



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

การพัฒนาหน้าตาต่างกระจกสองชั้นที่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสทำงานร่วม

เพื่อลดความร้อนเข้าสู่อาคาร

โดย

ดร.วราภรณ์ รัตตองพิสัยดี และคณะ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

มกราคม 2555

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาหน้าตาต่างกระจกสองชั้นที่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสทำงานร่วม

เพื่อลดความร้อนเข้าสู่อาคาร

คณะผู้วิจัย

ดร.วราภรณ์ รัตตองพิสัย ห้วหน้าโครงการ

ดร.สมชาย เจียมจิตต์สวัสดิ์

ผศ.ดร.ศิรินุช จินดารักษ์

ผศ.ดร.สมชาย มณีวรรณ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร และ  
ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้การสนับสนุนด้าน  
เครื่องมือวัดและความสะดวกในด้านห้องปฏิบัติการ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษากการลดความร้อนส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่พัฒนาขึ้นเพื่อทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะด้วยวิธีการทดสอบภายในอาคาร ณ ห้องปฏิบัติการของอาคารภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ โดยออกแบบและสร้างห้องทดสอบขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 2.5 เมตร พร้อมติดตั้งกรอบที่สามารถปรับเปลี่ยนระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ต้องการทดสอบ มีการบุฉนวนใยหินที่ผนังห้องรอบด้านเพื่อกำจัดผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังเหลือเพียงที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก รวมทั้งออกแบบและสร้างระบบแสงจำลองจากหลอดฮาโลเจนเพื่อให้ความร้อนด้วยแสงที่ตกกระทบลงบนกระจก ได้ทำการทดสอบการกระจายแสงให้มีความสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าต่างกระจกขนาดกว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.4 เมตร กำหนดที่ค่าความเข้มแสงแปรผันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ตรวจวัดความเข้มแสงด้วยไพรานอมิเตอร์พร้อมกำหนดให้มีการแปรผันสามค่าที่  $572 \text{ W/m}^2$ ,  $663 \text{ W/m}^2$  และ  $756 \text{ W/m}^2$  ทั้งนี้เพื่อจำลองความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนของจังหวัดพิษณุโลกระหว่างเวลา 10:00 – 15:00 นาฬิกา ทำการทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งผ่านความร้อนทางระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่พัฒนาขึ้นให้ทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ โดยสารที่ใช้ในการงานวิจัยนี้คือซอลท์ไฮเดรตและพาราฟิน พบว่าพาราฟินมีความเหมาะสมกว่าด้วยข้อดีหลายประการได้แก่การไม่เกิดการแยกชั้นของสารทำให้รับและคายความร้อนแฝงได้สมบูรณ์ ความโปร่งแสงขณะอยู่ในสถานะของเหลวทำให้คงสภาพการมองเห็นผ่านหน้าต่างกระจก ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะคือที่มีอากาศและแก๊สอาร์กอนบรรจุระหว่างแผ่นกระจกทั้งสอง ผลการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมมีค่าต่ำกว่าที่ 0.64 ต่อ 0.68

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องผ่านระบบหน้าต่างที่พัฒนาขึ้นมีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลถึงภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศที่ลดลงตามไป จากการพิจารณาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นโดยคำนวณจากผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะและระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะพบว่า มีระยะเวลาคืนทุน 4 ปี จากการคำนวณภายใต้สภาวะรับความร้อนสูงสุดตลอดเวลามีส่วนทำให้ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น และมีระยะเวลาคืนทุนสูงเกินจริงได้

## ABSTRACT

This research presents an experimental finding on the reduction of heat transfer through a double glaze window system which developed in the way to function with phase change material. The indoor test carried out in the laboratory at the building of Physics department, Faculty of Science. In this research, the testing room was designed and constructed with the dimension of 2 meter wide, 2 meter length and 2.5 meter height. The window system was installed on the frame in one side of the room wall. With this frame, the test window system can be changed from one type to another. The room well insulated with a rock wool as to eliminate the effect of heat transfer through other part of the room but the window. In addition, the artificial light system was designed and constructed using halogen lamps as a light source to radiate heat on the window glaze. The artificial light system was tested to ensure a consistent radiation all over the window area size 0.4 meter wide and 0.4 length with the acceptability no more than 5 percentage variation. The radiation was detected by a pyranometer. The radiation was varied between  $572 \text{ W/m}^2$   $663 \text{ W/m}^2$  and  $756 \text{ W/m}^2$  which referred the monthly average of solar radiation in Phitsanulok during 10:00 and 15:00. The heat transmitted through the double glaze window system that collaborated with phase change material was investigated and analysis. Two types of phase change materials employed were salt hydrate and paraffin. Paraffin is more suitable than salt hydrate and offers several advantages included no segregation, complete operating cycle, and transparent liquid-phase which preserve the window visual. The comparison between the double glaze window with and without phase

change material showed that the prior provide lower solar heat gain coefficient for the value of 0.64 against 0.68. In addition, the amount of heat transmitted through the double glaze window with phase change material is 5.6 percent lower than the one without phase change material. This also implied the lower cooling load for an air conditioning system. An economic feasibility considered on the reduction of electric consumption, this compared between the double glaze window system with phase change material and the one without it. The simple payback period show at 4 years that seem to be a long time. According to the calculation based on the duration of high heat gain, this can cause lesser energy reduction and higher payback period than what might be in practical.

# สารบัญเรื่อง

หน้า

บทคัดย่อ .....	ก
ABSTRACT.....	ค
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	5
1.2 ขอบเขต.....	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน.....	6
2.1.1 การนำความร้อน .....	7
2.1.2 การพาความร้อน.....	8
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน .....	9
2.2 แสงอาทิตย์และความร้อน.....	10
2.2.1 ความร้อนถ่ายเทจากรังสีอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจก.....	16
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
2.3.1 ระบบหน้าต่างกระจกและการป้องกันความร้อน.....	26
2.3.2 สารเปลี่ยนสถานะและการประยุกต์ใช้ในด้านอาคาร.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	39

## สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
3.1 รายละเอียดระบบทดสอบและอุปกรณ์การทดลอง.....	40
3.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	46
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ และอภิปรายผล.....</b>	<b>48</b>
4.1 ผลการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ.....	48
4.2 ผลการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วย.....	53
4.3 การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ เปรียบเทียบกับระบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะ.....	58
4.4 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ .....	62
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>64</b>
5.1 สรุป .....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	65
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>66</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>71</b>

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับช่องว่างระหว่างกระจก (Chirarattananon, 2005).....	24
ตารางที่ 3.1	สมบัติของสารเปลี่ยนสถานะ.....	45

# สารบัญรูป

## หน้า

รูปที่ 2.1 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ช่วงคลื่นรังสีเหนือม่วง (UV) รังสีมองเห็น (V) และรังสีใต้แดง(IR) (เพิ่มรายละเอียดรูปจาก Duffie and Beckman, 2006).....	11
รูปที่ 2.2 รังสีอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศและตกกระทบบนผิวโลก .....	12
รูปที่ 2.3 ความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงตลอดปี ของจังหวัดพิษณุโลก (Handbook of Solar Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications, 2005).....	12
รูปที่ 2.4 ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนกระจกและผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร.....	14
รูปที่ 2.5 วงจรความร้อนของระบบกระจกสองชั้น .....	20
รูปที่ 2.6 พลังงานความร้อนส่งผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้น .....	21
รูปที่ 3.1 แผนภาพภาคตัดขวางระบบทดสอบ ตำแหน่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ และความเข้มแสง .....	41
รูปที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างระบบแสงจำลอง ก ด้านหน้า ข ด้านข้าง.....	42
รูปที่ 3.3 สารเปลี่ยนสถานะ ภาพซ้าย RT42 ขณะจัดเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบ ภาพขวา ภาพขยายเห็นลักษณะเป็นผลึกของเนื้อสาร.....	43
รูปที่ 3.4 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ YOKOGAWA รุ่น DX220-3-2.....	43
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความเข้มแสง Pyranometer .....	43
รูปที่ 3.6 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K .....	44
รูปที่ 3.7 หน้าต่างกระจกสองชั้นมีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วม ถ่ายภาพจากด้านในห้องทดสอบเมื่อสารเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวใสขณะได้รับความร้อน .....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

### หน้า

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ก ผิวกระจกด้านนอกและด้านใน ข ภายนอกและภายในห้อง แสดงระยะในหน่วยเมตร.....	47
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบห้องทดสอบเมื่อไม่มีแสงตกกระทบหน้าต่าง กระจกสองชั้น ภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง .....	49
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง ชั้นแบบมีอากาศเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง $663 \text{ W/m}^2$ .....	50
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง ชั้นแบบมีอากาศเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง $756 \text{ W/m}^2$ .....	51
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง ชั้นแบบมีแก๊สอาร์กอนเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง $663 \text{ W/m}^2$ .....	52
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง ชั้นแบบมีแก๊สอาร์กอนเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง $756 \text{ W/m}^2$ .....	52
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขณะทดสอบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบ ไม่มีและแบบมีสารเปลี่ยนสถานะ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $750 \text{ W/m}^2$ ..	54
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง ชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $572 \text{ W/m}^2$ .....	55
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง ชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $663 \text{ W/m}^2$ .....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

### หน้า

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $756 \text{ W/m}^2$ .....	58
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ระหว่างระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีอากาศ แก๊สอาร์กอน และสารเปลี่ยนสถานะพาราฟินทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $572 \text{ W/m}^2$ $663 \text{ W/m}^2$ และ $756 \text{ W/m}^2$ .....	59
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดระหว่างผิวกระจกด้านนอกและด้านในระหว่างระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีอากาศ แก๊สอาร์กอน และสารเปลี่ยนสถานะพาราฟินทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $572 \text{ W/m}^2$ $663 \text{ W/m}^2$ และ $756 \text{ W/m}^2$ .....	60
รูปที่ 4.12 ความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีอากาศ แก๊สอาร์กอน และแบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะพาราฟินทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง $572 \text{ W/m}^2$ $663 \text{ W/m}^2$ และ $756 \text{ W/m}^2$ .....	61
รูปที่ ผ.1 พาราฟิน RT 42 มีช่วงการหลอมเหลวและพลังงานที่ตำแหน่งแรก $16.64 \text{ }^\circ\text{C}$ $21.47 \text{ J/g}$ ตำแหน่งสอง $28.02 \text{ }^\circ\text{C}$ $4.57 \text{ J/g}$ และตำแหน่งสาม $42.84 \text{ }^\circ\text{C}$ $149.65 \text{ J/g}$ ตามลำดับ ..	72
รูปที่ ผ.2 พาราฟิน RT 50 มีช่วงการหลอมเหลวและพลังงานที่ตำแหน่งแรก $29.56 \text{ }^\circ\text{C}$ $33.31 \text{ J/g}$ และตำแหน่งสอง $51.02 \text{ }^\circ\text{C}$ $150.86 \text{ J/g}$ ตามลำดับ.....	72
รูปที่ ผ.3 พาราฟินแข็งที่ใช้งานห้องปฏิบัติการเคมีมีช่วงการหลอมเหลวและพลังงานที่ตำแหน่งแรก $46.46 \text{ }^\circ\text{C}$ $34.45 \text{ J/g}$ และตำแหน่งสอง $60.19 \text{ }^\circ\text{C}$ $144.29 \text{ J/g}$ ตามลำดับ .....	73
รูปที่ ผ.4 $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ มีจุดหลอมเหลวที่ $36.13 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าพลังงาน $250.67 \text{ J/g}$ .....	73

## บทที่ 1

### บทนำ

สภาพภูมิอากาศของโลกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องที่เด่นชัดคือปรากฏการณ์สภาวะโลกร้อนส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มสูงขึ้นกว่าในอดีต จากข้อมูลบันทึกผลการวัดอุณหภูมิผิวโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1861 พบว่าในปี ค.ศ. 1998 และ ค.ศ. 2005 ค่าดังกล่าวสูงกว่าที่เคยได้รับการบันทึกมาถึง  $0.7^{\circ}\text{C}$  (HM Government, 2006) จากรายงานการพยากรณ์ของหน่วยงานความร่วมมือกับ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) คาดว่าอุณหภูมิพื้นผิวโลกจะเพิ่มสูงขึ้นในอัตรา  $0.1 - 0.2^{\circ}\text{C}$  ในระยะเวลา 10 ปีข้างหน้า ถ้าแต่ละประเทศทั่วโลกยังคงเพิ่มการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในอัตราสูงต่อไป ผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าวพบเห็นได้จากฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงไป ฤดูร้อนยาวนานขึ้น และจากการที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยสูงขึ้นทำให้ระบบปรับอากาศในอาคารเป็นที่ต้องการเพิ่มขึ้นในหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่มีภูมิอากาศเขตร้อน และเขตร้อนชื้น สืบเนื่องการถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ผ่านเปลือกอาคารภายนอกเข้าสู่ภายในอันมีผลกระทบโดยตรงต่อภาวะความสบายของผู้อยู่อาศัย ซึ่งยังไม่รวมถึงแหล่งกำเนิดความร้อนภายในจาก อุปกรณ์ หรือ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นตัวแปรสำคัญต่อการเพิ่มภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ แบ่งออกได้เป็นส่วนที่ตกกระทบผนังหลังคา และที่ผ่านหน้าต่างกระจก ส่วนสุดท้ายนี้เป็นภาระทางความร้อนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ พิจารณาจากทั้งสามองค์ประกอบโครงสร้างเปลือกอาคารแล้วจะเห็นได้ว่าหน้าต่างกระจกเป็นส่วนที่เป็นจุดอ่อนได้รับผลกระทบจากรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ในงานวิจัยนี้

ให้ความสำคัญต่อการลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกผ่านหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในอาคารด้วยเทคนิคการทำงานร่วมระหว่างหน้าต่างกระจกสองชั้นกับสารเปลี่ยนสถานะเนื่องจากความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์คือผลรวมของการส่งผ่านรังสีตรงและส่วนหนึ่งของรังสีที่ถูกดูดไว้แล้วปลดปล่อยเข้าสู่ภายในอาคารจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวภายนอกและผิวภายในของกระจก ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่ผ่านกระจกจะมีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์และการนำความร้อน โดยผลกระทบจากรังสีอาทิตย์มีค่ามากกว่า ชนิดและตำแหน่งการติดตั้งของหน้าต่างกระจก ประเทศไทยตั้งอยู่ในซีกโลกเหนือแสงอาทิตย์จะพาดผ่านเข้ามาทางทิศใต้ เมื่อพิจารณาตามหลักทางภูมิศาสตร์ การเอียงตัวของแกนโลก และการหมุนตัวของโลกรอบดวงอาทิตย์ มีผลให้หน้าต่างที่ถูกติดตั้งในทิศเหนือแทบไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากรังสีอาทิตย์และยังเป็นบริเวณที่ได้รับแสงจากธรรมชาติต่ำสุด ขณะที่ทางด้านตะวันออกและตะวันตกจะมีระยะเวลาที่ได้รับรังสีอาทิตย์ที่คล้ายกันคือด้านละประมาณครึ่งวัน ต่างกันที่ความเข้มแสงอาทิตย์และความร้อนของบรรยากาศที่ส่งผ่านเข้ามาในอาคารทางด้านตะวันตกมีค่ามากกว่าทางด้านตะวันออกสอดคล้องกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อมในช่วงเช้าที่มีค่าต่ำกว่าในช่วงบ่าย สำหรับหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งในทิศใต้อันเป็นทิศที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากรังสีอาทิตย์และเป็นระยะเวลาที่ยาวนานกว่าในทิศอื่นหรือเรียกได้ว่าตลอดทั้งวัน การติดตั้งหน้าต่างกระจกหรือกระจกส่วนหลังคาในทิศนี้จึงควรได้รับการพิจารณาเป็นพิเศษ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่อยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นและมีอาคารสำนักงานเป็นตึกสูงรายล้อมไปด้วยกระจก อาคารเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การออกแบบและตำแหน่งของพื้นที่ส่วนกระจกและการจัดการด้านการบังแสงจากรังสีอาทิตย์ที่ไม่เหมาะสมจะมีส่วนในการเพิ่มปริมาณความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร และเป็นภาระต่อการทำความเย็น จาก

การที่หน้าต่างกระจกมีความสำคัญไม่เพียงเพื่อรับแสงสว่าง ความสวยงามทางทัศนียภาพ ป้องกันสภาพอากาศจากภายนอก สถาปนิกมักออกแบบอาคารในอดีตจนถึงปัจจุบันมีความนิยมออกแบบอาคารให้มีพื้นที่กระจกมากที่สุดโดยคำนึงถึงความสวยงามและพื้นที่การรับแสงธรรมชาติ หากทว่าแทบไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบทางด้านการใช้พลังงาน และแสงสะท้อน ความจ้าของแสงที่โดนกระจก ซึ่งมีผลต่อความไม่สบายตาในการทำงานของผู้อยู่อาศัย การใช้ม่านบังแสงอาจช่วยลดความไม่สบายเหล่านั้นลงได้แต่ก็จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดไฟให้สว่างแทน อันส่งผลต่อเนื่องคือเพิ่มอัตราการใช้พลังงานในอาคาร จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มนักวิจัยทางด้านการใช้พลังงานในอาคารได้เสนอแนวทางการลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารผ่านหน้าต่างกระจกไว้แตกต่างกัน เริ่มจากวิธีการที่ไม่ซับซ้อน เช่น การติดตั้งกันสาดภายนอกอาคาร ม่านกันแสง บานเกร็ดที่บังแสง หรือ ผ้าม่านสะท้อนแสงภายในอาคาร ไปจนถึงการปรับปรุงโครงสร้างอาคารให้มีการเพิ่มเปลือกอาคารคลุมโดยรอบเป็นอาคารสองชั้น รวมไปถึงการสร้างผิวหน้าอาคารสองชั้น (double skin façade) เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากภายในอาคารในฤดูหนาวและป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทจากภายนอกเข้ามาในตัวอาคารในฤดูร้อน การลงทุนจะสูงขึ้นตามระดับความยากของเทคโนโลยี รวมถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มเติม และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา จะเห็นได้ว่าวิธีการสุดท้ายมีค่าใช้จ่ายสูงมากแทบเป็นไปได้สำหรับอาคารทั่วไปที่จะนำไปใช้งาน จึงเหลือเพียงการป้องกันไม่ให้ความร้อนส่งผ่านทางกระจกเข้ามาได้มากเกินไป การติดตั้งหน้าต่างกระจกแบบต่าง ๆ เพื่อผลในการลด หรือ ชะลอการส่งผ่านความร้อน ที่ได้รับความนิยมนได้แก่ กระจกเคลือบผิวสีหรือเคลือบสารเคมี กระจกสองชั้นและมากกว่าสองชั้นที่มีอากาศหรือแก๊สบรรจุอยู่ระหว่างแผ่นกระจก รวมถึงการใช้กระจกที่มีค่าการปลดปล่อยรังสีต่ำ ต่างมีผู้ค้นคว้าวิจัยเป็นจำนวนมาก

พบว่ากระจกบางชนิดมีผลต่อการรับแสงธรรมชาติและความสบายตา บางชนิดมีราคาสูง และบางชนิดเหมาะสมกับบางสภาวะภูมิอากาศ

บทบาทสำคัญของการใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับโครงสร้างเปลือกอาคารทั้งในส่วนหลังคาและผนังอาคารต่างได้รับการยอมรับทั้งในทางทฤษฎีและการทดลองว่ามีส่วนช่วยในการชะลอการส่งผ่านความร้อน หรือลดปริมาณความร้อนเข้าสู่อาคารได้ด้วยการเก็บความร้อนไว้ที่ผนังหรือหลังคาและถ่ายเทออกสู่ภายนอกในช่วงเวลาที่อุณหภูมิภายนอกต่ำลง เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะสามารถกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนแฝงซึ่งมีปริมาณมากกว่าการกักเก็บด้วยความร้อนสัมผัส จึงทำให้ได้รับความนิยมนำไปใช้งานในทางปฏิบัติจริงเพิ่มขึ้น หากทว่ายังไม่พบว่ามีการศึกษาแพร่หลายในการใช้สารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมกับหน้าต่างกระจก ทั้งที่พื้นที่ส่วนนี้ควรได้รับการเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นจุดอ่อนของอาคารที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรงและทันที

ในงานวิจัยชิ้นนี้เสนอรูปแบบใหม่ของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีการทำงานร่วมกับวัสดุเปลี่ยนสถานะ ความร้อนจากภายนอกส่งผ่านเข้ามายังวัสดุนี้เกิดการเปลี่ยนเฟสทำให้ความร้อนส่วนหนึ่งถูกกักเก็บไว้ จึงป้องกันความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อาคาร สามารถชะลอการส่งผ่านความร้อนเข้ามาภายในและถ่ายเทกลับออกสู่ภายนอกเมื่ออุณหภูมิต่ำลงเพื่อคืนสถานะ มีการทำงานเป็นวัฏจักรต่อเนื่องโดยไม่ต้องรับแรงหรือพลังงานจากแหล่งอื่น สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบห้องและระบบทดสอบภายในอาคาร ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีและที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วย นอกจากนี้ได้เสนอความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์จากระยะเวลาคืนทุนของระบบ

## 1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อหาสภาวะทำงานที่เหมาะสมของหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสทำงานร่วม ภายใต้สภาวะภูมิอากาศของประเทศไทย ด้วยวิธีการทดลอง
- 1.1.2 ศึกษาค่าการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างถึงผลต่อการนำไปใช้ในอาคารเพื่อประหยัดพลังงาน
- 1.1.3 ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

## 1.2 ขอบเขต

- 1.2.1 ศึกษาหาวัสดุเปลี่ยนเฟสที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานร่วมกับหน้าต่างกระจกสองชั้น
- 1.2.2 ออกแบบหน้าต่างกระจกสองชั้นและทดสอบหาสภาวะการณ์ทำงานของกระจกสองชั้นร่วมกับวัสดุเปลี่ยนเฟสในห้องปฏิบัติการ
- 1.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างแบบกระจกสองชั้นที่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส แบบที่มีอากาศ และแบบกระจกชั้นเดียว ที่มีผลต่อการลดการใช้พลังงานในอาคาร
- 1.2.4 วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 อุปกรณ์ หรือ สิ่งประดิษฐ์ในการทดลอง สามารถใช้เพื่อการเรียนการสอน และเพื่อสาธิตต่อผู้สนใจ
- 1.3.2 ผลงานวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการประหยัดพลังงานในอาคาร

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนประกอบไปด้วย การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน รวมถึงองค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ ปัจจัยการส่งผ่านความร้อนทางระบบหน้าต่างกระจก และปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ ต่อจากนั้นเป็นรายงานผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านเปลือกอาคารส่วนที่เป็นกระจกโดยให้ความสำคัญกับระบบหน้าต่างกระจกที่มีความเป็นฉนวน ความเป็นมารวมถึงการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะเพื่อเก็บกักความร้อน การประกอบกับวัสดุโครงสร้างเปลือกอาคารเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร และแนวทางในการทำงานร่วมกับระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น

#### 2.1 หลักการถ่ายเทความร้อน

กระบวนการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเมื่อบริเวณสองบริเวณมีอุณหภูมิแตกต่างกันทำให้มีการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า กระบวนการที่เกิดขึ้นมีสามแบบ คือ การนำความร้อนเกิดขึ้นเมื่อมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนเป็นของแข็งหรือของไหลนิ่ง การพาความร้อนเกิดขึ้นขณะที่ของไหลหรือตัวกลางเกิดการเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่งไปยังบริเวณอื่น และการแผ่รังสีความร้อนซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหรือระหว่างผิวกับบริเวณโดยรอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวคลื่นสูง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนคือการถ่ายโอนความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนไปในตัวกลางของแข็งที่อยู่หนึ่งไม่เคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำ การเผาไหม้ของอะลูมิเนียมที่ปลายด้านหนึ่งส่งผลให้อนุภาคมีการสั่นต่อเนื่องกันไปจนถึงปลายอีกด้านหนึ่งที่ไม่ได้สัมผัสเปลวไฟ ดังนั้นแล้วความร้อนจึงถ่ายโอนได้ด้วยการสั่นของอนุภาคหรือโมเลกุลของอะลูมิเนียม ตัวนำความร้อนที่ดีได้แก่ โลหะชนิดต่าง ๆ มักถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความร้อนดังเช่น ภาชนะหุงต้มอาหาร เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หม้อไอน้ำ เป็นต้น ขณะที่วัสดุตัวนำความร้อนที่ไม่ดี ได้แก่ ไม้ พลาสติก และใยแก้ว จึงถูกนำไปทำเป็นฉนวนกันความร้อน ทั้งในด้านอุตสาหกรรมโรงงานและใช้เป็นส่วนประกอบโครงสร้างเปลือกอาคาร เช่น ผนัง และหลังคา

การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางของแข็งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) สมการในหนึ่งมิติเขียนได้เป็น

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q$  คือ ความร้อนหรือกระแสความร้อน, W

$k$  คือ ค่านำความร้อน, W/m.K

$dT/dx$  คือ เกรเดียนอุณหภูมิ, K/m

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่มีการถ่ายโอนความร้อน,  $m^2$

สามารถจัดรูปสมการในรูปความต้านทานความร้อนลักษณะเดียวกับสมการทางไฟฟ้าตามกฎของโอห์มได้ดังนี้

$$R_{cd} \equiv \frac{(T_1 - T_2)}{q} = \frac{L}{kA} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $R_{cd}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อน, K/W

$T_1 - T_2$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิสองบริเวณ, K

L คือ ความยาวของวัสดุที่ความร้อนไหลผ่าน, m

### 2.1.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน คือการถ่ายโอนความร้อนจากพื้นผิวหนึ่งผ่านตัวกลางเคลื่อนที่ได้แก่ของเหลวและแก๊ส ดังการระบายความร้อนออกจากผนังในอาคารด้วยกระแสลมอาจเป็นได้ทั้งแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive) คือแบบมีกระแสอากาศไหลเวียนตามธรรมชาติ หรือแบบที่ใช้พลังงาน (Active) โดยอาศัยอุปกรณ์ เช่น พัดลม เป็นต้น บังคับให้เกิดกระแสอากาศไหลเวียนผ่านบริเวณที่ต้องการ โดยกระแสของไหลจะพาความร้อนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่งที่ตัวกลางนี้เคลื่อนที่ผ่าน การถ่ายโอนความร้อนด้วยวิธีนี้เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_{cv}$ ) ความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างพื้นผิวและกระแสของไหล ( $T_s - T_f$ ) พื้นที่ของพื้นผิวที่ถูกพาความร้อนออกไป (S) ดังเขียนสมการได้

$$q = h_{cv} S (T_s - T_f) \quad (2.3)$$

สามารถจัดรูปสมการความต้านทานความร้อนแบบการพาความร้อนได้เช่นเดียวกันกับความต้านทานความร้อนแบบการนำความร้อนด้วยลักษณะของสมการทางไฟฟ้าดังนี้

$$R_{cv} \equiv \frac{1}{h_{cv} S} \quad (2.4)$$

### 2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนคือการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันสองผิวหรือระหว่างผิวกับบริเวณแวดล้อมโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ตัวอย่างที่พบเห็นได้คือการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังผิวโลก การถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีนี้มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นต่อความต่างอุณหภูมิดังสมการ

$$q = \sigma AF(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F$  คือ ผลจากสมบัติพื้นผิวและรูปทรง

$\sigma$  คือ ค่าคงที่สเตฟาน มีค่าเท่ากับ  $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

สมการข้างต้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี ( $h_r$ ) ดังนี้ (Bejan and Kraus, 2003, Chapter 1)

$$q = h_r S(T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

โดย  $h_r = \sigma F(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$

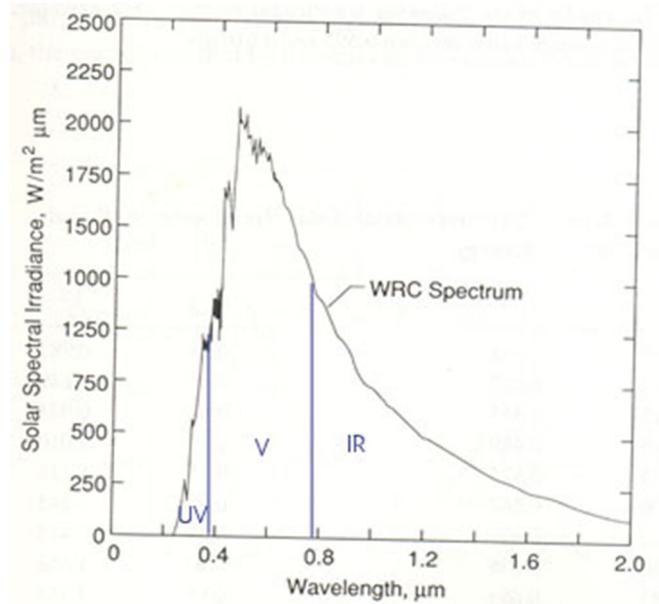
หรือเมื่อ  $T_1 - T_2$  มีค่าน้อยมาก  $h_r = 4\sigma F(T_1 T_2)^{3/2}$

ความต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนเขียนได้เป็น

$$R_r \equiv \frac{1}{h_r S} \quad (2.7)$$

## 2.2 แสงอาทิตย์และความร้อน

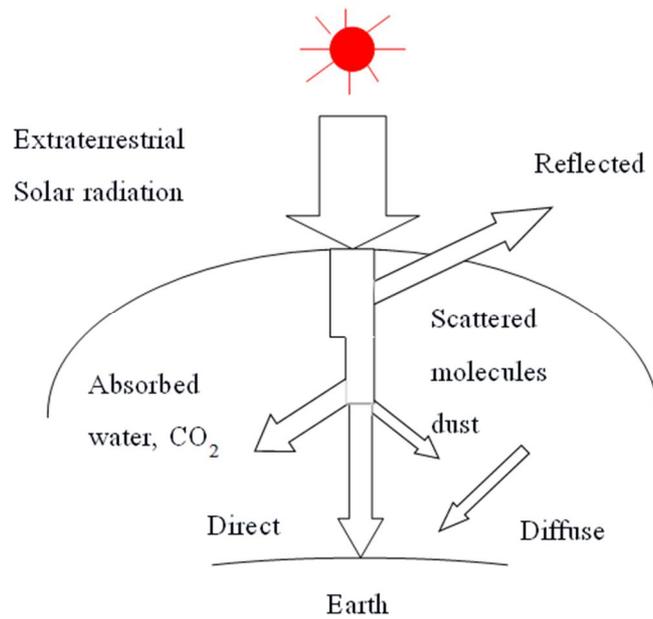
พลังงานที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยารวมตัวกันทางนิวเคลียร์ ณ บริเวณแกนกลางของดวงอาทิตย์ อยู่ในรูปของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา พลังงานส่วนนี้ถ่ายเท ออกมายังผิวนอกโดยมีความยาวคลื่นมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณแกนสูงกว่าที่ ผิวนอก สเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์สามารถประมาณค่าได้ด้วย สเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 5777 K (the effective blackbody temperature) จากการที่ เส้นทางโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จึง เปลี่ยนแปลงไปตลอดปี ทำให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation,  $G_{on}$ ) มีค่าต่างกันทุกวัน มีอัตราการเปลี่ยนแปลงประมาณ  $\pm 3\%$  รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบนอกบรรยากาศของโลกมีค่ากำลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เท่ากับ  $1353 \text{ W/m}^2$  คือค่า solar constant ค่ามาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันคือ  $1367 \text{ W/m}^2$  อ้างอิงข้อมูลของ WRC (The world radiation centre) หรือ  $433 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{hr}$  หรือ  $4.92 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{hr}$  (Duffie and Beckman, 2005) นอกจากนี้ยังพบว่าสเปกตรัมของการแผ่รังสีที่ผิวโลกเมื่อไม่คิดอิทธิพลของ ชั้นบรรยากาศเข้ามาเกี่ยวข้องมีค่าใกล้เคียงกับการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิ 5800 K ทั้ง ความยาวคลื่น และพลังงานรวมที่ปลดปล่อยออกมา สเปกตรัมของแสงอาทิตย์สามารถแบ่ง ออกได้เป็นสามช่วง คือ ช่วงรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet) มีความยาวคลื่นน้อยกว่า  $0.38 \mu\text{m}$  ช่วงรังสีที่มองเห็น (Visible) มีความยาวคลื่นระหว่าง  $0.38 \mu\text{m}$  และ  $0.78 \mu\text{m}$  และช่วงรังสีใต้ แดง (Infrared) มีความยาวคลื่นมากกว่า  $0.78 \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.1



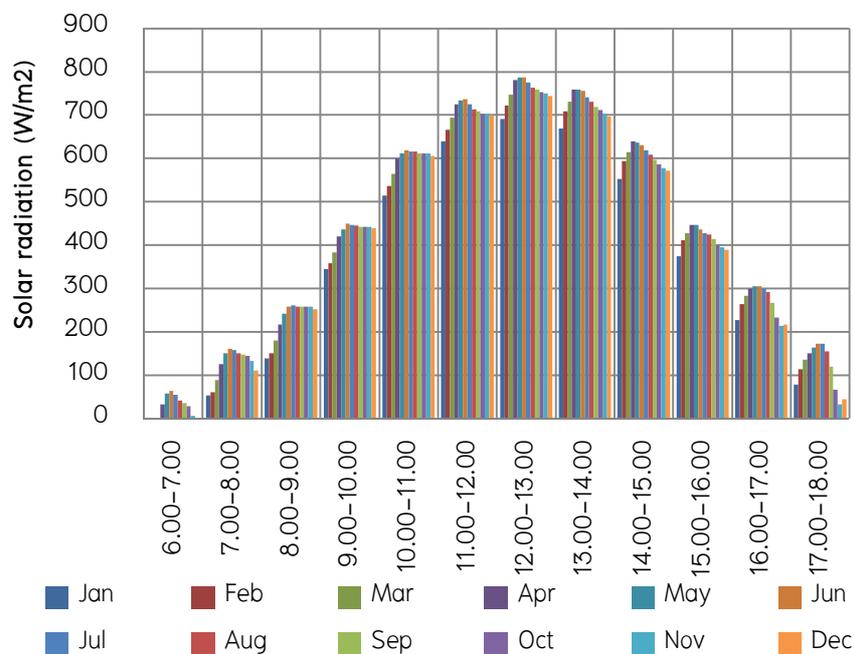
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ช่วงคลื่นรังสีเหนือม่วง (UV) รังสีมองเห็น (V) และรังสีใต้แดง(IR)  
(เพิ่มรายละเอียดรูปจาก Duffie and Beckman, 2006)

รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบนอกชั้นบรรยากาศเรียกว่ารังสีนอกโลก ส่วนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาตกกระทบบนผิวโลกและมีทิศอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์เรียกว่ารังสีตรง (beam or direct radiation) ส่วนของรังสีที่ถูกสะท้อนและกระจายโดยแก๊ส ฝุ่นละออง และวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงซึ่งมาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าก่อนตกกระทบผิวรับแสงเรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) ดังรูปที่ 2.2 ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย เรียกว่า รังสีรวม (total radiation) ในการพิจารณารังสีรวมนั้นจะจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น มีความยาวคลื่นไม่เกิน 3  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแสงอาทิตย์ โดยไม่พิจารณารวมถึงพลังงานคลื่นยาวที่เกิดจากการแผ่รังสีของผิวโลกและบรรยากาศ เนื่องจากโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีทำให้ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ในแต่ละวันของปีไม่คงที่ส่งผลถึงการเกิดฤดูกาล จึงมีผลทำให้ความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของวัน ตามวันของปี ตำแหน่งของพื้นที่บนโลก ดังแสดงความเข้มรังสีอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลกดังรูปที่ 2.3 นอกจากนั้นแล้ว

ค่ารังสีอาทิตย์ยังขึ้นอยู่กับสภาพท้องฟ้าในแต่ละวัน วันที่มีเมฆมากจะได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ตรงบนพื้นผิวต่ำกว่าวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ดัชนีเมฆของแต่ละพื้นที่จึงมีความสำคัญต้องพิจารณาพร้อมด้วย



รูปที่ 2.2 รังสีอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศและตกกระทบบนผิวโลก

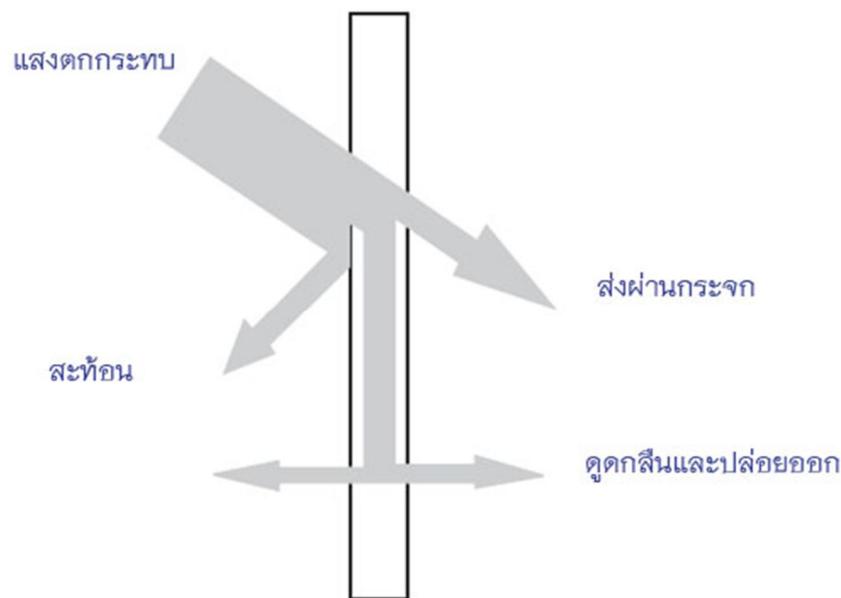


รูปที่ 2.3 ความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงตลอดปี ของจังหวัดพิษณุโลก (Handbook of Solar

Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications, 2005)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารมาจากทั้งรังสีตรง และรังสีกระจาย ในที่นี้หมายรวมไปถึงผลกระทบจากการแผ่รังสีทั้งสองที่สะท้อนจากวัสดุโดยรอบและส่งเข้ามาภายในอาคาร ซึ่งเป็นเหตุให้ต้องคำนึงถึงการเลือกวัสดุสร้างพื้นผิวบริเวณใกล้เคียงกับอาคารจากวัสดุที่มีค่าการสะท้อนต่ำ โดยความร้อนจะส่งผ่านจากเปลือกนอกเข้าสู่ภายในอาคาร มีส่วนที่เป็นจุดอ่อนของเปลือกอาคารคือ หน้าต่างกระจก เนื่องจากมีค่าหน่วยเวลาถ่ายเทความร้อนต่ำสุด เปรียบเทียบกับส่วนอื่นของเปลือกอาคาร คือ ผนัง และหลังคา โครงสร้างประกอบอาคารสองส่วนนี้สามารถเลือกจากวัสดุที่มีค่านำความร้อนต่ำ ปรับระดับความหนาของชั้นวัสดุเพื่อเพิ่มมวลกันความร้อน รวมถึงสามารถบุฉนวนระหว่างชั้นวัสดุป้องกันความร้อนได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงความทึบหรือโปร่งแสงของวัสดุ ด้วยเหตุที่ผนังและหลังคาอาคารเป็นส่วนที่มีพื้นที่มากและได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลายาวนานต่อวันนั่นเอง ขณะที่หน้าต่างก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของอาคารที่ควรได้รับความใส่ใจไม่น้อยไปกว่ากันทั้งนี้เพราะอาคารที่อยู่อาศัยและอาคารสำนักงานต่างมีลักษณะการออกแบบและโครงสร้างในปัจจุบันที่ประกอบไปด้วยหน้าต่างกระจกรอบอาคารมีสัดส่วนพื้นที่กระจกเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลของความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่อาคาร โดยทั่วไปหน้าต่างกระจกมีหน้าที่หลักสองประการคือ เพื่อการมองเห็นรวมทั้งป้องกันสภาพอากาศ ฝุ่นละออง และปัจจัยที่ไม่พึงประสงค์จากสภาพแวดล้อมภายนอก และเพื่อรับแสงธรรมชาติสำหรับการส่องสว่างภายในอาคาร หากพิจารณาแล้วจะเห็นว่า การหุ้มฉนวนในส่วนนี้ทำได้อย่างมีข้อจำกัดเพื่อไม่ให้สูญเสียหน้าที่สองประการ จึงไม่สามารถใช้วัสดุที่มีความทึบแสงได้เหมือนในส่วนของผนังและหลังคา พิจารณาความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกไปยังภายในอาคารจะพบว่ากระจกมีลักษณะเฉพาะตัวที่มีค่าการส่งผ่าน (Transmissibility) ไม่คงที่เมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือเมื่อความ

ยาวคลื่นที่ตกกระทบกระจกเปลี่ยนแปลงไปค่าการส่งผ่านกระจกก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นแสงที่ตกกระทบกระจกหน้าต่างจึงไม่ได้ผ่านกระจกทั้งหมดร้อยละเปอร์เซ็นต์จะมีส่วนที่สะท้อนกระจกกลับออกไปภายนอก ส่วนที่ส่งผ่านกระจกเข้ามาภายใน และส่วนที่ดูดกลืนในกระจกและปลดปล่อยออกมาในระยะเวลาต่อมา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยสองส่วนหลังที่เข้ามาภายในอาคารคือความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ (solar heat gain)



รูปที่ 2.4 ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนกระจกและผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร

ความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในอาคารได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ (solar heat gain coefficient, SHGC) ของระบบกระจก Oughton และ Hodkinson (2008) แสดงให้เห็นว่าระบบกระจกแผ่นเดี่ยว สองแผ่น และสามแผ่น ซึ่งแตกต่างกันด้วยค่า G คือค่าความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่อาคารได้รับจากส่วนของการส่งผ่านโดยตรงและส่วนของการปลดปล่อยรังสีความร้อนจากที่กระจกดูดแสงไว้ อ้างอิงค่า G ทางทฤษฎีระบบกระจกใสแผ่นเดี่ยว 0.82 ระบบกระจกใสสองชั้น 0.43 ระบบกระจกดูดแสงความร้อนแบบสองชั้น 0.36 ระบบกระจกสะท้อนแสงแบบสองชั้น 0.26 ระบบกระจก

ประสิทธิภาพสูงแบบสามชั้น 0.32 ระบบกระจกประสิทธิภาพสูงแบบสามชั้นที่มีแผ่นทึบแสงกั้นกลาง 0.16 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายในห้องที่ติดตั้งระบบกระจกใสแผ่นเดียวมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่มีระบบกระจกใสสองชั้น และต่ำสุดคือที่มีระบบกระจกประสิทธิภาพสูงแบบสามชั้นมีแผ่นทึบแสงกั้นกลาง กล่าวได้ว่าระบบกระจกที่มีค่า G ต่ำมีประสิทธิภาพผลในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านระบบกระจกได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามระบบกระจกสองชั้นให้ผลความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องเปรียบเทียบกับระบบกระจกสามชั้นไม่เกิน 11 เปอร์เซ็นต์ขณะที่ราคาค่าใช้จ่ายต่างกันมาก จึงทำให้พบเห็นการใช้งานระบบกระจกสองชั้นมากกว่า

กระจกควบคุมความร้อนสามารถลดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ด้วยการดูดแสงหรือสะท้อนกลับ ที่พบเห็นการใช้งานทั่วไปได้แก่

1. กระจกดูดแสง (Absorbing glasses) มีสองแบบคือ แบบกระจกสีที่มีสีลดทอดความหนาของแผ่นกระจกส่งผลให้สมบัติการควบคุมแสงอาทิตย์และความหนาแน่นของสีขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นกระจก ที่พบเห็นได้ทั่วไปคือสีเทา บรอนซ์ และเขียว สำหรับแบบที่สองจะเป็นลักษณะอนุภาคโลหะถูกเคลือบลงในกระจกเป็นชั้นหลายชั้นได้ตามที่ต้องการ ชนิดนี้สามารถดูดรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้ากระจกใส จึงทำให้สามารถใช้งานได้แบบกระจกแผ่นเดียว
2. กระจกสะท้อนแสง (Reflective glasses) กระจกประเภทนี้จะมีการเคลือบอ็อกไซด์โลหะหรือสารอื่นที่มีสมบัติใกล้เคียงลงบนผิวหน้าด้านหนึ่งของกระจก จะพบเห็นใช้งานกันในประเภทระบบกระจกสองชั้นโดยให้ผิวหน้านี้อยู่ภายในตรงช่องว่างของระบบ สีที่ใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตได้แก่ เงิน เทา บรอนซ์ หรือ น้ำเงิน แต่อาจพบเห็นได้ในสีอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

3. กระจกติดฟิล์มกรองแสง (Solar control films) มีให้เลือกหลายสี ฟิล์มมักจะถูกติดไว้ที่ด้านในของกระจก มีผลควบคุมป้องกันแสงอาทิตย์คล้ายกับกระจกสะท้อนแสง ด้วยราคาที่ดีจึงมักถูกเลือกเพื่อนำไปเปลี่ยนหน้าต่างเดิมที่ติดกระจกใส ปัจจุบันได้มีกระจกติดฟิล์มที่สามารถปรับสีตามความเข้มของแสงได้เพิ่มเติมเข้ามา
4. กระจกอัจฉริยะ หรือ กระจกฉลาด (smart windows) มีการพัฒนาและทดสอบในห้องปฏิบัติการ รวมถึงพบเห็นการใช้งานจริงเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วยกระจกที่มีการเคลือบสีชั้นได้แก่ ชั้นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conductor) ชั้นเปลี่ยนสีสามารถเลือกดูดแสงหรือสะท้อนสีบางช่วงคลื่น (electrochromic layer) ชั้นสะสมอนุภาคประจุไฟฟ้า (ion storage) และชั้นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชั้นที่สอง (second transparent conductor) กระจกจะปรับสีได้เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าไปที่ผิวกระจก ชั้นตัวนำทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ส่งผลให้ชั้นเปลี่ยนสีทำหน้าที่ดูดแสงบางช่วงคลื่นและส่งผ่านบางช่วงคลื่นเกิดการเปลี่ยนสีของกระจกเป็นการควบคุมความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านได้
5. กระจกปลดปล่อยรังสีความร้อนต่ำ (low emissivity coating) กระจกประเภทนี้ถูกเคลือบด้วยสารแผ่นรังสีต่ำทำได้สองแบบ แบบเคลือบแข็ง (hard coating) ยึดติดระหว่างสารโลหะที่เคลือบกับกระจกในระดับโควาเลนต์ มีค่าสภาพเปล่งรังสี (emissivity) ระหว่าง 0.2 ถึง 0.15 และแบบเคลือบอ่อน (soft coating) มีค่าสภาพเปล่งรังสี 0.1 ถึงต่ำกว่า 0.026 ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบแรก

### 2.2.1 ความร้อนถ่ายเทจากรังสีอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจก

แสงอาทิตย์มีค่าความเข้มแสงรังสีตรง  $I_B$  ตกกระทบบนพื้นผิวที่แสงที่มีค่าการดูดแสง (absorptivity)  $\alpha$  จะมีค่าการแผ่รังสีจากการดูดแสงเท่ากับ  $\alpha I_B \cos\theta$  เมื่อ  $\theta$  คือมุมระหว่างแนวรังสีตรงกับเส้นปกติบนพื้นผิว

สำหรับกระจกหรือวัสดุโปร่งแสงชนิดอื่นจะพบว่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนวัสดุเหล่านี้จะมีบางส่วนที่สะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนถูกดูดไว้ภายในเนื้อสาร (absorbed) และที่เหลือถูกส่งผ่านวัสดุ (transmitted) ดังได้แสดงในรูปที่ 2.3 ไว้แล้วนั้น สัดส่วนขององค์ประกอบสามตัวนี้แปรผันตามมุมที่แสงตกกระทบและสมบัติการดูดกลืนของตัวกลางที่แสงส่งผ่าน (Davies, 2004) เมื่อพิจารณารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนกระจกแผ่นเดียวเป็นกรณีแรก

ค่าดัชนีหักเหจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของแสง  $\theta_1$  และมุมสะท้อน  $\theta_2$  ดังนี้

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \mu \quad (2.8)$$

รังสีตรงสะท้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแสงโพลาไรซ์ (polarised) และแสงตัดกัน (perpendicular) บนระนาบ สัดส่วนของแสงสะท้อนในแนวขนานและตั้งฉากแสงได้ดังนี้

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)}; r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \quad (2.9)$$

หากแสงหนึ่งหน่วยตกลงบนพื้นผิวโดยมีส่วนหนึ่งสะท้อน  $r$  และ ส่วนหักเห  $1 - r$  กำหนด  $L$  คือ ความหนาของกระจก ดังนั้นความยาวของเส้นทางที่แสงหักเหคือ  $L / \cos\theta_2$  ขณะที่บางส่วนของรังสีถูกดูดเมื่อผ่านระยะทางนี้ จะได้ว่าความเข้มแสงที่ไปถึงอีกด้านหนึ่งของพื้นผิวกระจกมีค่า

$$a = \exp(-kL/\cos\theta_2) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $k$  คือสัมประสิทธิ์การสิ้นสูญ (extinction coefficient)

ค่า  $k$  ประมาณ  $4 \text{ m}^{-1}$  สำหรับกระจกใสและมีค่าประมาณ  $100 \text{ m}^{-1}$  สำหรับกระจกดูดความร้อน (heat-absorbing glasses) ขณะที่สัมประสิทธิ์ดูดแสง (absorption coefficient)  $a$  มีแนวโน้มเข้าใกล้ 1 สำหรับกระจกบางแบบดูดแสงต่ำ (thin, low-absorbing glass) ค่า  $k$  ของกระจกสีจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นด้วยเหตุที่ว่าแสงสีที่ส่งผ่านไปได้เนื่องจากมีส่วนรังสีอาทิตย์ที่ไม่ได้

ถูกต้องไว้แน่นอน ทำนองเดียวกัน  $a$  และ  $r$  มีค่าขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง ทว่าดัชนีหักเห มีผลน้อยมากต่อความยาวคลื่นของแสง พิจารณาอนุกรมของแสงสะท้อนและหักเหจากฝั่งด้าน แสงตกกระทบไปยังอีกฝั่งหนึ่งตามความหนากระจก จะได้ว่าองค์ประกอบรวมของรังสีสะท้อน (reflectance) มีค่า

$$\rho = r + r(1 - r)^2 a^2 / (1 - r^2 a^2) \quad (2.11)$$

โดยองค์ประกอบการดูดแสงสำหรับแสงที่เคลื่อนผ่านเส้นทางหนึ่งครั้งมีค่า  $(1-r)(1-a)$  และ ผลรวมค่าการดูดแสง (absorptance) มีค่า

$$\alpha = (1 - r)(1 - a) / (1 - ra) \quad (2.12)$$

ผลรวมสัดส่วนแสงที่ส่งผ่าน หรือค่าการส่งผ่าน (transmittance) มีค่า

$$\tau = (1 - r)^2 a / (1 - r^2 a^2) \quad (2.13)$$

ผลรวมของสามส่วนนี้มีค่าเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ  $\rho + \alpha + \tau = 1$  เนื่องจากลำแสงตกกระทบไม่ เป็นแสงโพลาไรซ์ดังนั้นแสงตกกระทบหนึ่งหน่วยจึงประกอบไปด้วยสองแนวลำแสงคือ

$$1 = \frac{1}{2}_{\parallel} + \frac{1}{2}_{\perp} \quad (2.14)$$

ดังนั้นสามารถเขียนเทอมสุทธิของค่าการดูดแสงและส่งผ่านได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{1}{2} \alpha_{\parallel} + \frac{1}{2} \alpha_{\perp} \quad (2.15)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tau_{\parallel} + \frac{1}{2} \tau_{\perp} \quad (2.16)$$

ถ้าแนวลำแสงตกกระทบบนผิวที่มุม  $\theta_1$  จะได้ว่า  $\theta_2 = \theta_1/\mu$  และ  $\sin\theta_2 = \tan\theta_2 = \theta_2$  ดังนั้น

แล้วค่าการสะท้อนบนหนึ่งพื้นผิวคือ

$$r = ((\mu - 1)/(\mu + 1))^2 \quad (2.17)$$

$r$  มีค่า 0.0434 สำหรับกระจกใสดัชนีหักเหเท่ากับ 1.526 โดยค่า  $r$  จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมุมตกกระทบบริเวณ  $\theta_1 = 50^\circ$  แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่มุม  $70^\circ$  ถึง  $90^\circ$  ซึ่งมีค่าเป็น 1 สำหรับกระจกบางมีความสามารถในการดูดแสงน้อยจึงมีค่า  $\alpha$  เป็น 1 มีค่าการสะท้อนอยู่ที่  $2r/(1+r)$  หรือ 0.0832 เมื่อรังสีตกกระทบบนผิวในแนวปกติ และมีค่าการส่งผ่าน  $1 - 0.0832 = 0.917$

พิจารณาทัศนศาสตร์ของกระจกสองชั้น การสะท้อน ดูดแสง และส่งผ่านรังสีตรงของแผ่นกระจกที่หนึ่งมีหลักการเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น แต่ผลจากการส่งผ่านของรังสีตรงไปยังกระจกแผ่นที่สองทำให้ต้องพิจารณาเพิ่มเติมในทุกองค์ประกอบของแสงดังนี้

องค์ประกอบส่วนสะท้อนมีค่ารวมเท่ากับ

$$\rho_{12} = \rho_1 + \rho_2 \tau_1^2 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.18)$$

การดูตรงรังสีในกระจกแผ่นที่หนึ่งมีค่า

$$\alpha_{1\text{ of }2} = \alpha_1 + \alpha_1 \rho_2 \tau_1 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.19)$$

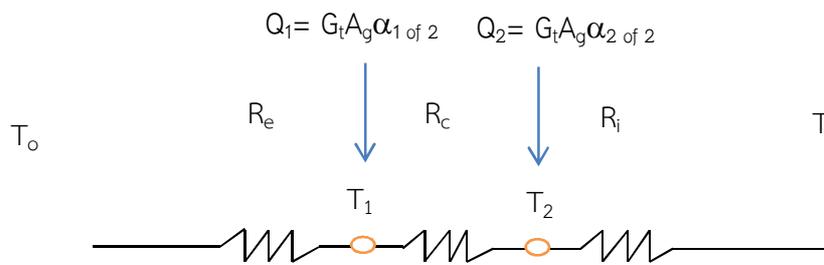
การดูตรงรังสีในกระจกแผ่นที่สองมีค่า

$$\alpha_{2\text{ of }2} = \alpha_2 \tau_1 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.20)$$

องค์ประกอบการส่งผ่านมีค่า

$$\tau_{12} = \tau_1 \tau_2 / (1 - \rho_1 \rho_2) \quad (2.21)$$

สมการข้างต้นตั้งแต่ (2.8) ถึง (2.21) จากเอกสารผลงานของ Jones (1980) และ Davies (2004) เมื่อคำนึงถึงค่าความร้อนที่ส่งผ่านกระจกสองชั้นโดยรังสีตรงตกกระทบพื้นที่กระจก  $A_g$  ณ เวลา  $t$  มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์  $G_t$  ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของกระจกแผ่นแรก (1) และแผ่นสอง (2) คือ  $Q_1 = G_t A_g \alpha_{1 \text{ of } 2}$  และ  $Q_2 = G_t A_g \alpha_{2 \text{ of } 2}$  ตามลำดับ สามารถเขียนวงจรความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อ  $T_o$  และ  $T_i$  คืออุณหภูมิภายนอกและภายในห้อง



รูปที่ 2.5 วงจรความร้อนของระบบกระจกสองชั้น

ความร้อนที่ถ่ายเทจาก  $T_2$  เข้าไปยังห้องปิด  $T_i$  เขียนได้ดังนี้ (Davies, 2004)

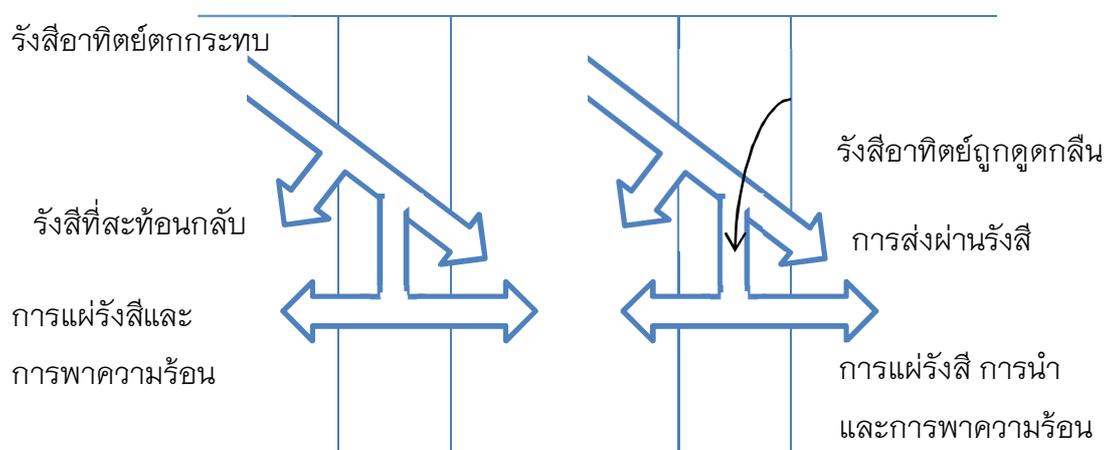
$$\frac{T_2}{R_i} = \frac{R_e + R_c}{R_e + R_c + R_i} \left( \frac{R_e}{R_e + R_c} Q_1 + Q_2 \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ  $R_e$   $R_c$  และ  $R_i$  คือความต้านทานความร้อนจากภายนอก ในช่องกระจก และภายในตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบกระจกสองชั้นมีการแปรผันตามขนาดของช่องว่าง หรือ ระยะห่างระหว่างแผ่นกระจก พบว่าระบบที่มีช่องว่างระหว่าง 1 ถึง 2 เซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นผลมาจากการนำความร้อนเป็นหลัก ส่วนผลของการพาความร้อนในสภาวะอากาศนิ่ง ณ ช่องว่างแคบแคบนี้มีค่าน้อยมาก ในทางตรงกัน

ข้ามกับระบบกระจกสองชั้นที่มีขนาดช่องว่าง ตั้งแต่ 3 เซนติเมตร ขึ้นไป การพาความร้อนมีความสำคัญมากกว่าการนำความร้อน และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวกระจก (Hagentoft, 2001)

การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นต่อหน่วยพื้นที่คือความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ที่กลับด้วยความร้อนสูญเสียจากระบบจากการพาความร้อนที่ผิวกระจกนอก และการนำความร้อนผ่านชั้นกระจกเข้ามาภายในดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 พลังงานความร้อนส่งผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้น

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ถ่ายเทผ่านกระจกมีค่า

$$Q_s = SHGC \times A \times G_T \quad (2.23)$$

เมื่อ  $Q_s$  คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจก, W

SHGC คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient)

A คือ พื้นที่กระจก,  $m^2$

$G_T$  คือ พลังงานแสงอาทิตย์รวม,  $W/m^2$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ คือ สัดส่วนของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผ่านเข้าไปภายใน ประกอบไปด้วยรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงและดูดซับไว้ด้วยสภาวะแวดล้อม

ภายใน และรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดซับไว้ด้วยระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นจากนั้นส่งผ่านเข้าไปยังภายในห้องด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficient, SC) ดังนี้

$$SC = \frac{SHGC}{SHGC_{standard}} \quad (2.24)$$

เมื่อ SC คือ สัมประสิทธิ์การบังแดด

$SHGC_{standard}$  คือ สัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์มาตรฐาน = 0.87

(ASHRAE 1993)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( Overall heat transfer coefficient; U) ของหน้าต่างกระจกสองชั้น คำนวณได้จาก

$$U = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_o} + R_{go} + R_{gap} + R_{gi} + \frac{1}{h_i} \right)} \quad (2.25)$$

เมื่อ  $h_o$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก, (W/m<sup>2</sup>.K)

$h_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน, (W/m<sup>2</sup>.K)

$R_{go}, R_{gi}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกแผ่นนอกและแผ่นในมีค่าเท่ากับ

$$L/k, (K/W)$$

L คือ ความหนาของแผ่นกระจก, (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของกระจก, (W/m.K)

อ้างอิงมาตรฐาน ASHRAE การออกแบบ ณ สภาวะฤดูร้อน กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก ( Heat transfer coefficient for outdoor surface;  $h_o$ ) เท่ากับ 22.7

$W/m^2 \cdot ^\circ C$  และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน ( Heat transfer coefficient for indoor surface;  $h_i$ ) คำนวณจาก

$$h_i = \frac{1.77(T_{gi} - T_i)^{0.25} + \epsilon_{in,2}\sigma(T_{gi}^4 - T_i^4)}{(T_{gi} - T_i)} \quad (2.26)$$

- เมื่อ  $T_{gi}$  คือ อุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน, (K)
- $T_i$  คือ อุณหภูมิของอากาศภายใน, (K)
- $\epsilon_{in,2}$  คือ ค่าการเปล่งรังสีของผิวกระจกแผ่นที่สองด้านใน
- $\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan Bellman constant เท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างบรรจุอากาศหรือแก๊สหรือสารเปลี่ยนสถานะระหว่างกระจก  $R_{gap}$  มีความสัมพันธ์กับค่าการเปล่งรังสีประสิทธิภาพ (Effective Emittance;  $\epsilon_e$ ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\epsilon_e = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_{in,1}} + \frac{1}{\epsilon_{out,2}}\right) - 1} \quad (2.27)$$

- เมื่อ  $\epsilon_{in,1}$  และ  $\epsilon_{out,2}$  คือค่าการเปล่งรังสีของผิวกระจกแผ่นที่ 1 ด้านในและแผ่นที่ 2 ด้านนอก เท่ากับ 0.84 กรณีกระจกใสหนา 6 mm (พรพรรณ, 2545)

หลังจากคำนวณค่า  $\epsilon_e$  แล้วอ่านค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในช่องว่างจากตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการคำนวณสำหรับช่องว่างมีอากาศบรรจุอยู่ ขนาดช่องว่าง 12 mm ความแตกต่างอุณหภูมิกระจกแผ่นนอกและแผ่นใน  $15^\circ C$  และค่า  $\epsilon_e$  คำนวณได้เท่ากับ 0.72 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนประมาณ  $8 W/m^2 \cdot K$  (Chirattananon, 2005)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับช่องว่างระหว่างกระจก

(Chirarattananon, 2005)

Thickness of space, mm	Temperature in space, °C	Temperature difference of glazing, °C	Value of coefficient, $h_s$ , W/(m <sup>2</sup> .K)					
			Effective emissivity, $\epsilon_e$					
			0.28	0.72	0.40	0.20	0.10	0.05
13	30	5	7.2	6.6	4.6	3.3	2.7	2.4
		15	7.3	6.6	4.6	3.3	2.7	2.4
	50	5	8.4	7.7	5.2	3.7	2.9	2.5
		15	8.5	7.7	5.2	3.7	2.9	2.5
10	30	5	7.8	7.2	5.2	3.9	3.3	3.0
		30	7.9	7.2	5.2	4.0	3.3	3.0
	50	5	9.1	8.3	5.9	4.3	3.6	3.2
		30	9.1	8.3	5.9	4.3	3.6	3.2
6	30	< 50	9.6	9.0	7.0	5.7	5.1	4.7
	50	< 50	11.0	10.2	7.8	6.2	5.5	5.1

สัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ของกระจกแผ่นเดียวมีค่า (ASHRAE 1993)

$$SHGC = \tau_{Global} + \alpha N_i = \tau_{Global} + \alpha \left( \frac{U}{h_o} \right) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $N_i$  คือ สัดส่วนรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดซับและถ่ายเทเข้าภายใน

$\tau_{Global}$  คือ ค่าการส่งผ่านแสงรวม

ดังนั้นกระจกสองชั้นจึงมีค่า SHGC แสดงได้ดังนี้

$$SHGC = \tau_{Global} + \alpha_o \left( \frac{U}{h_o} \right) + \alpha_i \left( \frac{U}{h_o} + \frac{U}{h_{gap}} \right) \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\alpha_o, \alpha_i$  คือ ค่าการดูดแสงของกระจกแผ่นนอกและแผ่นใน

$h_{gap}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในช่องว่างระหว่างแผ่นกระจก,

(W/m<sup>2</sup>.K)

จะได้ค่าความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นคือ

$$Q_w = A.G_T.SHGC + U.A.(T_o - T_i) \quad (2.30)$$

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะสามารถใช้สมการดังกล่าวแล้วข้างต้นได้ประกอบกับข้อสมมติฐานดังนี้

1. พิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติที่สภาวะคงที่
2. พิจารณาสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะเชิงมวลโดยรวม และมีค่าคงที่ในแต่ละสถานะ
3. สารเปลี่ยนสถานะอยู่ในบรรยากาศปิดเมื่อเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวไม่คำนึงถึงผลของการพาความร้อน
4. การถ่ายเทความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกได้รับแสงเกิดจากการแผ่รังสีและการพาความร้อนเท่านั้น

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้พลังงานไฟฟ้าในทุกภาคส่วนของประเทศไทยมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้นต่อเนื่องทุกปี ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (EPPPO) ปี 2552 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีมากที่สุดคือ ภาคอุตสาหกรรม รองลงมาเป็นภาคธุรกิจ และ บ้านและที่อยู่อาศัย สองภาคส่วนหลังใช้พลังงานไฟฟ้ากว่า 45 % ของประเทศ จากการศึกษาที่ประเทศไทยตั้งอยู่ในภูมิภาคเขตร้อนชื้นเป็นผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าหลักคือระบบปรับอากาศถ้าคิดเพียงครึ่งหนึ่งของ 45% จะมีอัตราการใช้พลังงานสูงถึง 31000 GWh/ปี การมีส่วนร่วมในการลดพลังงานด้านนี้ลงได้คือการลดอัตราการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคารลง ที่สำคัญคือพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกอันเป็นจุดอ่อนของอาคาร

เพราะเป็นช่องทางรับความร้อนเข้าสู่ภายในได้มากและเร็ว จึงมีความสำคัญที่ควรได้รับการป้องกันสูงสุด ปัจจุบันหน้าต่างกระจกมีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ ต่างมีข้อดีข้อด้อยเมื่อประยุกต์ใช้งานจริงบางชนิดมีผลรบกวนต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกดังเช่นพวกกระจกสะท้อนแสงบางชนิดกระทบต่อภาวะรับแสงและสภาวะการทำงานของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารดังพวกกระจกสีเข้มต่าง ๆ เป็นต้น หากทว่าเมื่อคำนึงถึงการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารแล้วถือได้ว่าเป็นประโยชน์ นอกจากนั้นการป้องกันยังสามารถทำได้ด้วยการกักเก็บความร้อนที่ส่งผ่านเข้ามายังหน้าต่างกระจกเพื่อป้องกันและสามารถชะลออัตราการถ่ายเทความร้อนลงสำหรับรอเวลาปลดปล่อยออกสู่ภายนอกเมื่ออุณหภูมิภายนอกลดต่ำลงถือเป็นแนวความคิดและเทคนิคทางเลือกใหม่ที่รอกการพิสูจน์ใช้งานในทางปฏิบัติจริงดังเช่นการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะที่มีสมบัติสำคัญคือการมีค่าความร้อนของการหลอมเหลวสูงทำให้สามารถเก็บกักความร้อนไว้ได้มากและอัตราการเปลี่ยนสถานะกลับสู่สภาวะของแข็งเร็วจะช่วยให้กลับมารับความร้อนได้ทันต้งนี้ เป็นต้น รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับระบบหน้าต่างกระจก การป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ และการประยุกต์ใช้ในอาคาร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.3.1 ระบบหน้าต่างกระจกและการป้องกันความร้อน

Rubin และคณะ (1998) ทำการหาสมบัติการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกด้วยการคำนวณจากข้อมูลทดสอบทางแสงของกระจกชนิดต่างกันและของส่วนเคลือบผิวกระจก สมมติฐานคือสมบัติของกระจกเคลือบผิวหลายชั้น กระจกลามิเนท หรือกระจกชนิดอื่น สามารถหาได้จากสมบัติทางแสงของวัสดุโครงสร้างพื้นฐานเชิงมวลและตามความหนาของแต่ละชนิดที่มีทั่วไปโดยไม่จำเป็นต้องทำการวัดความหนาแต่ละชั้นในกระจกดังกล่าว ข้อมูลทางแสงที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการคำนวณได้จากการทดสอบค่าการส่งผ่าน

และสะท้อนในช่วงของสเปกตรัมแสงระหว่าง 300 – 2500 nm โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ Perkin-Elmer Lambda 9 หรือ Lambda 19 spectrophotometer นอกจากนั้นมุมที่แสงตกกระทบกระจกถูกนำไปวิเคราะห์คำนวณถึงผลกระทบต่อสมบัติของกระจกด้วย ผลการคำนวณกระจกต่างแบบและชนิดให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ และถูกนำไปขยายผลเพื่อคำนวณระบบหน้าต่างกระจกได้ทั้งแบบกระจกชั้นเดียว สองชั้น หรือแม้กระทั่งสามชั้น พบว่าให้ค่าความถูกต้องเพียงพอสำหรับการนำไปใช้ประเมินสมรรถนะการใช้พลังงานรายปี

Sekhar และ คณะ (1998) ศึกษาหน้าต่างอัจฉริยะ (Smart window) ลักษณะเป็นกระจกสองชั้น ประกอบด้วยกระจกใสหนา 6 มม. ช่องว่างอากาศ 12 มม. และกระจกหนา 6 มม. ด้านหนึ่งเป็นกระจกสะท้อนความร้อนและอีกด้านหนึ่งเป็นกระจกเคลือบสารเปล่งรังสีต่ำ (Low-e) มีประสิทธิภาพทางพลังงานสูง ยอมให้แสงธรรมชาติผ่านได้มากเนื่องด้วยค่าการสะท้อนต่ำ จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรม DOE-2.1E จำลองการใช้กับอาคารในประเทศสิงคโปร์ พื้นที่ใช้สอยอาคาร 12,500 ตร.ม. พื้นที่ผนัง 6,100 ตร.ม. และพื้นที่โปร่งแสง 4,575 ตร.ม. โดยเปรียบเทียบภาระการทำความเย็น การใช้พลังงานและพลังงานที่ประหยัดได้ พบว่าหน้าต่าง Smart window สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างได้ถึง 70 – 80% ซึ่งมีความสูงกว่าเทคนิคการออกแบบและจัดการกระจกหน้าต่างแบบอื่นที่ประหยัดได้ 50 – 70% ของพลังงานแสงสว่าง และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าอัตราส่วนผลประหยัดได้ในอนาคตกับเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 5.09 อัตราผลตอบแทน 9.15 % และระยะเวลาคืนทุน 4 ปี และมีส่วนในการลดปริมาณ CO<sub>2</sub> SO<sub>2</sub> และ NO<sub>x</sub> ประมาณ 20%

Larssonและคณะ (1999) ทำการทดสอบรวมทั้งคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนส่งผ่านหน้าต่างคำนวณกันความร้อนที่มีรูปแบบเป็นกระจกสามชั้น ตัวกระจกเป็นแบบเคลือบสารให้เปล่งแสงต่ำ (low emissivity) ภายในช่องว่างระหว่างกระจกบรรจุแก๊ส

เฉื่อยคริปตอน ผลการทดสอบพบว่าหน้าต่างกระจกสามชั้นนี้ช่วยลดการส่งผ่านความร้อนเข้ามาภายในห้องมีผลให้อุณหภูมิผิวด้านในของกระจกสูงทำให้มีค่าความต้านทานความร้อนสูง อย่างไรก็ตามพบว่ามีบริเวณผิวกระจกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณมุมขอบด้านล่างและด้านบน แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของกรอบกระจกหน้าต่างซึ่งทำจากอลูมิเนียมที่มีส่วนช่วยในการส่งผ่านความร้อนโดยทำหน้าที่เป็นสะพานความร้อน

Rosencrantz และคณะ (2005) ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านแสงอาทิตย์และแสงสว่างธรรมชาติเข้าสู่ตัวอาคารในประเทศแถบสแกนดิเนเวียด้วยการใช้หน้าต่างประสิทธิภาพพลังงานสูงซึ่งผิวกระจกเคลือบด้วยสารปลดปล่อยรังสีความร้อนต่ำ (low-e) และเคลือบทับเพิ่มด้วยสารป้องกันการสะท้อน (anti-reflective, AR) ทั้งสองด้านของผิวกระจกในระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น ผลการคำนวณจากโปรแกรม ParaSol พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้น 15 % เปรียบเทียบจากระบบหน้าต่างที่มีกระจก low-e หนึ่งแผ่นกับหน้าต่างที่มีกระจกทั้งสองแผ่นเป็น low-e เคลือบ AR ผู้วิจัยกล่าวว่าไม่มีผลกระทบในเทอมของสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยรังสี นอกจากนั้นพบว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น 7% ส่งผลให้การใช้พลังงานของระบบทำความร้อนอาคารลดลง 4 % ต่อปี เนื่องจากการส่งผ่านแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกสองชั้นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงสว่างจากธรรมชาติเป็นหลัก อาจพบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในอาคารสูงเกินไปเมื่อมีการใช้กระจก low - e ทั้งหมด

Chow และคณะ (2006) ศึกษาผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Energy Plus ของกระจกหน้าต่างห้ารูปแบบ คือ กระจกแบบดูตแสงชั้นเดียว กระจกสองชั้นที่มีแผ่นแบบดูตแสงด้านในอาคาร กระจกสองชั้นที่มีแผ่นแบบดูตแสงด้านนอกอาคาร กระจกสองชั้นที่มีช่องว่างระบายอากาศระหว่างกลางเข้าสู่อาคารมีแผ่นกระจกแบบดูตแสงอยู่

ด้านในอาคาร และกระจกสองชั้นที่มีช่องว่างระบายอากาศระหว่างกลางออกสู่ภายนอกอาคาร มีแผ่นกระจกแบบดูดแสงด้านนอกอาคาร ขนาดพื้นที่กระจก 3 m<sup>2</sup> หันหน้าไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เพื่อให้ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาก และระยะเวลาการใช้งานตั้งแต่ 9:00 ถึง 18:00 ด้วยสภาพภูมิอากาศประเทศฮ่องกง พบว่ากระจกสองชั้นแบบที่มีการระบายอากาศที่ช่องว่างระหว่างกลางของแผ่นกระจกออกสู่ภายนอกอาคารมีส่วนช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดีที่สุดในภูมิอากาศแบบกึ่งเขตร้อน (subtropical) โดยสามารถลดการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารเทียบเท่า 66% ของกระจกหนึ่งชั้น และ 88% ของกระจกสองชั้นแบบมีแผ่นกระจกดูดแสงด้านนอกอาคาร ขณะที่แบบที่มีการระบายอากาศเข้าสู่ภายในอาคาร เหมาะสมกับการใช้งานช่วงฤดูหนาวเท่านั้น

Manz (2006) และคณะ ออกแบบและคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสามชั้นที่มีช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกสองช่อง ภายในช่องว่างเป็นสูญญากาศ โดยมีแท่งสแตนเลสชั้นระหว่างกระจกที่ด้านข้างเพื่อรองรับและกั้นแผ่นกระจกที่หนึ่งกับสอง และแผ่นที่สองกับสาม ผลการคำนวณจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนทางคอมพิวเตอร์พบว่าการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกมีค่าลดลงโดยมีค่าการส่งผ่านความร้อนที่กึ่งกลางแผ่นต่ำกว่า 0.2 W/m<sup>2</sup>.K ผลสำเร็จนี้เนื่องจากการใช้แท่งสแตนเลสกั้นระหว่างแผ่นกระจก การใช้กระจกทำจากโซดา-ไลม์ (soda-lime) ชนิดไม่ได้ผ่านการอบความร้อนขนาด 6mm 4mm และ 6mm และใช้กระจกเคลือบสารโลหะแบบการแผ่รังสีความร้อนต่ำ (low - emittance coating) มีค่า  $\epsilon = 0.03$  สำหรับผิวกระจกด้านในติดกับช่องว่างทั้งสี่หน้าคือด้านในกระจกแผ่นที่หนึ่ง ด้านในและด้านนอกกระจกแผ่นที่สองและด้านติดช่องว่างของกระจกแผ่นที่สาม โดยที่ด้านนอกกระจกแผ่นที่หนึ่งอยู่นอกอาคารและด้านในกระจกแผ่นที่สามอยู่ในอาคาร

Gugliermetti และ Bisegna (2007) ได้ศึกษาการใช้หน้าต่างกระจกสองชั้นแบบที่สามารถกลับด้านจากภายในออกสู่ภายนอกได้ มีจำหน่ายทั่วไปในอิตาลี นักวิจัยได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างให้หน้าต่างประกอบไปด้วยกระจกสองชนิดที่แตกต่างกัน คือ แผ่นหนึ่งเป็นกระจกดูดรังสีอาทิตย์ อีกแผ่นหนึ่งเป็นกระจกใส ระหว่างกลางของแผ่นทั้งสองบรรจุอากาศอยู่ภายใน ช่วงฤดูร้อนได้กำหนดให้กระจกแผ่นแรกอยู่ด้านนอกอาคารเพื่อที่จะได้กำจัดความร้อนที่ตัวมันดูดไว้สู่ภายนอก ในช่วงฤดูหนาวกระจกแผ่นนี้จะถูกหันกลับเข้าสู่ด้านในเพื่อคงความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจกใสเข้ามาให้คงอยู่ในอาคาร ลดภาระการทำความร้อนในฤดูร้อน และลดภาระการทำความร้อนในฤดูหนาว เทคนิคอื่นเช่นการใช้ม่านเพื่อควบคุมไม่ให้เกิดสภาวะที่ร้อนเกินไปถูกนำมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่าหน้าต่างที่ติดตั้งในทิศใต้โดยมีด้านหนึ่งเป็นกระจกดูดแสงเคลือบด้วย low-e ให้ผลการประหยัดพลังงานที่ดีที่สุด ในรอบหนึ่งปีสามารถประหยัดพลังงานได้ 161 MJ ต่อพื้นที่สุทธิของหน้าต่างในเขตพื้นที่ที่มีสภาพอากาศอบอุ่นแบบเมดิเตอร์เรเนียน

Freire และคณะ (2011) ดำเนินการถ่ายเทพลังงานความร้อนและความชื้นจากสภาวะแวดล้อมภายนอกเข้าสู่อาคารผ่านระบบหน้าต่างกระจก ในที่นี้พิจารณาเป็นองค์รวมทั้งตัวอาคารแตกต่างไปจากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่มีขอบเขตการพิจารณาเฉพาะระบบหน้าต่าง โดยหวังว่าผลการทำนายจะได้ภาพที่ชัดเจนและถูกต้องมากขึ้น เพื่อนำไปใช้ลดปริมาณการใช้พลังงานในอาคาร การทำนายอุณหภูมิที่ผิวกระจกและอากาศแต่ละโซนรวมถึงสมดุลพลังงานได้จากการคำนวณตามรูปแบบความต้านทานความร้อน (resistive model) ในวงจรความร้อน และแบบจำลองเชิงปริมาตรไฟไนต์ (Finite-volume model) ที่มีการกำหนดเป็นปริมาตรขนาดเล็กจำนวนมากเป็นจุดเชื่อมต่อการคำนวณ แบบจำลองแรกเป็นรูปแบบสมการและการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าแบบที่สองอาศัยข้อมูลสัมประสิทธิ์การดูด

แสงและการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของกระจกจากตารางในโปรแกรมคำนวณ Window 5 (Finlayson และคณะ, 1995) ในการคำนวณได้กำหนดขนาดของห้อง กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 6.0 m x 8.0 m x 2.7 m มีพื้นที่กระจกทางทิศใต้ 6 m<sup>2</sup> มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ 0.5 h (air change per hour) มีความร้อนที่ได้รับจากภายในห้อง 200 W กำหนดใช้งานระบบทำความร้อนเมื่ออุณหภูมิอากาศต่ำกว่า 20 °C และทำความเย็นเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงกว่า 27 °C ผลการจำลองจากสองวิธีพบว่าการทำนายค่าอุณหภูมิในระบบให้ผลเหมือนกันในเงื่อนไขกระจกหน้าต่างชั้นเดียว แต่สำหรับกระจกสองชั้นแบบจำลองเชิงปริมาตรไฟไนต์ให้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำกว่า ผู้วิจัยได้เน้นความสำคัญที่ไม่ควรละเลยคือการพิจารณาการดูดรังสีอาทิตย์ในระบบกระจก

สมศักดิ์ และคณะ (2546) พัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีการส่งผ่านพลังงานความร้อนของหน้าต่างกระจกใสและกระจกติดฟิล์ม พบว่าหน้าต่างกระจกสะท้อนแสงและหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีแผ่นกระจกสะท้อนแสงอยู่ด้านนอกมีค่าการส่งผ่านความร้อนต่ำที่สุด กระจก low-e ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ค่อนข้างต่ำกว่ากระจกติดฟิล์ม และกระจกใสชั้นเดียว

ติกะ (2547) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการส่งผ่านแสงทางหน้าต่างกระจกอาคารหลายรูปแบบ ทำการทดสอบด้วยระบบแสงอาทิตย์เทียมแบบหลอดเดี่ยว กำหนดขนาดกล่องทดสอบทำจากโลหะ 2 ชั้น กว้าง 50 cm ยาว 40 cm สูง 30 cm ภายในบรรจุนวนใยแก้วระหว่างชั้น กระจกที่ถูกทดสอบมีขนาดกว้าง 30 cm ยาว 30 cm หนา 6 mm 7 ชนิด ได้แก่กระจกใสชั้นเดียวติดฟิล์มต่างกัน 4 ชนิด คือ สีเงินเข้ม สีเทาเข้ม สีน้ำเงิน สีฟ้าใส และ กระจกสองชั้น 3 ชนิด คือ กระจกสองชั้น ด้านบนติดฟิล์มสีเงินเข้มด้านล่างใส กระจกสองชั้น ด้านบนใสด้านล่างติดฟิล์มสีเงินเข้ม และ กระจกสองชั้นลักษณะเดียวกันที่เจาะช่องระบายอากาศจากด้านบนสู่

ด้านนอก หลอดไฟที่ใช้เป็นหลอด OSRAM รุ่น HQI-E250 W/NDL มีการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล และวัดความส่องสว่างด้วย Lux meter มีการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะคงที่ทางความร้อนเพื่อหาค่าการส่งผ่านความร้อนทางกระจกและช่วงการหน่วงของเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกแต่ละแบบ ผลการทดสอบสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกชนิดของกระจกประกอบอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน

### 2.3.2 สารเปลี่ยนสถานะและการประยุกต์ใช้ในด้านอาคาร

การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะดำเนินอยู่สองทางโดยทางหนึ่งเริ่มจากสารในสถานะของแข็งรับความร้อนจากบริเวณแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และเป็นผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากถ่ายเทความร้อนให้กับสาร ทว่าดำเนินการตรงกันข้ามเมื่อสารในสถานะของเหลวส่งถ่ายความร้อนออกไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สารดังกล่าวก็จะคืนสถานะกลับเป็นของแข็งดังเดิม กระบวนการดังกล่าวทำให้สารเปลี่ยนสถานะถูกนำมาใช้ในการเก็บกักความร้อนและช่วยถ่วงเวลาการส่งผ่านความร้อนจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง ในอดีตมีการใช้งานเพื่อเป็นระบบกักเก็บพลังงานความร้อนสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ต่อมาใช้แพร่หลายในงานด้านอื่นด้วย สารเปลี่ยนสถานะมีมากมายหลายประเภทแตกต่างกันไปตามลักษณะและสมบัติกายภาพ การนำไปใช้เป็นส่วนผสมกับวัสดุโครงสร้างเปลือกอาคารดังเช่น ผนัง หรือ หลังคา ต่างได้รับการศึกษาวิจัยเป็นจำนวนมากในหลายประเทศถึงความมีประสิทธิภาพในการทำงาน ทว่ายังไม่เป็นที่แพร่หลายนักในประเทศไทยที่ผลงานวิจัยด้านนี้มีไม่มากนัก เนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ชนิด สมบัติ และการประยุกต์ใช้ในด้านอาคาร

Pasupathy และคณะ (2008) รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมาในด้านพัฒนาการของสารเปลี่ยนสถานะที่ถูกนำมาใช้งานกับอาคารที่พักอาศัย และอาคารพาณิชย์ ด้วยการติดตั้งร่วมกับ

ระบบพลังงาน จากการที่สารเปลี่ยนสถานะสามารถเก็บรักษาความร้อนและความเย็นในรูปแบบของความร้อนแฝงที่มีค่ามากกว่าความร้อนสัมผัสหลายเท่าตัวนั้น จึงมีส่วนลดการใช้พลังงานในอาคารของระบบทำความเย็นและทำความร้อนตามลำดับ การประยุกต์ใช้กับ ผนัง หลังคา และพื้นอาคาร โดยการนำไปบรรจุเป็นชั้นหนึ่งของผนังอาคารแบบหลายชั้นเพื่อรับความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาและชะลอการส่งผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร เป็นการเลื่อนเวลาออกไปทำให้ภาระทำความเย็นของอาคารขยับจากช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงไปยังช่วงเวลาที่มีการใช้ไฟฟ้าต่ำมีส่วนช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายทางพลังงานลง นอกจากนี้ยังลดผลกระทบความแปรผันจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอกที่มีต่ออุณหภูมิภายในอาคาร การเลือกใช้ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะมีความสำคัญต่อผลสำเร็จของงานหรืออาจสร้างปัญหาขึ้นได้ หลักการพิจารณามีดังนี้

- สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ได้แก่ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต้องอยู่ในช่วงของการพิจารณาใช้งาน ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตรสูง ความจุความร้อนและความหนาแน่นสูง สภาพการหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวไม่มีการแยกชั้นของสาร
- สมบัติโคเนติกส์ ได้แก่ มีอัตรานิวเคลียสสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดสภาวะซูเปอร์คูลิ่งขณะมีสถานะเป็นของเหลวซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ต้องลดอุณหภูมิของสารให้ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวทำให้สารสามารถกลับคืนสถานะของแข็งได้ มิฉะนั้นแล้วสารไม่สามารถกลับคืนสู่สถานะของแข็งและสูญเสียสภาพการเก็บรักษาความร้อนในรูปแบบความร้อนแฝงอันมีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาความร้อน และควรมีอัตราการเติบโตของการเกิดคริสตัลหรือการเกิดขึ้นของการกลายเป็นของแข็งสูง เพื่อประโยชน์คือการกลับคืนสู่สภาวะพร้อมรับความร้อนสำหรับกักเก็บไว้ตามที่ต้องการ

- สมบัติทางเคมี ได้แก่ ความคงตัวของสมบัติเคมี วัฏจักรการคืนตัวในสภาพของแข็งและเหลว สมบูรณ์ ไม่มีการเสื่อมสภาพของสารเมื่อมีการทำงานไปหลายรอบของวัฏจักรการเปลี่ยนสถานะ ไม่กัดกร่อน ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่เป็นสารระเบิดได้ง่าย
- หลักทางเศรษฐศาสตร์ คือ ราคาต่ำ และสามารถหาได้ง่าย

สารเปลี่ยนสถานะจำแนกออกได้สามชนิด คือ

1. สารอินทรีย์ (Organic) ได้แก่ พาราฟิน (paraffin) และกรดไขมัน (fatty acids)
2. สารอนินทรีย์ (Inorganic) ได้แก่ สารประกอบเกลือ-น้ำ (salt hydrate)
3. สารผสมระหว่างสารทั้งสองชนิดข้างต้น (Eutectic)

ข้อดีอันดับแรกของสารอินทรีย์คือมีให้เลือกใช้งานได้หลายช่วงอุณหภูมิ ไม่แยกชั้นอันทำให้การเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลวเป็นไปอย่างสมบูรณ์ การดูดและการคายพลังงานจากสารมีประสิทธิภาพที่ดี มีความคงตัวของสมบัติเคมี เป็นมิตรไม่กัดกร่อนต่อวัสดุโครงสร้างหลายชนิด ปลอดภัยไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่ข้อเสียคือมีค่าการนำความร้อนต่ำเมื่ออยู่ในสถานะของแข็งทำให้ต้องการอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงในช่วงการทำให้กลับเป็นของแข็ง และปริมาณความจุการเก็บรักษาในรูปความร้อนแฝงต่ำตรงกันข้ามกับสารอนินทรีย์ ข้อดีประการอื่นของสารอนินทรีย์คือ ราคาต่ำ จุดหลอมเหลวแคบ และไม่ติดไฟ แต่ข้อเสียสำคัญคือเกิดสภาวะซูเปอร์คูลิ่งทำให้มีการแยกชั้นของสารในสถานะของแข็งและของเหลวส่งผลกระทบต่อวงจรการเปลี่ยนสถานะและลดประสิทธิภาพในการรับและคายความร้อน

Mehling และ Cabeza (2008) แสดงข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับสมบัติทางเทคนิคของสารเปลี่ยนสถานะ ได้แก่ ความคงตัวของสมบัติของสารเพื่อการใช้งานได้ระยะเวลายาวนาน สำหรับบางกรณีที่สารได้รับอุณหภูมิสูงเกินไป หรือการแผ่รังสี เป็นต้น และการเลือกชนิดของวัสดุที่ใช้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะควรมีความเหมาะสมกัน เพื่อไม่เกิดปัญหาการรั่วไหลของสาร

ที่อาจเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหาคาร์บอนไดออกไซด์ และความปลอดภัย เมื่อมีการใช้งานในระยะยาว นอกจากนี้ยังได้รวบรวมรายละเอียดทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทางเทอร์โมไดนามิกส์ การถ่ายเทความร้อน รวมถึงการออกแบบระบบการกักเก็บความเย็นและความร้อนด้วยการใช้สารเปลี่ยนสถานะในการทำงานร่วม

Peippo และคณะ (1991) พิจารณานำสารเปลี่ยนสถานะใส่ลงไปในพื้นที่พลาสติกเพื่อใช้เป็นส่วนเก็บรักษาความร้อนในบ้านที่มีการไหลเวียนอากาศแบบไม่อาศัยงานกลขนาดพื้นที่  $120 \text{ m}^2$  ที่ไปด้วยฉนวนชั้นดี และมีพื้นที่กระจกกว้างในทิศใต้ของเมืองเมดิสัน รัฐวิสคอนซิน ประเทศสหรัฐอเมริกา ผลการศึกษาพบว่าบ้านหลังดังกล่าวสามารถประหยัดพลังงานได้มากถึง  $3 \text{ GJ}$  ต่อปี หรือ  $15\%$  ของค่าใช้จ่ายพลังงานรายปี โดยสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาความร้อนและทำงานเป็นวัฏจักรต่อวันได้คือสารที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิห้องเฉลี่ย  $1-3 \text{ }^\circ\text{C}$

Neeper (2000) ได้วิเคราะห์ทางพลศาสตร์ความร้อนการถ่ายโอนพลังงานของผนังแผ่นฉนวนที่มีสารเปลี่ยนสถานะประเภทกรดไขมันและซีฟิ่งพาราฟินฝังตัวอยู่ ด้วยวัตถุประสงค์การทำงานเป็นวัฏจักรของวันตามการแปรผันของอุณหภูมิห้องไม่ขึ้นอยู่กับการส่องแสงของดวงอาทิตย์ มีการผสมสารด้วยการปรับสัดส่วนสารเพื่อให้ได้อุณหภูมิการหลอมเหลวตามที่ต้องการ พบว่าสารเปลี่ยนสถานะที่ได้นี้มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับชนิดที่บรรจุในแคปซูล (encapsulated PCM) และใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของสภาวะความสบายในห้อง อย่างไรก็ตามความสามารถในการเก็บพลังงานความร้อนจะมีค่าลดลงเมื่อสารเปลี่ยนสถานะเกิดการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิเกินกว่าช่วงที่คาดการณ์ไว้

Feldman และ Banu (1991) ทดสอบแผ่นผนังฉนวนที่ผลิตขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยผสมบิวทิลสเตียเรต (Butyl stearate) ประมาณ  $21 - 22 \%$  ลงไประหว่างขั้นตอนการผสม

ส่วนประกอบของแผ่นผนังยิปซัมตามปกติ และสารกระตุ้นเชื้อจาก เบื้องต้นพบว่าสมบัติทางกายภาพและทางกลของแผ่นผนังยิปซัมสำหรับกักเก็บพลังงานความร้อนนี้มีค่าที่ดีเทียบเคียงกับแผ่นยิปซัมมาตรฐาน หากทว่ามีความจุในการเก็บและปลดปล่อยพลังงานความร้อนได้มากกว่าถึงสิบเท่า

Ismail และ Henriquez (2001) เสนอแนวความคิดใหม่ในการนำสารเปลี่ยนสถานะมาไหลเวียนระหว่างกลางแทนที่อากาศที่มีการบรรจุอยู่ระหว่างแผ่นกระจกในหน้าต่างกระจกสองชั้นทั่วไป หลักการคือ นำสารเปลี่ยนสถานะที่เป็นของเหลวผ่านปั๊มเพื่อป้อนเข้าไประหว่างชั้นกระจกที่รอบด้านปิดยกเว้นขอบบนให้อากาศไหลผ่านได้ จากนั้นรอให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากสารสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจนทำให้สารเปลี่ยนเป็นของแข็งเพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ป้องกันอุณหภูมิภายในลดลง ในทางอุดมคติของการออกแบบระบบนี้คือต้องมั่นใจว่าเพิ่มสูงขึ้นก่อนที่การเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งของสารจะสมบูรณ์ อาจถือได้ว่าเป็นงานวิจัยลำดับแรกแรกของการพัฒนานำสารเปลี่ยนสถานะมาใช้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ในระบบหน้าต่างกระจก ในงานวิจัยดังกล่าวได้มีการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนแสงอาทิตย์ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ร่วมกับผลการทดสอบค่าการส่งผ่าน การดูดแสง และการสะท้อนของกระจกแผ่นเดี่ยว กระจกสองชั้นมีอากาศคั่นกลางและแบบมีสารเปลี่ยนสถานะคั่นกลาง หากทว่าไม่ได้กล่าวถึงชนิดของสารที่ใช้ในการศึกษา ผลการคำนวณพบว่ามีประสิทธิภาพดี นอกจากนั้นนักวิจัยกลุ่มนี้ยังได้นำเสนอผลการคำนวณและทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ทางแสงในงานวิจัยชิ้นอื่นที่เกี่ยวข้องกัน (Ismail และ Henriquez, 1997; Ismail และคณะ, 2008)

Khudhair และ Farid (2003) รายงานผลการรวบรวมเอกสารงานวิจัยทางด้านการศึกษาประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะเพื่อเก็บรักษาความร้อนในอาคารสำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศ

หนาว โดยการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะระหว่างผิวทั้งสองด้านของผนัง ฝ้าเพดาน หรือพื้นห้อง เพื่อกักความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง เพิ่มภาวะความสบายให้กับผู้อาศัย ลดการแปรผันของอุณหภูมิห้อง สารเปลี่ยนสถานะประเภท salt hydrate และสารอินทรีย์ได้รับการพิจารณาว่ามีความเหมาะสมต่อการใช้งานในอาคาร เนื่องจากไม่เป็นพิษและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนสภาพระหว่างสถานะของแข็งและของเหลว อย่างไรก็ตามการใช้  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  พบว่ามีปัญหาในการคืนรูปและจำเป็นต้องผสมกับสารตัวอื่นเพื่อให้มีสภาพเป็นเจลจึงจะสามารถใช้ในทางปฏิบัติจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเติมสารอื่นเข้าไปอาจมีผลกระทบต่อพลังงานการเก็บสะสม รวมถึงสมบัติอื่นได้แก่อุณหภูมิการหลอมเหลว เป็นต้น

Weinlaeder และคณะ (2011) ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลผลการใช้งานแผ่นบานเกล็ดหน้าต่างบรรจุสารเปลี่ยนสถานะสำหรับป้องกันแสงอาทิตย์เข้าสู่ภายในอาคารตั้งแต่ฤดูหนาวปี 2008 ถึงฤดูร้อน 2010 โดยมีส่วนช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดในสำนักงานลงได้ถึง 2 K เมื่อเปรียบเทียบกับห้องสำนักงานที่มีการติดตั้งบานเกล็ดหน้าต่างแบบเดิม จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (solar heat gain coefficient) มีค่าลดลงเช่นกันสำหรับระบบที่มีการเก็บสะสมความร้อนในรูปแบบความร้อนแฝง พบว่าระบบป้องกันแสงอาทิตย์เมื่อบานเกล็ดปิดสนิทมีค่า 0.25 และเมื่อเปิดทำมุม  $45^\circ$  มีค่า 0.3 ขณะที่ระบบไม่มีสารเปลี่ยนสถานะมีค่า 0.35 และ 0.41 ตามลำดับ

จากผลการสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น การลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจกสามารถดำเนินการได้หลากหลายวิธีด้วยการเลือกชนิดของกระจก การใช้กระจกสองชั้น หรือสามชั้น การเปลี่ยนแก๊สที่บรรจุระหว่างกระจก ต่างมีข้อได้เปรียบ ข้อเสียเปรียบ แนวทางใหม่ถูกนำเสนอโดยนำสารเปลี่ยนสถานะที่สามารถกักเก็บความร้อนในรูปแบบความร้อนแฝงที่มีค่ามากกว่าความร้อนสัมผัสหลายเท่ามาใช้งานร่วมกับหน้าต่างกระจกสองชั้น

เพื่อลดความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่าง ทางทฤษฎีพบว่าจะได้ผลดีกว่าหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มี  
อากาศเป็นฉนวนบรรจุระหว่างแผ่นกระจกดังเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั่วไป หากทว่ายังขาด  
ผลการทดสอบยืนยันการทำงานที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีและที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมโดยการทดสอบภายในห้องทดสอบที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การทดสอบภายในห้องทดสอบมีข้อดีคือสามารถกำหนดพื้นที่รับแสงให้อยู่เฉพาะบริเวณด้านหน้าของหน้าต่างกระจกทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อนเมื่อรังสีอาทิตย์ไปกระทบส่วน หลังคา และผนังโดยรอบได้ ทำให้ผลการทดสอบมีความเชื่อถือได้ว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของห้องทดสอบเกิดจากแสงส่องผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในห้องเท่านั้น ในงานนี้ได้มีการออกแบบระบบทดสอบที่ประกอบไปด้วยระบบแสงจำลอง ห้องจำลองที่มีการติดตั้งหน้าต่างกระจกสองชั้น การติดตั้งเครื่องมือวัดต่อกับเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ อีกทั้งมีการแปรผันค่าความเข้มแสงเพื่อพิจารณาผลของความเข้มแสงที่มีต่อปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก การแปรผันค่าความเข้มแสงอ้างอิงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยของจังหวัดพิษณุโลกในช่วงเวลา 10:00 – 15:00 นาฬิกา มีค่าเฉลี่ยรายเดือนระหว่าง 590 – 755  $W/m^2$  (Handbook of Solar Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications, 2005) นอกจากนี้ได้เลือกชนิดหน้าต่างกระจกใสชนิดที่มีอากาศและชนิดที่มีแก๊สอาร์กอนบรรจุระหว่างแผ่นกระจก ตามที่มีการใช้งานและมีวงจำหน่ายทั่วไป ทั้งนี้เพื่อศึกษาความสามารถในการป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารเปรียบเทียบกับหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วม โดยมีรายละเอียดอุปกรณ์ และขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

### 3.1 รายละเอียดระบบทดสอบและอุปกรณ์การทดลอง

1. ห้องจำลองขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 2.5 เมตร ผนังโดยรอบบุด้วยฉนวนใยหินหนา 0.05 เมตร ได้รับการออกแบบ และสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ณ อาคารภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

2. ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นขนาดกว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.4 เมตร ความหนาไม่รวมส่วนกรอบ 0.024 m กระจกโพลีไธนาแผ่นละ 0.006 m ช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกขนาด 0.012 m ถูกติดตั้งไว้กึ่งกลางผนังด้านหนึ่งของห้องทดสอบ ดังรูปที่ 3.1

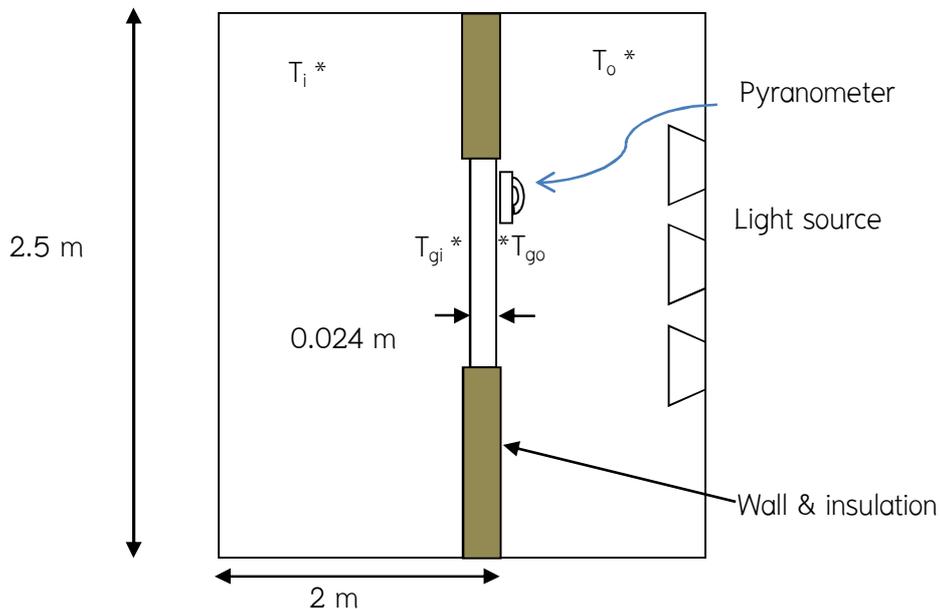
3. ระบบแสงจำลองจากหลอดไฟฮาโลเจนถูกออกแบบและทดสอบโดยกำหนดค่าความเข้มแสงเฉลี่ยให้มีค่าใกล้เคียงกับความเข้มรังสีอาทิตย์จังหวัดพิษณุโลก ระยะห่างของหลอดไฟกำหนดจากการที่แสงกระจายบนพื้นที่ขนาดเท่าหน้าต่างทดสอบอย่างสม่ำเสมอรับได้เมื่อการแปรผันของแสงบนพื้นที่นั้นไม่เกิน 5% ระบบนี้ประกอบไปด้วยหลอดไฟฮาโลเจนขนาด 500 W โคมและหลอดยี่ห้อ Philip จำนวน 25 ชุด ขนาดโครงยึดทำจากเหล็กบารระบบถูกออกแบบและติดตั้งโดยคำนึงถึงความปลอดภัยด้วยการใช้ไฟ 3 เฟสและได้รับการเดินสายไฟจากตู้ควบคุมวงจรไฟฟ้าจากช่างเทคนิคผู้ชำนาญ โครงสร้างและแผงควบคุมการเปิดและปิดไฟได้ดำเนินการโดยช่างไฟฟ้าเฉพาะทางดังแผนภาพโครงสร้างในรูปที่ 3.2 การใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเข้มแสงได้ด้วยแผงควบคุมการเปิด-ปิดร่วมกับการปรับระยะทาง

4. สารเปลี่ยนสถานะประเภทสารอินทรีย์ ชนิดพาราฟิน จากบริษัท Rubitherm RT42 และ RT 50 ดังรูปที่ 3.3 และประเภทสารอนินทรีย์  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  โดยมีสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะแสดงดังตารางที่ 3.1

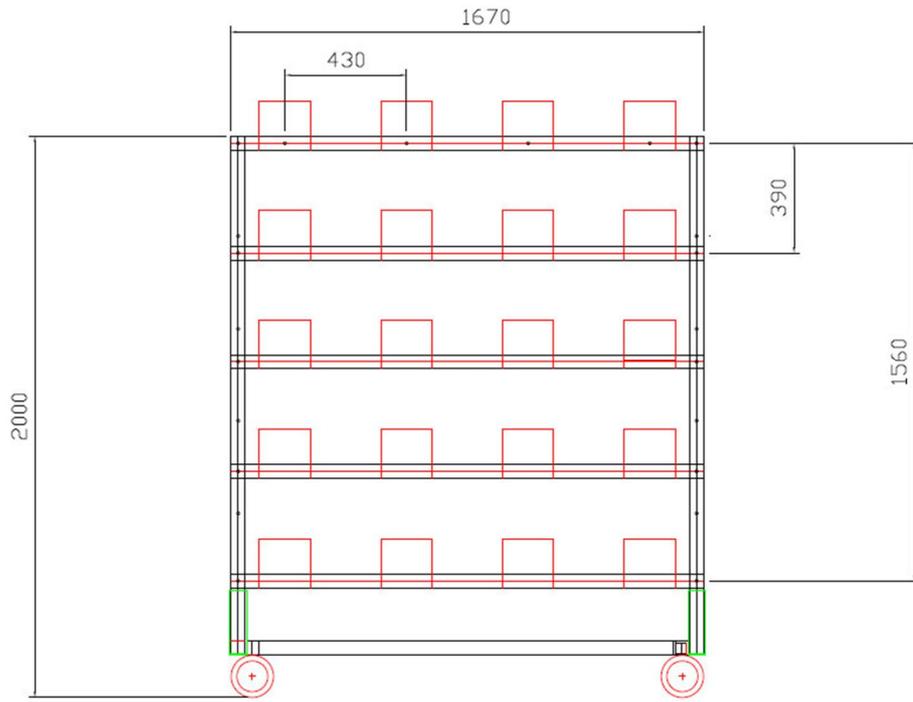
5. เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ YOKOGAWA รุ่น DX220-3-2 ดังรูปที่ 3.4

6. เครื่องวัดความเข้มแสง Pyranometer ดังรูปที่ 3.5

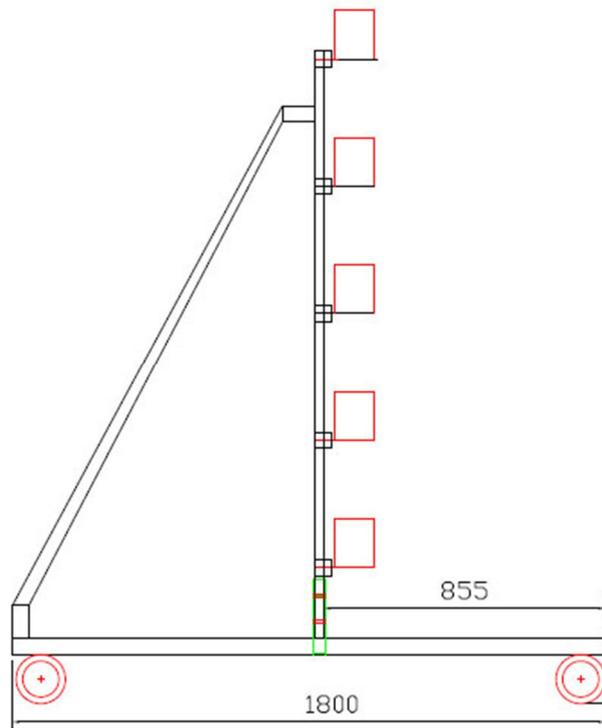
7. หัววัดอุณหภูมิและสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7
8. เครื่องชั่งน้ำหนักค่าความละเอียด 0.01 ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 3\%$
9. เครื่องวัดฟลักซ์ความร้อนยี่ห้อ Hukseflux ค่าความถูกต้อง  $\pm 3\%$  ช่วงของการวัด 2000– (-2000)  $W/m^2$
10. ฉนวนกันความร้อนใยหินยี่ห้อ Bradford ประเภท FIBERTEX 350 ความหนาแน่น 60  $kg/m^3$  ค่านำความร้อนระหว่าง 0.04 – 0.05  $W/m.K$  ที่อุณหภูมิการทำงานระหว่าง 50–100 °C
11. ฉนวนกันความร้อนผ้าและแผ่นสะท้อนความร้อน
12. ปั๊มขนาดกำลัง 120 W
13. เครื่องแก้วสำหรับบรรจุสารขนาดต่าง ๆ
14. ปิกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร ช้อนตักสาร ถุงมือ หน้ากาก และแว่นตาป้องกันสาร



รูปที่ 3.1 แผนภาพภาคตัดขวางระบบทดสอบ ตำแหน่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ และความเข้มแสง



ก. ด้านหน้า



ข. ด้านข้าง

รูปที่ 3.2 แผนภาพโครงสร้างระบบแสงจำลอง ก ด้านหน้า ข ด้านข้าง



รูปที่ 3.3 สารเปลี่ยนสถานะ ภาพซ้าย RT42 ขณะจัดเตรียมเพื่อใช้ในการทดสอบ ภาพขวา

ภาพขยายเห็นลักษณะเป็นผลึกของเนื้อสาร



รูปที่ 3.4 เครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ YOKOGAWA รุ่น DX220-3-2



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความเข้มแสง Pyranometer



รูปที่ 3.6 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K



รูปที่ 3.7 หน้าต่างกระจกสองชั้นมีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วม ถ่ายภาพจากด้านในห้อง

ทดสอบเมื่อสารเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวใสขณะได้รับความร้อน

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารเปลี่ยนสถานะ

ชนิด สมบัติ	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	RT 42 <sup>*</sup>	RT 50 <sup>*</sup>	Paraffin wax
คุณลักษณะ/สี (ของแข็ง) (ของเหลว)	ผงเป็นก้อน/ขาว ใส มีตะกอนขาว	เหลว ใส	ก้อน/ขาวขุ่น ใส	ก้อน/ขาวขุ่น ใส	ก้อน/ขาวขุ่น ใส
ความหนาแน่น (ของแข็ง) (ของเหลว)	( $\text{kg/m}^3$ ) 1485 -	( $\text{kg/m}^3$ ) 1710 1562	( $\text{kg/l}$ ) 0.76 0.88	( $\text{kg/l}$ ) 0.76 0.88	( $\text{kg/m}^3$ ) 818 <sup>+</sup> 760 <sup>+</sup>
อุณหภูมิหลอมเหลว	32 °C	29 °C	41 °C	49 °C	43–56 °C <sup>+</sup>
เอนทาลปีของการ หลอมเหลว (kJ/kg)	254	171	174	168	266 <sup>+</sup>
ค่านำความร้อน (W/m.K) (ของเหลว)	0.554	0.54	0.2	0.2	0.24 <sup>+</sup>
สภาวะกัดกร่อน	โลหะ	โลหะ	เฉื่อยต่อการ ทำปฏิกิริยา	เฉื่อยต่อการ ทำปฏิกิริยา	เฉื่อยต่อการ ทำปฏิกิริยา

\* อ้างอิงจาก [www.rubitherm.de/english/index.htm](http://www.rubitherm.de/english/index.htm)

<sup>+</sup> อ้างอิงจาก Totten G.E., Westbrook S.R., Shah R.J., Fuels and lubricants handbook:

technology, properties, performance and testing, 2003, p. 535 (available online at

[http://books.google.co.uk/books?id=J\\_AkNu-Y1wQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f](http://books.google.co.uk/books?id=J_AkNu-Y1wQC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f)

[≡false](#)

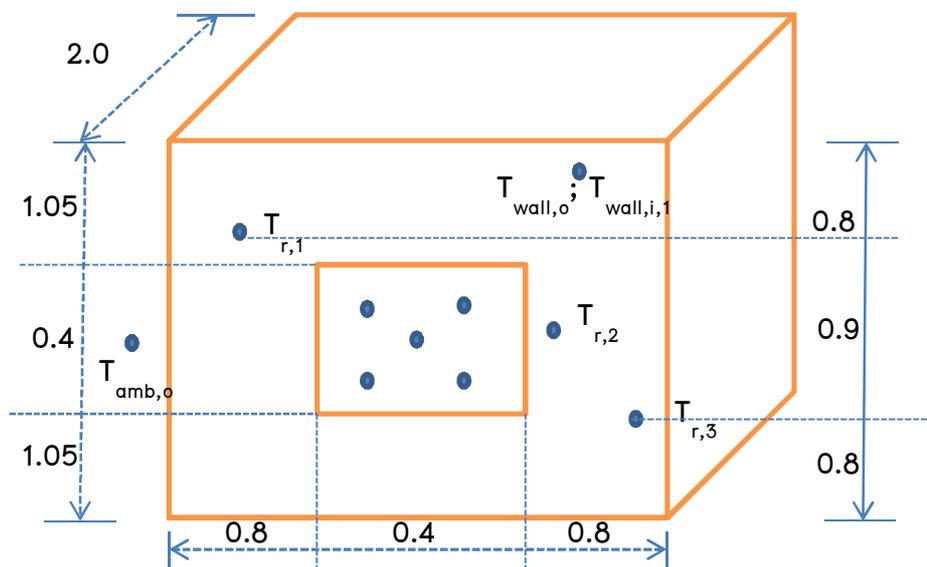
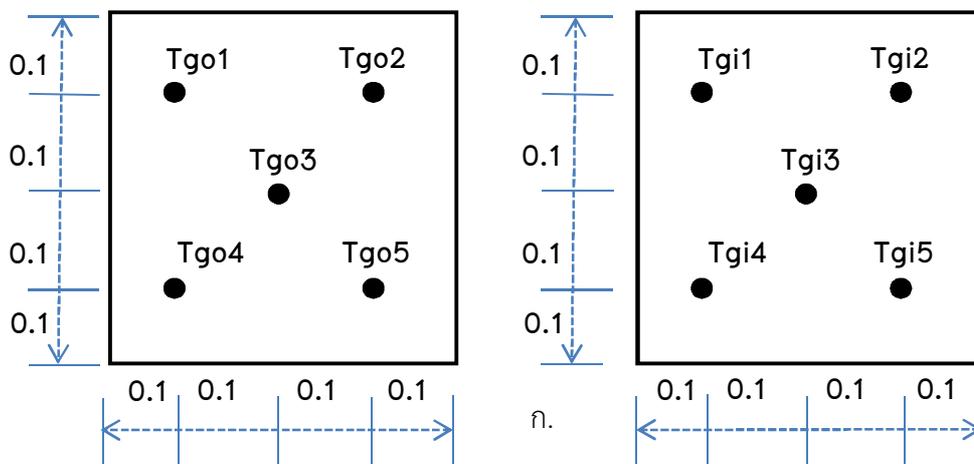
### 3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติดตั้งเครื่องมือวัดความเข้มแสงที่ด้านนอก ทำการทดสอบหาค่าความเข้มแสงที่ต้องการบนพื้นที่ขนาดเท่าหน้าต่างกระจก และใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบแสงจำลอง เมื่อสำเร็จแล้วสามารถใช้ในการทดสอบได้โดยเพียงควบคุมระยะห่างระหว่างระบบแสงจำลอง และห้องทดสอบ ร่วมกับการเปิดและปิดแสงจากแผงวงจร เพื่อให้ได้ความเข้มที่ต้องการ
2. ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 20 จุด ที่ผิวกระจกหน้าต่าง ภายใน ภายนอกห้องทดสอบ ผนังภายใน ผนังภายนอก อากาศภายใน และภายนอกห้องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และต่อเข้ายังเครื่องเก็บบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ
3. เปิดไฟให้แสงส่องผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีอากาศบรรจุภายในช่องว่าง ณ ความเข้มแสง  $572 \text{ W/m}^2$  ทำการวัดและเก็บบันทึกผลอุณหภูมิทุกหนึ่งนาทิต เป็นระยะเวลาสาม ชั่วโมง
4. ปิดไฟและรอให้ห้องทดสอบมีอุณหภูมิลบคืนสู่สภาวะปกติ
5. ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3. ลงมา โดยเปลี่ยนความเข้มแสงเป็น  $663 \text{ W/m}^2$  และ  $756 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ
6. เปลี่ยนหน้าต่างกระจกสองชั้นเป็นแบบที่มีแก๊สอาร์กอนบรรจุภายในช่องว่างแล้วทำตามขั้นที่ 3 ถึง 5.
7. ทำการเจาะช่องที่ด้านบนและด้านล่างของกรอบหน้าต่างกระจกบริเวณกึ่งกลางระหว่างแผ่นกระจกทั้งสองของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นชนิดที่มีอากาศบรรจุภายใน จากนั้นต่อท่อทองแดงและสายยางลงไปเพื่อใช้เป็นช่องเติมสารเปลี่ยนสถานะ ติดตั้งวาล์วเปิดปิดที่ท่อด้านล่างเพื่อใช้เป็นท่อระบายสารออกจากระบบหน้าต่างสองชั้นที่มีการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ

8. จัดเตรียมสารเปลี่ยนสถานะให้อยู่ในสถานะของเหลวเพื่อบรรจุลงในช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกทั้งสองของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น หลังจากนั้นรอเวลาให้สารเปลี่ยนสถานะเปลี่ยนเป็นของแข็งทั้งหมดจึงเริ่มทดสอบ

9. ทำการทดสอบตั้งแต่ข้อ 3. ลงมา สิ้นสุดการทดสอบเมื่อสารเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวทั้งหมด

10. นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้น



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ก ผิวด้านนอกและด้านใน ข ภายนอกและภายในห้อง

แสดงระยะในหน่วยเมตร

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ และอภิปรายผล

บทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบที่ไม่มีและมีการเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วย ภายใต้แสงจำลองที่มีการแปรผันค่าความเข้มแสง พฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนจากแสงผ่านระบบหน้าต่างสองชั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวกระจกและภายในห้องทดสอบ และแสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น

#### 4.1 ผลการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

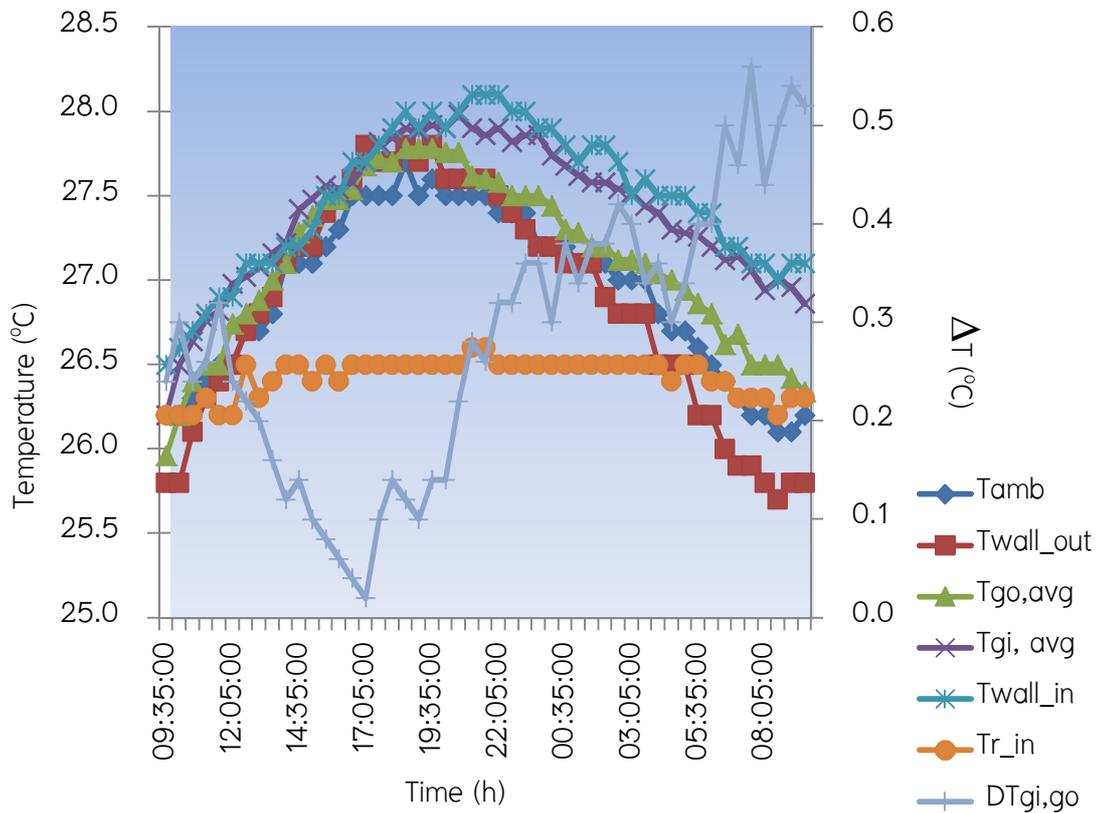
ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ใช้ในการทดสอบมีสองแบบ คือ

แบบที่ 1 กระจกสองชั้นประกอบด้วย กระจกใสหนา 6 mm. ช่องว่างระหว่างกระจกบรรจุอากาศ (Air) หนา 12 mm. และกระจกใสหนา 6 mm

แบบที่ 2 กระจกสองชั้นประกอบด้วย กระจกใสหนา 6 mm. ช่องว่างระหว่างกระจกบรรจุแก๊สอาร์กอน (Ar) หนา 12 mm. และกระจกใสหนา 6 mm.

ทำการวัดอุณหภูมิห้องทดสอบที่ติดตั้งระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบที่ 1 ในเบื้องต้นเพื่อตรวจสอบว่าห้องทดสอบที่สร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการจะไม่ได้รับผลกระทบการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกอาคาร การทดสอบนี้ทำขณะที่ห้องทดสอบไม่ได้รับความร้อนจากระบบแสงจำลองในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่าขณะที่ห้องปฏิบัติการอาจได้รับผลกระทบจากสภาวะอากาศภายนอกอาคารทำให้มีอุณหภูมิห้องสูงขึ้นต่อเนื่องจนถึงช่วงบ่ายเนื่องจากความร้อนสะสมที่ผนังอาคาร แต่ทว่าอุณหภูมิภายในห้องทดสอบมีค่าค่อนข้างคงที่แสดงให้เห็นว่าการบุฉนวนผนังห้องทดสอบสามารถป้องกันผลกระทบจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการหรือภายนอกห้องทดสอบได้เป็นอย่างดี จากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศแวดล้อมหรืออุณหภูมิของห้องปฏิบัติการกับอุณหภูมิภายในห้องทดสอบ สามารถสังเกตพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้น เมื่ออุณหภูมิห้องปฏิบัติการเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 9:35 ถึงค่าสูงสุดเวลา 18:35 อุณหภูมิผิวกระจกแผ่นนอกด้านนอกห้องทดสอบ และแผ่นในด้านในในห้องทดสอบต่างแปรผันตามไป

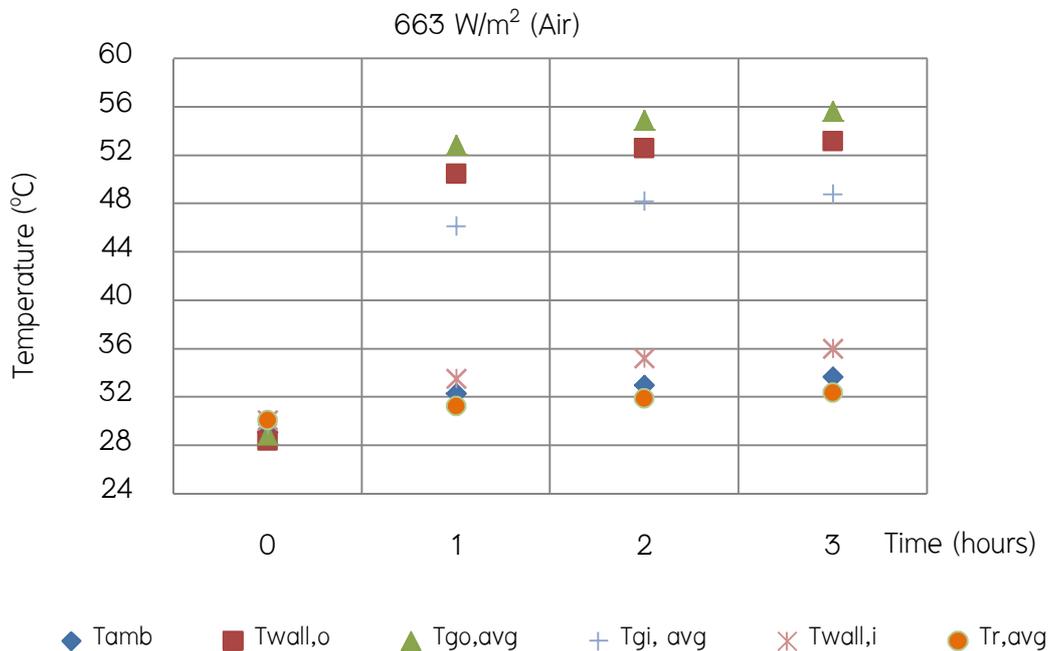
ด้วย แต่อุณหภูมิผิวกระจกแผ่นในเพิ่มถึงค่าสูงสุดล่าช้ากว่าประมาณ 2 ชั่วโมง ทั้งนี้เพราะการส่งถ่ายความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่มีฉนวนอากาศกั้นกลางนั้นทำให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่กระจกแผ่นในล่าช้าลง (time lag) จากการถ่ายเทผ่านชั้นอากาศที่มีค่าการนำความร้อนต่ำดังแสดงในรูปที่ 4.1



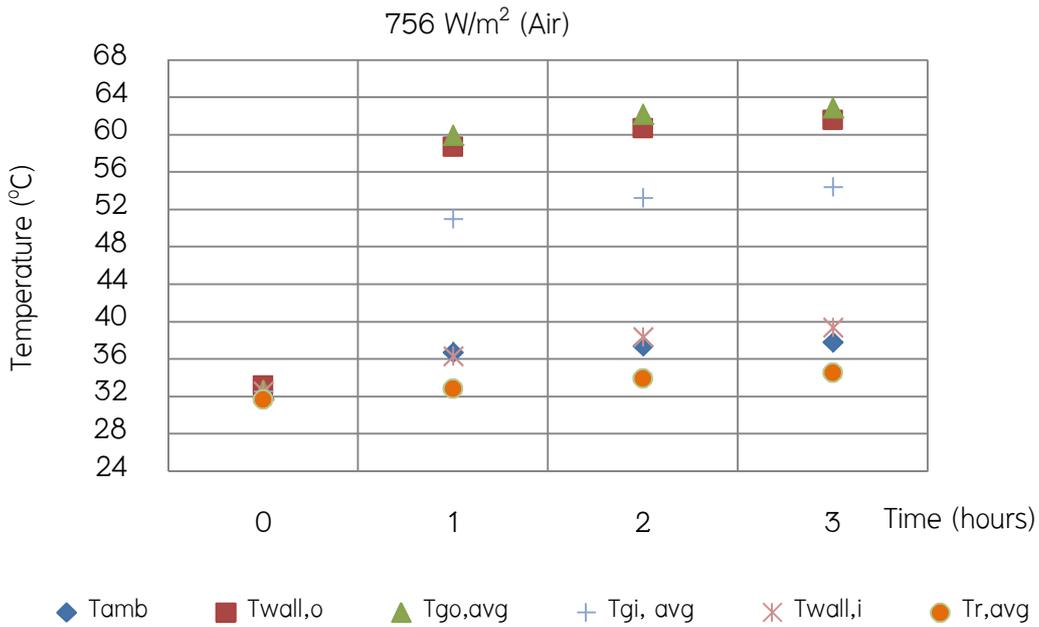
รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบห้องทดสอบเมื่อไม่มีแสงตกกระทบหน้าต่างกระจกสองชั้น ภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบที่มีอากาศคั่นระหว่างแผ่นกระจกด้วยการให้ความร้อนจากแสงจำลองที่กำหนดให้แนวแสงตกกระทบตั้งฉากกับพื้นที่กระจกหน้าต่างเพื่อจำลองการได้รับแสงอาทิตย์ตกกระทบแนวตั้งฉากที่ให้ค่าความเข้มรังสีบนพื้นที่สูงกว่าแนวอื่นและส่งผลเนื่องถึงค่าความร้อนที่มากตามไปด้วย ผลการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกเข้ามาภายในห้องทดสอบ ณ ความเข้มรังสี  $663 \text{ W/m}^2$  และ  $756 \text{ W/m}^2$  พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านนอกและด้านในมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาชั่วโมงแรกที่ได้รับความร้อน

จากแสงจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 อุณหภูมิผิวกระจกด้านนอกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นน้อยมาก ในช่วงเวลาที่สองและสามขณะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวกระจกด้านนอกและด้านในอยู่ที่ไม่เกิน  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีค่าค่อนข้างคงที่หลังช่วงเวลาที่ผ่านไป สังเกตได้ว่าอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในมีความแตกต่างกันมากอันเนื่องมาจนถึงความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในห้องทดสอบนั้นมาจากความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นเป็นหลัก ที่ความเข้มแสงมากปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นมีค่ามากตามไปด้วย พิจารณาอุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านนอกเมื่อทดสอบที่ความเข้มแสง  $663\text{ W/m}^2$  มีค่าสูงสุดประมาณ  $56\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ขณะที่ ณ ความเข้มแสง  $756\text{ W/m}^2$  ผิวกระจกด้านนอกมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ  $63\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 นอกจากนั้นแล้วส่งผลถึงอุณหภูมิภายในห้องทดสอบที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิภายในห้องที่ทดสอบ ณ ความเข้มแสงทั้งสองมีค่าสูงสุดที่ประมาณ  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

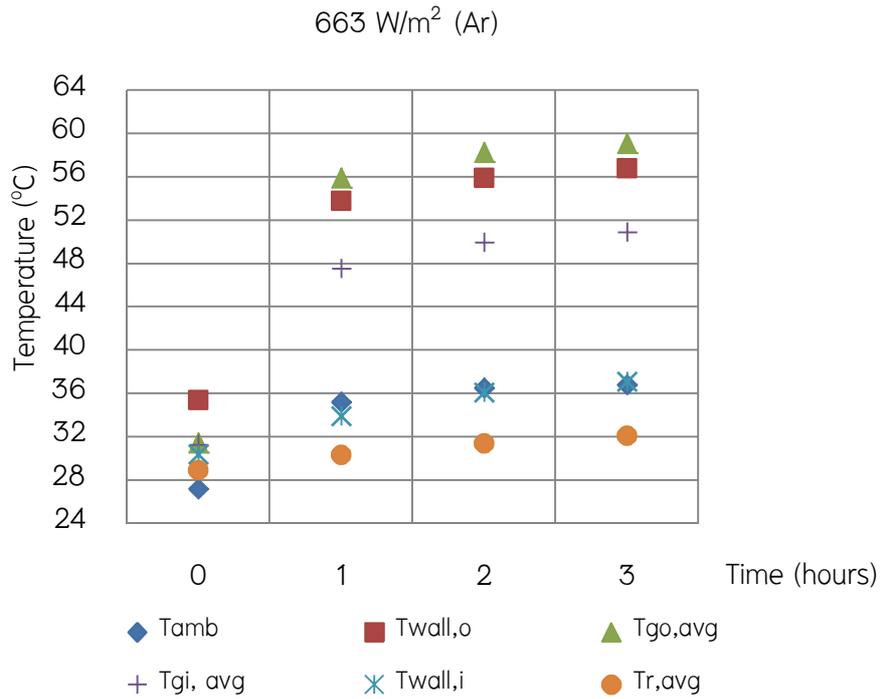


รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีอากาศเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง  $663\text{ W/m}^2$



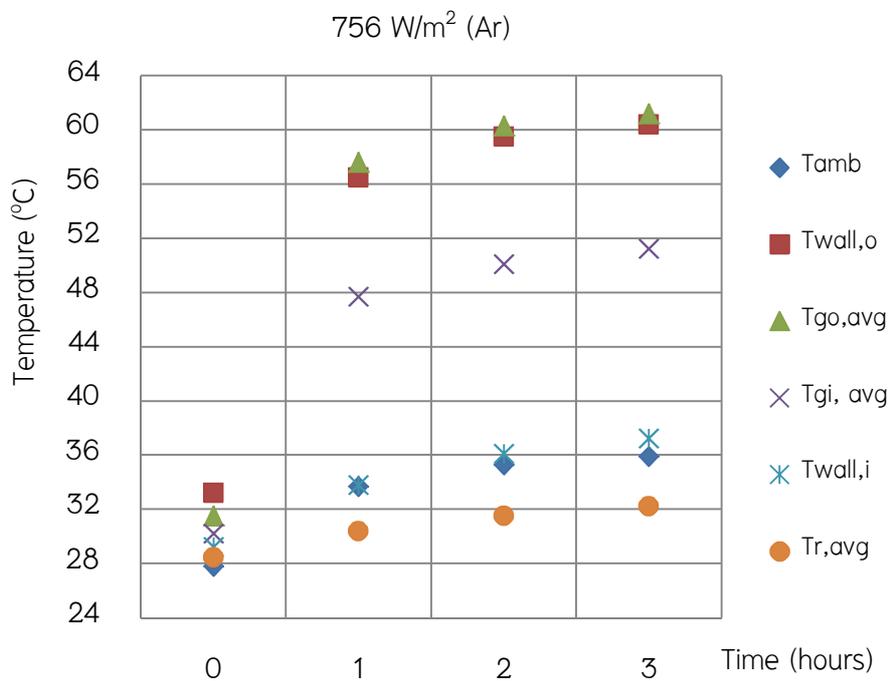
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีอากาศเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง 756 W/m<sup>2</sup>

ผลการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบที่สองมีแก๊สอาร์กอนบรรจุในช่องระหว่างแผ่นกระจกแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาภายในห้องทดสอบ ที่ความเข้มแสง 663 W/m<sup>2</sup> และ 756 W/m<sup>2</sup> ทำนองเดียวกันกับหน้าต่างกระจกแบบที่หนึ่งคืออุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านนอกและด้านในมีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงในช่วงแรกที่ได้รับความร้อนจากแสงจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จากนั้นคงความแตกต่างของอุณหภูมิมะหว่างผิวกระจกด้านนอกและด้านในเมื่อผ่านหนึ่งชั่วโมงแรก อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิผิวกระจกด้านนอกต่ำลงหลังจากนั้น ความเข้มแสงมีผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น อุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านนอกทดสอบที่ความเข้มแสง 663 W/m<sup>2</sup> มีค่าสูงสุดประมาณ 57 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ขณะที่ ณ ความเข้มแสง 756 W/m<sup>2</sup> ผิวกระจกด้านนอกมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 63 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.4 นอกจากนั้นพบว่าสามารถกันความร้อนส่งผ่านได้ดีกว่าหน้าต่างกระจกแบบที่หนึ่งที่มีอากาศบรรจุอยู่ พิจารณาได้จากค่าอุณหภูมิของผิวกระจกภายในที่มีค่าต่ำกว่าของกรณีหน้าต่างกระจกแบบที่หนึ่งทั้งสองความเข้มแสง



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง

ชั้นแบบมีแก๊สอาร์กอนเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง 663 W/m<sup>2</sup>



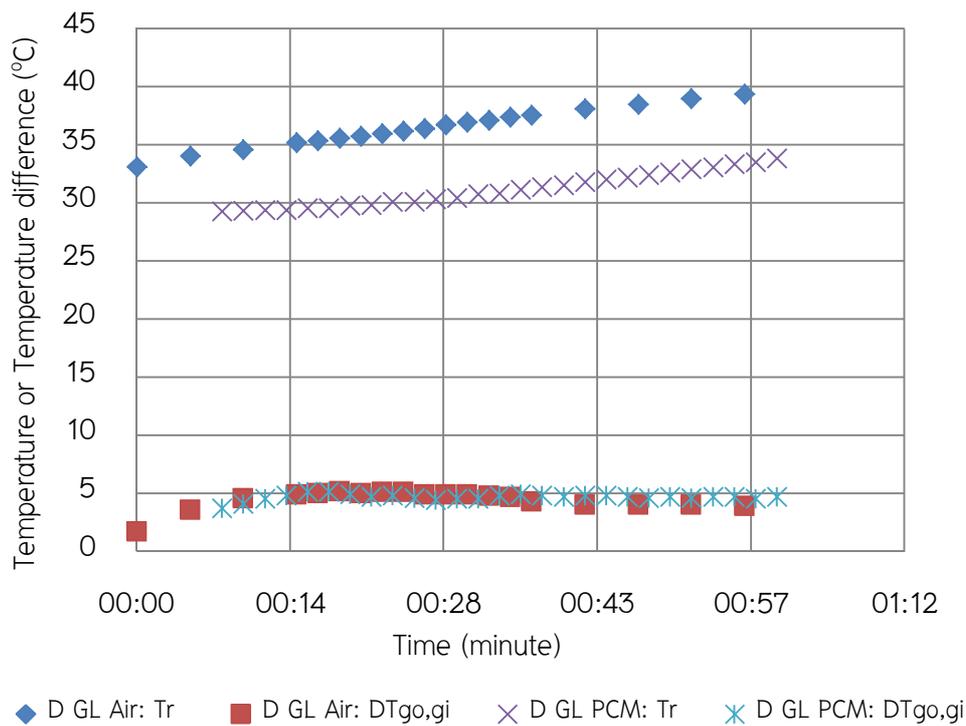
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง

ชั้นแบบมีแก๊สอาร์กอนเป็นฉนวน ณ ความเข้มแสง 756 W/m<sup>2</sup>

## 4.2 ผลการทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วย

สารเปลี่ยนสถานะที่นำมาทดสอบได้แก่สารประเภท Salt hydrate และ paraffin เนื่องจากช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกับอากาศแวดล้อมขณะได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ และค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูงซึ่งจะสามารถกักเก็บความร้อนไว้ได้ดี ในการทดสอบใช้งานสารประเภทแรกคือ  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  กับกล่องทดสอบที่มีช่องหน้าต่างกระจกสองชั้นบรรจุสาร  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ระหว่างกลางทำการทดสอบที่ความเข้มแสง 750–800  $\text{W/m}^2$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่สภาวะเดียวกันของระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วยพบว่าค่าความแตกต่างอุณหภูมิของผิวกระจกแผ่นนอกและแผ่นในระหว่างสองระบบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยความแตกต่างอุณหภูมิดังกล่าวของกระจกสองชั้นแบบไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ (D GL Air:DTgo,gi) และแบบมีสารเปลี่ยนสถานะ (D GL PCM:DTgo,gi) มีค่าประมาณ  $5^\circ\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในขณะทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะนั้น พบว่ามีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะถึงแม้ค่าอุณหภูมิภายในขณะเริ่มต้นไม่เท่ากันแต่ก็แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการชะลอการส่งผ่านความร้อนจากผิวกระจกนอกไปยังภายในได้ว่าระบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วยนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า จากผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าสารประเภท salt hydrate ชนิดนี้มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำกว่าสภาวะที่จะนำไปใช้งานจริง จึงทำให้หน่วงการส่งผ่านความร้อนได้ไม่นาน อีกทั้งปัญหาสำคัญที่พบคือการแยกชั้นของสารหลังจากหลอมเหลวอันทำให้เกิดการตกตะกอนของเกลืออยู่ส่วนล่างขณะที่ของเหลวลอยอยู่เหนือขึ้นไปด้านบน ทั้งนี้เนื่องจากสารประเภทนี้มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ส่งผลให้การกลับคืนสู่สภาวะของแข็งดั้งเดิมต้องอาศัยการคนให้สารเป็นเนื้อเดียวกันแล้วกลับคืนสู่สถานะของแข็งทั้งหมด ถ้าสารคงสภาวะของเหลวขณะใช้งานจะรับหรือ

กักเก็บได้เพียงความร้อนสัมผัส อันเป็นเหตุให้สูญเสียความสามารถในการกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนแฝงซึ่งมีค่าสูงกว่ามากด้วยเหตุนี้จึงทำให้การใช้ salt hydrate เพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง ถึงแม้จะมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูงก็ตาม ด้วยเหตุผลทางเทคนิคที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



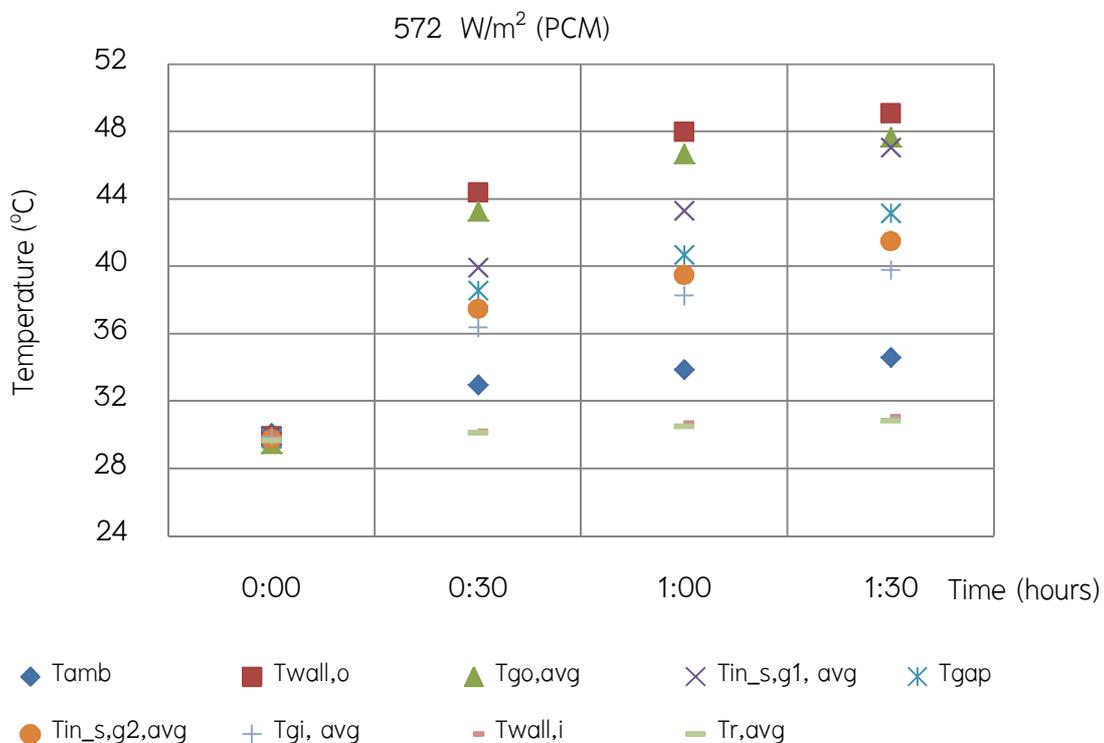
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในขณะทดสอบหน้าตาต่างๆกระจกสองชั้นแบบ

ไม่มีและแบบมีสารเปลี่ยนสถานะ  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง  $750 \text{ W/m}^2$

เนื่องด้วยข้อจำกัดทางเทคนิคการใช้งานของสารเปลี่ยนสถานะประเภท salt hydrate ได้นำมาประกอบการพิจารณาเลือกสารเปลี่ยนสถานะชนิด paraffin ที่นอกจากมีสมบัติที่เหมาะสมทั้งช่วงของอุณหภูมิหลอมเหลว และค่าเอนทาลปีของการเปลี่ยนเฟส ความเป็นเนื้อเดียวกันของสารตลอดกระบวนการเปลี่ยนสถานะ ความคงที่ของสมบัติทางกายภาพเป็นข้อ

สำคัญและประโยชน์ต่อการใช้งานจริง อีกทั้งความโปร่งแสงเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะทำให้สามารถใช้งานกับหน้าต่างกระจกโดยคงสภาวะการมองเห็นภายนอกดังเดิม

ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะชนิด paraffin ของบริษัท Rubitherm RT42 ทำงานร่วมด้วยถูกทดสอบด้วยระบบแสงจำลองที่ค่าความเข้มแสง 572 W/m<sup>2</sup> 663 W/m<sup>2</sup> และ 756 W/m<sup>2</sup> ดังมีพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 ผลการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์ในช่วงที่สารเปลี่ยนจากสถานะเดิมของแข็งเป็นของเหลวทั้งหมดที่ความเข้มแสง 756 W/m<sup>2</sup> ภายในช่วงเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที



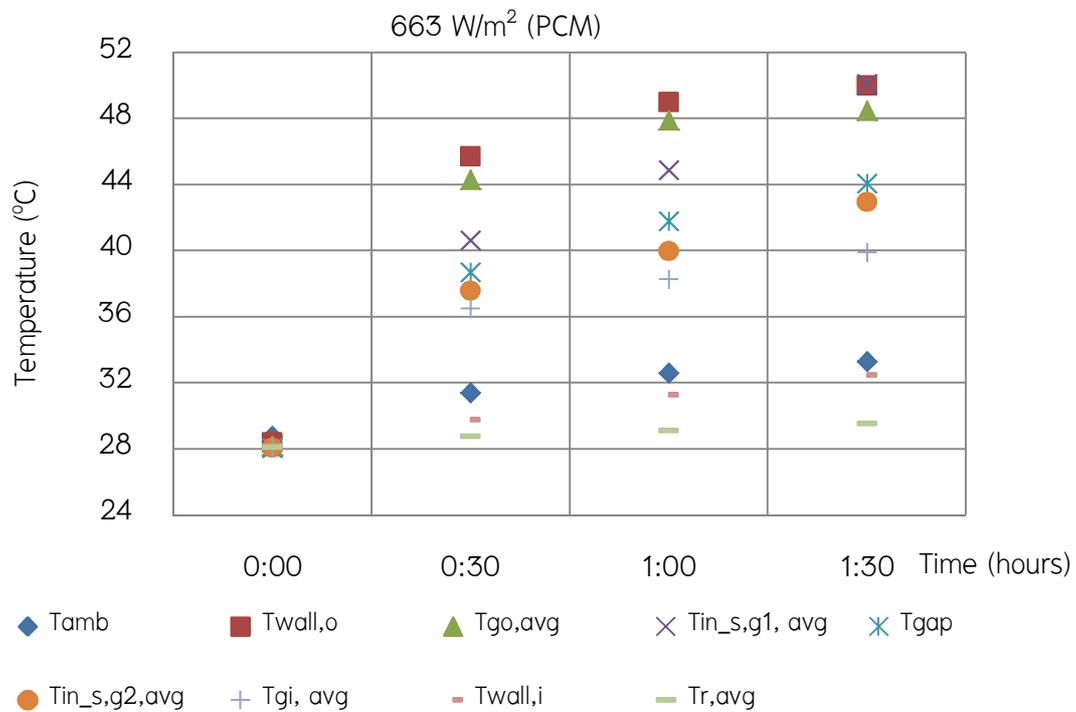
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง 572 W/m<sup>2</sup>

การถ่ายเทความร้อนเมื่อแสงจำลองตกกระทบบนกระจกหน้าต่างด้านนอกผ่านสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 และกระจกแผ่นในเข้ามายังภายในห้องสามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจากภายนอกเข้าไปภายในห้องทดสอบและอุณหภูมิในระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ผลการทดสอบภายใต้แสงจำลอง ณ ความเข้มแสง

572 W/m<sup>2</sup> แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าสารเปลี่ยนสถานะเมื่อได้รับความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงถึงจุดหลอมเหลวจึงเริ่มเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวจากบริเวณที่สัมผัสกระจกแผ่นนอกเข้าด้านในและจากขอบบนของกรอบกระจกลงมาเมื่อเวลาทดสอบผ่านไป 40 นาที อุณหภูมิภายในระหว่างแผ่นกระจก (Tgap) มีค่ามากกว่า 40 °C อุณหภูมิผิวกระจกแผ่นนอกด้านใน (Tin\_s,g1,avg) เพิ่มขึ้นตามและแสดงถึงสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูงสุดเมื่อสารเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลว ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ส่งไปยังสารถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะของกระบวนการหลอมเหลวซึ่งในรูปของความร้อนแฝง เป็นผลให้มีอุณหภูมิผิวกระจกแผ่นนอกด้านในสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวด้านนอกของกระจกแผ่นนอก (Tgo,avg) เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง 30 นาที นอกจากนั้นจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้อง (Tr,avg) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตลอดช่วงเวลาดังกล่าวเนื่องจากความสามารถในการป้องกันความร้อนของหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ อย่างไรก็ตามสารเปลี่ยนสถานะ RT42 ยังคงมีส่วนที่เป็นของแข็งอยู่ทางครึ่งล่างของหน้าต่างกระจกที่สามารถรับความร้อนได้ต่อไปอีกประมาณครึ่งชั่วโมงจึงหลอมเหลวหมด

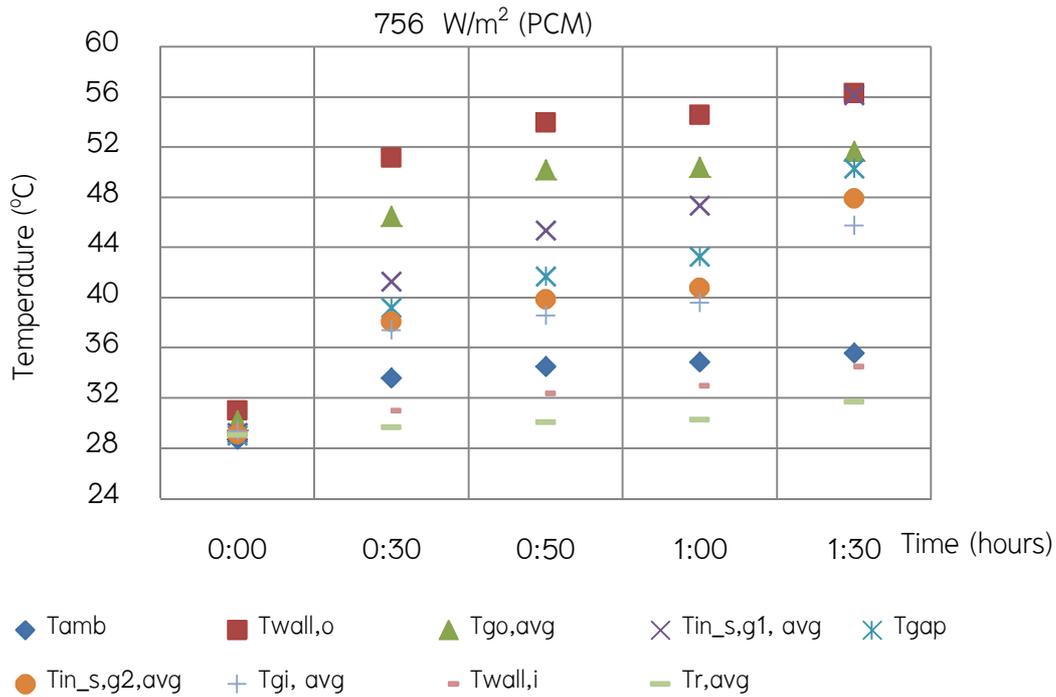
ผลการทดสอบเมื่อเปลี่ยนค่าความเข้มแสงเป็น 663 W/m<sup>2</sup> และ 756 W/m<sup>2</sup> ต่างแสดงพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในห้องทำงานองเดียวกันกับที่ค่าความเข้มแสงก่อนหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสงการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งเป็นของเหลวเกิดในระยะเวลาที่สั้นลง อีกทั้งเห็นผลการดูดซับความร้อนไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะได้ดีขึ้นโดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยผิวกระจกด้านนอก (Tgo,avg) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของผนังส่วนที่ ได้รับแสง (Twall,o) ทั้งนี้ความร้อนที่ส่งผ่านกระจกถูกกักเก็บไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะนั่นเอง อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อช่วงเวลาถึง 1 ชั่วโมง 30 นาที อุณหภูมิของผิวกระจกด้านในเริ่มมีความแตกต่างจากผิวกระจกด้านนอกลดลงกว่าช่วงเวลาก่อนหน้าอันเป็นผลเนื่องจากความสามารถในการกักเก็บความร้อนลดลงเมื่อสารเปลี่ยนสถานะอยู่ในสถานะของเหลวทั้งหมด ช่วงเวลาดังกล่าวจึงถือว่าเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมใช้งานระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ และใน

สถานะของความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวันช่วงเวลาดังกล่าวถือว่ามีความสอดคล้องต่อการใช้งานในสถานะธรรมชาติจริง



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง

ชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง 663 W/m<sup>2</sup>



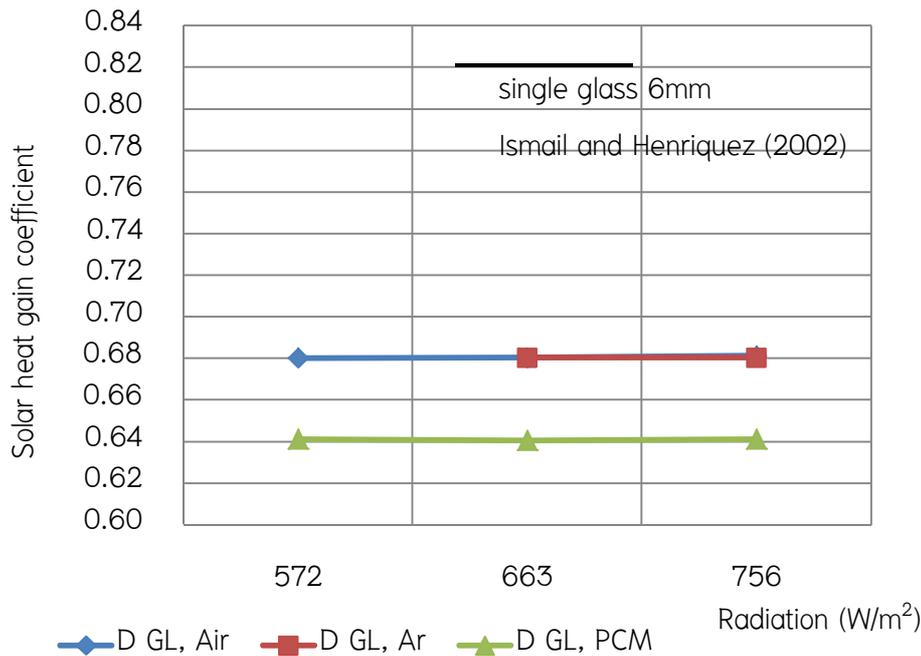
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาระหว่างทดสอบระบบหน้าต่างกระจกสอง

ชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ RT 42 ทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง 756 W/m<sup>2</sup>

#### 4.3 การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

##### เปรียบเทียบกับระบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะ

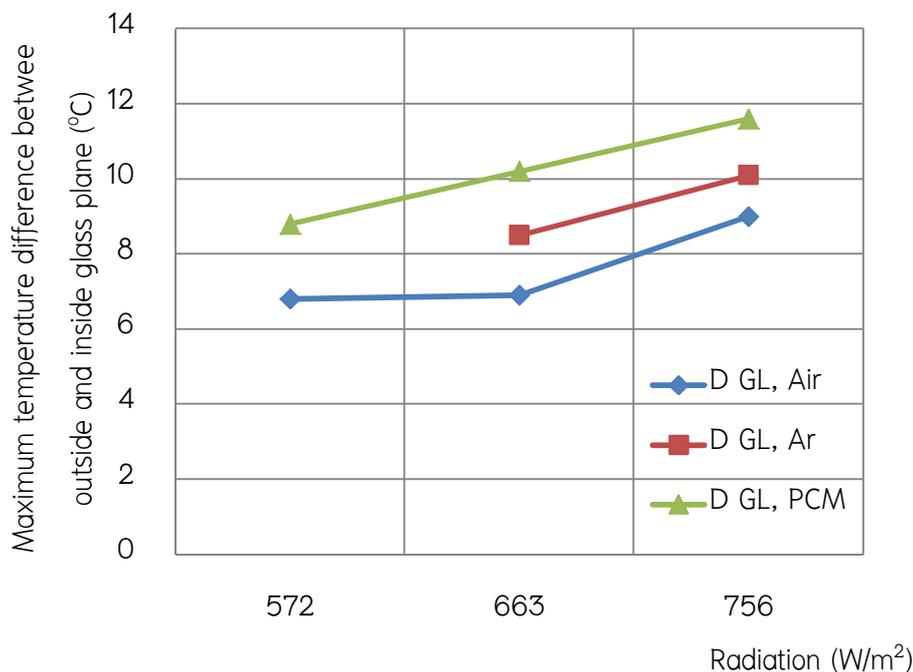
สัมประสิทธิ์ความร้อนจากแสงอาทิตย์คำนวณจากสมการ (2.29) สมบัติกระจกสองชั้นที่มีอากาศอยู่ระหว่างแผ่นกระจกหนา 6 mm อ้างอิงจาก พรพวรรณ (พ.ศ. 2546) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการส่งผ่านแสงรวมของหน้าต่างกระจกสองชั้น สำหรับระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วย อ้างอิงสมบัติทางแสงจาก Ismail และ Henriquez (1998) ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนจากแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีค่าต่ำกว่าแบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และต่ำกว่าหน้าต่างกระจกชั้นเดียวมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ระหว่างระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีอากาศ แก๊สอาร์กอน และสารเปลี่ยนสถานะพาราฟินทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง 572 W/m<sup>2</sup> 663 W/m<sup>2</sup> และ 756 W/m<sup>2</sup>

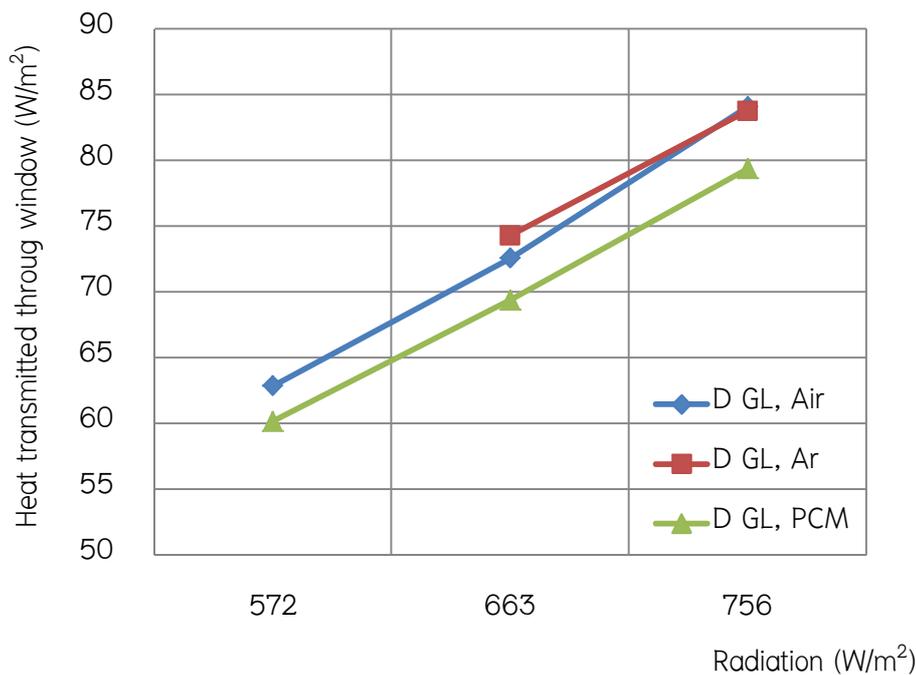
โดยค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์แสดงถึงสัดส่วนของแสงที่ส่งผ่านเข้าไปยังภายในห้องซึ่งประกอบด้วยรังสีที่ส่งผ่านโดยตรงและถูกดูดซับไว้ด้วยสภาวะแวดล้อมภายใน และรังสีที่ถูกดูดซับไว้ด้วยระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นจากนั้นถ่ายโอนความร้อนผ่านเข้าไปยังภายในห้อง ดังนั้นค่าดังกล่าวยิ่งต่ำยิ่งดีเนื่องจากแสดงถึงปริมาณการส่งผ่านของแสงที่ลดลง พบว่าระบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีความสามารถในการลดความร้อนส่งผ่านได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะประมาณ 5.8 % ที่เงื่อนไขชนิดกระจก ความหนา และขนาดช่องระหว่างแผ่นกระจกที่เท่ากัน สำหรับกระจกที่มีความหนาขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากค่าการส่งผ่านแสงลดลง ทั้งนี้กระจกหน้าต่างขนาดหนา 6 mm ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ พบมีการใช้งานทั่วไปในระบบหน้าต่างกระจกสองชั้น ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงระบบเดิมให้ทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกระจกแผ่นนอกและแผ่นในของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือ ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะ (D GL, PCM) รองลงมาคือระบบที่มีแก๊สอาร์กอน (D GL, Ar) และท้ายสุดคือระบบที่มีอากาศเป็นฉนวนคั่นกลางแผ่นกระจกทั้งสอง (D GL, Air) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวแปรผันตามความเข้มแสงโดยมีค่ามากขึ้นตามความเข้มแสง สำหรับระบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วย ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างผิวกระจกด้านนอกและด้านในมีค่าเท่ากับ  $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ความเข้มแสง  $572\text{ W/m}^2$   $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ความเข้มแสง  $663\text{ W/m}^2$  และ  $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ความเข้มแสง  $756\text{ W/m}^2$  โดยพบว่าที่ความเข้มแสง  $756\text{ W/m}^2$  มีค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดระหว่างผิวกระจกแผ่นนอกและแผ่นในของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นมากกว่าที่ความเข้มแสง  $572\text{ W/m}^2$  ประมาณ 24 %



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดระหว่างผิวกระจกด้านนอกและด้านในระหว่างระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีอากาศ แก๊สอาร์กอน และสารเปลี่ยนสถานะพาราฟินทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง  $572\text{ W/m}^2$   $663\text{ W/m}^2$  และ  $756\text{ W/m}^2$

ผลการคำนวณค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ พบว่าหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีค่าต่ำกว่าแบบอื่นอย่างชัดเจน และสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา ที่ความเข้มแสงมากค่าความร้อนที่ส่งผ่านมีค่ามากตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงมีผลต่อปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับห้องทดสอบ เป็นที่แน่ชัดว่าความเข้มแสงยิ่งสูงยิ่งมีระดับพลังงานความร้อนสูงตามไปด้วย ดังนั้นจึงพบว่าที่ระดับความเข้มแสง  $756 \text{ W/m}^2$  มีค่าความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อาคารมากกว่าที่  $663 \text{ W/m}^2$  และ  $572 \text{ W/m}^2$  ตามลำดับ โดยระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีค่าการส่งผ่านความร้อนต่ำกว่าระบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะประมาณ 5.6 % ที่ค่าความเข้มแสง  $756 \text{ W/m}^2$



รูปที่ 4.12 ความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีอากาศ แก๊สอาร์กอน และแบบที่มีสารเปลี่ยนสถานะพาราฟินทำงานร่วม ณ ความเข้มแสง  $572 \text{ W/m}^2$   $663 \text{ W/m}^2$  และ  $756 \text{ W/m}^2$

จากผลการทดสอบดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นบ่งชี้ว่าระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีการทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีความสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารได้ดีกว่าแบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะคือมีอากาศหรือแก๊สอาร์กอนอยู่ระหว่างกลางแผ่นกระจกทั้งสอง ขณะได้รับแสงแนวตั้งฉากกับระนาบกระจก มีความเป็นไปได้ที่ระบบหน้าต่างจะป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้ดีขึ้นเมื่อความหนาของกระจกเพิ่มขึ้น หรือการใช้กระจกลดการเปล่งรังสี อย่างไรก็ตามมีข้อควรพิจารณาอยู่ที่ระยะเวลาที่สามารถเก็บความร้อนในรูปแบบความร้อนแฝงนั้นอยู่ช่วงที่สารจากสถานะของแข็งเปลี่ยนเป็นของเหลว หากว่าเกินช่วงเวลานี้จะไม่เป็นผลดีเนื่องจากค่านำความร้อนของสารในสถานะของเหลวสูงกว่าอากาศหรือ แก๊สเฉื่อยดังแก๊สอาร์กอนที่บรรจุในหน้าต่าง อาจส่งผลให้ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ภายในได้เร็วขึ้น โดยลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวกระจกแผ่นนอกและแผ่นใน ด้วยเหตุนี้การใช้งานสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับหน้าต่างกระจกสองชั้นควรมีการออกแบบอย่างรอบคอบ คำนึงถึงปัจจัยการคายความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อให้ทำงานในช่วงที่ความเข้มแสงสูงและถ่ายเทความร้อนออกในช่วงเย็นเมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมต่ำลง ประกอบกับการพิจารณาถึงค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลวของสารควรมีค่าสูงเพื่อให้ผลการทำงานที่ดี

#### 4.4 ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะสามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคารลงจากระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบธรรมดา 5.6 % หมายถึงการลดภาระการทำความเย็นลงได้ 5.6 % เปรียบเทียบต่อหน่วยพลังงาน พิจารณาสำหรับระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบธรรมดา ที่ค่าภาระเครื่องปรับอากาศหนึ่งตันความเย็นหรือ 1.62 kW ระยะเวลาทำงานรวม 70 เปอร์เซ็นต์ 8 ชั่วโมงต่อวัน กำหนดทำงานยกเว้นวันเสาร์และอาทิตย์ดังนั้นใน

หนึ่งปีมีการทำงานทั้งสิ้น 260 วัน จะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 2329.6 ( $1.6 \times 260 \times 8 \times 0.7$ ) kWh คิดอัตราค่าไฟฟ้าคงที่ที่ 3 บาทต่อหน่วย ดังนั้นระบบนี้ต้องจ่ายค่าไฟเท่ากับ 6988 บาทต่อปี ขณะที่ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่า จึงมีภาระทำความเย็นสำหรับเครื่องปรับอากาศอยู่ที่ 1.51 kW ต้องการพลังงานไฟฟ้า 2199.1 kWh/year และต้องจ่ายค่าไฟเท่ากับ 6597 บาท/ปี ขณะที่ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายในส่วนของการเปลี่ยนสถานะเมื่อคิดเฉพาะต้นทุนไม่คิดค่าขนส่งและค่าบริการอื่น 1660 บาท

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนอย่างง่ายทำได้โดยหาอัตราค่าใช้จ่ายต่อผลประโยชน์ที่ได้รับในที่นี่ได้แก่ค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้จากระบบปรับอากาศ สำหรับค่าใช้จ่ายคือส่วนที่เพิ่มจากระบบเดิม พบว่าสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 4 ปี แต่หากเปรียบเทียบกับหน้าต่างกระจกชั้นเดียวพบว่าสามารถคืนทุนได้ด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่า เนื่องจากเป็นการคำนวณด้วยเงื่อนไขเดียวกันกับที่ใช้ในการทดสอบเมื่อได้รับรังสีตรงตลอดเวลา การคำนวณภายใต้สภาวะรับความร้อนสูงตลอดเวลาทำให้ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนสูงเกินควร ถึงกระนั้นก็ตามผลการคำนวณนี้แสดงให้เห็นว่าระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริง

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

หน้าต่างกระจกสองชั้นทำงานร่วมกับวัสดุเปลี่ยนเฟสสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายใน เมื่อแสงตกกระทบโดยตรงบนหน้าต่างกระจก พลังงานความร้อนถ่ายเทผ่านสารเปลี่ยนสถานะจากเดิมของแข็ง ระยะเวลาผ่านไปสารเปลี่ยนสถานะสะสมความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิถึงจุดหลอมเหลวเปลี่ยนจากสถานะของแข็งเป็นของเหลว ปრაกฏการณ์ดังกล่าวทำให้ความร้อนถูกกักเก็บไว้ด้วยสารเปลี่ยนสถานะ และปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านเข้ามายังภายในห้องลดลง ผลการศึกษาโดยการทดสอบการทำงานของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบไม่มีและแบบมีสารเปลี่ยนสถานะภายใต้แสงจำลองที่ความเข้มแสงระหว่าง  $572 - 756 \text{ W/m}^2$  มีดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนจากด้านนอกผ่านกระจกเข้ามาด้านในห้องของระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะหรือแบบที่มีอากาศและแบบที่มีแก๊สอาร์กอน บรรจุระหว่างแผ่นกระจกทั้งสอง ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกระจกแผ่นนอกและแผ่นในลดลงเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นแสดงถึงความร้อนที่ส่งผ่านกระจกหน้าต่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง
2. การป้องกันความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมให้ผลดีกว่าแบบที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในช่วงระยะเวลากว่าหนึ่งชั่วโมง สามสิบนาทีเมื่อสารเริ่มเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว แสดงโดยค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนแสงอาทิตย์ต่ำกว่าระบบที่ไม่มีด้วยค่า 0.64 และ 0.68 ตามลำดับ และค่าความ

แตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิผิวกระจกแผ่นนอกและในที่มีค่าสูงกว่าทุกความเข้มแสงที่ทดสอบ

3. ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบมีสารเปลี่ยนสถานะทำงานร่วมด้วยมีค่าต่ำสุด รองลงมาคือหน้าต่างกระจกสองชั้นที่มีอาร์กอนและอากาศซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างแบบแรกต่ำกว่าแบบระบบที่สอง 5.6 %
4. ระบบหน้าต่างกระจกสองชั้นแบบเดิมสามารถปรับปรุงให้ทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะได้ ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจึงมีเพียงค่าสารเปลี่ยนสถานะ หากยังพบว่าระยะเวลาคืนทุนยังสูงอยู่ที่ 4 ปี ทั้งนี้คำนวณภายใต้สภาวะรับความร้อนสูงตลอดเวลามีส่วนทำให้ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น และระยะเวลาคืนทุนสูงเกินจริงได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรได้มีการศึกษาและพัฒนาสารเปลี่ยนสถานะประเภท salt hydrate ซึ่งมีค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลวสูง เพื่อไม่ให้เกิดการแยกชั้นสารเมื่อหลอมเหลวด้วยการผสมกับสารประกอบอื่น จะทำให้สามารถใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้การทดสอบระบบหน้าต่างสองชั้นทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะในอาคารที่มีการออกแบบมาเพื่อใช้ทดสอบภายนอกยังคงมีความจำเป็นเพื่อทราบถึงการทำงานเป็นวัฏจักรของสารเปลี่ยนสถานะภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเข้มแสง ตามฤดูกาล รวมถึงความเสื่อมสภาพของสารในสภาวะการใช้งานจริง

## เอกสารอ้างอิง

- American Society of Heating Refrigerating Air Conditioning Engineers, 1993, Fundamentals Handbook (SI), Fenestration ASHRAE Standard 27
- Athienitis A.K., Liu C., Hawes D., D. Banu, D. Feldman, Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. Building Environment, 1997; 32: 405–410
- Bejan A. and Kraus A., Heat transfer handbook, John Wiley & Sons, INC., 2003, Chapter 1
- Chirarattananon S., Building for energy efficiency, Energy Field of Study, Asian Institute of Technology, 2005.
- Chow T.T., Lin Z., He W., Chan A.L.S., Fong K.F., Use of ventilated solar screen window in warm climate, Applied Thermal Engineering, 2006; 26: 1910–1918.
- Davies M.G., Building heat transfer, John Wiley & Sons, Inc., Chichester, England, 2004, 500 p.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy and Departement of Physics, Silpakorn University, Handbook of Solar Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications. August 2005. Thailand.
- Duffie J.A. and Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA., 2006, 908 p.
- Farrell A.J., Norton B. and Kennedy D.M., Corrosive effects of salt hydrate phase change materials used with aluminium and copper. Journal of Materials Processing Technology, 2006; 175: 198–205.

Feldman D, Banu D. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar Energy Material*, 1991; 22 (2–3): 231–242.

Finlayson E, Arasteh D, Rubin M, Sadlier J, Sullivan R, Huizenga C, et al., Advancements in thermal and optical simulations of fenestration systems: the development of WINDOW 5. In: Proc of the VI thermal envelopes conference, Clearwater Beach, FL; 1995.

Freire R.Z., Mazuroski W., Abadie M.O. and Mendes N., Capacitive effect on the heat transfer through building glazing systems, *Applied Energy*, 2011; 88: 4310–4319.

Gugliermetti F. and Bisegna F., Saving energy in residential buildings: The use of fully reversible windows, *Energy*, 2007; 32 (7): 1235–1247.

Hagentoft C.E., Introduction to building physics, Lund, Studentlitteratur, 2001, 444 p.  
Handbook of Solar Radiation and Climatic Data for Renewable Energy Applications, DEDE, SU, 2005

HM Government, Climate Change The UK Programme 2006, Presented to Parliament by the secretary of state for the Environment, Food and Rural Affairs, 2006

Ismail K.A.R. and Henriquez J.R., PCM glazing systems, *International Journal of Energy Research*, 1997; 21: 1241–1255.

Ismail K.A.R. and Henriquez J.R., Thermally effective windows with moving phase change material curtains, *Applied Thermal Engineering*, 2001; 21: 1909–1923.

Ismail K.A.R, Salinas C.T and Henriquez J.R, Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows, *Energy and Buildings*. 2008; 40: 710–719.

Jones, R.H.L. Solar radiation through windows – theory and equations, *Building Services Engineering Research and Technology*, 1980; 1 (2): 83–91.

Khudhair A.M. and Farid M. M., A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Applied Thermal Engineering*, 2003; 23: 251–283.

Larsson U., Moshfegh B. and Sandberg M., Thermal analysis of super insulated windows (numerical and experimental investigations), *Energy and Buildings*, 1999; 29: 121–128.

Manz H., Brunner S. and Wullschlegel L., Triple vacuum glazing: heat transfer and basic mechanical design constraints, *Solar Energy*, 2006; 80 (12): 1632–1642.

Mehling H., Cabeza L.F., Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications (*Heat and Mass Transfer*), 2008, Springer–Verlag Berlin Heidelberg, 308 p.

Neeper D. Thermal dynamics of wall board with latent heat storage. *Sol Energy* 2000; 68: 393–403.

Oughton D.R. and Hodkinson S.L., *Faber & Kell ' s Heating and Air–Conditioning of Buildings*, 2008, Elsevier Ltd. UK

- Pasupathya A., Velraja R., Seeniraj R.V., Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008; 12: 39–64.
- Peippo K, Kauranen P, Lund PD. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy Building*, 1991; 17: 259–270.
- Rattanongphisat W., Feasibility of phase change material for heat reduction window, *Proceeding of the 10<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET2011)*, 4 - 7 September, 2011, Istanbul, Turkey.
- Rosencrantz T., Bülow-Hübe H., Karlsson B. and Roos A. Increased solar energy and daylight utilisation using anti-reflective coatings in energy-efficient windows, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2005; 89: 249–260.
- Rubin M., Rottkay K. and Powles R., *Window Optics*, *Solar Energy*, 1998; 62(3): 149–161.
- Sekhar S.C. and Toon K.L.C., On the study of energy performance and life cycle cost of smart windows, *Energy and Buildings*, 1998; 28: 307–316.
- Thongchai W. and Rattanongphisat W., A study of heat transmission through a double glass window using mathematical equations, abstract, *Proceeding of Naresuan Research Conference*, Phitsanulok, Thailand, 29–31 July 2010.
- Weinlaeder H., Koerner W., Heidenfelder M., Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage, *Energy and Buildings*, 2011; 43: 2468–2475.
- Weinläder H., Beck A. and Fricke J., PCM-facade-panel for day lighting and room heating. *Solar Energy*, 2005; 78: 177–186.

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร, 2538

ติเกะ บุนนาค, การศึกษาการส่งผ่านความร้อนและแสงผ่านกระจกอาคาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์

, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์, 2547

พรพรรณ เหลืองรุจิวงศ์ การศึกษาประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงานของหน้าต่างกระจก

สำหรับบ้านพักอาศัย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา

เทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-

พระจอมเกล้าธนบุรี, 2546

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, นพรัตน์ คำพร และเข็มชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์, การศึกษาการส่งผ่าน

พลังงานความร้อนของหน้าต่างกระจกและหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม,การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546,

จ.ปราจีนบุรี

<http://www.rubitherm.de/english/index.htm>

<http://www.bradfordinsulation.com.au/Bradford/UploadedFiles/b2/b2dce3e7-13c0-4a76->

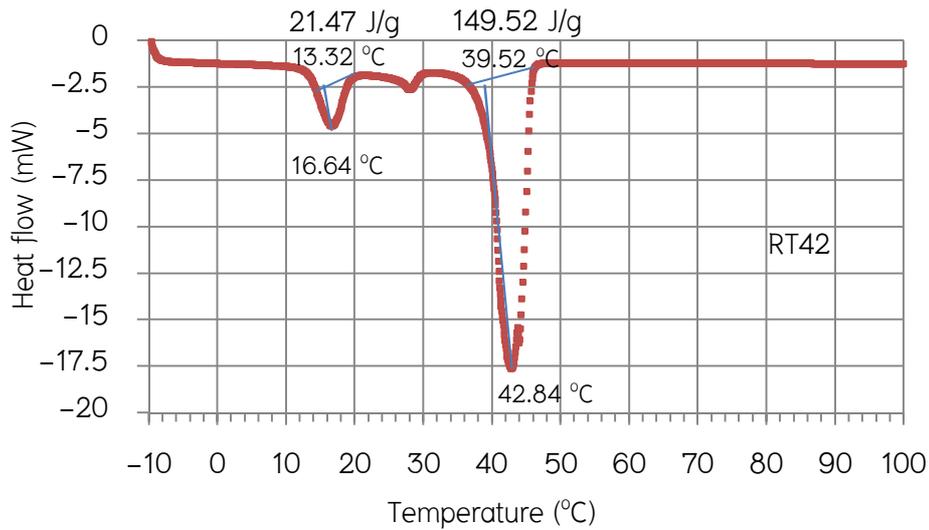
<bafe-5ada491b0b95.pdf>

<http://www.agc-flatglass.co.th/en/product/insulating.asp>

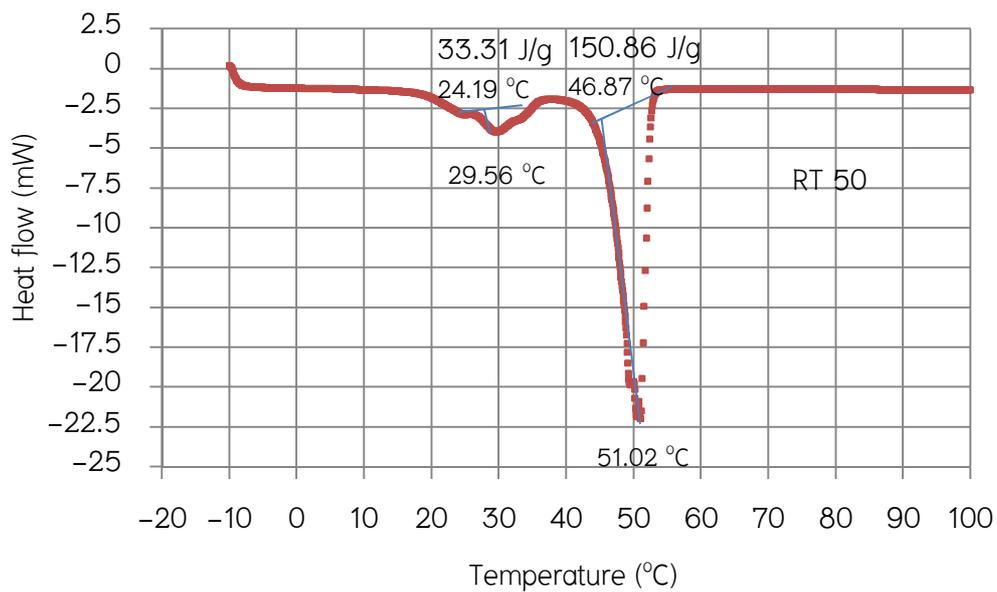
## ภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์สารเปลี่ยนสถานะด้วยเครื่อง DSC

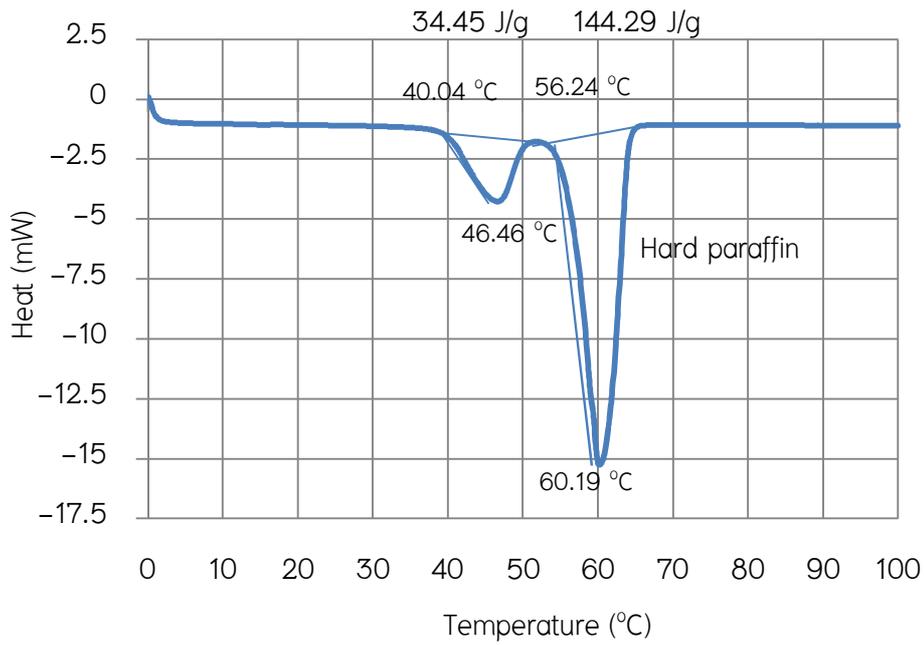
(Differential Scanning Calorimetry)



รูปที่ ผ.1 พาราฟิน RT 42 มีช่วงการหลอมเหลวและพลังงานที่ตำแหน่งแรก 16.64 °C 21.47 J/g ตำแหน่งสอง 28.02 °C 4.57 J/g และตำแหน่งสาม 42.84 °C 149.65 J/g ตามลำดับ

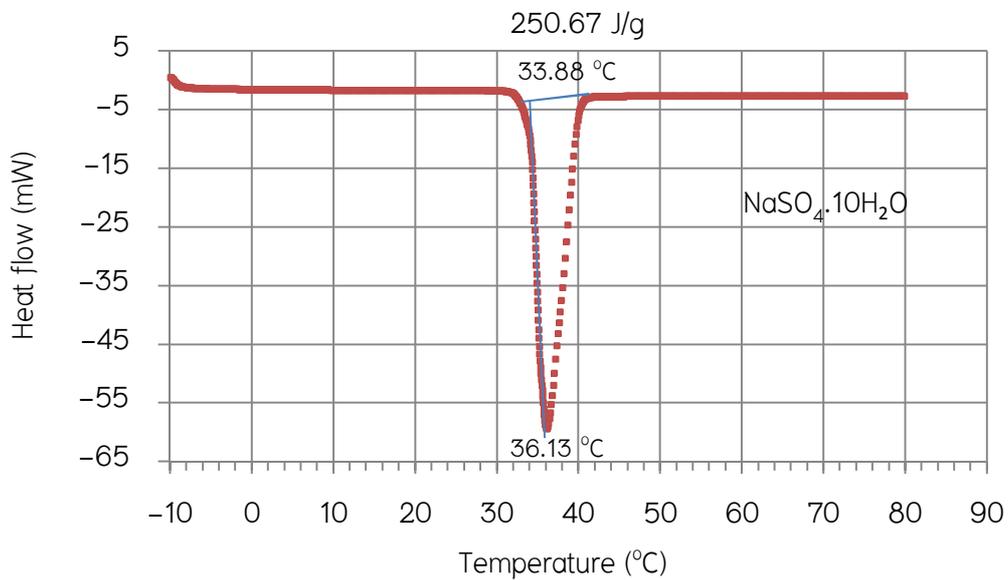


รูปที่ ผ.2 พาราฟิน RT 50 มีช่วงการหลอมเหลวและพลังงานที่ตำแหน่งแรก 29.56 °C 33.31 J/g และตำแหน่งสอง 51.02 °C 150.86 J/g ตามลำดับ



รูปที่ ผ.3 พาราฟินแข็งที่ใช้งานห้องปฏิบัติการเคมีมีช่วงการหลอมเหลวและพลังงานที่ตำแหน่ง

แรก 46.46 °C 34.45 J/g และตำแหน่งสอง 60.19 °C 144.29 J/g ตามลำดับ



รูปที่ ผ.4 NaSO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O มีจุดหลอมเหลวที่ 36.13 °C ค่าพลังงาน 250.67 J/g