค่า Safety Factor ในการคำนวณ

สมการที่ 2 จะใช้กรณีที่มามีอิทธิพลของแสงแดด ค่า  $\Delta T$  ถูกเปลี่ยนเป็นค่า CLTD เพื่อปรับให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด เพราะในสภาพความเป็นจริงความแตกต่างของอากาศระหว่างภายนอกกับภายในไม่เคยคงที่ จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนไปตลอดเวลา การคำนวณ Peak Load ของอาคารจึงใช้สมการที่ 2 ใช้ค่า CLTD แทน  $\Delta T$  ค่า CLTD เป็นค่าที่ดัดแปลงมาจาก  $\Delta T$  แต่ปรับให้เข้ากับอิทธิพลจากภายนอกหลายองค์ประกอบ เช่น เวลา วัน เดือน และเขตละติจูดที่เกิด Peak Load มวลสารและสี การหน่วงของเวลา ตลอดจนผลกระทบของแสงแดด อุณหภูมิและสภาพแวดล้อม[11]

การใช้กล่องทดลองตามแบบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการคายความร้อนวัสดุ เนื่องจากขนาดของกล่องเป็นการจำลองการใช้จริงด้วยขนาดที่เล็กกลง ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการคายความร้อนระหว่างวัสดุต่างๆจึงต้องใช้  $Q$  หรือ ปริมาณความร้อนในการเปรียบเทียบไม่ใช่อุณหภูมิที่เก็บได้โดยตรง การทดลองด้วยกล่องทดลองทำในระบบปิดซึ่งอุณหภูมิภายนอกและภายในกล่องคงที่ ไม่มีอิทธิพลจากแสงอาทิตย์

สำหรับการหาปริมาณความร้อนสามารถหาได้โดยสูตรดังต่อไปนี้

$$Q = CFM(1.08)\Delta T$$

โดยที่

$Q$  = ปริมาณความร้อนที่ถูกระบายโดยอากาศ(Btu/h)

$CFM$  = ปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศที่ใช้(ft<sup>3</sup>/minute)

$\Delta T$  = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิช่องอากาศเข้าและอุณหภูมิช่องระบายอากาศออก(F°)

## 2.4 หลักการวัดค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity)

วัสดุใดมีประสิทธิภาพการนำความร้อนดีหรือไม่นั้นเราสามารถพิจารณาได้จากค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity, K-Value) ซึ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุนั้นๆ โดยวัดค่าอัตราปริมาณความร้อนไหลต่อหน่วยเวลาจากจุดระยะทางหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ไหลผ่านมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K) นอกจากนี้ความเป็นฉนวนกันความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance, R-Value) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของความหนาต่อค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ มีหน่วยเป็นตารางเมตร - เคลวิน ต่อวัตต์ (m<sup>2</sup>.K/W) ฉนวนกันความร้อนที่ดีต้องมีค่าสภาพนำความร้อนที่ต่ำ และมีค่าความต้านทานความร้อนสูง [12]

ค่าสภาพนำความร้อน (k) สามารถคำนวณได้จาก

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad \text{หน่วยวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K) (1)}$$

โดย k = สภาพนำความร้อน หน่วยวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m.K)  
 Q = ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง หน่วยวัตต์(W)  
 A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน หน่วยตารางเมตร(m<sup>2</sup>)  
 L = ความหนาของชิ้นทดสอบ หน่วยเมตร(m)  
 ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ หน่วยเคลวิน (K)

ค่าความต้านทานความร้อน (R) สามารถคำนวณได้จาก

$$R = \frac{L}{k} \quad \text{หน่วยตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์(m<sup>2</sup>.K/W)}$$

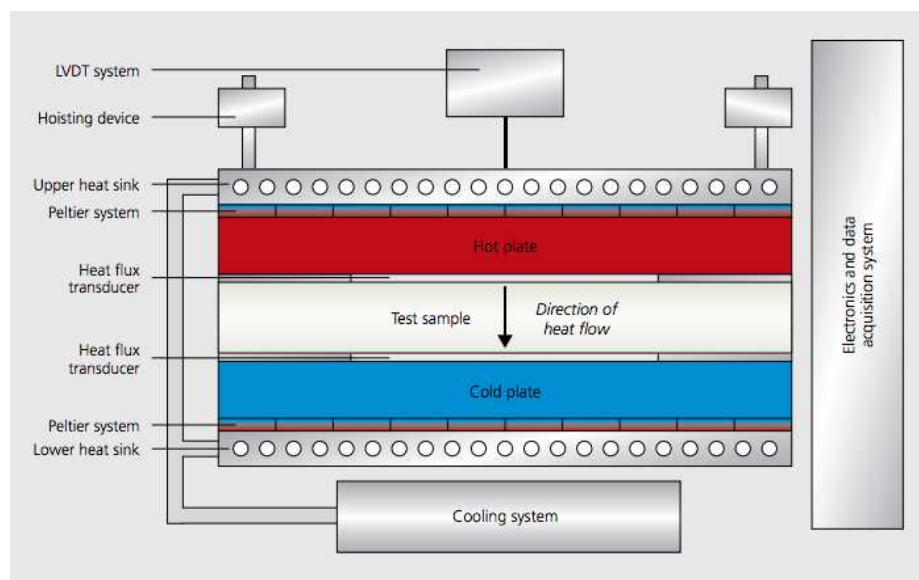
และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U-value) คือ ส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อน ดังแสดงในสมการ

$$U = \frac{1}{R} \quad \text{หน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน (W/m<sup>2</sup>.K)}$$

### การทดสอบแบบ Heat Flow Meter

การทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อนแบบ Heat Flow Meter ตามมาตรฐาน ASTM C 518, ISO 8301, BSEN 12667 และ JISA 1412 [11] ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน คือพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะนำมาไว้ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ  $22 \pm 5^{\circ}\text{C}$  และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 10$  อย่างน้อย 24 ชั่วโมงโดยมวลของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบใส่เข้าเครื่องทดสอบโดยวางอยู่ระหว่างแผ่นความร้อนและแผ่นความเย็น ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.1 รูปตัดแสดงลักษณะการทำงานของเครื่องวัดแบบ Heat Flow Meter [13]



รูปที่ 2.2 เครื่อง NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda ที่ใช้หลักการแบบ Heat Flow Meter [13]

จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิให้แตกต่างกัน ( $\Delta T$ ) ระหว่างแผ่นอุณหภูมิความร้อน และแผ่นความเย็น ภายในเครื่องทดสอบมีฉนวนล้อมรอบตลอดแนวความหนาของแผ่นอุณหภูมิและขึ้นทดสอบเพื่อให้ป้องกันการสูญเสียความร้อน เครื่องจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ที่ติดอยู่กับผิวของแผ่นอุณหภูมิทั้งสองโดยการวัดการไหลของความร้อนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นทั้งสองเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady-state condition) [12]

เครื่อง NETZSCH HFM436 Lambda ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ Heat Flow Meter ที่ใช้ทดสอบวัสดุต้นแบบในการวิจัยนี้ ตัวอย่างของวัสดุที่นำไปทดสอบต้องมีขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และความหนาอยู่ในช่วง 6-80 มิลลิเมตร [13]

## 2.5 ลักษณะทางกายภาพของยางพารา

ยางพารา เป็นไม้ยืนต้น มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิลและเปรู ทวีปอเมริกาใต้ โดยชาวพื้นเมืองเรียกว่า "เกาชู" (Cao Tchu) แปลว่าต้นไม้ร้องไห้ จนถึงปี พ.ศ. 2313 (1770) โจเซฟ 프리สตัดลีย์ พบว่ายางสามารถนำมาลบรอยดำของดินสอได้ จึงเรียกว่ายางลบหรือตัวลบ (Rubber) ซึ่งเป็นศัพท์ใช้ในอังกฤษและเนเธอร์แลนด์เท่านั้น ศูนย์กลางของการเพาะปลูกและซื้อขายยางในอเมริกาใต้แต่ดั้งเดิมอยู่ที่รัฐปารา (Pará) ของบราซิล ยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า ยางพารา [4]

ยางพารามีส่วนประกอบต่างๆดังนี้

### 2.5.1 ราก เป็นระบบรากแก้ว

### 2.5.2 ลำต้น กลมตรง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

- เนื้อไม้ ยางพาราจัดเป็นไม้เนื้ออ่อน เนื้อไม้มีสีขาวปนเหลืองอยู่ด้านในลำต้น
- เนื้อเยื่อเจริญ เป็นเยื่อบางๆอยู่โดยรอบ เนื้อไม้มีหน้าที่สร้างความเจริญเติบโตให้แก่

ต้นยาง

- เปลือกไม้ เป็นส่วนที่อยู่ถัดจากเยื่อเจริญออกมาด้านนอกสุด ช่วยป้องกันอันตรายที่จะมากระทบต้นยาง เปลือกของต้นยางมีความสำคัญต่อเกษตรกรชาวสวนยางมาก เนื่องจากท่อน้ำยางจะอยู่ในส่วนนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเปลือกด้านในที่ติดอยู่กับเยื่อเจริญ จะมีท่อน้ำยางอยู่มากที่สุด

2.5.3 ใบ โดยทั่วไป 1 ก้านจะมีใบย่อย 3 ใบ มีหน้าที่หลักในการปรุงอาหาร หายใจ และคายน้ำ ใบยางจะแตกออกมาเป็นขึ้นๆเรียกว่า ฉัตร ระยะเวลาเริ่มแตกฉัตรจนถึงใบในฉัตรนั้นแก่เต็มที่ จะใช้เวลาประมาณ 2-3 เดือน ยางจะผลัดใบในฤดูแล้งของทุกปี ยกเว้นยางต้นเล็กที่ยังไม่แตกกิ่งก้านสาขา หรืออายุยังไม่ถึง 3 ปีจะไม่ผลัดใบ

### 2.5.4 ดอก มีลักษณะเป็นช่อ มีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกัน ดอกยางทำ

หน้าที่ผสมพันธุ์ โดยเป็นการผสมพันธุ์แบบเปิด ดอกยางจะออกตามปลายกิ่งของยางหลังจากที่ต้นยางผลัดใบ

**2.5.5 ผล** มีลักษณะเป็นพู ในแต่ละพูจะมีเมล็ดอยู่ภายใน ผลอ่อนมีสีเขียว ผลแก่มีสีน้ำตาล และมีลักษณะแข็ง

**2.5.6 เมล็ด** มีสีน้ำตาลลายขาวคล้ายสีของเมล็ดละหุ่ง ยาวประมาณ 2-2.5 เซนติเมตร กว้างประมาณ 1.5-2.5 เซนติเมตร หนักประมาณ 3-6 กรัม เมล็ดยางเมื่อหล่นใหม่ๆจะมีเปอร์เซ็นต์การงอกสูงมาก แต่เปอร์เซ็นต์การงอกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในสภาพปกติเมล็ดยางจะรักษาความสามารถในการงอกไว้ได้เพียง 20 วันเท่านั้น

**2.5.7 น้ำยาง** เป็นของเหลวสีขาวถึงขาวปนเหลืองข้นขึ้นอยู่กับน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง ในน้ำยางที่มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง และส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง ตามปกติในน้ำยางจะมีเนื้อยางประมาณ 25-45%

เมื่อเปรียบเทียบไม้ยางพารากับไม้สัก น้ำหนักและความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก จะอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน จากข้อมูลของการอบไม้ของโรงงานอบไม้พบว่า การอบไม้ยางพารา หนา 2 นิ้ว จะใช้เวลา 10-12 วันซึ่งจะเร็วกว่าการอบไม้สักประมาณ 2 เท่า การแตกเสียหายจากการอบมีน้อย ในด้านการหดตัวของไม้ยางพาราในด้านรัศมีและด้านสัมผัส จะใกล้เคียงกับไม้สัก และการคงรูปขณะใช้งานของไม้ยางพาราก็อยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ ความยากง่ายในการตกแต่งด้วยเครื่องจักร ไม้ยางพารา นับเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง ซึ่งสามารถแปรรูป หรือเลื่อยตัด หรือไสได้ง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ไม้ยางพาราเป็นไม้ปลูกอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมแก่การนำมาแปรรูปเพื่อใช้ในการก่อสร้าง[3, 14] อีกทั้งการใช้วัสดุในท้องถิ่นยังเป็นการช่วยลดผลกระทบต่อธรรมชาติจากการก่อสร้างได้อีกด้วย

## 2.6 การปลูกยางพาราในประเทศไทย

การปลูกยางในประเทศไทยไม่มีการบันทึกเป็นหลักฐานที่แน่นอน แต่คาดว่าน่าจะเริ่มมีการปลูกในช่วงประมาณปี พ.ศ. 2442-2444 ซึ่งพระยารัษฎานุประดิษฐ์ มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) เจ้าเมืองตรังในขณะนั้น ได้นำเมล็ดยางพารามาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรังเป็นครั้งแรก ซึ่งชาวบ้านเรียกต้นยางชุดแรกนี้ว่า "ต้นยางเทศา" และต่อมาได้มีการขยายพันธุ์ยางมาปลูกในบริเวณจังหวัดตรังและนราธิวาส ในปี พ.ศ. 2454 ได้มีการนำพันธุ์ยางมาปลูกในจังหวัดจันทบุรีซึ่งอยู่ทางภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยหลวงราชไมตรี (ปุม ปุณศรี) เป็นผู้นำพันธุ์ยางมาปลูก และนับจากนั้นเป็นต้นมาได้มีการขยายพันธุ์ปลูกยางพาราไปทั่วทั้ง 14 จังหวัดในภาคใต้ และ 3 จังหวัดในภาคตะวันออก นอกจากนี้ยังมีการขยายพันธุ์ยางมาปลูกในภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 เป็นต้นมา ยางพาราก็กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และมีการ

ผลิตเป็นอันดับหนึ่งของโลก

ยางพาราประเภทยางดิบ ผลิตภัณฑ์ยาง และไม้ยางพารา สามารถทำรายได้การส่งออกเป็นอันดับสองของประเทศ ยางพาราจึงถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และมีการส่งออกยางธรรมชาติมาเป็นอันดับหนึ่งของโลกมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 ซึ่งในปี พ.ศ. 2543 มีผลผลิตจากยางธรรมชาติประมาณ 2.4 ล้านตัน มีมูลค่าทั้งสิ้นประมาณ 124,000 ล้านบาท เดิมพื้นที่ที่มีการปลูกยางส่วนใหญ่จะอยู่ในภาคใต้และภาคตะวันออก แต่ในปัจจุบันมีการขยายการปลูกเพิ่มขึ้นไปยังภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันตก โดยเฉพาะยางพาราจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่างในเขตจังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดศรีสะเกษ จัดเป็นยางพาราคุณภาพดีไม่ต่างจากแหล่งผลิตเดิมในเขตภาคใต้และภาคตะวันออก พื้นที่ที่เหมาะสมแก่การปลูกยางทั่วประเทศมีทั้งหมด 55.1 ล้านไร่ แต่พื้นที่ปลูกจริงมีประมาณ 12.4 ล้านไร่เท่านั้น

ประเทศไทยปัจจุบันมีพื้นที่ปลูกยางพารามากถึง 12.4 ล้านไร่ ซึ่งปลูกมาเป็นอันดับสองรองจากประเทศอินโดนีเซีย โดยปลูกมากในภาคใต้ โดยมากถึง 85.3% ของพื้นที่ทั้งหมด ใน พ.ศ. 2454 ได้ขยายการปลูกมาทางจังหวัดจันทบุรี ทางภาคตะวันออกของไทย และขยายตัวมาทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือในปี พ.ศ. 2534 [3]

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีการโค่นล้มโดยมีการปลูกทดแทนประจำ เนื่องจากเมื่ออายุต้นประมาณ 25 ปีก็จะไม่สามารถให้น้ำยางที่มีคุณภาพได้แล้ว ปริมาณไม้จึงมีมากพอทุกปีเนื่องจากมีการโค่นสวนยางประมาณ 3 แสนกว่าไร่ แล้วปลูกทดแทน ขึ้นมาใหม่ คิดเป็นเนื้อไม้ประมาณ 8 ล้านลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.1 พื้นที่ปลูกยางพาราในภาคใต้

จังหวัด	พื้นที่ปลูกยางพารา (ไร่)	
	พื้นที่ปลูก	พื้นที่ยางอายุมากกว่า 6 ปี
1. สุราษฎร์ธานี	1,871,907	1,674,267
2. นครศรีธรรมราช	1,447,643	1,136,190
3. สงขลา	1,444,302	1,222,119
4. ตรัง	1,310,188	1,109,178
5. ยะลา	1,046,872	892,493
6. นราธิวาส	1,005,871	896,029
7. พังงา	757,025	541,437
8. กระบี่	625,231	516,498
9. พัทลุง	538,477	470,200
10. ชุมพร	464,622	391,891
11. ปัตตานี	295,185	255,358
12. สตูล	290,019	223,432
13. ระนอง	150,529	100,667
14. ภูเก็ต	91,787	84,417
รวมภาคใต้	11,339,658	9,514,176

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, พื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศไทย : แหล่งที่มา



ตารางที่ 2.2 พื้นที่ปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

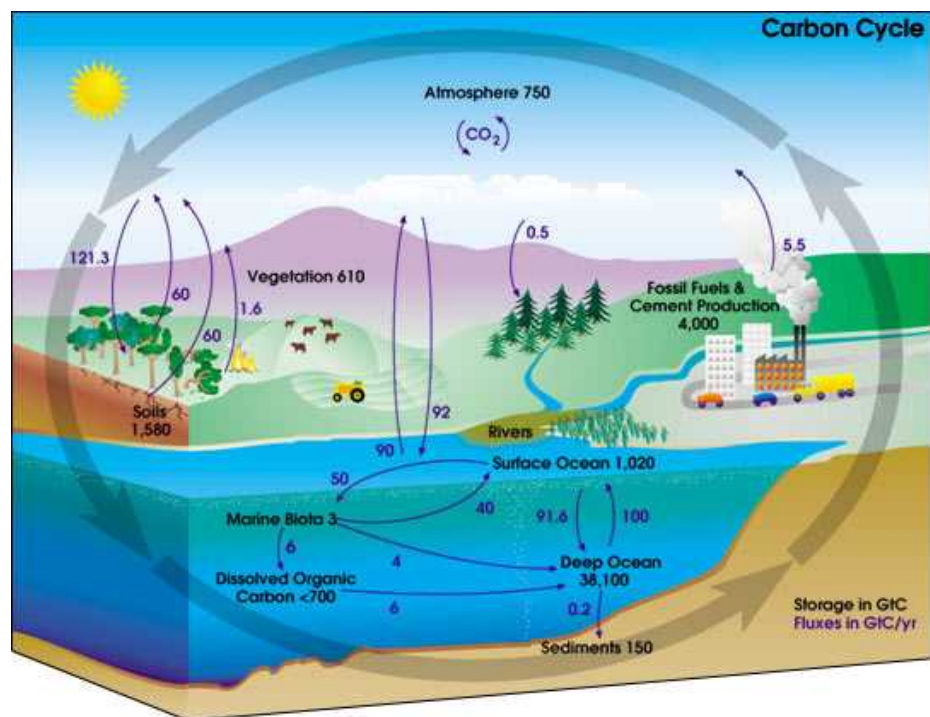
จังหวัด	พื้นที่ปลูกยางพารา (ไร่)	
	พื้นที่ปลูก	พื้นที่ยางอายุมากกว่า 6 ปี
1. หนองคาย	637,824	300,671
2. เลย	382,497	39,365
3. อุดรธานี	295,000	52,000
4. อุดรราชธานี	214,856	54,144
5. บุรีรัมย์	178,331	75,956
6. ศรีสะเกษ	176,096	49,162
7. สกลนคร	171,665	40,286
8. นครพนม	140,517	41,544
9. กาฬสินธุ์	137,398	19,838
10. มุกดาหาร	110,000	25,633
11. หนองบัวลำภู	94,288	7,762
12. สุรินทร์	90,686	32,578
13. ยโสธร	49,657	14,969
14. อำนาจเจริญ	42,418	4,635
15. ขอนแก่น	38,507	8,336
16. ชัยภูมิ	31,431	7,012
17. นครราชสีมา	25,833	4,978
18. ร้อยเอ็ด	24,657	8,082
19. มหาสารคาม	3,881	2,071
รวมภาคใต้	2,845,542	789,031

ที่มา : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, พื้นที่ปลูกยางพาราในประเทศไทย : แหล่งที่มา

## 2.7 กระบวนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Emissions)

### 2.7.1 วัฏจักรคาร์บอน (Carbon Life-Cycle)

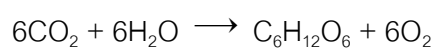
วัฏจักรคาร์บอนเป็นวัฏจักรชีวธรณีเคมี เกิดจากคาร์บอนถูกแลกเปลี่ยนระหว่างสิ่งมีชีวิต พื้นดิน น้ำ และชั้นบรรยากาศของโลก คาร์บอนเป็นธาตุสำคัญธาตุหนึ่งของสิ่งมีชีวิต เป็นองค์ประกอบประมาณ 50% ของเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช การหมุนเวียนของคาร์บอนในระบบนิเวศแบ่งได้เป็น 3 แบบ ตามระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนเวียนให้ครบรอบคือ ระยะสั้น ระยะกลางและระยะยาว [15]



รูปที่ 2.3 แผนภูมิของวัฏจักรคาร์บอน

#### การหมุนเวียนระยะสั้น

เป็นการหมุนเวียนของคาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจเริ่มจากพืชตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศมาสังเคราะห์เป็นสารอินทรีย์คาร์บอนจากบรรยากาศจึงเคลื่อนย้ายเข้าสู่พืช เกิดขึ้นได้ทั้งบนบกและในน้ำ ดังสมการ



ในการสังเคราะห์ด้วยแสง พืชจะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเคมี บางส่วนถูกใช้ไป บางส่วนถูกเก็บสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งจะถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร คาร์บอนเหล่านี้

จะกลับสู่บรรยากาศโดยการหายใจ และการย่อยสลายหลังจากสิ่งมีชีวิตตายลงไป การย่อยสลายนี้อาจจะได้คาร์บอนในรูปคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนกลับคืนสู่บรรยากาศ โดยการย่อยสลายของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้สองสถานะ คือ สถานะที่มีและไม่มีออกซิเจน ในสถานะที่มีออกซิเจน คาร์บอนในสารอินทรีย์จะถูกปล่อยออกมาในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนในสถานะไม่มีออกซิเจน คาร์บอนถูกปล่อยออกมาในรูปก๊าซมีเทน

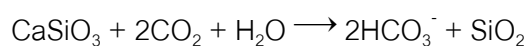
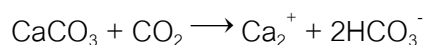
คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นรูปหนึ่งของคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีแสงของมีเทน หรือจากการเผาไหม้ของมวลชีวภาพโดยปกติ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารพิษต่อสิ่งมีชีวิต แต่ก็มีสิ่งมีชีวิตบางกลุ่มใช้คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแหล่งพลังงานได้ โดยการเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะที่มีออกซิเจน ส่วนในสถานะไม่มีออกซิเจนจะเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซมีเทน หรือเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นกรดอะซิติกแล้วแต่ชนิดของแบคทีเรีย [15]

#### การหมุนเวียนระยะกลาง

การหมุนเวียนของคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ในดินตะกอน ถ่านหิน น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ เกิดจากคาร์บอนในรูปสารอินทรีย์ในพืชและสัตว์ที่ตายแล้ว ถูกทับถมจนกลายเป็นถ่านหิน คาร์บอนในรูปนี้จะกลับคืนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศโดยการเผาไหม้

#### การหมุนเวียนระยะยาว

เป็นการหมุนเวียนของคาร์บอนผ่านระบบโครงสร้างของโลกทั้งในแผ่นดิน มหาสมุทรและหินปูน องค์ประกอบสำคัญของหินปูนคือแคลเซียมคาร์บอเนต หินปูนเป็นแหล่งสะสมคาร์บอนที่สำคัญของพื้นโลก การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและการกัดเซาะจะชะแคลเซียม ซิลิกา และคาร์บอนออกจากหินปูนดังสมการ



สิ่งที่ได้จากการกัดเซาะจะลงสู่แม่น้ำและไปยังมหาสมุทร  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{HCO}_3^-$  บางส่วนจะถูกไปใช้ในการสร้างโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ เช่นเปลือกหอย บางส่วนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศ เมื่อสิ่งมีชีวิตตาย จะถูกย่อยสลายได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลึก ซึ่งจะกลับคืนสู่บรรยากาศเมื่อน้ำในบริเวณนั้นม้วนตัวขึ้นมา [16]

### 2.7.2 การกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sink)

วัฏจักรคาร์บอนที่เกิดขึ้นบนโลก ที่มีการแลกเปลี่ยนสสารตลอดเวลา ทั้งจากบรรยากาศสู่พื้นโลก หรือจากพื้นโลกสู่น้ำทะเล และจากน้ำทะเลขึ้นสู่บรรยากาศ วนเวียนกันอยู่เช่นนี้เป็นวัฏจักร ซึ่งปกตินั้นธรรมชาติจะสะสมไว้ในตัวเองระดับหนึ่ง และจะเริ่มมีการแลกเปลี่ยนต่อเมื่อต้องปรับตัวเองให้เกิดความสมดุล ดังนั้นการกักเก็บคาร์บอนของธรรมชาติจึงอยู่ในทุกที่ที่เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหนึ่งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน และธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต จึงมีคาร์บอนอยู่มากมายและสามารถเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างร่างกายของสิ่งมีชีวิตและอากาศ ทั้งนี้เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเสียจากการหายใจของสิ่งมีชีวิต แต่เป็นแหล่งอาหารของพืช เมื่อคาร์บอนแยกตัวออกจากอากาศจะไปรวมอยู่ในสถานที่หนึ่งซึ่งเรียกว่า Carbon Sink ซึ่ง Carbon Sink ที่ใหญ่ที่สุดในโลก คือ ป่าและมหาสมุทร

Natural Resources Canada (2007) บัญญัติความหมายของคำว่า Carbon Sink ไว้ว่า เป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนจากส่วนต่างๆในวัฏจักรคาร์บอนที่เกิดขึ้น และจะปลดปล่อยส่วนที่เหลือจากการกักเก็บขึ้นสู่บรรยากาศ แหล่งกักเก็บคาร์บอนตามธรรมชาติ เช่น ป่าไม้ที่ยังมีชีวิต แต่เมื่อต้นไม้ตายและเริ่มเน่าเปื่อย ก็จะเปลี่ยนจากผู้กักเก็บคาร์บอนเป็นผู้ปลดปล่อยแทน

U.S. Environmental Protection Agency (2001) ได้นิยามความหมายของศัพท์คำว่า Carbon Sink ไว้ว่า อ่างกักเก็บคาร์บอนมีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอน และช่วยดูดซับก๊าซเรือนกระจกได้โดยเก็บไว้ในรูปของคาร์บอน โดยป่าและมหาสมุทรเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่ใหญ่ที่สุด และมีคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องคือ Carbon Sequestration มีความหมายถึง การปลดปล่อยและเก็บคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ต้นไม้ และพืชพรรณต่างๆมีการแลกเปลี่ยนก๊าซโดยดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เก็บคาร์บอนไว้ และปลดปล่อยออกซิเจนออกมาในรูปของก๊าซ พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิลก็มีการกักเก็บคาร์บอนไว้เช่นกัน และจะไม่ปลดปล่อยออกมาจนกระทั่งมีการเผาไหม้

## 2.8 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA)

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment; LCA) ของผลิตภัณฑ์กระบวนการผลิตหรือการบริการ เป็นการศึกษาถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ หรือของกระบวนการผลิต หรือของการบริการนั้นๆ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization; ISO) ได้นิยามความหมายของ LCA ไว้ในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ว่า “เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออกรวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักร” ข้อมูลที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิต สามารถนำมาใช้ศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรือของ

กระบวนการผลิต หรือของการบริการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น (EcoDesign) เพื่อเตรียมความพร้อมในการรองรับมาตรการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมของกลุ่มประเทศในสหภาพยุโรปและประเทศพัฒนาอื่นๆ ซึ่งกลุ่มอุตสาหกรรมที่จะได้รับผลกระทบจากมาตรการเหล่านี้เป็นกลุ่มแรกคือกลุ่มอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างของมาตรการต่างๆที่จะบังคับใช้ในอนาคตอันใกล้ เช่น ระเบียบของสหภาพยุโรปว่าด้วยสารเคมี (Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals; REACH) ระเบียบว่าด้วยการจำกัดการใช้สารอันตรายบางชนิดในผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment; RoHS) ระเบียบที่ให้ผู้ผลิตต้องรับผิดชอบในการเรียกคืนซากสินค้าที่หมดอายุ (Waste Electrical & Electronic Equipment; WEEE) และกฎหมายการแปรรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ของผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนของประเทศญี่ปุ่น [17]

#### วัฏจักรชีวิตของสถาปัตยกรรม

ทุกขั้นตอนของสิ่งมีชีวิตบนโลกนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลายประการ ทุกสิ่งย่อมมีกระบวนการเกิดจนกระทั่งดับสลาย ดังนั้นในการเกิดสถาปัตยกรรมขึ้นนั้นจึงประกอบด้วยขั้นตอนที่หลากหลาย ได้แก่ ขั้นตอนการได้มาของวัสดุ การผลิต การก่อสร้าง ช่วงเวลาใช้งานอาคาร และการทำลายวัสดุ ตั้งแต่ในขั้นตอนการผลิตวัสดุชนิดหนึ่งๆต้องใช้พลังงานในขั้นตอนการผลิต รวมไปถึงการขนส่งถึงสถานที่ก่อสร้าง

ตารางที่ 2.3 แสดงการใช้พลังงาน และปริมาณการปล่อยคาร์บอนของวัสดุต่างๆ

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY							
Materials	Embodied Energy & Carbon Data						Comments
	EE - MJ/kg			EC - kgCO <sub>2</sub> /Kg			
	EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon						
<b>Aggregate</b>							
General	0.1			0.005			
<b>Aluminium</b>							
General	155			8.24			13.8 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Assumes UK ratio of 25.6% extrusions, 55.7% Rolled & 18.7% castings. Worldwide recycled content of 33%.
Virgin	218			11.46			20.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included).
Recycled	28.8			1.69			
Cast Products	159			8.28			14.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Worldwide recycled content of 33%.
Virgin	226			11.70			21.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included).
Recycled	24.5			1.35			
Extruded	154			8.16			13.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Worldwide recycled content of 33%.
Virgin	214			11.20			20.2 MJ/kg Feedstock Energy (Included).
Recycled	34.1			1.98			
Rolled	155			8.26			13.8 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Worldwide recycled content of 33%.
Virgin	217			11.50			20.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included).
Recycled	27.8			1.67			
<b>Asphalt</b>							
General	2.60			0.045			1.91 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Road & Pavement	2.41			0.14			0.82 MJ/kg Feedstock Energy (Included), reference 123
EXAMPLE: Road	2,672 MJ/Sqm			134 KgCO <sub>2</sub> /Sqm			906 MJ/Sqm Feedstock Energy (Included)
<b>Bitumen</b>							
General	47			0.48			37.7 (?) MJ/kg Feedstock Energy (Included). Feedstock taken as typical energy content of Bitumen, uncertain carbon dioxide emissions
<b>Brass</b>							
General	44.00			2.42 (?)			poor data availability, largely dependent upon ore grade. Very poor carbon data, uncertain of estimates, which were taken from average quoted emissions per MJ energy
Virgin	80.00			4.39 (?)			
Recycled	20.00			1.1 (?)			
<b>Bricks</b>							
General (Common Brick)	3.00			0.22			
EXAMPLE: Single Brick	8.4 MJ per brick			0.62 kgCO <sub>2</sub> per brick			Assuming 2.8 kg per brick
Facing Bricks	8.20			0.52			Very small sample size
EXAMPLE: Single Facing Brick	23 MJ per brick			1.46 kgCO <sub>2</sub> per brick			Assuming 2.8 kg per brick
Limestone	0.85			?			
<b>Bronze</b>							
General	77.00			4.1 (?)			Reference 155
<b>Carpet</b>							
General Carpet	74.40			3.89			For per square meter see material profile
Felt (Hair and Jute) Underlay	18.60			0.96			Reference 77
Nylon	67.9 to 149			3.55 to 7.31			Very difficult to select value, few sources, large range, value includes feedstock's
Polyethylterephthalate (PET)	106.50			5.55			includes feedstock's
Polypropylene	95.40			5.03			includes feedstock's, for per square meter see material profile
Polyurethane	72.10			3.76			includes feedstock's
Rubber	67.5 to 140			3.91 to 8.11			
Saturated Felt Underlay (impregnated with Asphalt or tar)	31.70			1.70			Reference 77
Wool	106.00			5.48			For per square meter see material profile, References 57,166 & 234
<b>Cement</b>							
General (Typical)	4.6			0.83			Portland Cement, CEM I
Fibre Cement	10.90			2.11			
Mortar (1:3 cement:sand mix)	1.40			0.213			
Mortar (1:4)	1.21			0.177			
Mortar (1:6)	0.99			0.136			
Mortar (1:1/2:4 1/2 Cement:Lime:Sand mix)	1.37			0.196			Values estimated from the ICE Cement, Mortar & Concrete Model
Mortar (1:1:6 Cement:Lime:Sand mix)	1.18			0.163			
Mortar (1:2:9 Cement:Lime:Sand mix)	1.09			0.143			
Soil-Cement	0.85			0.14			
% Cementitious Replacement	0%	25%	50%	0%	25%	50%	Note 0% is a 'standard' CEM I cement
General (with Fly Ash Replacement)	4.6	3.52	2.43	0.83	0.62	0.42	Portland Cement
General (with Blast Furnace Slag Replacement)	4.6	3.81	3.01	0.83	0.64	0.45	Portland Cement

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY							
Materials	Embodied Energy & Carbon Data						Comments
	EE - MJ/kg			EC - kgCO <sub>2</sub> /Kg			
							EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon
<b>Ceramics</b>							
General	10.00			0.65			Very Large data range, difficult to select best value.
Fittings	20.00			1.05			Reference 1
Refractory products	5.50			0.51			
Sanitary Products	29.00			1.48			
Tile	9.00			0.59			Very large data range
<b>Clay</b>							
General (Simple Baked Products)	3.00			0.22			General simple baked clay products (inc. terracotta)
Tile	6.50			0.46			
Vitrified clay pipe DN 100 & DN 150	6.19			0.45			
Vitrified clay pipe DN 200 & DN 300	7.03			0.49			
Vitrified clay pipe DN 500	7.86			0.53			
<b>Concrete</b>							
General	0.95			0.130			Use of a specific concrete specification is preferred to gain greater accuracy.
NOMINAL PROPORTIONS METHOD (Volume), Proportions from BS 8500:2006 (ICE Cement, Mortar & Concrete Model Calculations)							
1:1:2 Cement:Sand:Aggregate	1.39			0.209			(High strength)
1:1.5:3	1.11			0.159			(used in floor slab, columns & load bearing structure)
1:2:4	0.95			0.129			(Typical in construction of buildings under 3 storeys)
1:2.5:5	0.84			0.109			
1:3:6	0.77			0.096			(non-structural mass concrete)
1:4:8	0.69			0.080			
REINFORCED CONCRETE							
For reinforcement add to selected coefficient for each 25kg rebar	0.26			0.018			Add for each 25 kg Steel per m3 concrete
EXAMPLE: Reinforced RC30 (below)	2.12 (1.08 + 0.26 * 4)			0.241 (0.153 + 0.018 * 4)			
CONCRETE BLOCKS (ICE CMC Model Values)							
Block - 8 MPa Compressive Strength	0.60			0.061			Estimated from concrete block mix proportions.
Block - 10 MPa	0.67			0.074			
Block -12 MPa	0.71			0.080			
Block -13 MPa	0.81			0.098			
Autoclaved Aerated Blocks (AAC's)	3.50			0.28 to 0.375			Not ICE CMC model results
MISCELLANEOUS VALUES							
Prefabricated Concrete	2.00			0.215			Literature resources suggest this value, unknown why so high!
Fibre-Reinforced	7.75			0.450			
Concrete Road & Pavement	1.24			0.127			
EXAMPLE Road	2,085 MJ/Sqm			187.7 KgCO <sub>2</sub> /Sqm			
Wood-Wool Reinforced	2.08			-			Reference 12
% Cement Replacement - Fly Ash	0%	25%	50%	0%	25%	50%	Note 0% is a standard concrete
GEN 0	0.64	0.57	0.50	0.071	0.058	0.046	Compressive Strength C6/8 MPa
GEN 1	0.77	0.66	0.56	0.095	0.077	0.058	C8/10; Mass Concrete, mass fill, mass foundations
GEN 2	0.81	0.70	0.58	0.103	0.083	0.062	C12/15
GEN 3	0.85	0.73	0.60	0.112	0.089	0.066	C16/20
RC20	0.95	0.80	0.65	0.128	0.102	0.075	C20/25
RC25	0.99	0.83	0.67	0.136	0.108	0.079	C25/30
RC30	1.08	0.90	0.72	0.153	0.120	0.087	C30/37; (Strong) foundations
RC35	1.13	0.94	0.74	0.161	0.126	0.091	C35/45; Ground floors
RC40	1.17	0.97	0.77	0.169	0.132	0.096	C40/50; Structural purposes, in situ floors, walls, superstructure
RC50	1.41	1.15	0.88	0.212	0.165	0.117	C50
PAV1	1.04	0.87	0.70	0.145	0.114	0.083	C25/30
PAV2	1.08	0.90	0.72	0.153	0.120	0.087	C28/35
% Cement Replacement - Blast Furnace Slag	0%	25%	50%	0%	25%	50%	Note 0% is a standard concrete
GEN 0	0.64	0.59	0.54	0.071	0.059	0.048	Compressive Strength C6/8 MPa
GEN 1	0.77	0.69	0.62	0.095	0.078	0.061	C8/10; Mass Concrete, mass fill, mass foundations
GEN 2	0.81	0.70	0.65	0.103	0.083	0.065	C12/15
GEN 3	0.85	0.76	0.67	0.112	0.091	0.070	C16/20
RC20	0.95	0.84	0.73	0.128	0.103	0.079	C20/25
RC25	0.99	0.88	0.76	0.136	0.110	0.083	C25/30
RC30	1.08	0.95	0.82	0.153	0.122	0.092	C30/37; (Strong) foundations
RC35	1.13	0.99	0.85	0.161	0.129	0.096	C35/45; Ground floors
RC40	1.17	1.03	0.88	0.169	0.135	0.101	C40/50; Structural purposes, in situ floors, walls, superstructure
RC50	1.41	1.22	1.03	0.212	0.168	0.124	C50
PAV1	1.04	0.91	0.79	0.145	0.116	0.088	C25/30
PAV2	1.08	0.95	0.82	0.153	0.122	0.092	C28/35
<b>COMMENTS</b>							
The first column represents standard concrete, created with 100% Portland cement. The other columns are estimates based on a direct substitution of fly ash or blast furnace slag in place of the cement content. The ICE Cement, Mortar & Concrete Model was applied. It was assumed that there will be no changes in the quantities of water, aggregates or plasticiser/additives due to the use of cementitious replacement materials.							

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY			
Materials	Embodied Energy & Carbon Data		Comments
	EE - MJ/kg	EC - kgCO <sub>2</sub> /Kg	
<b>Copper</b>			
General	40 to 55	2.19 to 3.83 (?)	Conflicting data, possibly due to large variations in ore grade. Assumes recycled materials of 46%. See material profiles for further details.
Virgin	70 (?)	3.83 (?)	Large data range, very difficult to select possibly due to large variations in ore grade and therefore embodied energy and carbon.
Recycled from high grade scrap	17.5 (?)	0.96 (?)	
Recycled from low grade scrap	50 (?)	2.75 (?)	
<b>Glass</b>			
General	15.00	0.85	Poor data availability on recycled glass. Virgin Glass releases 0.185 Kg CO <sub>2</sub> during production processes (Additional to energy emissions) this has been factored in (Fact taken from British Glass). Recycling rate from British glass report towards sustainable development 2004, difficult to select embodied carbon.
Fibreglass (Glasswool)	28.00	1.53	
Toughened	23.50	1.27	Only three data sources
<b>Insulation</b>			
General Insulation	45.00	1.86	Estimated from typical market shares, Feedstock Energy 16.5 MJ/kg (Included)
Cellular Glass	27.00	-	Reference 48
Cellulose	0.94 to 3.3	-	
Cork	4.00	0.19	Reference 49
Fibreglass (Glasswool)	28.00	1.35	Poor data difficult to select appropriate value
Flax (Insulation)	39.50	1.70	Reference 2, 5.97 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Mineral wool	16.60	1.20	
Rockwool (stonewool)	16.80	1.05	
Paper wool	20.17	0.63	Reference 2
Polystyrene	See Plastics	See Plastics	see plastics
Polyurethane	See Plastics	See Plastics	see plastics
Woodwool (loose)	10.80	-	Reference 168
Woodwool (Board)	20.00	0.98	Reference 49
Wool (Recycled)	20.90	-	References 57, 166 & 234
<b>Iron</b>			
General	25.00	1.91 (?)	Uncertain
<b>Lead</b>			
General	25.00	1.33	Allocated (divided) on a mass basis, assumes recycling rate of 61.5%
Virgin	49.00	2.61	
Recycled	10.00	0.53	
Virgin If produced with zinc	13.6 to 23.6	0.72 to 1.25	Allocated by system expansion (i.e. energy contributable to zinc by other processes)
<b>Lime</b>			
General	5.30	0.74	Embodied carbon was difficult to estimate
<b>Linoleum</b>			
General	25.00	1.21	Data difficult to select, large data range.
<b>Miscellaneous</b>			
Asbestos	7.40	-	Reference 4
Calcium Silicate Sheet	2.00	0.13	Reference 49
Chromium	83	5.39	Reference 21
Cotton, Padding	27.10	1.28	Reference 34
Cotton, Fabric	143	6.78	Reference 34
Damp Proof Course/Membrane	134	4.20	
Felt General	36	-	
Flax	33.50	1.70	Reference 2
Fly Ash	0.10	0.01	
Grit	0.12	0.01	Reference 92
Carpet Grout	30.80	-	Reference 139
Glass Reinforced Plastic - GRP - Fibreglass	100	8.10	Reference 1
Lithium	853	5.30	Reference 92
Mandolite	63	1.40	Reference 1
Mineral Fibre Tile (Roofing)	37	2.70	Reference 1
Manganese	52	3.50	Reference 21
Mercury	87	4.94	Reference 21
Molybdenum	378	30.30	Reference 21
Nickel	164	12.40	Reference 92
Perlite - Expanded	10.00	0.52	Reference 92
Perlite - Natural	0.66	0.03	Reference 92
Quartz powder	0.85	0.02	Reference 92
Shingle	11.30	0.30	Reference 62
Silicon	2355	-	Reference 138
Slag (GGBS)	1.33	0.07	Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)
Silver	128.20	6.31	Reference 124
Straw	0.24	0.01	References 57, 166 & 234
Terrazzo Tiles	1.40	0.12	Reference 1
Vanadium	3710.00	228.00	Reference 21
Vermiculite - Expanded	7.20	0.52	Reference 92
Vermiculite - Natural	0.72	0.03	Reference 92
Vicuclad	70.00	-	Reference 1



<b>INVENTORY OF CARBON &amp; ENERGY (ICE) SUMMARY</b>			
Materials	Embodied Energy & Carbon Data		Comments
	EE - MJ/kg	EC - kgCO2/Kg	
Water	0.20	-	Reference 139
Wax	52.00	-	Reference 139
Wood stain/Varnish	50.00	5.35	Reference 1
General Wool	3.00	0.15	Reference 155
Yttrium	1470	84.00	Reference 21
Zirconium	1610	97.20	Reference 21
<b>Paint</b>			
General	68.00	3.56	Large variations in data, especially for carbon emissions.
EXAMPLE: Single Coat	10.2 MJ/Sqm	0.53 kgCO2/Sqm	Assuming 6.66 Sqm Coverage per kg
EXAMPLE: Double Coat	20.4 MJ/Sqm	1.06 kgCO2/Sqm	Assuming 3.33 Sqm Coverage per kg
EXAMPLE: Triple Coat	30.6 MJ/Sqm	1.60 kgCO2/Sqm	Assuming 2.22 Sqm Coverage per kg
<b>Paper</b>			
Paperboard (General for construction use)	24.80	1.32	Excluding CV of wood, excludes carbon sequestration
Fine Paper	28.20	1.50	Excluding CV of wood, excludes carbon sequestration
Wallpaper	36.40	1.93	
<b>Plaster</b>			
General (Gypsum)	1.80	0.12	Problems selecting good value, inconsistent figures, West et al believe this is because of past aggregation of EE with cement
Plasterboard	6.75	0.38	
<b>Plastics</b>			
General	80.50	2.53	35.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Determined by the average use of each type of plastic used in the European construction industry
ABS	95.30	3.10	48.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
General Polyethylene	83.10	1.94	54.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Based on average use of types of PE in European construction
High Density Polyethylene (HDPE)	76.70	1.60	54.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
HDPE Pipe	84.40	2.00	55.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Low Density Polyethylene (LDPE)	78.10	1.70	51.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
LDPE Film	89.30	1.90	55.2 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Nylon 6	120.50	5.50	38.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Nylon 6,6	138.60	6.50	50.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Polycarbonate	112.90	6.00	36.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Polypropylene, Orientated Film	99.20	2.70	55.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Polypropylene, Injection Moulding	115.10	3.90	54 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Expanded Polystyrene	88.60	2.50	46.2 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
General Purpose Polystyrene	86.40	2.70	46.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
High Impact Polystyrene	87.40	2.80	46.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Thermoformed Expanded Polystyrene	109.20	3.40	49.7 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Polyurethane	72.10	3.00	34.67 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Poor data availability of feedstock energy
PVC General	77.20	2.41	28.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Assumed market average use of types of PVC in the European construction industry
PVC Pipe	67.50	2.50	24.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Calendered Sheet PVC	68.60	2.60	24.4 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
PVC Injection Moulding	95.10	2.20	35.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
UPVC Film	69.40	2.50	25.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
<b>Rubber</b>			
General	101.70	3.18	41.1 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Assumes that natural rubber accounts for 35% of market. Difficult to estimate carbon emissions.
Synthetic rubber	120.00	4.02	42 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Difficult to estimate carbon emissions.
Natural latex rubber	67.60	1.63	39.43 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Feedstock from the production of carbon black. Difficult to estimate carbon emissions.
<b>Sand</b>			
General	0.10	0.005	
<b>Sealants and adhesives</b>			
Epoxy Resin	139.30	5.91	42.6 MJ/kg Feedstock Energy (Included)
Mastic Sealant	62.3 to 200	-	
Melamine Resin	113.00	-	Reference 77
Phenol Formaldehyde	87 to 89.3	-	
Urea Formaldehyde	40 to 78.2	1.3 to 2.26	
<b>Soil</b>			
General (Rammed Soil)	0.45	0.023	

<b>INVENTORY OF CARBON &amp; ENERGY (ICE) SUMMARY</b>			
<b>Materials</b>	<b>Embodied Energy &amp; Carbon Data</b>		<b>Comments</b>
	<b>EE - MJ/kg</b>	<b>EC - kgCO<sub>2</sub>/Kg</b>	
<b>Steel</b>			
<b>General (average of all steels)</b>	<b>24.40</b>	<b>1.77</b>	Estimated from UK mix of materials. Worldwide recycled content of 42.7%
Virgin	35.30	2.75	
Recycled	9.50	0.43	Could not collect strong statistics on mix of recycled steels
<b>Bar &amp; rod</b>	<b>24.60</b>	<b>1.71</b>	Recycled content 42.7%
Virgin	36.40	2.68	
Recycled	8.80	0.42	
<b>Engineering steel - Recycled</b>	<b>13.10</b>	<b>0.68</b>	
<b>Pipe - Virgin</b>	<b>34.44</b>	<b>2.70</b>	
Recycled	Not Typical Production Route		
<b>Plate - Virgin</b>	<b>48.40</b>	<b>3.19</b>	
Recycled	Not Typical Production Route		
<b>Section</b>	<b>25.40</b>	<b>1.78</b>	Recycled content 42.7%
Virgin	36.80	2.78	
Recycled	10.00	0.44	
<b>Sheet - Virgin</b>	<b>31.50</b>	<b>2.51</b>	
Recycled	Not Typical Production Route		
<b>Sheet - Galvanised - Virgin</b>	<b>39.00</b>	<b>2.82</b>	
<b>Wire - Virgin</b>	<b>36.00</b>	<b>2.83</b>	
<b>Stainless</b>	<b>56.70</b>	<b>6.15</b>	4.3 MJ/kg Feedstock Energy (Included). This data has been difficult to select, there is highly conflicting data, finally selected world average data from institute of Stainless Steel Forum (ISSF) due to the large extent of the study. Values specified are for the most popular grade (304).
<b>Stone</b>			
Data on stone was difficult to select, with high standard deviations and data ranges.			
<b>General</b>	<b>1.00</b>	<b>0.056</b>	
<b>Stone Gravel/Chippings</b>	<b>0.30</b>	<b>0.017</b>	
<b>Granite</b>	<b>0.1 to 13.9 l</b>	<b>0.006 to 0.781</b>	Reference 22
<b>Limestone</b>	<b>0.30</b>	<b>0.017</b>	
<b>Marble</b>	<b>2.00</b>	<b>0.112</b>	
<b>Marble tile</b>	<b>3.33</b>	<b>0.187</b>	
<b>Shale</b>	<b>0.03</b>	<b>0.002</b>	Reference 36
<b>Slate</b>	<b>0.1 to 1.0</b>	<b>0.006 to 0.056</b>	Large data range
<b>Timber</b>			
All timber values exclude the Calorific Value (CV) of wood. Timber values were particularly difficult to select!			
<b>General</b>	<b>8.50</b>	<b>0.46</b>	Estimated from UK consumption of timber
<b>Glue Laminated timber</b>	<b>12.00</b>	<b>0.65 (?)</b>	
<b>Hardboard</b>	<b>16.00</b>	<b>0.86</b>	
<b>Laminated Veneer Lumber</b>	<b>9.50</b>	<b>0.51 (?)</b>	Ref 126
<b>MDF</b>	<b>11.00</b>	<b>0.59</b>	Only 4 data sources
<b>Particle Board</b>	<b>9.50</b>	<b>0.51</b>	Very large data range, difficult to select best value
<b>Plywood</b>	<b>15.00</b>	<b>0.81</b>	
<b>Sawn Hardwood</b>	<b>7.80</b>	<b>0.47</b>	
<b>Sawn Softwood</b>	<b>7.40</b>	<b>0.45</b>	
<b>Veneer Particleboard (Furniture)</b>	<b>23.00</b>	<b>1.24</b>	
<b>Tin</b>			
<b>Tin Coated Plate (Steel)</b>	<b>19.2 to 54.7</b>	<b>1.03 to 2.93</b>	
<b>Tin</b>	<b>250.00</b>	<b>13.70</b>	lack of modern data, large range of data
<b>Titanium</b>			
<b>Virgin</b>	<b>361 to 745</b>	<b>-</b>	lack of modern data, large range of data, small sample size
<b>Recycled</b>	<b>258.00</b>	<b>-</b>	lack of modern data, large range of data, small sample size
<b>Vinyl Flooring</b>			
<b>General</b>	<b>65.64</b>	<b>2.29</b>	23.58 MJ/kg Feedstock Energy (Included). Same value as PVC calendered sheet
<b>Vinyl Composite Tiles (VCT)</b>	<b>13.70</b>	<b>-</b>	Reference 77
<b>Zinc</b>			
<b>General</b>	<b>61.90</b>	<b>3.31</b>	
<b>Virgin</b>	<b>72.00</b>	<b>3.86</b>	
<b>Recycled</b>	<b>9.00</b>	<b>0.48</b>	uncertain carbon estimates, currently estimated from typical fuel mix

INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) SUMMARY			
Materials	Embodied Energy & Carbon Data		Comments
	EE - MJ/kg	EC - kgCO <sub>2</sub> /Kg	
			EE = Embodied Energy, EC = Embodied Carbon

Miscellaneous:

	Embodied Energy - MJ	Embodied Carbon - Kg CO <sub>2</sub>	
<b>PV Modules</b>	MJ/sqm	Kg CO <sub>2</sub> /sqm	
Monocrystalline	4750 (2590 to 8640)	242 (132 to 440)	Assumed typical industrial fuel mix to estimate CO <sub>2</sub>
Polycrystalline	4070 (1945 to 5660)	208 (99 to 289)	
ThinFilm	1305 (775 to 1805)	67 (40 to 92)	
<b>Windows</b>	MJ per Window		
1.2mx1.2m Single Glazed Timber Framed Unit	286 ?	14.60	Assumed typical UK industrial fuel mix to estimate CO <sub>2</sub>
1.2mx1.2m Double Glazed (Air or Argon Filled):	--	--	--
Aluminium Framed	5470	279	
PVC Framed	2150 to 2470	110 to 126	
Aluminium -Clad Timber Framed	950 to 1460	48 to 75	
Timber Framed	230 to 490	12 to 25	
Krypton Filled Add:	510	26	
Xenon Filled Add:	4500	229	

## 2.9 คุณสมบัติของวัสดุ

### 2.9.1 ไม้ (Wood)

#### ความชื้น

หมายถึง น้ำที่มีอยู่ในไม้ มีความสัมพันธ์ต่อคุณสมบัติของไม้ในด้านต่างๆอย่างสำคัญยิ่ง ปริมาณความชื้นในไม้ นิยมแสดงเป็นค่าส่วนร้อยของน้ำหนักของเนื้อไม้แท้ๆ ตามปกติไม้จะมีความชื้นอยู่ในตัวเสมอไม่มากก็น้อย ในขณะที่ถูกตัดโค่นลงใหม่ๆ ความชื้นอาจมีแตกต่างกันระหว่างร้อยละ 60-300 หรือสูงต่ำกว่านั้น หลังจากตัดทอนหรือแปรรูปเป็นแผ่นแล้วไม้จะค่อยๆแห้งลงเอง โดยที่น้ำในช่องเซลล์จะแห้งไปก่อนจนถึงระดับหนึ่ง ซึ่งความชื้นในผนังเซลล์ยังมีอยู่เต็ม แต่ความชื้นในช่องเซลล์หมดไป เราเรียกความชื้นระดับนี้ว่าจุดหมาด ไม้ที่หมาดแล้วนี้จะต้องเสียความชื้นต่อไป จนกระทั่งได้ส่วนสัมพันธ์กับความชื้นในอากาศโดยรอบ ไม้ที่แห้งจนได้ส่วนสัมพันธ์กับความชื้นในอากาศแล้วนี้ เรียกว่า แห้ง หรือ แห้งในอากาศ สำหรับประเทศไทย ปริมาณความชื้นไม้แห้งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างร้อยละ 10 - 16 หรืออาจสูงต่ำกว่านี้บ้าง ตามความเปลี่ยนแปลงความชื้นในอากาศของฤดูกาลต่างๆ การที่จะไม่ให้มีความชื้นเหลืออยู่เลยตามธรรมชาตินั้น เป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้ เว้นแต่จะทำการอบด้วยเตาอบมีอุณหภูมิสูงกว่า ๑๐๐ องศาเซลเซียสเท่านั้น สภาพที่ไม้มีความชื้นเป็นศูนย์เช่นนี้ เรียกว่า อบแห้ง [14]

เมื่อความชื้นถูกนำออกจากเซลล์แล้วก็จะเกิดเป็นช่องว่างระหว่างเซลล์ลุส ทำให้ไม้เป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุหลายๆประเภท โดยไม้แต่ละชนิดมีค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น แตกต่างกันไปตามลักษณะของเนื้อไม้

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติด้านความร้อนของไม้ประเภทต่างๆ

วัสดุ	ค่า k (W/m.°C)	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.°C)
ไม้เนื้อแข็ง	0.217	800	1.30
ไม้เนื้อแข็งปานกลาง	0.176	600	1.30
ไม้เนื้ออ่อน	0.131	500	1.30
ไม้อัดซีพบอร์ด	0.144	800	1.30

(ที่มา: ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆของอาคาร)

#### การหดและการพองตัว

เกิดขึ้นเมื่อไม้เสียความชื้นหรือได้รับความชื้นเพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันการเสียหายอันเกิดจากการหด การพองตัวนี้ จึงมีความจำเป็นที่เราจะต้องเลือกใช้ไม้ที่มีความชื้นให้เหมาะสมถูกต้องกับกาลเทศะ ขนาดของการหดและพองตัว เราเรียกกันเป็นส่วนร้อยของขนาดหรือปริมาตรเดิม การหดตัวมากที่สุดตามแนวสัมผัส ซึ่งจะมีค่าประมาณ 1.5-2 เท่าของการหดตัวตามแนวรัศมี และหดตัวน้อยมากตามแนวยาวของลำต้น

การที่ไม้หดตัวตามทิศทางต่างๆไม่เท่ากันนี้ ทำให้ไม้แปรรูปที่ได้จากส่วนต่างๆ ของต้นไม้เมื่อยังสดมีรูปเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่อไม้แห้งลง ไม้ที่ใช้งานตากแดดตากฝนอยู่เป็นประจำ เช่น พื้นชาน ก็มีเหตุที่ทำให้ไม้หดตัวไม่เท่ากัน เกิดจากความแตกต่างของปริมาณความชื้นที่ผิวของไม้กับไม้ส่วนที่อยู่ลึกๆลงไป ในที่สุดก็ทำให้เกิดรอยปริ รอยร้าว หรือรอยแตกปรากฏอยู่ทั่วไป

#### ความแข็งแรง

หมายถึง ความสามารถของไม้ที่จะรับน้ำหนักหรือแรงภายนอก เช่น แรงแน้ำ แรงลม น้ำหนักของสิ่งของหรือแรงที่มนุษย์ทำขึ้น เป็นคุณสมบัติสำคัญที่จะต้องพิจารณาเมื่อนำไม้มาใช้ก่อสร้างบ้านเรือน หรืองานอื่นๆในลักษณะเดียวกัน แรงที่เข้ามากระทำต่อไม้ที่ใช้ในการก่อสร้างนั้น แยกได้เป็น ๓ ประเภท คือ แรงดึง แรงอัด แรงเฉือน นอกจากแรงทั้ง 3 แล้ว ยังมีคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงอยู่อีก 3 ประการ คือ ความยากง่ายในการทำให้ไม้เสียรูป เรียกว่า ความดื้อ หรือความยืดหยุ่น ความยากง่ายในการทำให้ไม้แตกหักออกจากกัน เรียกว่า ความเหนียว หรือความเปราะ และความสามารถต้านทานต่อความชื้นขุ่นจนเจาะไซ เรียกว่า ความแข็ง คุณสมบัติทั้งเหล่านี้ รวมเรียกว่า กลสมบัติของไม้ ในการทดลองหาค่าทางกลสมบัติของไม้ตามวิธีมาตรฐานสากล พบว่าไม้แห้งที่มีความชื้นร้อยละ 12 จะมีค่าทางกลสมบัติสูงกว่าไม้สดที่มีความชื้นร้อยละ 30 ประมาณ 1.4-1.5 เท่า

## 2.9.2 โฟม (Foam)

ฉนวนโฟมมีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารประกอบทางเคมีที่นำมาใช้ รูปแบบที่นำมาใช้มีทั้งแบบพ่น และแบบสำเร็จรูป โดยใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร น้ำหนักเบา ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้าง สามารถป้องกันความร้อนได้ดี มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง ชนิดของโฟมที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนมีดังนี้[18]

โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากสไตรีนมอนอเมอร์ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม ถูกผลิตออกขายครั้งแรกในช่วงปี 1930 – 1939 ในการผลิตโพลีสไตรีนยังมีวัตถุดิบอื่น ๆ ที่ใช้ร่วมด้วยได้แก่ เบนซีน เอทิลีน และบิวทาไดอีน โพลีสไตรีนเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือหลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อทำให้ร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง โพลีสไตรีนแข็งที่บริสุทธิ์จะไม่มีสี ใส แต่สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ ได้ และยืดหยุ่นได้จำกัด[19]

โพลีสไตรีนที่ใช้งานอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นชนิดที่เรียกว่า expanded polystyrene (EPS) เป็นชนิดที่ได้จากการผสมพอลีสไตรีนร้อยละ 90-95 กับสารทำให้ขยายตัว ร้อยละ 5-10 พลาสติกที่เป็นของแข็งถูกทำให้เป็นโฟมโดยการใช้ความร้อน โพลีสไตรีนอีกชนิดหนึ่งคือ Extruded polystyrene (XPS) มีชื่อทางการค้าที่แพร่หลายคือ Styrofoam เป็นชนิดที่มีการเติมอากาศไว้ในช่องว่างตามเนื้อโฟมทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ ใช้ในงานก่อสร้าง และใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร และยังมีชนิดที่เป็นแผ่นเรียกว่า Polystyrene Paper Foam (PSP) ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร เช่นกล่องหรือถาดใส่อาหาร สารพิษที่ปลดปล่อยออกมาในระหว่างการผลิตพอลีสไตรีนได้แก่

- เบนซีน เป็นสารก่อมะเร็ง
- สไตรีนมอนอเมอร์ เป็นสารที่สงสัยว่าก่อให้เกิดมะเร็ง
- 1, 3-บิวทาไดอีน เป็นสารที่สงสัยว่าก่อให้เกิดมะเร็ง
- คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ทำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลองและสงสัยว่าก่อให้เกิดมะเร็งในคน
- โครเมียม (6) ออกไซด์ ก่อให้เกิดมะเร็งและการกลายพันธุ์ในสัตว์ทดลอง

การรีไซเคิลโฟมพอลีสไตรีนมีปัญหาในเรื่องไม่คุ้มทุนเป็นสำคัญ เนื่องจากคุณภาพของพลาสติกที่รีไซเคิลได้จะต่ำกว่าก่อนผ่านการรีไซเคิล ดังนั้นพลาสติกที่รีไซเคิลได้จึงไม่สามารถนำกลับมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เดิมได้ ต้องทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ด้อยคุณภาพลงไป เช่นโฟมบรรจุอาหารไม่สามารถรีไซเคิลกลับมาใส่อาหารได้อีก ต้องนำไปทำเป็นโฟมกันกระแทก ฉนวนฝ้าผนัง ถาดในโรงอาหาร เป็นต้น ซึ่งการทำเช่นนี้ต้องให้เพิ่มวัตถุดิบหรือต้นทุนด้านต่าง ๆ เข้าไปอีก

โพลีโพลียูรีเทน (Polyurethane, PU) เป็นพลาสติกโพลีเมอร์ประเภทหนึ่ง ผลิตจากปฏิกิริยาของโพลีออลกับไดไอโซไซยาเนตหรือโพลีเมอริก ไดไอโซไซยาเนต โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โพลียูรีเทนส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต คือ ไม่สามารถหลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้ ซึ่งผลิตรออกมาหลายรูปแบบได้แก่ เป็นโฟมยืดหยุ่น โฟมแข็ง สารเคลือบป้องกันสารเคมี กาว สารฉนวน และอีลาสโตเมอร์ กรณีการใช้เป็นฉนวน จะพ่นให้เกิดเป็นโฟมมีลักษณะแข็ง เช่น การพ่นเพื่อป้องกันความร้อนใต้พิภพฯ จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด เซลล์ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าการนำความร้อน (k) ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ ค่าการนำความร้อนของฉนวนชนิดนี้จะเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานความร้อน (R-Value) จะลดลงตามอายุการใช้งาน เนื่องจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์

โพลียูรีเทนติดไฟได้ง่ายและรวดเร็วมาก และเมื่อไหม้แล้วจะให้ความร้อน และควันหนาแน่นมาก ที่สำคัญคือให้ก๊าซพิษออกมาด้วยได้แก่ ไดออกซิน ไอโซไซยาโนด์ ไฮโดรเจนไซยาโนด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

โพลีโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นเอทิลีนโพลีเมอร์ขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยมีฟองก๊าซละลายอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบเซลล์ปิดมีลักษณะอ่อนนุ่ม จึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ การต้านทานไอน้ำอยู่ในเกณฑ์สูง มีการเสื่อมสภาพได้จากรังสียูวี จึงควรมีแผ่นปิดผิวขณะใช้งาน หรือติดตั้งในที่ที่ไม่โดนรังสียูวีโดยตรง การเลือกใช้งานในระบบหลังคาในประเทศไทย ต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตร เพื่อให้ค่าการต้านทานความร้อน (R-Value) เพียงพอ โพลีเอทิลีนเป็นโพลีเมอร์พลาสติกชนิดหนึ่ง เมื่อเผาไหม้จะก่อให้เกิดควันปริมาณมาก และปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เป็นอันตรายออกมา

### 2.9.3 คอนกรีต (Concrete)

เป็นวัสดุผสมในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม เช่น หิน ทราย หรือกรวด และ น้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จ คอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้าๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่าคอนกรีต ความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆหลังจากที่ผสม และยิ่งแข็งแรงขึ้นภายหลังจากการแข็งตัวโดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่ คอนกรีตมีใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งรวมถึง อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งมีเห็นได้ทั่วไป

คุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ ประมาณ 10% ของแรงอัด โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึง จะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปใน

คอนกรีตโดยจะเรียกว่าคอนกรีตเสริมแรง หรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกกัน (โดยเสริมแรงด้วยเหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต ซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีตเสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือย

นอกจากนี้ในงานก่อสร้างยังมีการใช้วิธีการที่เรียกว่าคอนกรีตอัดแรงโดยทำการใส่แรงเข้าไปในคอนกรีตที่หล่อมาจากโรงงาน โดยเมื่อนำไปใช้งาน แรงที่ใส่เข้าไปในคอนกรีตจะหักล้างกับน้ำหนักของตัวคอนกรีตเองและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยงานสะพานและทางยกระดับ นิยมใช้คอนกรีตอัดแรง

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 จักรกริษฐ์ พิสุตรเสียง ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของฉนวนใยพารา โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำส่วนของใยพารามาผลิตเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนเพื่อลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาทำลายใยพารา ผู้วิจัยทำการผลิตวัสดุฉนวนจากใยพาราหลายรูปแบบแล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆในห้องทดลอง ก่อนจะนำวัสดุดังกล่าวไปทดสอบการใช้งานในสถานที่จริง แล้วเก็บข้อมูลการใช้พลังงาน ในการทดลองครั้งใช้วัสดุเปรียบเทียบเพียง 3 แบบเท่านั้น ผู้วิจัยจึงเสนอแนะแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคตว่าน่าจะมีฉนวนอีกหลายประเภทที่น่าสนใจนำมาเป็นวัสดุเปรียบเทียบ

2.10.2 สมเจตน์ พัชรพันธ์ และคณะ ได้ทำการทดลองผลิตฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยหญ้าแฝกมาผสมกับน้ำยางธรรมชาติ โดยนำเส้นใยหญ้าแฝกสายพันธุ์ราชบุรีผ่านกระบวนการแยกเส้นใย ฟันเคลือบประสานเส้นใยด้วยน้ำยาง และขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 1.5 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบทำให้ทราบค่าการนำความร้อนของฉนวนเส้นใยหญ้าแฝกและน้ำยางอยู่ที่  $0.0564 \text{ W/m.K}$  ซึ่งใกล้เคียงกับฉนวนกันความร้อนอื่นๆที่ผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จากผลการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะนำเส้นใยหญ้าแฝกและน้ำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งเป็นการนำวัสดุธรรมชาติมาทดแทนวัสดุสังเคราะห์

2.10.3 Chistina Becchio, Stefano Paolo, Andrea Kindinis และ Simonetta Paglioloco ได้ทำการพัฒนาวัสดุเป็นคอนกรีตผสมด้วยเศษไม้ เพื่อลดการใช้คอนกรีต และพัฒนาคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนของวัสดุ โดยการผลิตวัสดุต้นแบบที่ใช้เศษไม้ผสมเข้ากับคอนกรีตในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำวัสดุดังกล่าวไปทดสอบคุณสมบัติทางด้านความร้อนต่างๆ ได้แก่ ค่าการนำความร้อน ความหนาแน่น และความแข็งแรง ผลปรากฏว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตปกติในท้องตลาด โดยที่ความแข็งแรงยังอยู่ในขั้นที่รับได้ และสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่า

2.10.4 Andrew H. Buchanan และ S. Bry Levine ได้ทำการเปรียบเทียบอาคารหลายประเภท โดยเปรียบเทียบระหว่างใช้วัสดุทั่วไปในท้องตลาด และใช้ไม้เป็นส่วนประกอบว่าวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างมีการปลดปล่อยคาร์บอน และใช้พลังงานรวมมากน้อยต่างกันอย่างไรบ้าง หลังจากการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผลออกมาปรากฏว่า อาคารที่ใช้ไม้มีค่าการปลดปล่อยคาร์บอน และพลังงานสะสมรวมน้อยกว่าอาคารที่ก่อสร้างโดยใช้วัสดุทั่วไปตามท้องตลาด โดยสามารถลดการปลดปล่อยคาร์บอนมวลรวมไปได้ร้อยละ 20 และลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลไปได้ร้อยละ 1.5 ของประเทศ



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ตัวแปรที่ทำการทดสอบ

ในการศึกษาเปรียบเทียบผนังวัสดุไม้จริงที่ความหนาต่างกัน และวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างกัน การกำหนดตัวแปรแบ่งเป็นสองส่วนด้วยกัน โดยแบ่งตามการทดลองดังนี้

##### กำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการทดลอง (ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง)

- ตัวแปรต้น* - ความหนาไม้จริง(4 ซม, 6 ซม, 8 ซม,) และ วัสดุที่นำมาปิดช่องว่างระหว่างไม้ (โฟม, คอนกรีต)
- ตัวแปรตาม* - ประสิทธิภาพด้านความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน การต้านทานความร้อน และการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ(Time lag)
- ตัวแปรควบคุม* - ชนิดของไม้(ไม้ยาง) ชนิดของส่วนผสม(โฟม คอนกรีต)เป็นแบบเดียวกันในวัสดุทุกชิ้น

##### กำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการทดลอง (ส่วนการทดลองด้วยโปรแกรม DOE 2.0)

- ตัวแปรต้น* - ประสิทธิภาพด้านการนำความร้อน(Thermal Conductivity) และความหนาแน่นของวัสดุแต่ละชิ้นที่จะนำไปใช้ในการประมวลผลของโปรแกรม
- ตัวแปรตาม* - การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kW.h)
- ตัวแปรควบคุม* - อาคารเป็นอาคารประเภทพักอาศัยที่มีการใช้งานช่วงเวลากลางคืนหลังคาเป็นกระเบื้องคอนกรีต

#### 3.2 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างและเครื่องมือที่เลือกใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 กล่องทดลอง

เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายจะต้องสร้างกล่องทดสอบที่มีคุณสมบัติดังนี้

1. ผนังกล่องทั้ง 5 ด้านจะต้องมีค่าความต้านทานสูง (R) เพื่อกันผลกระทบจากอากาศภายนอกต่ออุณหภูมิภายในกล่อง
2. ผนังของกล่องต้องไม่มีการรั่วซึมของอากาศ (Infiltration)
3. ขนาดพัสดมเท่ากันในทุกการทดลอง

ดังนั้นกล่องทดลองจึงมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีขนาดภายในกล่อง  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  เมตร ผนังทั้ง 5 ด้านเป็นโฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene foam) หนา 2 นิ้ว (0.05 เมตร) ซึ่งมีความการกันความร้อน ( $R$ ) = 1.35

สาเหตุที่เลือกกล่องทดลองที่มีปริมาตรภายใน  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  เมตร หรือขนาดภายนอก  $0.6 \times 0.6 \times 0.6$  เมตร

1. เนื่องจากผนังทั้ง 5 ด้านของกล่องทดลองเป็นผนังโฟมที่มีความการกันความร้อนสูงทำให้เปรียบเสมือนไม่มีอิทธิพลความร้อนจากภายนอกเลย ปัญหาการถ่ายเทความร้อนด้านอื่นที่ไม่ใช่ด้านที่ทำการทดลองจึงไม่มีผลกระทบต่อกล่องทดลอง

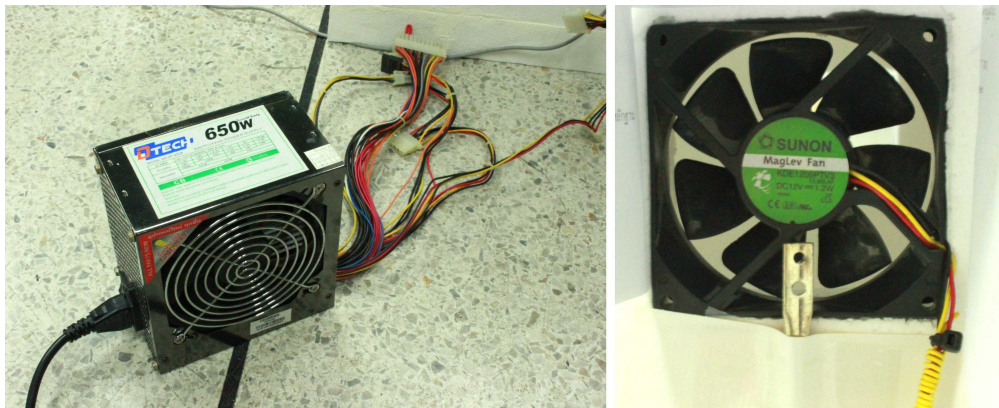
2. การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง ซึ่งในการคำนวณจะให้ความร้อนในด้านที่เป็นวัสดุต้นแบบ แล้วคำนวณจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่อง ( $\Delta T$ ) คำนวณออกมาเป็นปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศที่ใช้คิดว่าปริมาตรต่อเวลา ทำให้ขนาดของกล่องทดลองไม่มีผลต่อค่าที่คำนวณออกมา

แหล่งให้ความร้อนของกล่องทดลอง เป็นไฟอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ต่อกับขาตั้งเพื่อให้ความร้อนกับวัสดุในทางตั้งเพื่อให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของผนังมากที่สุด



รูปที่ 3.1 หลอดไฟอินฟราเรดที่ใช้ในการให้ความร้อนกับวัสดุในการทดลอง

พัดลมระบายอากาศที่ติดในช่องอากาศออก เป็นพัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด 9 เซนติเมตร ต่อเข้ากับหม้อแปลงขนาด 192-650 วัตต์



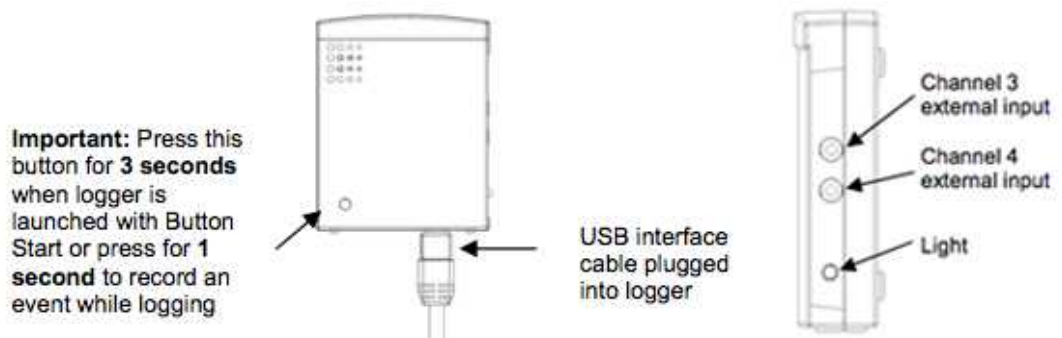
รูปที่ 3.2 หม้อแปลงและพัดลมระบายอากาศ

### 3.2.2 เครื่องมือเก็บข้อมูล

#### อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ

อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิใช้ HOBO temp/RH/2 ext channels Data Logger จำนวน 2 เครื่อง เก็บข้อมูลอุณหภูมิเข้า อุณหภูมิออก อุณหภูมิพื้นผิวด้านในและพื้นผิวด้านนอก โดยอุปกรณ์ HOBO Data Logger มีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

กล่องเก็บข้อมูลมีขนาด 58 x 74 x 22 มิลลิเมตร หนัก 46 กรัม ภายนอกประกอบด้วย ช่องต่อเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น 2 ช่อง ไฟ LED แสดงสถานะ และช่องต่อสาย USB สำหรับต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบภายนอกของ HOBO Data Logger temp/RH/2 ext channels

สามารถเก็บข้อมูลอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-4$  ถึง  $158\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) ความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในช่วงอุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเก็บข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ได้ตั้งแต่ 5% ถึง 95% ความคลาดเคลื่อน  $\pm 2.5\%$  ในช่วงความชื้น 10% ถึง 90%

เครื่องเก็บข้อมูลดังกล่าวสามารถเก็บข้อมูลอุณหภูมิได้นาน 18 ชั่วโมง มีความจำในเครื่อง 64k ทำให้สามารถอ่านข้อมูลออกมาได้รวดเร็วมากขึ้น



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ HOBO ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในกล่องทดลอง

### อุปกรณ์วัดความเร็วลม

ในการคำนวณค่า  $Q$  ของวัสดุจากการทดลองด้วยกล่องทดลองเพื่อนำมาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการหน่วงความร้อนของผนัง จะต้องวัดปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศที่ใช้ (CFM)

เครื่องมือที่นำมาใช้หาปริมาณการไหลของอากาศคือ Testo 400 – The multi-function meter/ logger เครื่องมือวัดนี้สามารถวัดได้ทั้งอุณหภูมิ ความชื้น ความกดอากาศ และความเร็วลม โดยจะเปลี่ยนโพรบที่ต่อเข้ากับเครื่องเป็นโพรบที่ตรงกับค่าที่ต้องการวัด โดยการวัดทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานของ ASHRAE [20]



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม Testo 400

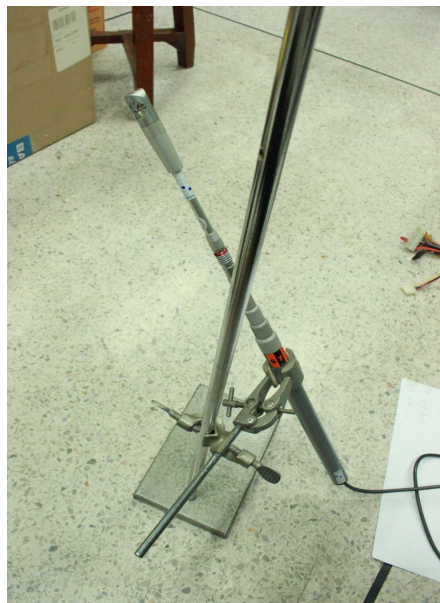
(ที่มา : [www.keison.co.uk](http://www.keison.co.uk))

โพรบสำหรับวัดความเร็วลมคือ Vane Type K (NiCr-Ni) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 0.6 นิ้ว สามารถวัดความเร็วลมได้ตั้งแต่ +80 ถึง 1200 fpm และในโพรบนี้สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -22 °F ถึง +280 °F มีค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1\%$



รูปที่ 3.6 หัวโพรบ Vane Type K (NiCr-Ni) สำหรับวัดความเร็วลม

ในการวัดความเร็วลมเพื่อหาปริมาณการไหลของอากาศจะต้องกรอกข้อมูลเส้นผ่านศูนย์กลางลงในเครื่องมือเพื่อให้คำนวณผลออกมา และเพื่อให้ผลที่ออกมาใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด จึงต่อโพรบสำหรับวัดความเร็วลมเข้ากับขาตั้งเนื่องจากหากใช้มือจับตัววัดผลที่ออกมาจะมีการเหวี่ยงของค่า



รูปที่ 3.7 โพรบสำหรับวัดความเร็วลมที่ต่อเข้ากับขาตั้ง

### 3.3 ขั้นตอนการผลิตวัสดุต้นแบบ

ผลิตวัสดุต้นแบบขนาดประมาณ 30x30 เซนติเมตร โดยมีความหนาต่างๆกัน ซึ่งความหนาที่มากที่สุดหนาไม่เกิน 8 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นวัสดุขนาดใหญ่ที่สุดที่สามารถนำไปเข้าเครื่องทดสอบหาค่าการต้านทานความร้อนในห้องทดลองได้[21] โดยไม่ที่ใช้ในการผลิตวัสดุต้นแบบเป็นไม้ยางทั้งหมด มีรูปแบบทั้งสิ้น 9 แบบ ดังนี้

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ว

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ว

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ว

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต

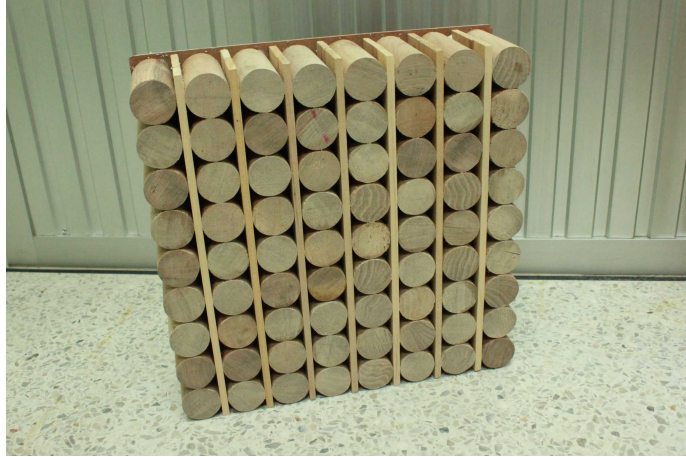
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต

และมีวัสดุเปรียบเทียบพื้นฐาน (Base Case) เป็นผนังก่ออิฐมวลเบาครึ่งแผ่นฉาบเรียบ ขนาด 30 x 30 เซนติเมตรอีกหนึ่งชิ้น

#### ขั้นตอนที่ 1

ตัดไม้กลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว 2 หุน (ประมาณ 3 เซนติเมตร) ให้ยาว 4 เซนติเมตร 6 เซนติเมตร และ 8 เซนติเมตร ตามความหนาของวัสดุต้นแบบที่ต้องการ แล้วจัดเรียงโดยมีไม้ขนาดหนา  $\frac{1}{2}$  เซนติเมตร ชั้นเป็นโครงสร้างคล้ายโครงเคร่า และยึดระหว่างไม้ด้วยกาวลาเท็กซ์สำหรับไม้ โดยปิดผิวด้วยไม้อัดยางหนา 2 มิลลิเมตร

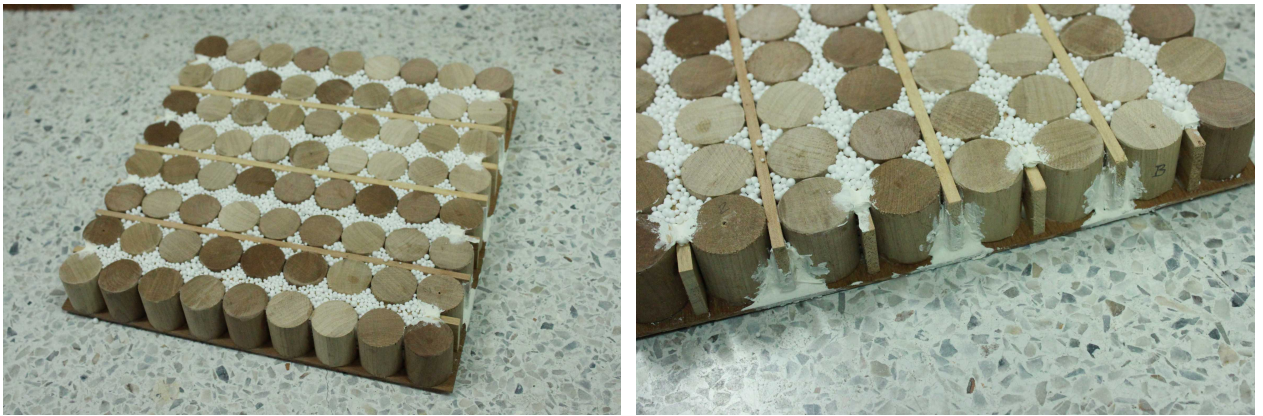
สาเหตุที่ใช้ไม้ในลักษณะตัดขวางแล้วนำมาประกอบกันเป็นแผ่นแทนที่จะตัดตามขวางในแบบที่ใช้ในท้องตลาด เนื่องจากการตัดไม้ตามขวางแทบไม่เหลือเศษไม้จากการแปรรูป อีกทั้งไม้ที่ใช้ยังไม่จำเป็นต้องเป็นไม้ขนาดใหญ่ที่อายุการปลูกมาก สามารถใช้ไม้ปลูกขนาดเล็กมาประกอบเป็นผนังได้



รูปที่ 3.8 วัสดุไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้

### ขั้นตอนที่ 2

สำหรับวัสดุที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโพลีโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว ใช้ซิลิโคนยาปิดบริเวณที่มีช่องว่างแล้วใส่โพลีโพลีสไตรีนที่ใช้กันกระแทกในการขนส่งพัสดุคละขนาด (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร, 4 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร) ลงในช่องว่างระหว่างไม้ ระหว่างที่ใส่เม็ดโพลีโพลีสไตรีนลงในช่องว่างใช้ไม้กระทุ้งเพื่อให้เม็ดโพลีโพลีสไตรีนลงไปอยู่ในช่องว่างระหว่างไม้จนเต็ม

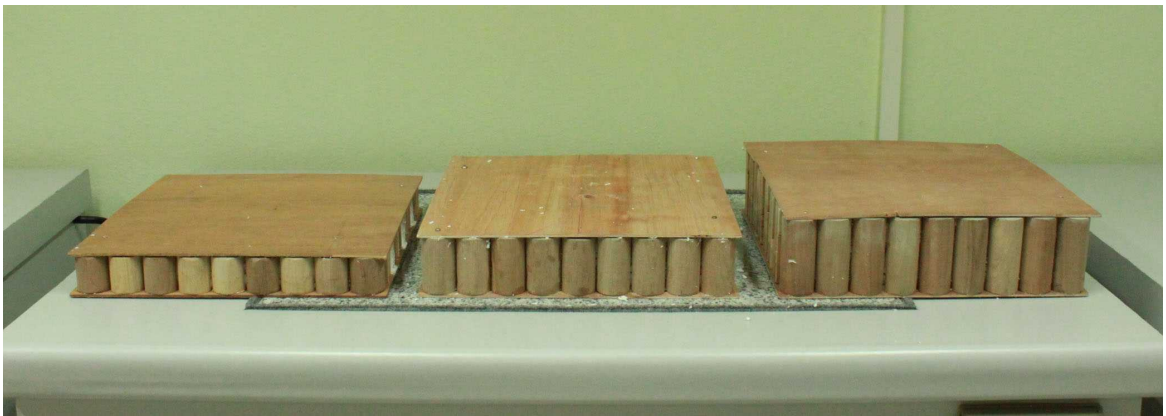


รูปที่ 3.9 วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโพลีโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว

สำหรับวัสดุที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต ใช้คอนกรีตผสมสำเร็จใส่ลงในช่องว่างระหว่างไม้ โดยผสมในอัตราส่วน คอนกรีตต่อน้ำ 3:1 เพื่อให้เหลวพอจะเทลงในช่องว่าง ระหว่างที่เทคอนกรีตใช้ไม้แทงลงไปเพื่อไล่ฟองอากาศและให้คอนกรีตลงไปจนถึงก้น หลังจากนั้นรอให้คอนกรีตแห้งเป็นเวลาประมาณสองวัน ระหว่างนั้นใช้วัสดุที่มีน้ำหนักทับเพื่อไม่ให้วัสดุต้นแบบแอ่นตัว โดยที่วัสดุต้นแบบทั้ง 9 ชั้นจะใช้ไม้อัดขนาดหนา 2 มิลลิเมตรประกบทั้งหน้าหลังทั้งสองด้านทุกชั้น



รูปที่ 3.10 วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต



รูปที่ 3.11 วัสดุต้นแบบที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรเมื่อเสร็จสมบูรณ์แล้ว

### ขั้นตอนที่ 3

สำหรับวัสดุเปรียบเทียบพื้นฐาน (Base) ที่เป็นผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นฉาบเรียบ ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 8 เซนติเมตร ก่อเหมือนผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นฉาบปูนทั่วไป

- ก่อนทำการก่อจะต้องนำอิฐแช่น้ำหรือรดน้ำให้อิฐดูดน้ำจนอิ่มตัว แล้วนำไปผึ่งให้หมาดๆเพื่อไม่ให้อิฐมอญดูดน้ำจากปูนจนทำให้เกิดการแตกร้าว

- เรียงอิฐให้มีการสับหว่างกันในแต่ละชั้น โดยก่อให้มีความหนาชั้นปูนก่อประมาณ 1.5-2.0 เซนติเมตร โดยปกติแล้วจะต้องมีการทำการบ่ม โดยการรดน้ำให้ผนังชุ่มชื้นอยู่อย่างสม่ำเสมออย่างน้อย 7 วัน แต่เนื่องจากเวลาทดลองที่จำกัด และขนาดวัสดุที่มีขนาดเพียง 30 x 30 เซนติเมตร จึงลดเหลือเพียง 2 วัน

- ในการฉาบปูนต้องฉีดน้ำบริเวณที่จะฉาบให้เปียกโดยทั่วก่อนแล้วจึงค่อยลงมือฉาบ หลังจากนั้นจึงรอให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง



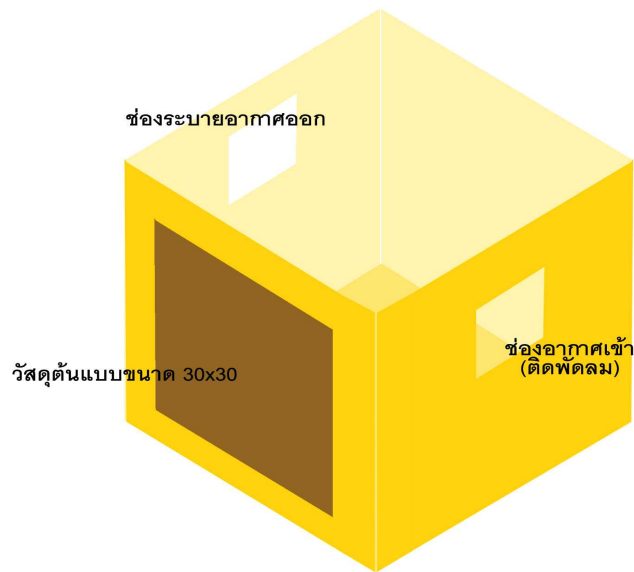


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างผนังก่ออิฐฉาบปูนขนาด 30 x 30 เซนติเมตร

### 3.4 ช่วงการทดลอง (กล่องทดลอง)

#### ขั้นตอนที่ 1

จำลองกล่องทดลองที่ใช้มีขนาดภายใน 50x50x50 เซนติเมตร ผนังทั้ง 6 ด้านทำด้วยแผ่นโฟม โพลีสไตรีนหนา 2 นิ้ว ปิดรอยต่อระหว่างแผ่นด้วยซิลิโคน และเจาะช่องเปิดขนาด 9 x 9 เซนติเมตร เจาะสูงจากพื้น 33 เซนติเมตร ในด้านตรงกันข้ามเพื่อเป็นช่องระบายอากาศ ช่องหนึ่งเปิดโล่งเป็นช่องอากาศเข้า อีกช่องเป็นช่องระบายอากาศออกติดตั้งพัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร เพื่อช่วยระบายอากาศ ส่วนด้านที่อยู่ระหว่างช่องระบายอากาศเตรียมไว้เป็นช่องขนาด 30x30 เซนติเมตร เพื่อใส่วัสดุต้นแบบ



รูปที่ 3.13 แสดงตำแหน่งการเจาะของกล่องทดลอง และตำแหน่งที่วางวัสดุต้นแบบ

เหตุที่ใช้กล่องทดลองขนาด 50 x 50 x 50 เซนติเมตร เพราะ

- เป็นขนาดที่พอดีกับวัสดุ
  - การทดสอบเป็นการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง ไม่ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมของชั้นความร้อน ดังนั้น กล่องจึงไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่
  - ขนาดพอเหมาะ สามารถเคลื่อนย้ายได้ไม่ยากนัก และใช้งบประมาณในการทำไม่มาก
- อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลอุณหภูมิคือ HOBO Data Logger รุ่น temp/RH/2 ext channels ซึ่งสามารถต่อเซ็นเซอร์เพิ่มได้อีก 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่วางเครื่องเก็บอุณหภูมิและเซ็นเซอร์จะวางไว้ทั้งหมด 5 จุดได้แก่

- บริเวณอากาศเข้า เพื่อวัดอุณหภูมิอากาศเข้า
- บริเวณอากาศออก เพื่อวัดอุณหภูมิอากาศออก
- ผิววัสดุภายนอก
- ผิววัสดุภายใน

การติดเซ็นเซอร์ของเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิบริเวณผิววัสดุภายนอก และผิววัสดุภายใน จะใช้ติดกับผิวของวัสดุด้วยน็อตเพื่อให้แนบติดกับผิวของวัสดุ อุณหภูมิที่ได้จะได้เป็นอุณหภูมิที่แท้จริง และปิดทับเซ็นเซอร์ด้วยโฟมโพลีสไตรีนแบบเดียวกับที่ใช้ทำผิวกล่อง เพื่อไม่ให้ความร้อนจากภายนอกมีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวที่วัดได้

สำหรับเซ็นเซอร์ของเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิบริเวณอากาศเข้า และบริเวณอากาศออก จะติดกระดาดแข็งสีขาวไว้รอบบริเวณอากาศเข้าและอากาศออก เพื่อป้องกันแสงจากหลอดไฟไม่ให้มีผลต่ออุณหภูมิที่วัดได้

แหล่งความร้อนที่ใช้ให้ความร้อนแก่วัสดุต้นแบบ ได้จากหลอดไฟอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ติดตั้งในทางตั้ง (Vertical) เช่นเดียวกับวัสดุต้นแบบ เพื่อให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของผนังมากที่สุด



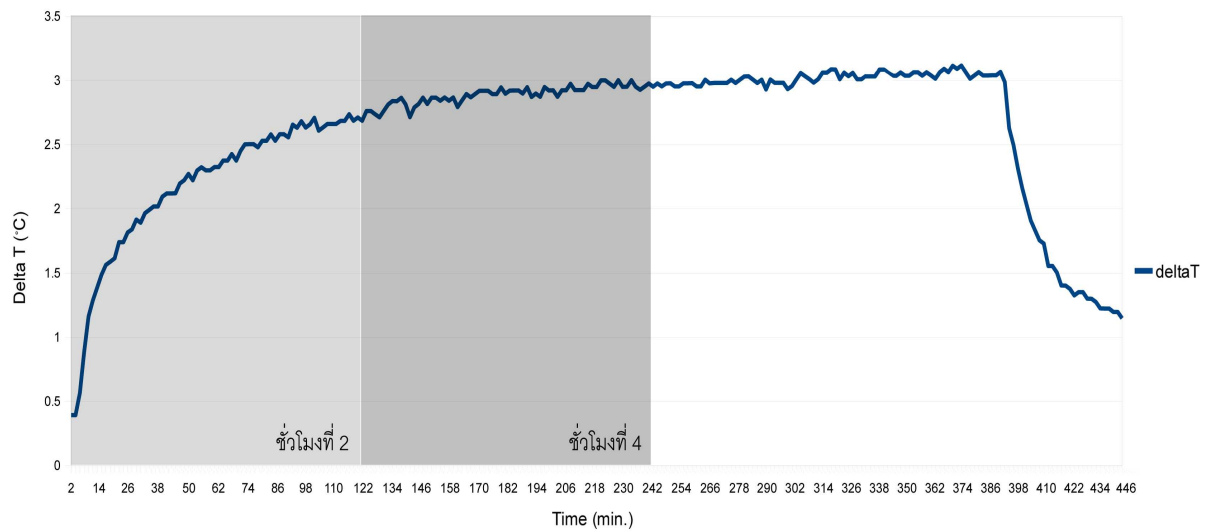
รูปที่ 3.14 การติดเซ็นเซอร์ของเครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิเข้ากับวัสดุ

### ขั้นตอนที่ 2

นำวัสดุต้นแบบไปทำการทดลองโดยใช้กล่องวางในห้องแบบปิด เปิดไฟให้ความร้อนจนวัสดุอิ่มตัวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที แล้วปิดไฟเพื่อให้วัสดุคลายความร้อนออกเป็นเวลาอีก 4 ชั่วโมง เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ (Time-lag)

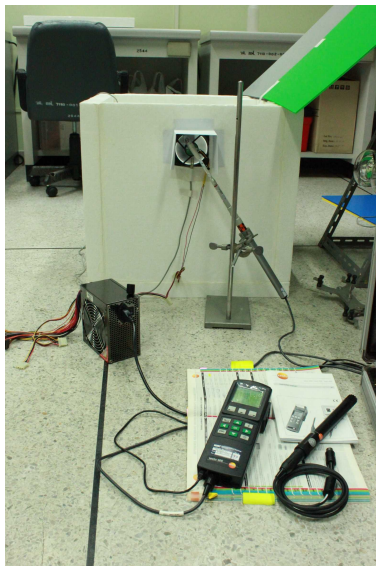
โดยระยะเวลาในการให้ความร้อนวัสดุ ได้มาจากการเปิดไฟให้กับวัสดุที่หนาที่สุด คือหนา 8 เซนติเมตรทิ้งไว้ทั้ง 8 ชั่วโมง แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟเพื่อดูเวลาที่วัสดุดังกล่าวอิ่มตัว จากกราฟจะเห็นว่ากราฟเริ่มเข้าสู่เส้นตรงที่เวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที เนื่องจากเวลาในการทำการวิจัยค่อนข้างจำกัด ดังนั้นระยะเวลาที่พอเหมาะในการให้ความร้อนคือ 4 ชั่วโมง

แผนภูมิที่ 3.1 แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิออก (Delta T) ของวัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ที่มีการให้ความร้อนเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

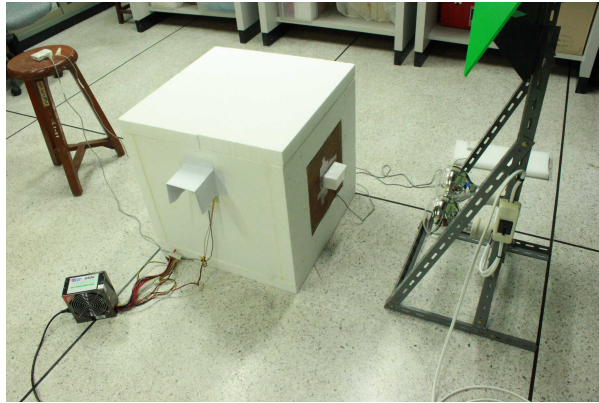


### ขั้นตอนที่ 3

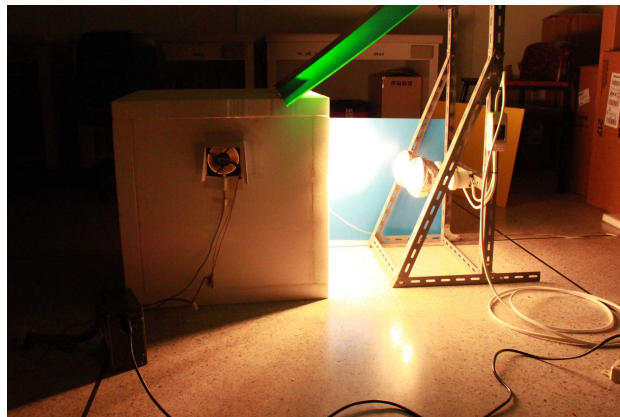
เก็บข้อมูลจาก Data logger เพื่อนำไปคำนวณค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิออก และค่า Q ของวัสดุ เพื่อนำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบให้เห็นประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน และการคายความร้อนในสถานะเสมือนการใช้งานจริง



รูปที่ 3.15 แสดงการวัดความเร็วลมของพัดลมระบายอากาศเพื่อคำนวณหา CFM



รูปที่ 3.16 ลักษณะการตั้งกล่องทดลอง และตำแหน่งของไฟอินฟราเรด



รูปที่ 3.17 กล่องทดลองเมื่อเปิดไฟ

### 3.5 ช่วงการทดลอง (การทดสอบในห้องทดลอง และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์)

#### ขั้นตอนที่ 1

นำวัสดุต้นแบบส่งเข้าห้องทดลองเพื่อหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, K) และค่าการต้านทานความร้อน(R) ในห้องทดลองของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ด้วยเครื่องทดสอบของ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda โดยเป็นการทดสอบแบบ Heat Flow Meter ตามมาตรฐาน ASTM C 518, ISO 8301, BSEN 12667 และ JISA 1412 ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน คือ พลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะนำมาไว้ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ  $22 \pm 5^{\circ}\text{C}$  และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 10$  อย่างน้อย 24 ชั่วโมงโดยมวลของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบใส่เข้าเครื่องทดสอบโดยวางอยู่ระหว่างแผ่นความร้อนและแผ่นความเย็น

จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิให้แตกต่างกัน ( $\Delta T$ ) ระหว่างแผ่นอุณหภูมิความร้อน และแผ่นความเย็น ภายในเครื่องทดสอบมีฉนวนล้อมรอบตลอดแนวความหนาของแผ่นอุณหภูมิและชิ้นทดสอบเพื่อให้ป้องกันการสูญเสียความร้อน เครื่องจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากเซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ที่ติดอยู่กับผิว

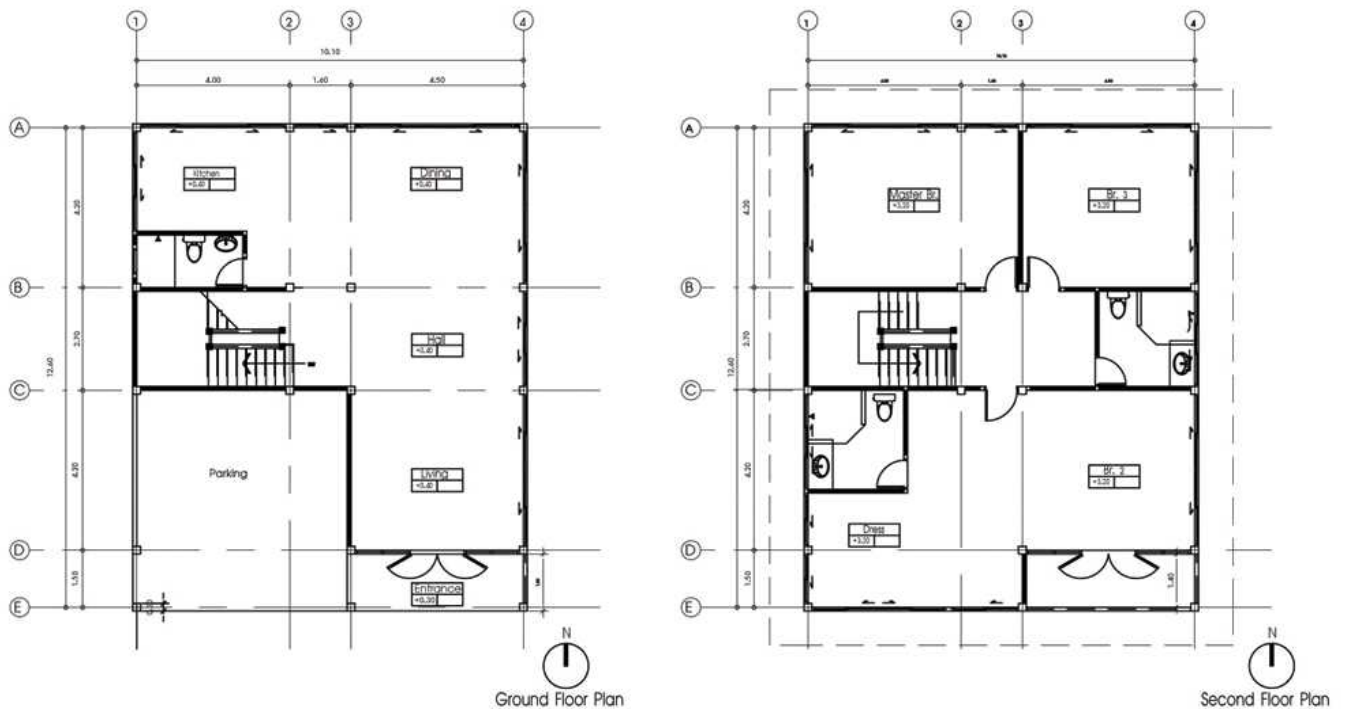
ของแผ่นอุณหภูมิทั้งสองโดยการวัดการไหลของความร้อนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นทั้งสองเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady-state condition)

วัสดุที่จะนำไปเข้าเครื่องทดสอบดังกล่าวจะต้องมีขนาดขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 8 เซนติเมตร มีผิวเรียบเสมอกัน การทำงานของเครื่องจะให้ความร้อนวัสดุด้วยแผ่นความร้อน (Hot plate) ที่ด้านบนวัสดุ โดยด้านล่างวัสดุจะมีแผ่นความเย็น (Cold plate) เป็นตัวช่วยระบายความร้อน โดยแผ่นความร้อนจะให้อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และคำนวณผลออกมาด้วยคอมพิวเตอร์[21]

## ขั้นตอนที่ 2

หลังจากได้ค่าการถ่ายเทความร้อน (U factor) และค่าการคายความร้อน ( $\dot{C}$ ) แล้ว นำค่าที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว มาใส่ค่าในโปรแกรมจำลองประสิทธิภาพพลังงาน ในสภาพอากาศของประเทศไทย ด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 ทำการจำลองเปรียบเทียบวัสดุต้นแบบชนิดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน โดยช่วงเวลาที่ใส่สอยอาคารในการจำลองเพื่อหาค่าการใช้พลังงาน เป็นลักษณะการใช้งานในแบบบ้านพักอาศัย คือใช้งานในช่วงเวลากลางคืนเป็นส่วนใหญ่

รูปแบบอาคารที่นำมาอ้างอิงในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นบ้านพักอาศัยสองชั้นที่มีผังเรียบง่ายเหมือนกับรูปแบบบ้านตามหมู่บ้านจัดสรร ดังที่แสดงในภาพ



รูปที่ 3.18 รูปแบบอาคารอ้างอิง (Reference Building) ที่ใช้ในการศึกษา [21]

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการทดลองสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองด้วยกล่องทดลองเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพคล้ายการใช้งานจริงเพื่อนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ และส่วนที่สองเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ และนำผลการทดลองดังกล่าวไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูประสิทธิภาพเมื่อนำวัสดุต้นแบบดังกล่าวไปใช้ในอาคารประเภทพักอาศัย

#### 4.1 ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง

ในส่วนของการทดลองด้วยกล่องทดลองทดลองเพื่อนำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ โดยจะติดตั้งวัสดุต้นแบบทั้ง 9 แบบ คือ

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้  
 วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้  
 วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ว  
 วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ว  
 วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ว

วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต  
 วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต  
 วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต

และวัสดุเปรียบเทียบพื้นฐาน (Base Case) เป็นผนังก่ออิฐมวลเบาครึ่งแผ่นฉาบเรียบ ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร เข้ากับกล่องทดลองมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีขนาดภายในกล่อง 0.5 x 0.5 x 0.5 เมตร ผนังทั้ง 5 ด้านเป็นโฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene foam) หนา 2 นิ้ว (0.05 เมตร) ซึ่งมีค่าการ

กันความร้อน (R) = 1.35 วัสดุจะถูกติดตั้งในทิศทางตั้ง (Vertical) แหล่งความร้อนที่ใช้ให้ความร้อนแก่ วัสดุต้นแบบ ได้จากหลอดไฟอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ติดตั้งในทางตั้งเช่นเดียวกับ วัสดุต้นแบบ โดยกำหนดหัวข้อในการเปรียบเทียบดังนี้

เปรียบเทียบผนังหนา 4 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน

เปรียบเทียบผนังหนา 6 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน

เปรียบเทียบผนังหนา 8 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน

เปรียบเทียบผนังไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร

วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนที่ใช่แล้ว ที่มีความหนา 4, 6 และ 8

เซนติเมตร

วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร

การวิจัยจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 2 นาที เป็นเวลา 7 ชั่วโมง 30 นาที โดยจะเปิดไฟให้ ความร้อนจนวัสดุอิ่มตัวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที แล้วปิดไฟเพื่อให้วัสดุคลายความร้อนออกเป็น เวลาอีก 4 ชั่วโมง ข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์การหน่วงเหนี่ยวความร้อนของผนัง (Time-lag)

### ข้อจำกัดในการวิจัย

- การทดลองนี้เป็นการทดลองและเก็บข้อมูลในระบบปิด กล้องทดลองถูกตั้งอยู่ในห้องแบบ ปิดเพื่อลดผลกระทบจากภายนอกที่จะมีผลต่ออุณหภูมิที่วัดได้

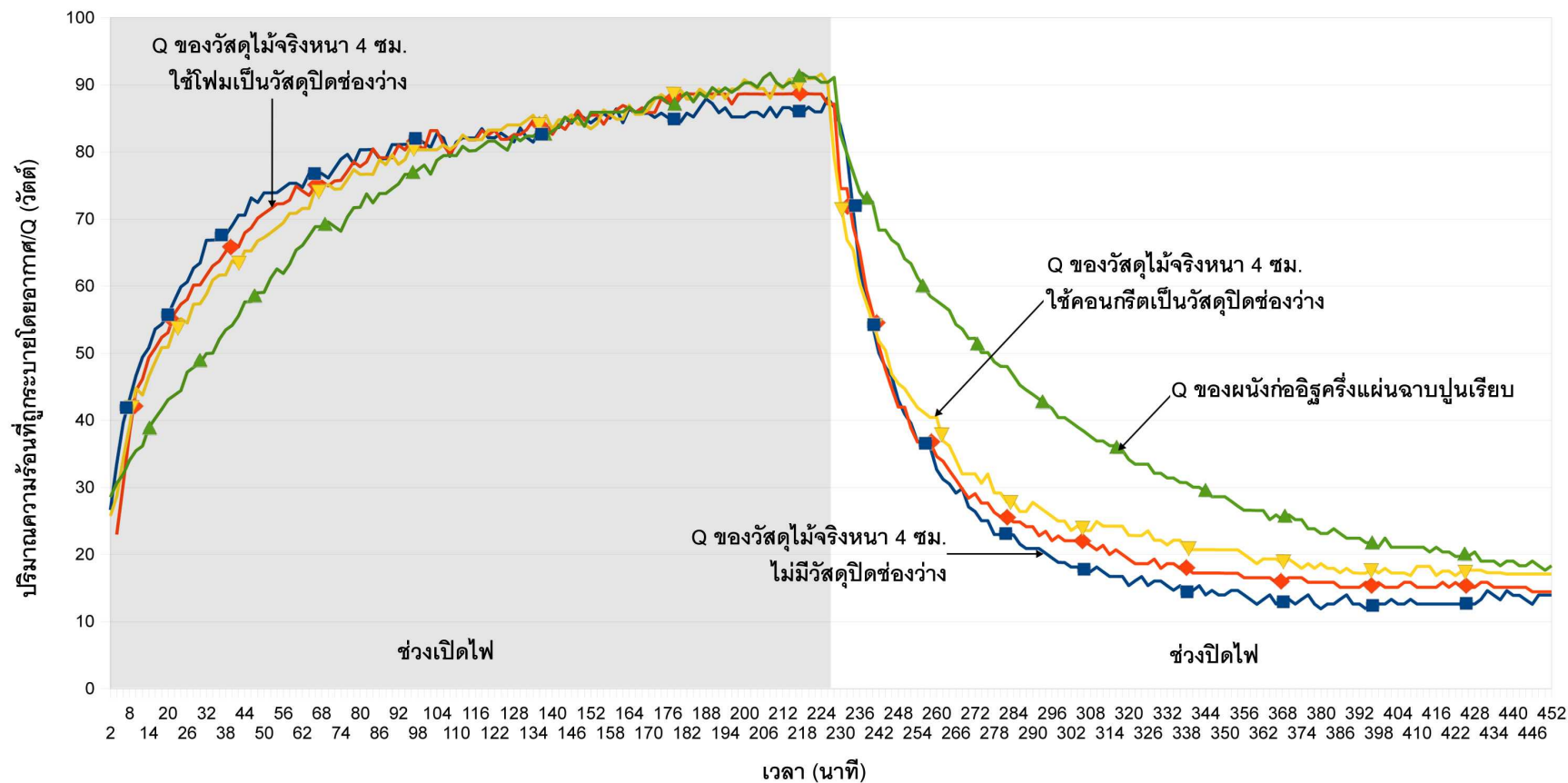
- การทดลองนี้ทดลองเปรียบเทียบผนังต้นแบบที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรกับวัสดุ เปรียบเทียบพื้นฐาน (Base Case) เป็นผนังก่ออิฐมวลฉนวนครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบเท่านั้น

### ผลการทดลอง

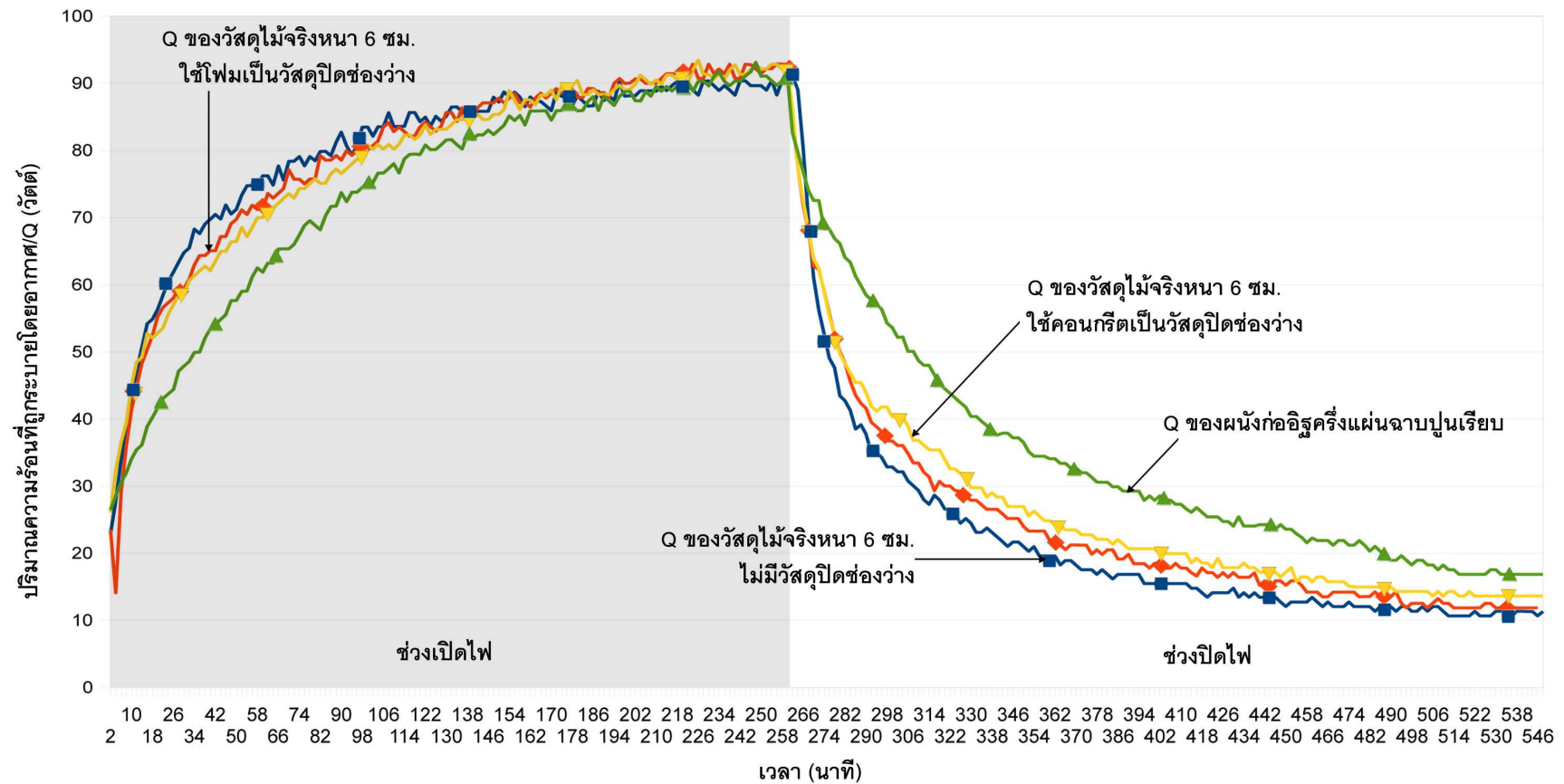
จากการทดลองมีผลการทดลองดังนี้



แผนภูมิที่ 4.1 เปรียบเทียบผนังหนา 4 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน

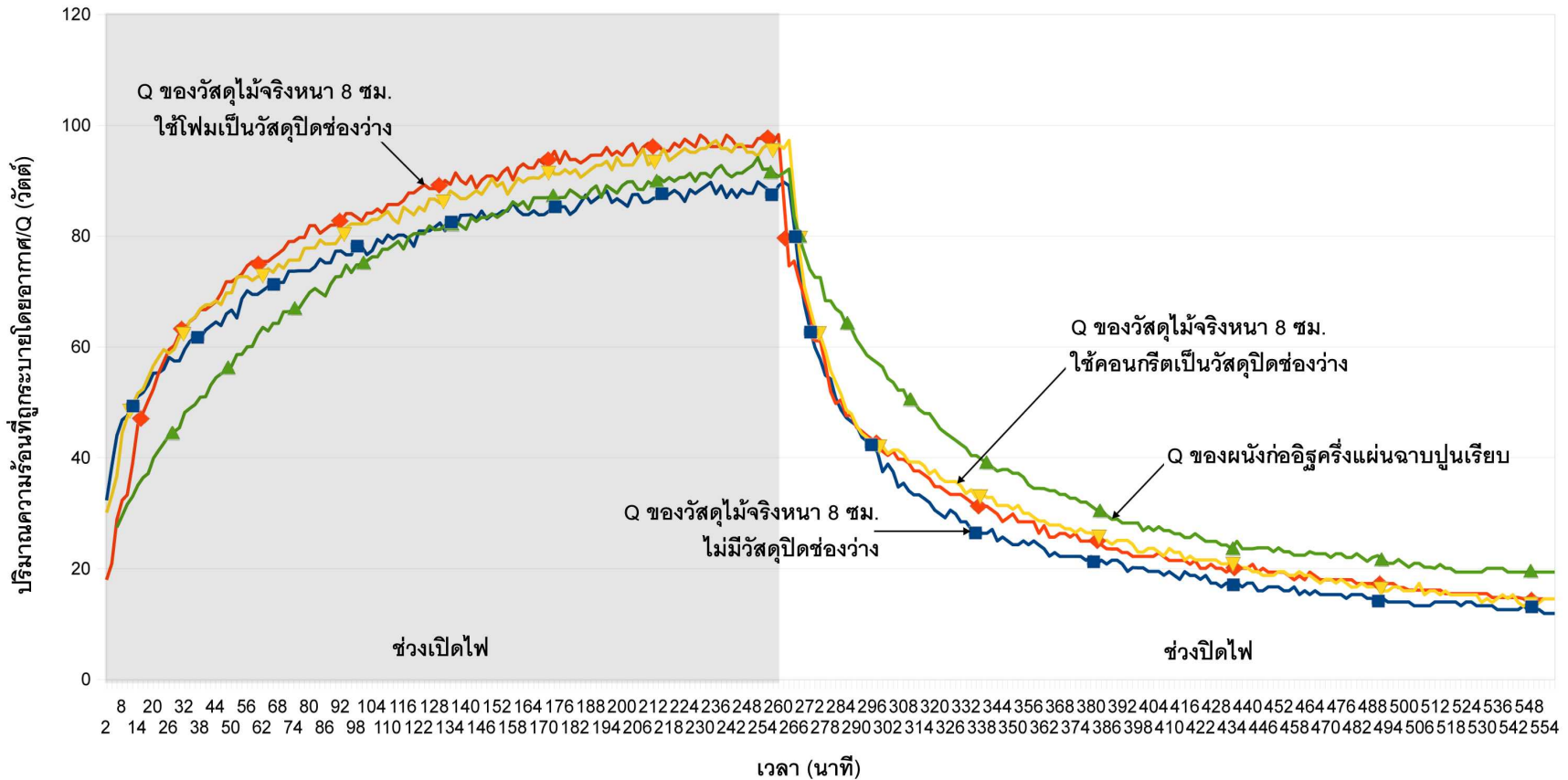


แผนภูมิที่ 4.2 เปรียบเทียบผนังหนา 6 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน



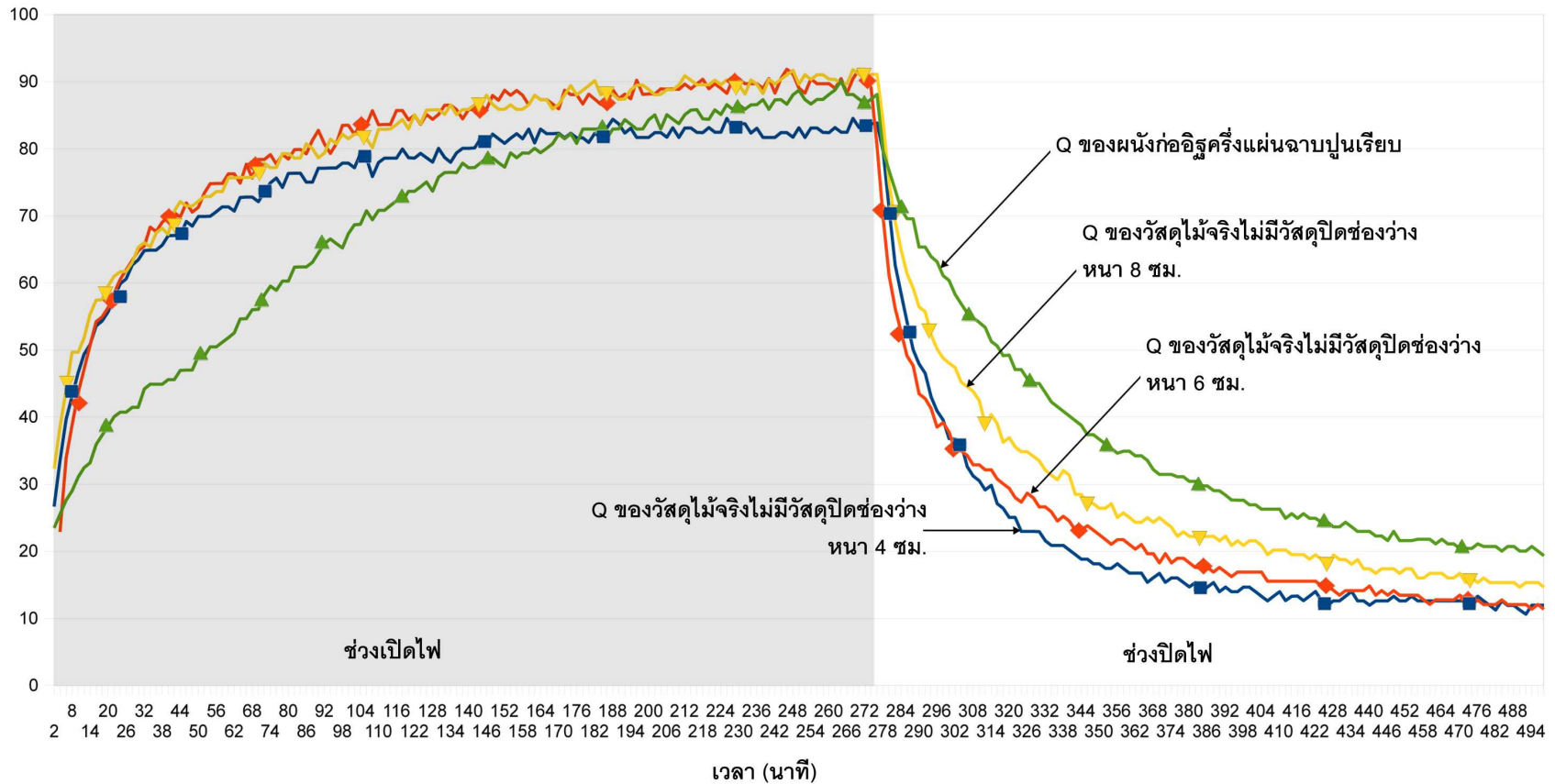
- Q ของวัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. ไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง
- ◆ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. ใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▼ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▲ Q ของผนังก่ออิฐครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ

แผนภูมิที่ 4.3 เปรียบเทียบผนังหนา 8 เซนติเมตรเท่ากัน ที่ใช้วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ต่างชนิดกัน



- Q ของวัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. ไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง
- ▼ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ◆ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. ใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▲ Q ของผนังก่ออิฐครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ

แผนภูมิที่ 4.4 เปรียบเทียบผนังไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร



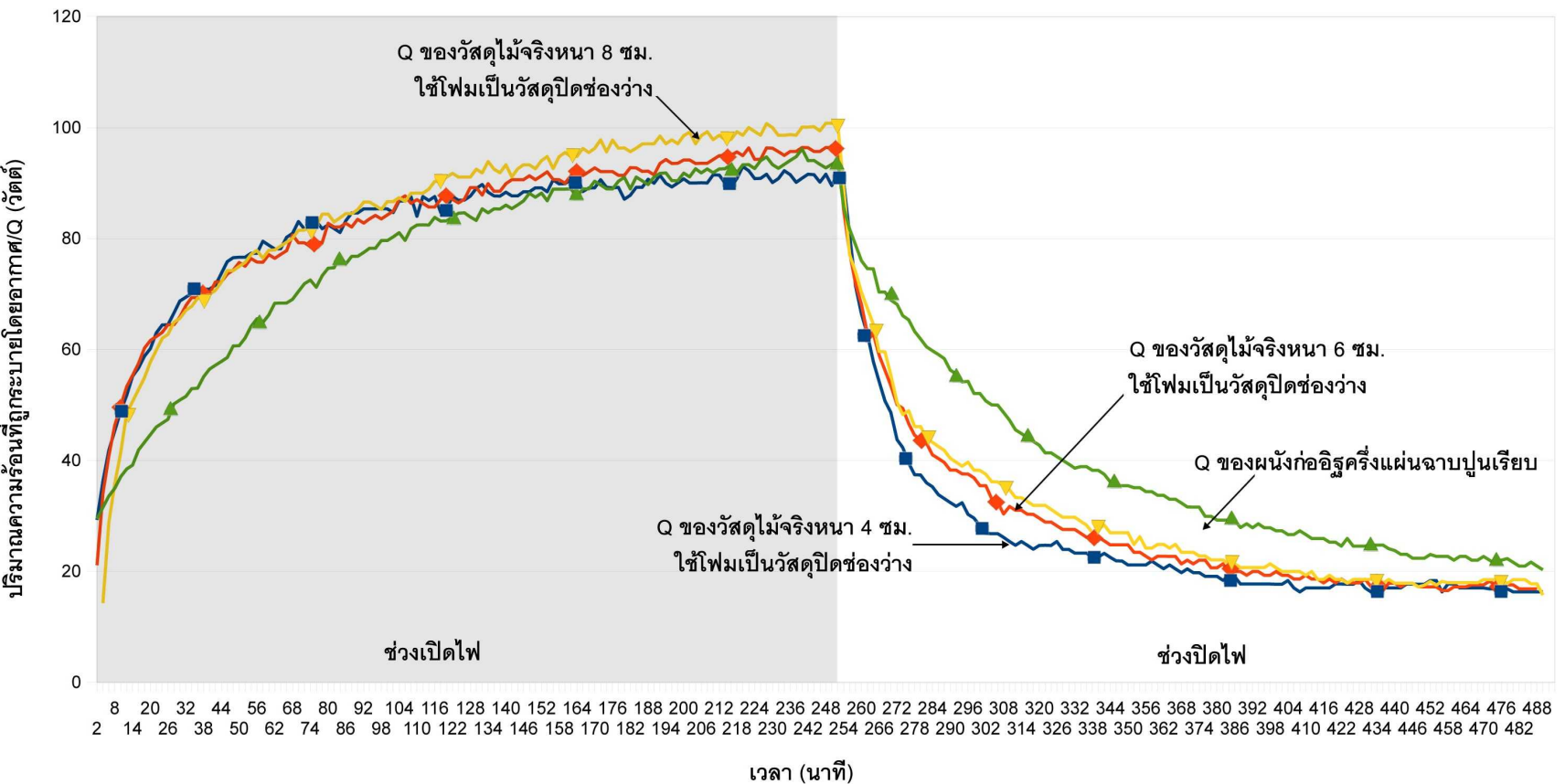
■ Q ของวัสดุไม้จริงไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง หนา 4 ซม.

▼ Q ของวัสดุไม้จริงไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง หนา 8 ซม.

◆ Q ของวัสดุไม้จริงไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง หนา 6 ซม.

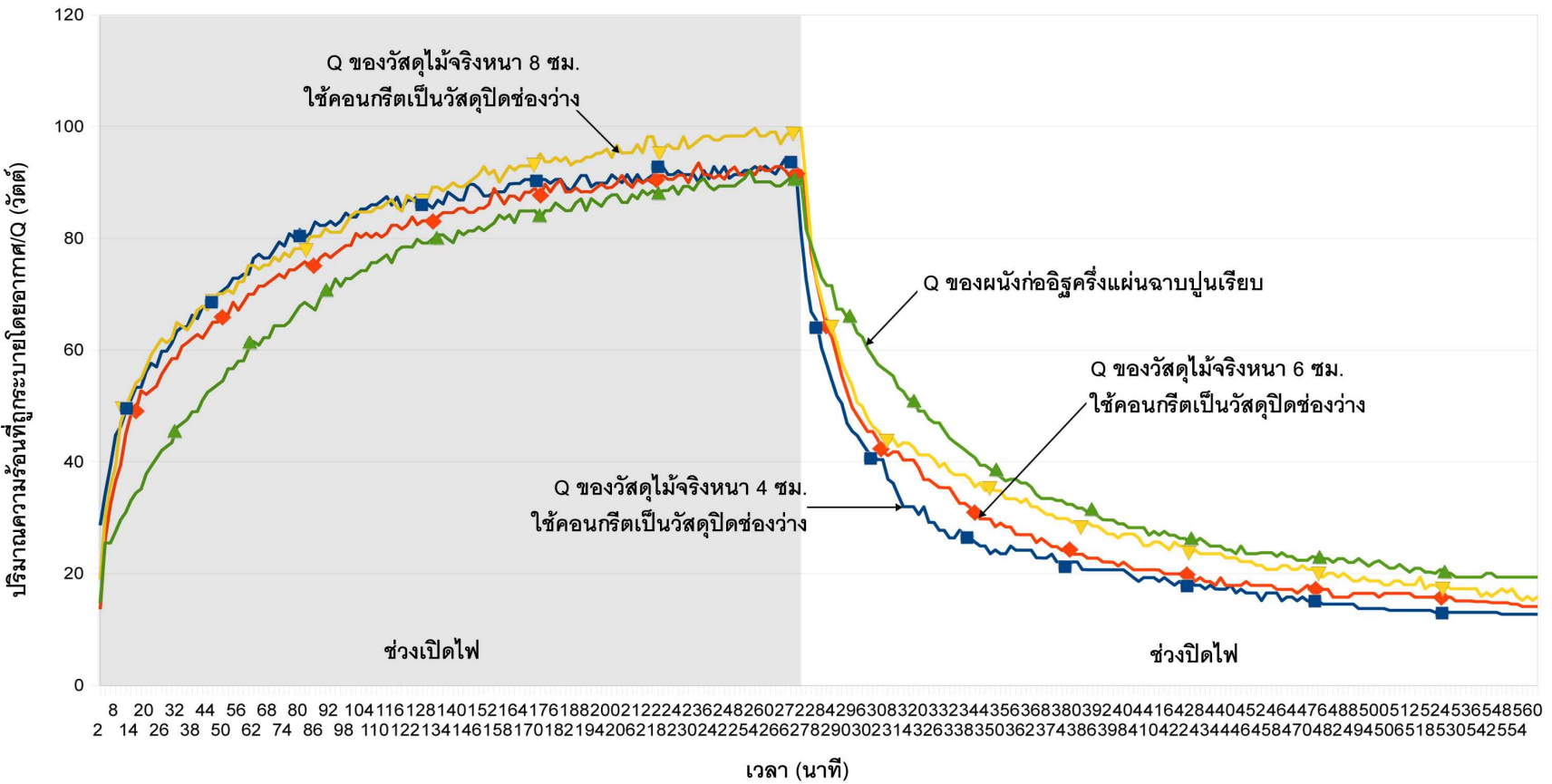
▲ Q ของผนังก่ออิฐครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ

แผนภูมิที่ 4.5 วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร



- Q ของวัสดุไม้จริงหนา 4 ซม. ใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▼ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. ใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ◆ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. ใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▲ Q ของผนังก่ออิฐครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ

แผนภูมิที่ 4.6 วัสดุไม้จริงที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต ที่มีความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร



- Q ของวัสดุไม้จริงหนา 4 ซม. ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ◆ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▼ Q ของวัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่าง
- ▲ Q ของผนังก่ออิฐครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ

ตารางที่ 4.1 สรุปอุณหภูมิจากการทดลองวัสดุผนังทั้งหมด

ประเภทผนัง	อุณหภูมิผิวผนังด้านใน (°C)			อุณหภูมิผิวผนังด้านนอก (°C)			ความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิกากาศภายนอก และภายในกล่อง (°C)		
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้	40.38	28.56	34.05	58.33	29.39	43.35	2.38	0.32	1.33
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้	46.95	29.91	37.05	64.56	29.49	44.79	3.23	0.4	1.62
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้	46.62	29.74	37.84	65.95	30.38	47.81	3.26	0.52	1.82
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟม โพลีสไตรีนใช้แล้ว	49.71	30.69	40.16	62.14	31.07	46.77	3.34	0.48	1.94
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟม โพลีสไตรีนใช้แล้ว	46.74	30.41	38.29	67.92	30.82	48.92	3.08	0.44	1.66
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟม โพลีสไตรีนใช้แล้ว	45.36	32.68	38.55	64.18	33.55	48.72	3.73	0.64	2.2
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 4 ซม. ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วย คอนกรีต	50.07	31.55	42	58.46	31.99	46.96	3.52	0.51	2.19
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 6 ซม. ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วย คอนกรีต	48.96	33.03	41.11	65.7	34	51.13	3.47	0.59	2.14
วัสดุไม้จริงที่มีความหนา 8 ซม. ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วย คอนกรีต	46.22	32.49	38.78	60.76	33.2	46.6	3.73	0.59	2.08
ผนังก่ออิฐมวลเบาครึ่งแผ่นฉาบเรียบ	57.63	31.94	44.17	68.71	31.52	50.71	3.51	0.59	1.91

จากแผนภูมิที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของผนังไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ และใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้โดยทั้งหมดมีความหนาเท่ากันคือ 4 เซนติเมตร เทียบกับผนังก่ออิฐมวลฉนวนครึ่งแผ่นฉนวนปูนเรียบ จะเห็นได้ว่าในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่ผนังทั้ง 4 แบบ ผนังที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ความร้อนขึ้นเร็วที่สุด ตามมาด้วยผนังไม้จริงที่ใช้เม็ดโฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ และผนังไม้จริงที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างตามลำดับ ส่วนผนังก่ออิฐฉนวนปูนเป็นผนังที่ความร้อนขึ้นช้าที่สุด แต่เมื่อหยุดให้ความร้อนแก่ผนัง ผนังไม้ทั้ง 3 แบบอัตราการคายความร้อนเร็วกว่าผนังก่ออิฐฉนวนปูนอย่างเห็นได้ชัด โดยผนังที่ไม่มีการปิดช่องว่างคายความร้อนเร็วสุด ตามมาด้วยปิดช่องว่างด้วยโฟม และคอนกรีตเป็นอันดับสุดท้าย

จากแผนภูมิที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของผนังไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ และใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้โดยทั้งหมดมีความหนาเท่ากันคือ 6 เซนติเมตร เทียบกับผนังก่ออิฐมวลฉนวนครึ่งแผ่นฉนวนปูนเรียบ ในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่ผนัง ผนังไม้ทั้ง 3 แบบความร้อนจะขึ้นสูงเร็วกว่าผนังก่ออิฐฉนวนปูน โดยที่ผนังไม้จริงที่ใช้คอนกรีตปิดช่องว่างระหว่างไม้เป็นผนังไม้ชนิดที่ความร้อนขึ้นสูงช้าที่สุดใน 3 แบบเนื่องจากได้อิทธิพลจากคุณสมบัติที่เก็บกักความร้อนไว้ได้นานของคอนกรีต เมื่อหยุดให้ความร้อนแก่ผนัง ผนังไม้ทั้ง 3 แบบอัตราการคายความร้อนเร็วกว่าผนังก่ออิฐฉนวนปูน แต่เมื่อเทียบกับในแผนภูมิที่ 4.1 กราฟของผนังไม้ทั้ง 3 แบบเข้าใกล้กราฟของผนังก่ออิฐฉนวนปูนมากกว่าเนื่องจากมวลของผนังที่มากขึ้นทำให้สามารถคายความร้อนได้ช้าลง โดยผนังที่ไม่มีการปิดช่องว่างคายความร้อนเร็วสุด ตามมาด้วยปิดช่องว่างด้วยโฟม และคอนกรีตเป็นอันดับสุดท้าย เช่นเดียวกับแผนภูมิที่ 4.1 ต่างกันตรงที่ในแผนภูมิที่ 4.1 ผนังหนา 4 เซนติเมตรที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างการคายความร้อนเร็วกว่าผนังอีกสองชนิดอย่างชัดเจน แต่ในแผนภูมิที่ 4.2 ผนังหนา 6 เซนติเมตรที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างอัตราการคายความร้อนค่อนข้างใกล้เคียงกับผนังอีกสองชนิดมากกว่า

จากแผนภูมิที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของผนังไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ และใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้โดยทั้งหมดมีความหนาเท่ากันคือ 8 เซนติเมตร เทียบกับผนังก่ออิฐมวลฉนวนครึ่งแผ่นฉนวนปูนเรียบ ในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่ผนัง ผนังไม้จริงที่ใช้เม็ดโฟมและผนังไม้จริงที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างความร้อนจะขึ้นสูงเร็วที่สุดและใกล้เคียงกันมากโดยผนังที่ใช้เม็ดโฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างความร้อนขึ้นเร็วกว่าเล็กน้อย ในขณะที่ผนังที่ไม่มีการปิดช่องว่างความร้อนก็ขึ้นสูงในลักษณะเดียวกับผนังสองแบบข้างต้นแต่ปริมาณความร้อนที่เข้ามาได้ต่ำกว่า ส่วน



ผนังก่ออิฐฉาบปูนเป็นผนังที่ความร้อนขึ้นช้าที่สุดเช่นเดียวกับแผนภูมิที่ 4.1 เมื่อหยุดให้ความร้อนแก่ผนัง การคายความร้อนของผนังไม้ทั้ง 3 แบบใกล้เคียงกับการคายความร้อนของผนังก่ออิฐฉาบปูนมากกว่าวัสดุความหนา 4 และ 6 เซนติเมตร เช่นเดียวกับแผนภูมิที่ 4.1 และ 4.2 ผนังที่ไม่มีเปิดช่องว่างคายความร้อนเร็วสุด ตามมาด้วยเปิดช่องว่างด้วยโฟม และคอนกรีตเป็นอันดับสุดท้าย

จากแผนภูมิที่ 4.4 จะเห็นว่าลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของวัสดุผนังไม้จริงที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ที่ความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความร้อนจะขึ้นเร็วในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่วัสดุ และจะคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันเมื่อหยุดให้ความร้อนแก่วัสดุเนื่องจากลักษณะเซลล์ของเซลลูโลสในเนื้อไม้มีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้รับความร้อนได้เร็วและคายความร้อนออกได้เร็วเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนครั้งแผ่นฉาบปูนเรียบจะเห็นว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนในช่วงแรกที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่วัสดุความร้อนจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าผนังไม้ทั้ง 3 ความหนา แต่เมื่อหยุดให้ความร้อน ความร้อนในผนังก่ออิฐฉาบปูนก็คายออกมาได้ช้ากว่าผนังไม้เช่นเดียวกัน

เมื่อดูเปรียบเทียบกันเองในกลุ่มของผนังไม้จริงที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างที่ความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร จะเห็นว่าในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่ผนัง ผนังความหนา 6 และ 8 เซนติเมตรความร้อนขึ้นในอัตราที่ใกล้เคียงกันมาก โดยที่ผนังความหนา 4 เซนติเมตรความร้อนจะขึ้นน้อยที่สุด เมื่อหยุดให้ความร้อนผนังความหนา 4 เซนติเมตรก็เป็นผนังที่คายความร้อนออกเร็วที่สุด ส่วนผนังความหนา 6 และ 8 เซนติเมตรที่ในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนความร้อนขึ้นมาใกล้เคียงกัน ในช่วงที่หยุดให้ความร้อนแล้วผนังความหนา 6 เซนติเมตรคายความร้อนออกมาเร็วกว่าผนังความหนา 8 เซนติเมตร

จากแผนภูมิที่ 4.5 จะเห็นว่าลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของวัสดุผนังไม้จริงที่ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้ววัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ที่ความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความร้อนจะขึ้นเร็วในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่วัสดุ และจะคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันเมื่อหยุดให้ความร้อนแก่วัสดุเช่นเดียวกับแผนภูมิที่ 4.4 แต่ต่างกันตรงที่ในแผนภูมิที่ 4.4 ผนังไม้จริงที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างความหนา 4 เซนติเมตรเส้นกราฟจะอยู่ต่ำความหนา 6 และ 8 เซนติเมตรอย่างชัดเจน ในขณะที่ในแผนภูมิที่ 4.5 เมื่อเปลี่ยนเป็นผนังไม้จริงที่ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนปิดช่องว่างระหว่างไม้ กราฟของความหนาทั้ง 4, 6 และ 8 เซนติเมตรใกล้เคียงกันมากกว่าไม่มีวัสดุปิดผนังเลย โดยผนังหนา 4 เซนติเมตรความร้อนขึ้นน้อยที่สุดและคายความร้อนเร็วที่สุด ตามมาด้วยผนังหนา 6 เซนติเมตร และผนัง 8 เซนติเมตร เป็นความหนาที่ความร้อนสูงที่สุดและคายความร้อนช้าที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนครั้งแผ่นฉาบปูนเรียบจะเห็นว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนในช่วงแรกที่เปิดไฟให้ความร้อนแก่วัสดุความร้อนจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าผนังไม้ทั้ง 3 ความหนา แต่เมื่อหยุดให้ความร้อน ความร้อนในผนังก่ออิฐฉาบปูนก็คายออกมาได้ช้ากว่าผนังไม้เช่นเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบ

เทียบกับแผนภูมิที่ 4.4 กราฟของผนังวัสดุไม้ที่ปิดช่องด้วยเม็ดโฟมจะเข้าใกล้กราฟของผนังก่ออิฐฉาบปูนมากกว่า แสดงว่าการใส่เม็ดโฟเข้าไปทำให้ผนังร้อนช้าลง ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้คายความร้อนช้าลงเช่นเดียวกัน

จากแผนภูมิที่ 4.6 จะเห็นว่าลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของวัสดุผนังไม้จริงที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร กราฟเข้าใกล้กราฟของผนังก่ออิฐฉาบปูนมากกว่าในแผนภูมิที่ 4.4 และ 4.5 โดยมีจุดที่แตกต่างจากสองแผนภูมิข้างต้นคือลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุผนังความหนา 4 เซนติเมตร ในช่วงที่เปิดไฟให้ความร้อนกับวัสดุความร้อนขึ้นเร็วเกินผนังทั้งความหนา 6 และ 8 เซนติเมตรเนื่องจากเนื้อมวลของวัสดุน้อยกว่า แต่เมื่อหยุดให้ความร้อนก็ยังคงสามารถคายความร้อนได้รวดเร็วกว่าผนังความหนา 6 และ 8 เซนติเมตรเช่นเดียวกับผนังที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง และใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่าง

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อดูลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของวัสดุผนังไม้จริงทั้ง 9 แบบเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนเรียบ พบว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนความร้อนจะเพิ่มขึ้นช้าในช่วงแรกและเมื่อหยุดให้ความร้อนตัววัสดุก็คายความร้อนออกมาได้ช้าเช่นเดียวกันซึ่งพฤติกรรมด้านความร้อนเช่นนี้ไม่เหมาะกับบ้านพักอาศัยซึ่งส่วนมากจะใช้เวลาในช่วงกลางวัน ส่วนวัสดุผนังที่มีส่วนประกอบจากไม้จริงความร้อนจะสามารถถ่ายเทผ่านวัสดุเข้าไปได้เร็วแต่ก็สามารถคายความร้อนได้เร็วเช่นเดียวกันเนื่องจากไม่มีเซลล์ของเซลล์โลสที่มีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งเหมาะกับบ้านพักอาศัยมากกว่า แต่ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่สามารถถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุได้เร็วให้ช้าลงจึงทดลองใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีน และคอนกรีตปิดช่องว่างระหว่างไม้ พบว่ากรณีที่ใช้เม็ดโฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ความร้อนผ่านเข้ามาได้ช้าลงแต่ด้วยความเป็นฉนวนของโฟมทำให้ความร้อนผ่านออกมาได้ช้าเช่นกันแต่ก็ยังอยู่ในระดับใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างเลย ส่วนกรณีใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ความร้อนผ่านเข้ามาได้ช้าที่สุดเมื่อเทียบกับไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง และใช้เม็ดโฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างและเมื่อหยุดให้ความร้อนการคายความร้อนก็คายออกมาได้ช้าที่สุดโดยค่อนข้างใกล้เคียงกับการคายความร้อนของคอนกรีตเนื่องจากมวลสารของคอนกรีตเก็บความร้อนเอาไว้ในขณะที่โฟมเนื้อมวลของมันไม่ได้เก็บความร้อน เพียงแต่ทำให้พื้นที่ที่ความร้อนจะถ่ายเทออกมาน้อยลงทำให้ความร้อนถ่ายเทออกมาได้ช้ากว่ากรณีที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้เลย โดยทั้งนี้ผลที่ออกมาขึ้นอยู่กับมวลสารของวัสดุผนังด้วย ยิ่งผนังที่มีมวลสารมากลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อนยิ่งเข้าใกล้กราฟของผนังก่ออิฐฉาบปูน กล่าวคือความร้อนขึ้นช้าในช่วงแรก และเมื่อปิดไฟความร้อนก็คายออกมาได้ช้าเช่นกัน

## 4.2 ส่วนการทดสอบในห้องทดลอง และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 4.2.1 ส่วนการทดสอบในห้องทดลอง

นำวัสดุต้นแบบส่งเข้าห้องทดลองเพื่อหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, K) และค่าการต้านทานความร้อน(R) ในห้องทดลองของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ด้วยเครื่องทดสอบของ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda โดยเป็นการทดสอบแบบ Heat Flow Meter ตามมาตรฐาน ASTM C 518, ISO 8301, BSEN 12667 และ JISA 1412 ใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน คือ พลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบจะนำมาไว้ในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิ  $22 \pm 5^{\circ}\text{C}$  และ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $50 \pm 10$  อย่างน้อย 24 ชั่วโมงโดยมวลของชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกินร้อยละ 1 หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบใส่เข้าเครื่องทดสอบโดยวางอยู่ระหว่างแผ่นความร้อนและแผ่นความเย็น แผ่นความร้อนจะให้อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และคำนวณผลออกมาด้วยคอมพิวเตอร์ วัสดุที่จะนำไปเข้าเครื่องทดสอบดังกล่าวจะต้องมีขนาดขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร และหนาไม่เกิน 8 เซนติเมตร มีผิวเรียบเสมอกัน

### 4.2.2 ส่วนการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

หลังจากได้ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, K) และค่าการต้านทานความร้อน(R) จากห้องทดลองแล้ว นำมาเข้าสู่ตรรกาคำนวณหาค่า Thermal Transmittance หรือ U-value หลังจากนั้นนำไปแทนค่าในค่า U-value ของวัสดุในโปรแกรม Visual DOE 4.1 โดยประเภทของอาคารที่นำมาใช้จำลองเป็นอาคารประเภทพักอาศัยที่กำหนดให้ใช้งานในช่วงเวลากลางคืนในวันธรรมดา และใช้งานทั้งวันในวันหยุด

### ผลการทดสอบ

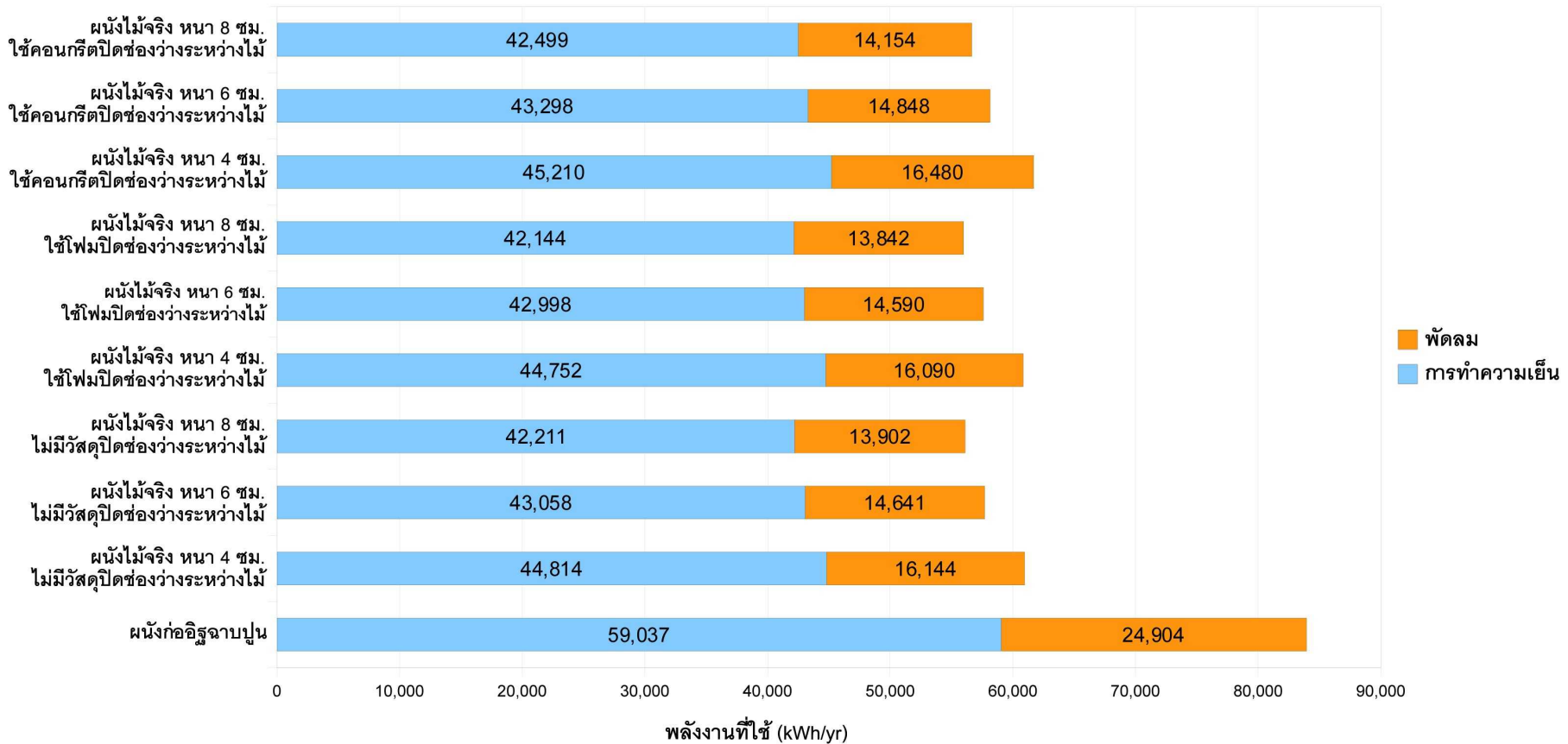
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบหาคุณสมบัติในการนำความร้อน และการต้านทานความร้อนของวัสดุในห้องทดลอง

ค่าที่วัด	วัสดุไม้จริง ไม่มีการปิดช่องว่าง			วัสดุไม้จริงปิดช่องว่าง ด้วยโฟมโพลีสไตรีน			วัสดุไม้จริงปิดช่องว่าง ด้วยคอนกรีต		
	4 ซม.	6 ซม.	8 ซม.	4 ซม.	6 ซม.	8 ซม.	4 ซม.	6 ซม.	8 ซม.
Resistance (m <sup>2</sup> *K/W)	0.238	0.348	0.432	0.241	0.353	0.440	0.220	0.329	0.400
U-value (W/m <sup>2</sup> K)	4.201	2.874	2.315	4.149	2.833	2.272	4.545	3.040	2.500
Conductivity (W/m*K)	0.185			0.182			0.200		
Density (kg/m <sup>3</sup> )	658.78			660.44			697.34		

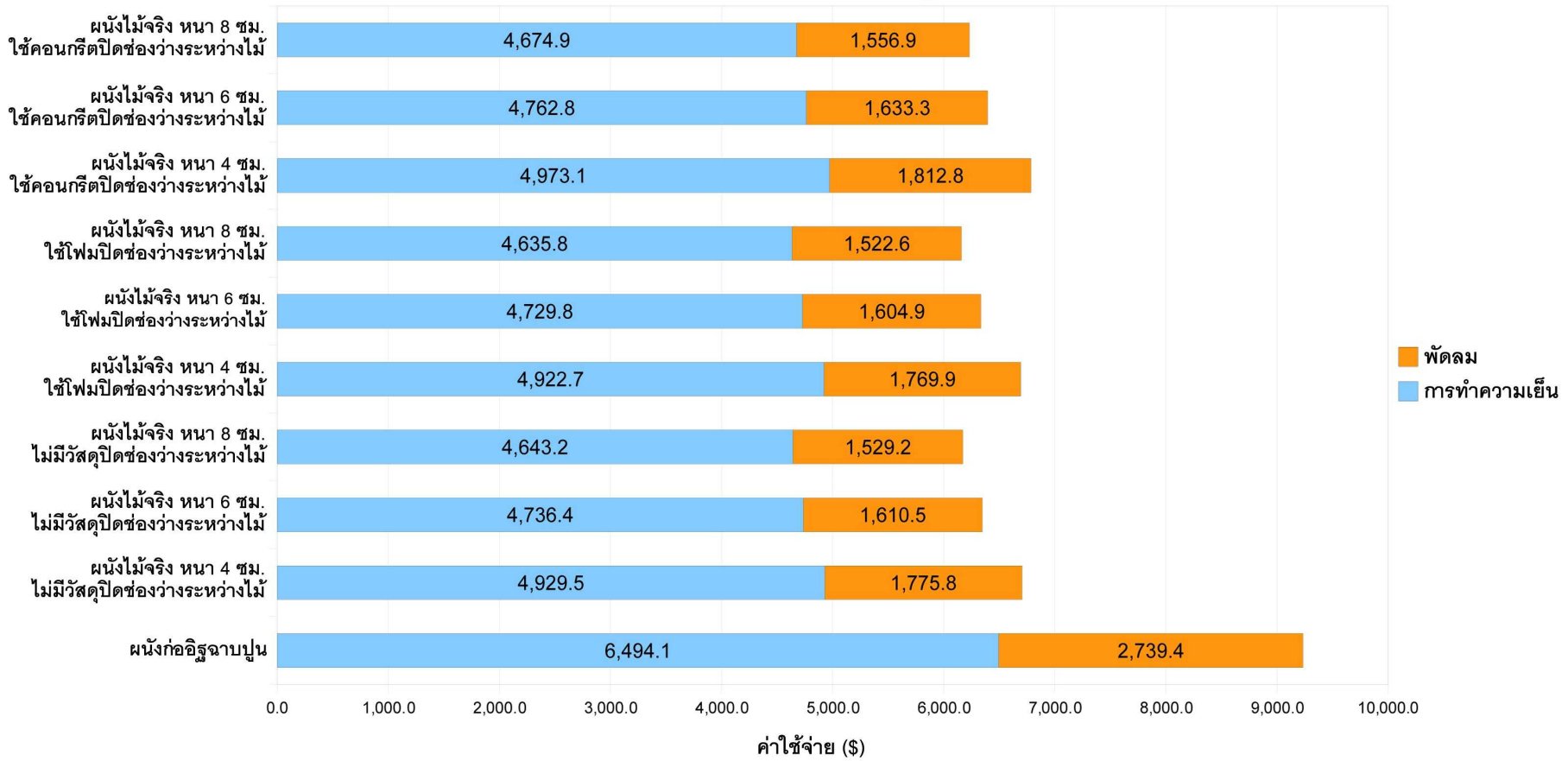
หมายเหตุ ค่าของ Thermal Transmittance หรือ U-value เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{ด้วย สูตร } U = 1/R$$

แผนภูมิที่ 4.7 แสดงปริมาณพลังงานสะสมทั้งปีที่ใช้ในบ้านพักอาศัยต้นแบบ เมื่อใช้ผนังประเภทต่างๆ เปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐมวลเบาครึ่งแผ่นฉาบเรียบ



แผนภูมิที่ 4.8 แสดงค่าใช้จ่ายที่ใช้จ่ายในด้านพลังงานเป็นเวลา 1 ปีของบ้านพักอาศัยต้นแบบ  
เมื่อใช้ผนังประเภทต่างๆ เปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐมวลฉนวนเรียบ



จากแผนภูมิที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานใน 1 ปีของบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังไม้ทั้ง 9 ประเภทกับบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูนเรียบ ผลออกมาว่าผนังไม้ทั้ง 9 ประเภทใช้พลังงานน้อยกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนทั้งสิ้น โดยใช้พลังงานในการทำความเย็นน้อยกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนโดยเฉลี่ยประมาณ 14,000 kWh/yr และใช้พลังงานในการทำงานของพัดลมน้อยกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนโดยเฉลี่ยประมาณ 1,000 kWh/yr

เมื่อเปรียบเทียบกันในกลุ่มของผนังไม้ทั้ง 9 ประเภท จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ไม่ต่างกันมากนัก โดยผนังไม้ที่ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้วเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรใช้พลังงานตลอดทั้งปีน้อยที่สุด ตามมาด้วยผนังไม้ที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร และผนังไม้ที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างผนังทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรเป็นผนังที่ใช้พลังงานตลอดทั้งปีมากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังไม้ประเภทอื่น และเมื่อเปรียบเทียบกันในวัสดุผนังประเภทเดียวกันความหนา 8 เซนติเมตรเป็นความหนาที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

จากแผนภูมิที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานใน 1 ปีของบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังไม้ทั้ง 9 ประเภทกับบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูนเรียบ ผลออกมาเป็นในแนวทางเดียวกับแผนภูมิที่ 4.7 โดยผนังไม้ทั้ง 9 ประเภทค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานน้อยกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนทั้งสิ้น เมื่อเปรียบเทียบกันในกลุ่มของผนังไม้ทั้ง 9 ประเภท จะเห็นว่าค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานไม่ต่างกันมากนัก โดยผนังไม้ที่ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้วเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตรค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานตลอดทั้งปีน้อยที่สุด ตามมาด้วยผนังไม้ที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร และผนังไม้ที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างผนังทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร เป็นผนังที่ค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานตลอดทั้งปีมากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังไม้ประเภทอื่น และเมื่อเปรียบเทียบกันวัสดุผนังประเภทเดียวกันความหนา 8 เซนติเมตรเป็นความหนาที่ค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานน้อยที่สุด

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 พบว่าผนังไม้จริงทั้ง 9 แบบช่วยลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นในบ้านพักอาศัยได้ประมาณร้อยละ 36 เมื่อเทียบกับการใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูน โดยเมื่อเปรียบเทียบกันในกลุ่มของผนังไม้ทั้ง 9 ประเภท จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ไม่ต่างกันมากนัก โดยผนังไม้ที่ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้วเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ใช้พลังงานตลอดทั้งปีน้อยที่สุด ตามมาด้วยผนังไม้ที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ และผนังไม้ที่ใช้คอนกรีตเป็น

วัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้เป็นผนังที่ใช้พลังงานตลอดทั้งปีมากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังไม้ประเภทอื่น ซึ่งข้อมูลจากผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนนี้ตรงกับความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ ที่ให้ผลออกมาว่าวัสดุที่ใช้โฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้เป็นวัสดุที่ความร้อนขึ้นช้ากว่าวัสดุที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ในขณะที่เดียวกันก็ยังคงความสามารถในการคายความร้อนได้ใกล้เคียงกับวัสดุที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ที่คายความร้อนได้เร็วที่สุด แต่มีข้อด้อยตรงความร้อนขึ้นเร็วมากในช่วงแรก



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการทดลองสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองด้วยกล่องทดลองเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพคล้ายการใช้งานจริงเพื่อนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ และส่วนที่สองเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการภายใต้การควบคุมของผู้เชี่ยวชาญ และนำผลการทดลองดังกล่าวไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อดูประสิทธิภาพเมื่อนำวัสดุต้นแบบดังกล่าวไปใช้ในอาคารประเภทพักอาศัย โดยวัสดุที่นำมาทดสอบมี 9 แบบ ได้แก่ วัสดุไม้จริงที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมโพลีสไตรีนที่ใช้แล้ว ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต ที่ความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับวัสดุเปรียบเทียบพื้นฐาน (Base Case) เป็นผนังก่ออิฐมวลฉนวนครึ่งแผ่นฉนวนเรียบ

*ส่วนที่ 1* เป็นส่วนของการทดลองด้วยกล่องทดลองทดลองเพื่อนำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้ไปวิเคราะห์ความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุ โดยจะติดตั้งวัสดุต้นแบบทั้ง 9 แบบ เข้ากับกล่องทดลองมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีขนาดภายในกล่อง  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  เมตร ผนังทั้ง 5 ด้านเป็นโฟมโพลีสไตรีน วัสดุจะถูกติดตั้งในทิศทางตั้ง (Vertical) แหล่งความร้อนที่ใช้ให้ความร้อนแก่วัสดุต้นแบบเป็นหลอดไฟอินฟราเรด ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 หลอด ติดตั้งในทางตั้งเช่นเดียวกับวัสดุต้นแบบ และจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 2 นาที ข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์การหน่วงเหนี่ยวความร้อนของผนัง (Time-lag)

*ส่วนที่ 2* เป็นการทดสอบในห้องทดลอง และจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำวัสดุต้นแบบส่งเข้าห้องทดลองเพื่อหาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, K) และค่าการต้านทานความร้อน(R) ในห้องทดลองของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ด้วยเครื่องทดสอบของ NETZSCH รุ่น HFM 436 Lambda โดยเป็นการทดสอบแบบ Heat Flow Meter ตามมาตรฐาน ASTM C 518, ISO 8301, BSEN 12667 และ JISA 1412 และคำนวณผลออกมาด้วยคอมพิวเตอร์ หลังจากได้ค่าการนำค่าที่ได้มาเข้าสู่ตรรกะคำนวณหาค่า Thermal Transmittance หรือ U-value แล้วนำไปแทนค่าในค่า U-value ของวัสดุในโปรแกรม Visual DOE 4.1 โดยประเภทของอาคารที่นำมาใช้จำลองเป็นอาคารประเภทพักอาศัยที่กำหนดให้ใช้งานในช่วงเวลากลางคืนในวันธรรมดา และใช้งานทั้งวันในวันหยุด

## 5.1 บทสรุป

### ส่วนที่ 1

จากการทดลองเพื่อดูลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time-lag) ของวัสดุผนังไม้จริงทั้ง 9 แบบเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนครึ่งแผ่นฉาบปูนเรียบ พบว่าผนังก่ออิฐฉาบปูนความร้อนจะเพิ่มขึ้นช้าในช่วงแรกและเมื่อหยุดให้ความร้อนตัววัสดุก็คายความร้อนออกมาได้ช้าเช่นเดียวกันซึ่งพฤติกรรมด้านความร้อนเช่นนี้ไม่เหมาะกับบ้านพักอาศัยซึ่งส่วนมากจะใช้เวลาในช่วงกลางวัน ส่วนวัสดุผนังที่มีส่วนประกอบจากไม้จริงความร้อนจะสามารถถ่ายเทผ่านวัสดุเข้าไปได้เร็วมากในช่วงแรก แต่ก็สามารถคายความร้อนได้เร็วเช่นเดียวกันเนื่องจากไม่มีเซลล์ของเซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งเหมาะกับบ้านพักอาศัยมากกว่า แต่ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติที่สามารถถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุได้เร็วให้ช่างจึงทดลองใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีน และคอนกรีตปิดช่องว่างระหว่างไม้ พบว่า

- กรณีที่ใช้เม็ดโฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ความร้อนผ่านเข้ามาได้ช้ากว่าผนังไม้ที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ แต่ด้วยความหนาของโฟมทำให้ความร้อนผ่านออกมาได้ช้าเช่นกันแต่ก็ยังอยู่ในระดับใกล้เคียงกับกรณีที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างเลย

- กรณีใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ความร้อนผ่านเข้ามาได้ช้าที่สุดเมื่อเทียบกับไม่มีวัสดุปิดช่องว่าง และใช้เม็ดโฟมเป็นวัสดุปิดช่องว่างแต่ก็ยังอยู่ในระดับที่ไม่ต่างกันมาก และเมื่อหยุดให้ความร้อนการคายความร้อนก็คายออกมาได้ช้าที่สุดโดยค่อนข้างใกล้เคียงกับการคายความร้อนของคอนกรีต

- ในสองกรณีข้างต้นที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมวลสารของคอนกรีตเก็บความร้อนเอาไว้ในเนื้อวัสดุยิ่งวัสดุมีความหนาและเนื้อมวลสารที่มากยิ่งคายความร้อนออกมาได้ช้า ในขณะที่โฟมเนื้อมวลของมันไม่ได้เก็บความร้อน เพียงแต่ทำให้พื้นที่ที่ความร้อนจะถ่ายเทออกมาน้อยลงทำให้ความร้อนถ่ายเทออกมาได้ช้ากว่ากรณีที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ไม่มากนัก โดยทั้งนี้ผลที่ออกมาขึ้นอยู่กับมวลสารของวัสดุผนังด้วย ยิ่งผนังที่มีมวลสารมากลักษณะการหน่วงเหนี่ยวความร้อนยิ่งเข้าใกล้กราฟของผนังก่ออิฐฉาบปูน กล่าวคือความร้อนขึ้นช้าในช่วงแรก และเมื่อปิดไฟความร้อนก็คายออกมาได้ช้าเช่นกัน

### ส่วนที่ 2

จากผลการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 พบว่าผนังไม้จริงทั้ง 9 แบบช่วยลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นในบ้านพักอาศัยได้ประมาณร้อยละ 36 เมื่อเทียบกับการใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูน และประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้ประมาณร้อยละ 26.4 โดยเมื่อเปรียบเทียบกันในกลุ่มของผนังไม้ทั้ง 9 ประเภท จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ไม่ต่างกันมากนัก โดยผนังไม้ที่ใช้เม็ดโฟมโพลีสไตรีนใช้แล้วเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ใช้พลังงานตลอดทั้งปีน้อยที่สุด ตามมาด้วยผนังไม้ที่ไม่มีวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้ และผนังไม้ที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุปิดช่องว่างระหว่างไม้เป็นผนังที่ใช้พลังงานตลอด

ทั้งปีมากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังไม้ประเภทอื่น

ตารางที่ 5.1 สรุปผลพลังงานที่ใช้ในการทำความเย็นและค่าใช้จ่ายจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วัสดุ	พลังงานที่ใช้ในการทำความเย็น (kWh/yr)	ค่าใช้จ่าย (\$)
วัสดุไม้จริงหนา 4 ซม. ไม่มีการเปิดช่องว่างระหว่างไม้	44,814	4,929.5
วัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. ไม่มีการเปิดช่องว่างระหว่างไม้	43,058	4,736.4
วัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. ไม่มีการเปิดช่องว่างระหว่างไม้	42,211	4,643.2
วัสดุไม้จริงหนา 4 ซม. เปิดช่องว่างระหว่างไม้ ด้วยเม็ดโพลีโพลีสไติลีนที่ใช้แล้ว	44,752	4,922.7
วัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. เปิดช่องว่างระหว่างไม้ ด้วยเม็ดโพลีโพลีสไติลีนที่ใช้แล้ว	42,998	4,729.8
วัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. เปิดช่องว่างระหว่างไม้ ด้วยเม็ดโพลีโพลีสไติลีนที่ใช้แล้ว	42,144*	4,635.8*
วัสดุไม้จริงหนา 4 ซม. เปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต	45,210	4,973.1
วัสดุไม้จริงหนา 6 ซม. เปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต	43,298	4,762.8
วัสดุไม้จริงหนา 8 ซม. เปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยคอนกรีต	42,499	4,674.9
ผนังก่ออิฐมวลเบาครึ่งแผ่นฉาบเรียบ	59,037**	6,494.1**

หมายเหตุ \*\*สีแดงคือวัสดุที่ใช้พลังงานที่มากที่สุด

\*สีฟ้าคือวัสดุที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

แต่ผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีส่วนที่แตกต่างจากการทดสอบด้วยกล่องทดลองตรงที่วัสดุที่มีความหนา 8 เซนติเมตร เป็นวัสดุที่ใช้พลังงานในการทำความเย็นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุความหนา 4 และ 6 เซนติเมตร เนื่องจากความหนาที่ใช้เป็นส่วนหารในการคำนวณค่า U-value มีค่ามากทำให้ค่า U-value มีค่าน้อยลง ในขณะที่การทดสอบด้วยกล่องทดลองเพื่อดูความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนในสภาวะที่คล้ายกับการใช้งานจริงพบว่าวัสดุที่ความหนา 8 เซนติเมตรเป็นวัสดุที่คายความร้อนได้ช้าเมื่อเทียบกับความหนา 4 และ 6 เซนติเมตรเนื่องจากมีมวลมาก แม้จะช่วยป้องกันความร้อนในช่วงแรกได้ดีกว่าวัสดุที่ความหนา 4 และ 6 เซนติเมตรเล็กน้อย แต่เมื่อหยุดให้

ความร้อนกลับคายความร้อนได้ช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัด

### ส่วนที่ 3

หลังจากจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำข้อมูลค่าใช้จ่ายด้านพลังงานมาวิเคราะห์หาระยะเวลาคู่มือของวัสดุแต่ละประเภท โดยคำนวณจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 ปี ส่วนด้วยราคาวัสดุที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบส่วนต่างกับวัสดุเปรียบเทียบพื้นฐาน คือผนังก่ออิฐฉาบปูน ได้ผลออกมาตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาคู่มือของวัสดุแต่ละชนิดเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูน

วัสดุ	ราคาวัสดุ (บาท/ ตร.ม.)	ส่วนต่างราคา (บาท)	ค่าไฟที่ประหยัดได้ (บาท/ปี)	PAYBACK (ปี)
ผนังก่ออิฐฉาบปูน (BASE CASE)	750.00	-	-	-
ไม้จริงหนา 4 ซม. ไม่มีการปิดช่องว่าง	839.30	30,085.17	48,502.60	8 เดือน
ไม้จริงหนา 6 ซม. ไม่มีการปิดช่องว่าง	1,080.77	111,436.41	54,488.70	2 ปี
ไม้จริงหนา 8 ซม. ไม่มีการปิดช่องว่าง	1,322.12	192,747.23	57,377.90	3 ปี 5 เดือน
ไม้จริงหนา 4 ซม. ปิดช่องว่างด้วยเม็ดโฟม	839.30	30,085.17	48,713.40	8 เดือน
ไม้จริงหนา 6 ซม. ปิดช่องว่างด้วยเม็ดโฟม	1,080.77	111,436.41	54,693.30	2 ปี
ไม้จริงหนา 8 ซม. ปิดช่องว่างด้วยเม็ดโฟม	1,322.12	192,747.23	57,607.30	3 ปี 5 เดือน
ไม้จริงหนา 4 ซม. ปิดช่องว่างด้วยคอนกรีต	938.30	63,438.27	47,151.00	1 ปี 4 เดือน
ไม้จริงหนา 6 ซม. ปิดช่องว่างด้วยคอนกรีต	1,179.77	144,789.51	53,670.30	2 ปี 9 เดือน
ไม้จริงหนา 8 ซม. ปิดช่องว่างด้วยคอนกรีต	1,421.12	226,100.33	56,395.20	4 ปี

- หมายเหตุ
- พื้นที่ผนังทั้งหมดของบ้านเท่ากับ 336.9 ตารางเมตร
  - ค่าเงิน 1 ดอลลาร์สหรัฐ เท่ากับ 31 บาท
  - โฟมที่ใช้เป็นโฟมใช้แล้ว จึงไม่คิดมูลค่า

จากตารางที่ 5.2 พบว่าวัสดุที่คุ้มทุนเร็วที่สุดคือ ผนังไม้จริงหนา 4 เซนติเมตรที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟม และ ผนังไม้จริงหนา 4 เซนติเมตรที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ เนื่องจากราคาวัสดุต่อตารางเมตรต่ำที่สุด เพราะปริมาณไม้ที่ใช้น้อยกว่าวัสดุที่ความหนาอื่น อีกข้อสังเกตคือ วัสดุผนังไม้ที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ และที่ปิดช่องว่างระหว่างไม้ด้วยเม็ดโฟมระยะเวลาคุ้มทุนเท่ากันเนื่องจากราคาวัสดุต่อตารางเมตรเท่ากัน เพราะโฟมที่นำมาใช้ปิดช่องว่างเป็นเม็ดโฟมใช้แล้วจึงไม่คิดมูลค่า แม้ว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของวัสดุที่ใช้โฟมปิดช่องว่างจะต่ำกว่าวัสดุที่ไม่มีการปิดช่องว่าง แต่ต่ำกว่าในมูลค่าที่ไม่มากนัก เมื่อคำนวณระยะเวลาคุ้มทุนแล้วจึงแทบไม่แตกต่างกัน

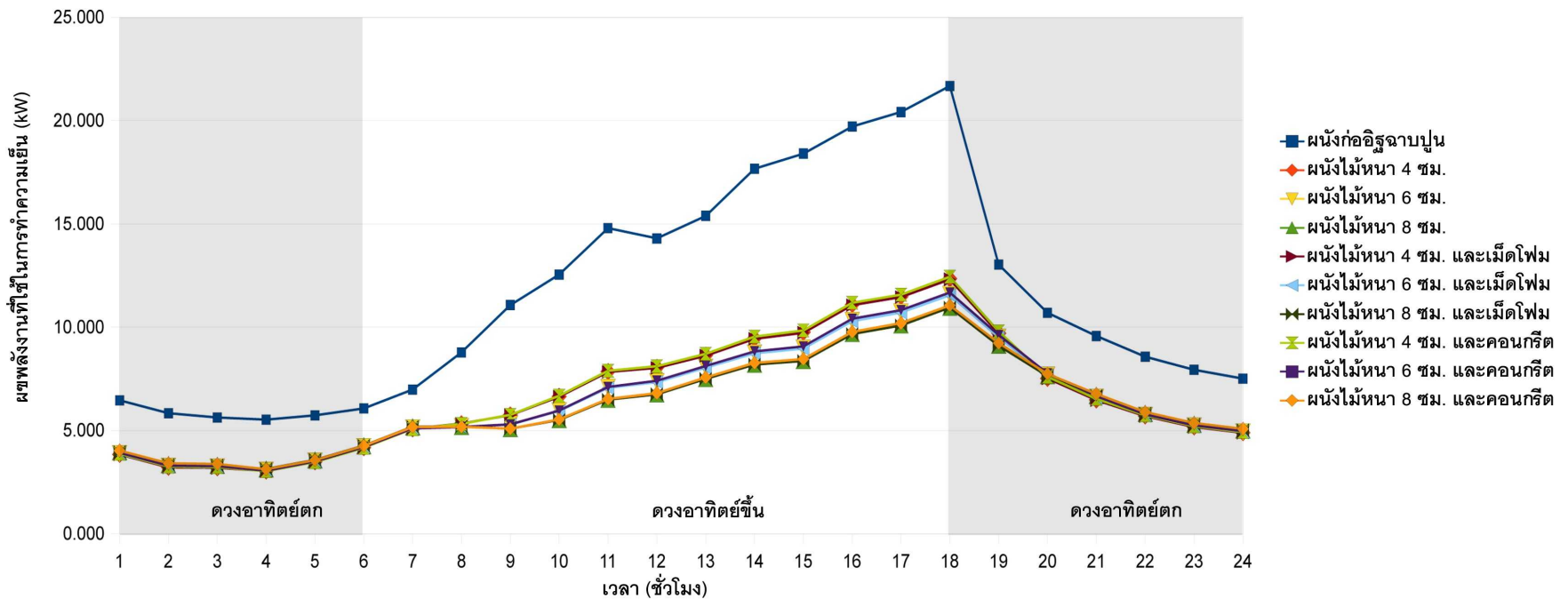
#### ส่วนที่ 4

จากการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อนำข้อมูลการใช้พลังงานในการทำความเย็นตลอด 24 ชั่วโมงในหนึ่งวันมาวิเคราะห์การใช้พลังงาน โดยใช้ข้อมูลของวันที่ 21 มีนาคม ซึ่งเป็นวันที่ดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับโลกมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการทำความเย็นของวัสดุผนังทั้ง 9 ประเภท เทียบกับวัสดุเปรียบเทียบพื้นฐาน คือผนังก่ออิฐฉาบปูน ได้ผลออกมาตามตารางที่ 5.3 และแผนภูมิที่ 5.1 โดยที่ในข้อมูลผนังที่ใส่ในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ประกอบด้วย ความหนาแน่น ความหนา และค่าการนำความร้อนของวัสดุ เนื่องจากวัสดุที่มีมวลจะส่งผลต่อการหน่วงเหนี่ยวความร้อน เมื่อใส่ข้อมูลความหนาแน่นลงในโปรแกรม โปรแกรมจะคำนวณความร้อนสะสมจากชั่วโมงหนึ่งไปอีกชั่วโมงหนึ่ง เพื่อให้ออกมาใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการใช้พลังงานในการทำความเย็นใน 24 ชั่วโมง ของวันที่ 21 มีนาคม

เวลา (ชั่วโมง)	ผนังคอนกรีต ฉาบปูน (kW)	ผนังไม้หนา 4 ซม. (kW)	ผนังไม้หนา 6 ซม. (kW)	ผนังไม้หนา 8 ซม. (kW)	ผนังไม้หนา 4 ซม. กับโฟม (kW)	ผนังไม้หนา 6 ซม. กับโฟม (kW)	ผนังไม้หนา 8 ซม. กับโฟม (kW)	ผนังไม้หนา 4 ซม. กับคอนกรีต (kW)	ผนังไม้หนา 6 ซม. กับคอนกรีต (kW)	ผนังไม้หนา 8 ซม. กับคอนกรีต (kW)
1	6.458	3.841	3.869	3.964	3.837	3.866	3.960	3.874	3.920	4.027
2	5.838	3.221	3.249	3.344	3.217	3.246	3.340	3.254	3.300	3.407
3	5.628	3.191	3.219	3.314	3.187	3.216	3.310	3.224	3.270	3.377
4	5.523	3.038	3.069	3.132	3.040	3.072	3.135	3.027	3.058	3.123
5	5.733	3.478	3.509	3.572	3.480	3.512	3.575	3.467	3.498	3.563
6	6.063	4.168	4.199	4.262	4.170	4.202	4.265	4.157	4.188	4.253
7	6.973	5.078	5.109	5.172	5.080	5.112	5.175	5.067	5.098	5.163
8	8.776	5.324	5.179	5.188	5.320	5.179	5.191	5.315	5.167	5.178
9	11.068	5.751	5.291	5.089	5.740	5.283	5.086	5.753	5.288	5.086
10	12.543	6.647	5.948	5.531	6.630	5.933	5.512	6.672	5.963	5.537
11	14.792	7.850	7.077	6.510	7.831	7.057	6.493	7.892	7.107	6.527
12	14.289	8.048	7.359	6.774	8.030	7.338	6.753	8.106	7.410	6.808
13	15.383	8.638	8.059	7.518	8.620	8.039	7.495	8.709	8.123	7.569
14	17.666	9.457	8.753	8.206	9.434	8.730	8.183	9.537	8.830	8.270
15	18.396	9.754	8.984	8.383	9.730	8.959	8.358	9.839	9.067	8.453
16	19.710	11.091	10.314	9.694	11.066	10.288	9.668	11.181	10.402	9.770
17	20.407	11.480	10.727	10.112	11.456	10.701	10.084	11.574	10.821	10.193
18	21.667	12.340	11.576	10.968	12.315	11.550	10.941	12.432	11.668	11.051
19	13.029	9.701	9.517	9.126	9.691	9.499	9.101	9.794	9.621	9.226
20	10.693	7.525	7.673	7.647	7.521	7.665	7.633	7.595	7.761	7.741
21	9.568	6.475	6.590	6.688	6.471	6.587	6.681	6.524	6.659	6.768
22	8.568	5.701	5.729	5.824	5.697	5.726	5.820	5.734	5.780	5.887
23	7.938	5.171	5.199	5.294	5.167	5.196	5.290	5.204	5.250	5.357
24	7.508	4.891	4.891	5.014	4.887	4.916	5.010	4.924	4.970	5.077

แผนภูมิที่ 5.1 เปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานในการทำความเย็นใน 24 ชั่วโมง ของวันที่ 21 มีนาคมของผนังประเภทต่างๆ



จากตารางที่ 5.3 และแผนภูมิที่ 5.1 พบว่าวัสดุผนังที่ความหนา 8 เซนติเมตร ทั้งที่ไม่มีการปิดช่องว่างระหว่างไม้ ปิดช่องว่างด้วยโฟมโพลีสไตรีน และปิดช่องว่างด้วยคอนกรีตเป็นผนังเป็นผนังที่ใช้พลังงานความในการทำความเย็นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับความหนา 4 และ 6 เซนติเมตร โดยที่ผนังหนา 8 เซนติเมตรที่ปิดช่องว่างด้วยโฟมเป็นผนังที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดแต่แทบไม่ต่างกับผนังที่ไม่มีการปิดช่องว่าง และผนังที่ปิดช่องว่างด้วยคอนกรีตเลย แล้วตามมาด้วยผนังที่มีความหนา 6 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตรเป็นผนังที่ประหยัดพลังงานน้อยสุดตามลำดับ ผนังทั้งความหนา 4, 6 และ 8 เซนติเมตร ใช้พลังงานในการทำความเย็นไม่ต่างกันมากนักดังที่แสดงในแผนภูมิที่ 5.1 โดยที่เมื่อเปรียบเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนแล้วสามารถลดพลังงานได้เฉลี่ยประมาณ 7.39 kW เวลาที่ใช้พลังงานสูงที่สุดคือ 18 นาฬิกา เนื่องจากความร้อนถูกสะสมมาตั้งแต่ช่วงเช้า และจะเริ่มลดต่ำลงเรื่อยๆเมื่อดวงอาทิตย์ตกโดยจะต่ำที่สุดเวลา 4 นาฬิกา และจะเริ่มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่ออีกครึ่งเมื่อเวลา 6 นาฬิกาที่ดวงอาทิตย์ขึ้นอีกครั้ง

### ส่วนที่ 5

จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถสรุปประสิทธิภาพของผนังต้นแบบทั้ง 9 แบบเป็นตารางได้ดังในตารางที่ 5.4 โดยแบ่งออกเป็น ปริมาณพลังงานที่ใช้ต่อปี ค่าไฟฟ้าต่อปี และระยะเวลาในการคืนทุน โดยหมายเลขในช่องแทนลำดับ ซึ่งหมายเลข 1 หมายถึงประสิทธิภาพดีที่สุด

ตารางที่ 5.4 สรุปประสิทธิภาพของผนังแต่ละแบบ

วัสดุ	พลังงาน	ค่าไฟ	เวลาคืนทุน	ความคุ้มค่า (บาท)	วิเคราะห์
ไม้ 4 ซม.	8	8	1*	30248.93	วัสดุความหนา 4 ซม. คืนทุนเร็วที่สุด แต่การใช้พลังงาน และค่าไฟต่อปีค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น
ไม้ 4 ซม. + โฟม	7	7	1*	30380.4	
ไม้ 4 ซม. + คอนกรีต	9**	9**	2	28392**	
ไม้ 6 ซม.	5	5	3	31638.6	ในระยะเวลาคืนทุนที่เท่ากัน ไม้ 6 ซม.+ โฟม ประหยัดไฟกว่า ไม้ 6 ซม. ที่ไม่มีการปิดช่องว่าง
ไม้ 6 ซม. + โฟม	4	4	3	31757.4*	
ไม้ 6 ซม. + คอนกรีต	6	6	4	29864.93	
ไม้ 8 ซม.	2	2	5	30539.85	วัสดุความหนา 8 ซม. ใช้พลังงานและค่าไฟน้อยเป็นอันดับ 1, 2 และ 3 แต่ว่าคืนทุนช้าที่สุด
ไม้ 8 ซม. + โฟม	1*	1*	5	30661.95	
ไม้ 8 ซม. + คอนกรีต	3	3	6**	29107.2	

หมายเหตุ \*\*สีแดงคือวัสดุที่ใช้พลังงานมากที่สุด ค่าไฟมากที่สุด คืนทุนช้าที่สุด และคุ้มทุนน้อยที่สุด

\*สีฟ้าคือวัสดุที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด ค่าไฟน้อยที่สุด คืนทุนเร็วที่สุด และคุ้มทุนมากที่สุด

ความคุ้มค่าคิดที่อายุการใช้งานของผนังอยู่ที่ 20 ปี



จากตารางที่ 5.4 พบว่าวัสดุผนังที่ความหนา 4 เซนติเมตรมีระยะคืนทุนที่เร็วกว่าผนังแบบอื่น แต่การใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าต่อปีสูงที่สุดเมื่อเทียบกับผนังแบบอื่น ดังนั้นเมื่อมองถึงการใช้งานในระยะยาว ผนังที่ความหนา 4 เซนติเมตรไม่คุ้มค่าเนื่องจากต้องเสียค่าไฟในอัตราที่สูงกว่าผนังชนิดอื่น และเมื่อพิจารณาถึงความคุ้มทุนที่อายุการใช้งานของวัสดุที่ 20 ปี ผลที่ได้ก็ยังน้อยกว่าวัสดุที่ความหนาอื่น

ในขณะที่วัสดุผนังที่ความหนา 8 เซนติเมตรการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าต่อปีต่ำที่สุด แต่กลับเป็นผนังที่คืนทุนช้ากว่าผนังแบบอื่นๆ และเมื่อมองถึงความคุ้มทุนที่อายุการใช้งานของวัสดุ 20 ปี วัสดุที่ความหนา 8 เซนติเมตรมากกว่าผนังหนา 4 ซม. เล็กน้อย แต่ยังไม่ใช้แบบที่มากที่สุด

เมื่อพิจารณาจากความคุ้มทุนพบว่าผนังที่คุ้มทุนมากที่สุดที่อายุการใช้งานของวัสดุ 20 ปี คือ ผนังไม้ความหนา 6 เซนติเมตรที่ไม่มีการปิดช่องว่าง และผนังไม้ความหนา 6 เซนติเมตรที่ปิดช่องว่างด้วยโฟม โดยผนังที่ปิดช่องว่างด้วยโฟมมีค่าความคุ้มทุนมากกว่าเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาในส่วนอื่นๆ พบว่าวัสดุผนังทั้งสองแบบระยะเวลาคุ้มทุนเท่ากัน แต่ผนังที่ปิดช่องว่างด้วยโฟมประหยัดพลังงานมากกว่าเล็กน้อย

จากข้อมูลทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่า ผนังที่คุ้มทุนมากที่สุดคือผนังไม้หนา 6 เซนติเมตรที่ปิดช่องว่างด้วยโฟม แต่ถ้าหากในช่วงการก่อสร้างมีงบประมาณจำกัดผนังที่เหมาะสมคือผนังไม้หนา 4 เซนติเมตรที่ปิดช่องว่างด้วยโฟมเนื่องจากค่าก่อสร้างถูกกว่าแบบแรกประมาณร้อยละ 73 ในขณะที่ความคุ้มทุนต่ำกว่าเพียงร้อยละ 4.34 เท่านั้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

ในการวิจัยเรื่องวัสดุผนังไม้จริงที่ใช้วัสดุต่างๆ ในการปิดช่องว่างในครั้งต่อไปควรจะพิจารณาถึง

1. วัสดุชนิดอื่นๆ นอกเหนือจาก โฟมโพลีสไตรีน และคอนกรีต มีผลต่อความสามารถในการป้องกันความร้อนและการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุผนังอย่างไร
2. ลดปริมาณไม้จริงที่ใช้ และเพิ่มปริมาณวัสดุที่ใช้ปิดช่องในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อดูว่าจะมีผลต่อความสามารถในการป้องกันความร้อนและการหน่วงเหนี่ยวความร้อนของวัสดุผนังอย่างไร
3. ทดลองในสภาพการใช้งานจริงว่าสามารถช่วยลดการใช้พลังงานเท่ากับการทดลองด้วยกล่อง และการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือไม่

## รายการอ้างอิง

- [1] A.H. Buchanan, S.B. Levine, "Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions," Environmental Science & Policy 2 (1999): 427-437.
- [2] S. Hameury, T. Lundström, "Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign," Energy and Buildings 36 (2004): 281–292.
- [3] พูลผล ธรรมธวัช, ยางพารา (สงขลา), หน้า 312-314.
- [4] องค์การสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ประวัติยางพารา [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.reothai.co.th/> [10 กุมภาพันธ์ 2556]
- [5] J.C. Morel, A. Mesbah, M. Oggero, P. Walker, "Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction," Building and Environment 36 (2001): 1119–1126.
- [6] พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน, [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [www.royin.go.th](http://www.royin.go.th) [10 กุมภาพันธ์ 2556]
- [7] กฎกระทรวง ฉบับที่ 55 [ออนไลน์]. 2543. แหล่งที่มา: [www.asa.or.th](http://www.asa.or.th) [3 มกราคม 2556]
- [8] ธนิต จินดาวนิต, สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยีอาคาร (กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540), หน้า 27.
- [9] สมสิทธิ์ นิตยะ, การออกแบบอาคารสำหรับภูมิอากาศในเขตร้อนชื้น (กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541), หน้า 139.
- [10] M. Bailyn, A Survey of Thermodynamics. (New York : American Institute of Physics, 1994), p. 23.

- [11] American Society of Heating Refrigeration and Air-condition Engineering, ASHRAE Handbook Fundamental SI Edition 1993. (Atlanta Georgia, 1993)
- [12] กรองทิพย์ เต็มเกาะ, "การทดสอบสภาพนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนคอมโพสิต," วารสารกรม วิทยาศาสตร์บริการ 190 (2555): 9-11.
- [13] NETZSCH Analyzing & Testing. Heat Flow Meter – HFM Method, Technique, Application (HFM 436 Lambda). (Wittelsbacherstrbe : Netzsch, 2008)
- [14] พงศ์ โสโน, สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เล่มที่ 3 [ออนไลน์]. 2520. แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/encyclopedia/คุณสมบัติของไม้> [3 มกราคม 2556]
- [15] F.T. Mackenzie, Biogeochemistry In Encyclopedia of Environmental Biology. W.A. Nierenberg, editor. (San diago : Academic Pres, Inc. P, 1995), p. 261-267, 270.
- [16] Atlas,R.M. and R. Bartha, Microbial Ecology: Fundamental and Application 4<sup>th</sup> edition. (Science Plubishing, 1998)
- [17] วันดี ลือสายวงศ์, "วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Lift Cycle Assessment, LCA)," เอกสารเผยแพร่ กลุ่มทดสอบโลหะและธาตุปริมาณน้อย (2548)
- [18] ฉนวนโฟม [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [www.dede.go.th](http://www.dede.go.th) [1 พฤษภาคม 2556]
- [19] โพลีสไตรีน [ออนไลน์] แหล่งที่มา: [th.wikipedia.org](http://th.wikipedia.org) [1 พฤษภาคม 2556]
- [20] testo Inc., testo - Portablw Reference Technology. (New Jersey : testo Inc.)
- [21] อรรถนัย เศรษฐสุบุตร และ ธนิต จินดาวงศ์, "การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว," การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 3 (พฤษภาคม 2550): 8.

ภาคผนวก

Netzsch HFM Test Report

## Netzsch HFM Test Report

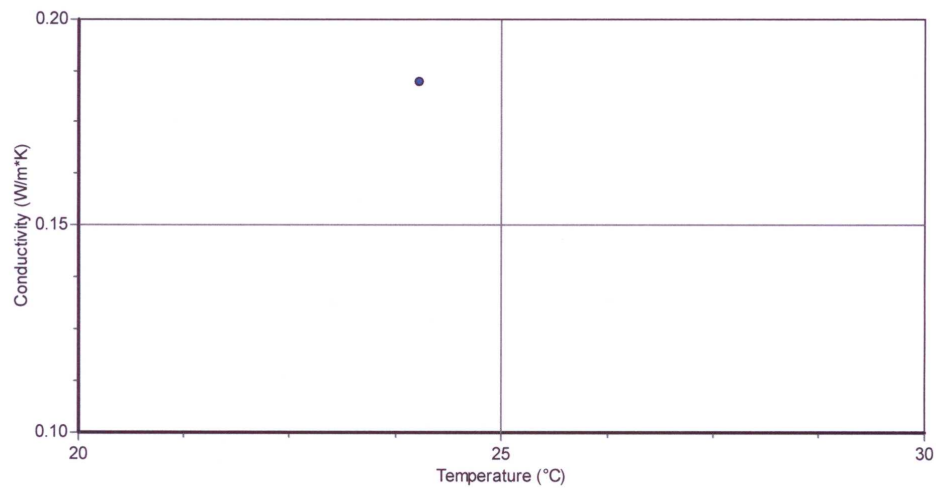
### General Information

Run Id: 11-01-13\_09-17Wood box      Date/Time: 1/11/13 01:00 PM  
 Operator: DSS

### Sample Information

Sample ID: Wood Box  
 Material: Wood  
 Sample Size:  
 Density: 0.00 kg/m<sup>3</sup>  
 Remark:

### Test Result



Nr.	MeanT °C	DeltaT °C	Thickness cm	Conductivity W/m*K	Resistance m <sup>2</sup> *K/W	Gradient K/m
1	24.0	19.9	4.395	0.185	0.238	452.2

Netzsch HFM Test Report

## Netzsch HFM Test Report

### General Information

Run Id: 29-01-13\_07-59

Date/Time: 1/29/13 05:01 PM

Operator: BT

### Sample Information

Sample ID: Wood Box

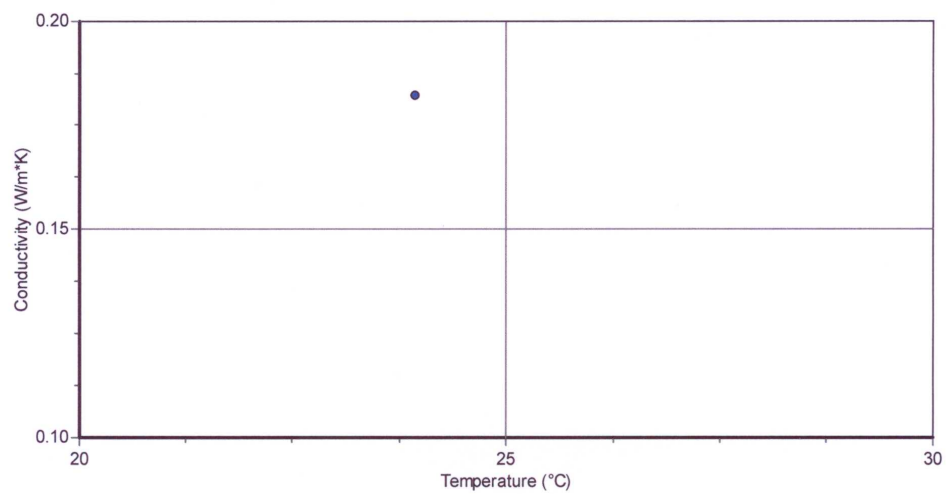
Material: Wood and Foam

Sample Size:

Density: 0.00 kg/m<sup>3</sup>

Remark:

### Test Result



Nr.	MeanT °C	DeltaT °C	Thickness cm	Conductivity W/m*K	Resistance m <sup>2</sup> *K/W	Gradient K/m
1	23.9	19.8	6.429	0.182	0.353	308.5

Netzsch HFM Test Report

## Netzsch HFM Test Report

### General Information

Run Id: 6-02-13\_08-04

Date/Time: 2/6/13 01:13 PM

Operator: BT

### Sample Information

Sample ID: Wood Box

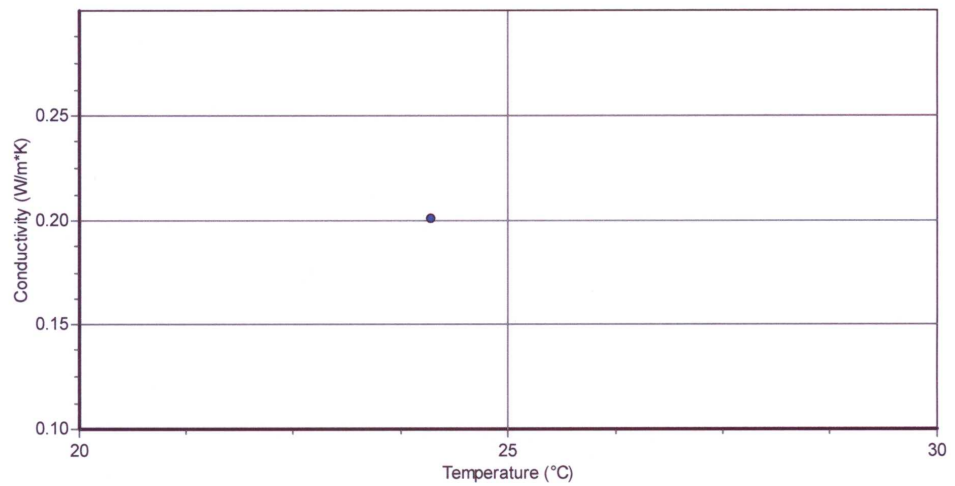
Material: Wood and Cement

Sample Size:

Density: 0.00 kg/m<sup>3</sup>

Remark:

### Test Result



Nr.	MeanT °C	DeltaT °C	Thickness cm	Conductivity W/m*K	Resistance m <sup>2</sup> *K/W	Gradient K/m
1	24.1	19.8	6.591	0.200	0.329	300.5

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตติรัตน์ ลิ้มปิยพันธ์ เกิดวันจันทร์ที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และตอนปลาย จากโรงเรียนราชวินิต มัธยม จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2555 และได้เข้ารับการศึกษาคือต่อใน หลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาสถาปัตยกรรม ในปีการศึกษา 2555