การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17
15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี

การศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น

A Study of The Performance of Cooling Ceiling Panel

อายุส วัฒนวาณิชกร[1] และเชิดพันธ์ วิทูราภรณ์[2]
[1] นิสิตปริญญาโท
[2] อาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาคารและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพ ฯ 10330
โทร 0 – 2218 – 6622 โทรสาร 0 – 2252 – 2889 E-mail: chirdpun@hotmail.com[2]

Aryut Wattanawanichakorn[1] and Chirdpun Vitooraporn[2]
[1] Graduate student
[2] Lecturer at Building Technology and Environment Laboratory, Mechanical Engineering Department,
Chulalongkorn University Phyathai Rd, Patumwan, Bangkok 10330
Tel : 0 – 2218 – 6622 Fax : 0 – 2252 – 2889 E-mail: chirdpun@hotmail.com[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยตัวแปรที่พิจารณาในการทดลอง คืออุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และภาระการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว โดยการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวเพิ่มสูงขึ้น และยังส่งผลให้ระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวลดลงด้วย ในทางตรงกันข้ามจากผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นไม่ส่งผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ดีอัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหลสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ภาระความร้อนยังมีผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวด้วย โดยในกรณีทดลองที่มีภาระความร้อนสูง ระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องจะเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิสูงขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาสร้างสมการเพื่อแสดงสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวได้

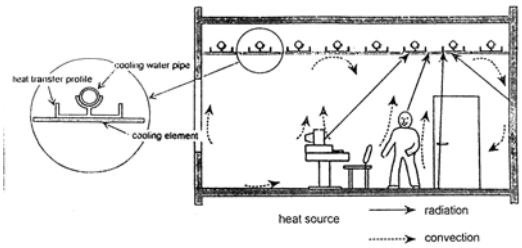
Abstract

In this research, the performance of cooling ceiling panel in transferring heat is studied. The variables being considered in the experiment are temperature of chilled water that is fed to the cooling ceiling panel, flow rate of the chilled water and cooling load of the cooling ceiling panel. From the experiment, it is found that the temperature of chilled water provides an effect on surface temperature of the cooling ceiling panel, the room temperature and the rate of heat transfer of the cooling ceiling panel at the steady state condition. Chilled water at low temperature increases the rate of heat transfer of the cooling ceiling panel, and, at the same time, reduces surface temperature of the cooling ceiling panel as well as the room temperature. On the contrary, the flow rate of the chilled water does not significantly affect surface temperature of the cooling ceiling panel, the room temperature and the rate of heat transfer of the cooling ceiling panel at the steady state condition. However, the flow rate of chilled water has an effect on the time gradient required for surface temperature of the cooling ceiling panel, the room temperature and the rate of heat transfer in the steady state condition. The surface temperature of the cooling ceiling panel,

the room temperature and the heat transfer of cooling ceiling panel approach more rapidly to the steady state condition as the chilled water flow rate fed to the cooling panel get higher. Furthermore, the heat load also plays an important effect on the surface temperature of the cooling ceiling panel and room temperature at the steady state condition. Higher heat load results in higher temperature of the surface temperature of the cooling ceiling panel and the room temperature at the equilibrium condition. The results from the experiment are then used to derive the equations that represent the performance of the cooling ceiling panel at the steady state condition.

1. บทนำ

ฝ้าเพดานทำความเย็นเป็นระบบทำความเย็นที่อาศัยกลไกการรับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรงจากผนังห้องในส่วนที่ไม่ได้ติดตั้งท่อที่มีสารทำความเย็นอยู่ภายใน รวมทั้งวัตถุ และบุคคลที่อยู่ภายในห้องด้วย และกลไกที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้น ณ บริเวณชั้นอากาศที่อยู่ชิดกับผนังทำความเย็น แล้วอากาศที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนนี้จะเกิดการเคลื่อนตัวเข้าผสมกับอากาศที่อยู่ภายในห้องด้วยแรงลอยตัว กลไกที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เกิดจากฝ้าเพดานโลหะทำความเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาศัยอุปกรณ์ที่สำคัญคือ ท่อโลหะที่มีสารทำความเย็นไหลเวียนอยู่ภายในซึ่งสารทำความเย็นที่นิยมนำมาใช้คือน้ำ นำมายึดติดกับแผ่นโลหะน้ำหนักเบา แล้วอาศัยการนำความร้อนจากผนังทำความเย็นที่ได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากผนัง วัตถุ และบุคคลในห้อง และการพาความร้อนจากอากาศภายในห้อง ผ่านท่อโลหะไปสู่น้ำหรือ สารทำความเย็นภายใน จากนั้นอาศัยเครื่องสูบน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำไปสู่เครื่องทำน้ำเย็น และไหลเวียนในระบบต่อไป



รูปที่ 1 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้พิจารณาภาระการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งประกอบด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นและผนัง การพาความร้อนแบบธรรมชาติ และความร้อนจากหลอดไฟโคม ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของฝ้าเพดานทำความเย็นจะอาศัยสมการของ Walton(1980) ซึ่งได้เสนอวิธีหาค่าการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวล้อมรอบปิดด้วยวิธีอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (MRT) โดยการลดพื้นผิวที่มีอยู่หลายพื้นผิวและแทนที่โดยประมาณด้วยสองพื้นผิว ในกรณีของการแลกเปลี่ยนรังสีของผนังภายในห้อง พื้นผิวหนึ่งจะเป็นพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ย T_p อีกพื้นผิวหนึ่งคือพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ประกอบรวมเป็นพื้นผิวล้อมรอบปิดและถูกสมมติรวมเป็นพื้นผิวเดียวกันซึ่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมอเท่ากับ T_r โดยพื้นผิวที่สมมติขึ้นนี้จะมีพื้นที่การแผ่รังสีเท่ากับผลรวมของพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ประกอบรวมเป็นพื้นผิวล้อมรอบปิด และมีอุณหภูมิของพื้นผิวที่ทำให้เกิดปริมาณการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจากพื้นผิวที่สมมติขึ้นเท่ากับพื้นผิวที่มีหลายพื้นผิวที่เป็นพื้นผิวจริง ซึ่งสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีที่ได้จากวิธี MRT นี้คือ

$$q_r = \sigma F_r \left[T_p^4 - T_r^4 \right] \qquad (1)$$

เมื่อ

F_r = ตัวประกอบการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสี

σ = ค่าคงที่สเตฟานซ์ – โบลทซ์มานน์ = 5.669×10^{-8} $W/(m^2\text{-}K^4)$

q_r = ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนสุทธิโดยการแผ่รังสีของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น (W/m^2)

ซึ่งอุณหภูมิของพื้นผิวสมมติ, T_r, คำนวณโดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ และสภาพเปล่งรังสีของทุกพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็นซึ่งในกรณีที่ทุกพื้นผิวมีค่าสภาพเปล่งรังสีใกล้เคียงกันแล้วอุณหภูมิของพื้นผิวสมมตินี้จะประมาณได้ด้วยอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น

นอกจากนี้ในทางปฏิบัติค่าของสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวที่ไม่ใช่โลหะ หรือพื้นผิวโลหะที่ทาสีแล้วจะมีค่าประมาณ 0.9 เมื่อนำค่าของสภาพเปล่งรังสีนี้ไปใช้แล้ว ตัวประกอบการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสี จะมีค่าประมาณ 0.87 สำหรับห้องส่วนใหญ่ (ASHRAE 1992) ดังนั้นสมการ (1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$q_r = 5 \times 10^{-8} \left[(AUST + 273)^4 - (t_p + 273)^4 \right] \qquad (2)$$

เมื่อ

t_p = อุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^\circ C$)

AUST = อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น ($^\circ C$)

2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

การพาความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบที่ใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นโดยปกติจะเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ กล่าวคือการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนออกจากชั้นอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติ มีปัจจัยหลายอย่าง เช่น ลมรั่วเข้าสู่ห้อง หรือการเคลื่อนที่ของคนที่อาจรบกวน และมีผลกระทบต่อกลไกการพาความร้อนแบบธรรมชาติ รวมทั้งอาจเหนี่ยวนำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับได้

การคำนวณค่าการพาความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นจะอาศัยสมการที่ได้จากผลงานวิจัยของ Schutrum และ Vouris (1954) ซึ่งได้ทำการทดลองพบว่าขนาดห้องโดยปกติแล้ว จะไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ยกเว้นในกรณีพื้นที่

ที่มีขนาดใหญ่มากๆ เช่น โรงเก็บเครื่องบิน หรือคลังสินค้า ขนาดของพื้นที่จึงจะมีผลกระทบต่ออัตราการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณอัตราการพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยฝ้าเพดานทำความเย็นในห้องขนาดปกติจากงานวิจัยนี้คือ

$$q_c = 2.12\left(t_a - t_p\right)^{1.31} \quad (3)$$

เมื่อ

q_c = ฟลักซ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m^2)

t_p = อุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^{\circ}C$)

t_a = อุณหภูมิของอากาศในห้อง ($^{\circ}C$)

2.3 ความร้อนจากการแผ่รังสีของหลอดไฟ

ภาระความร้อนภายในที่ใส่ให้กับห้องจำลองในการทดลองนี้ มาจากหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ โดยจำนวนหลอดไฟจะขึ้นกับกรณีการทดลอง ซึ่งภาระความร้อนภายในจากหลอดไฟสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_b = n_b A_{b-p} \varepsilon_b \sigma (T_b^4 - T_p^4) \quad (4)$$

เมื่อ

q_b = การแผ่รังสีของหลอดไฟไปสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น (W/m^2)

T_b = อุณหภูมิของผิวแก้วของหลอดไฟ (K)

T_p = อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น (K)

A_{b-p} = พื้นที่ผิวของหลอดไฟ (m^2)

n_b = จำนวนหลอดไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ดวง/m^2)

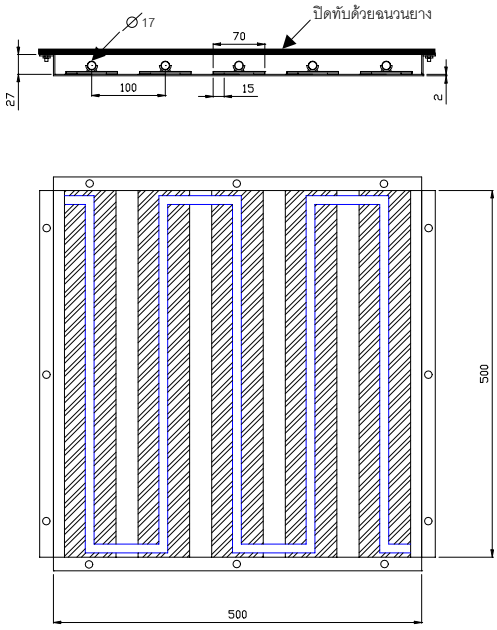
ε_b = สภาพเปล่งรังสีของผิวแก้วของหลอดไฟ

σ = ค่าคงที่สเตฟานซ์–โบลทซ์มานน์ = 5.669 x 10^{-8} $W/(m^2\text{-}K^4)$

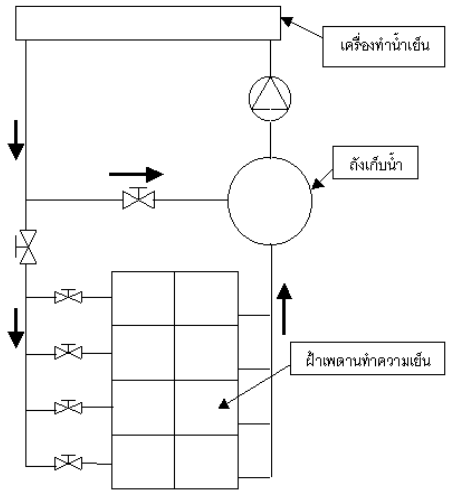
3. การทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองติดตั้งแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นที่จัดทำขึ้นขนาด 50 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2 จำนวน 8 แผ่น บนห้องจำลองขนาด 1 เมตร x 2 เมตร ที่มีความสูง 1 เมตร ซึ่งสร้างจากไม้อัดความหนา 4 มิลลิเมตร โครงสร้างยึดด้วยเหล็กฉากรู และให้ภาระความร้อนภายในด้วยหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ จำนวนหลอดขึ้นอยู่กับกรณีของการทดลอง ทั้งนี้การติดตั้งแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นในการทดลองจะติดตั้งโดยการต่อแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นขนานกัน 4 ชุด โดยแต่ละชุดจะใช้แผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นต่ออนุกรมกัน 2 แผ่นฝ้าเพดาน และทำการปิดทับด้วยฉนวนยางกันความร้อน โดยในรูปที่ 3 แสดงวงจรการเดินน้ำเย็นในระบบที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็น และภาระความร้อนเพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ที่มีต่อสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยการทดลองทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 35 กรณี ซึ่งมีค่าของตัวแปรแตกต่างกันในแต่ละการทดลองกล่าวคือ จะทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นอยู่ที่ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในช่วงตัดต่อของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยที่



รูปที่ 2 แบบแสดงขนาดของฝ้าเพดานทำความเย็น



รูปที่ 3 ระบบทางเดินของน้ำเย็น

อุณหภูมิน้ำเย็นค่าหนึ่งๆ จะทำการทดลอง 7 กรณีดังนี้คือ

กรณีทดลองที่	อัตราการไหล	ภาระความร้อนภายใน
1	0.5 ลิตร/นาที	-
2	1 ลิตร/นาที	-
3	1.5 ลิตร/นาที	-
4	1.5 ลิตร/นาที	หลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 1 ดวง
5	1.5 ลิตร/นาที	หลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 2 ดวง
6	1.5 ลิตร/นาที	หลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 3 ดวง
7	1.5 ลิตร/นาที	หลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 4 ดวง

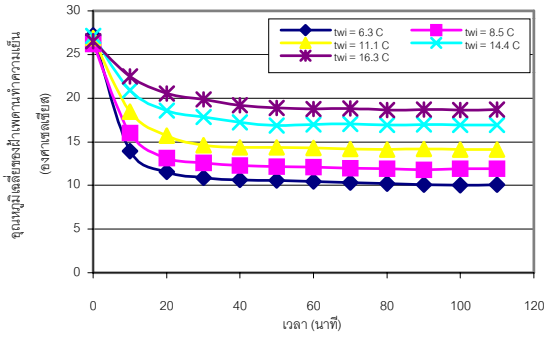
โดยที่อัตราการไหลของน้ำเย็นที่ระบุไว้ในตารางคือ อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็นที่จ่ายผ่านฝ้าเพดานทำความเย็นแต่ละชุดที่ต่อขนานกัน จำนวน 4 ชุด และในการทดลองได้ทำการวัดค่าต่างๆ ในแต่ละกรณีดังนี้คือ อุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิของพื้นผนังด้านใน อุณหภูมิน้ำเย็นเข้า-ออกของฝ้าเพดานทำความเย็น

อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง ทำการบันทึกค่าที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งอุณหภูมิทุกจุดเข้าสู่สภาวะคงตัว และวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สภาวะเริ่มการทดลอง และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว เพื่อนำผลไปวิเคราะห์

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

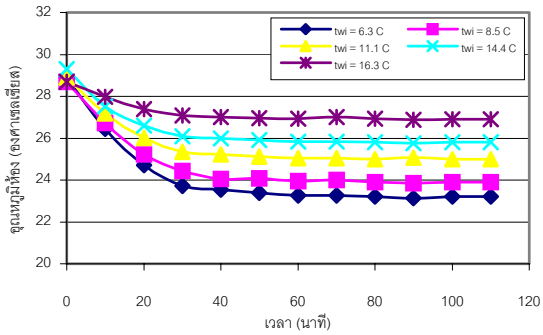
4.1 ผลของอุณหภูมิน้ำเย็นจ่ายที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น

จากผลการทดลองในทุกกรณีพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มการทดลอง จากนั้นการลดลงจะช้าลงจนกระทั่งอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น จากการทดลองพบว่า ในกรณีที่มีภาระความร้อนแบบเดียวกัน และมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่างๆ กัน การจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวมีค่าต่ำกว่า ในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นยังมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั่นคือในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้เร็วกว่าในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4

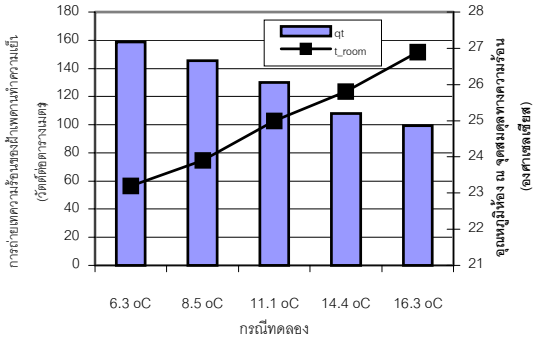


รูปที่ 4 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3, 8.5, 11.1, 14.4, และ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 2 ดวง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีต่ออุณหภูมิห้อง ในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่มีภาระความร้อนแบบเดียวกัน และมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จะพบว่าการจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ทั้งนี้ยังพบอีกว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิห้องในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั้นคือในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้เร็วกว่าในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูงกว่า



รูปที่ 5 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3, 8.5, 11.1, 14.4, และ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 2 หลอด



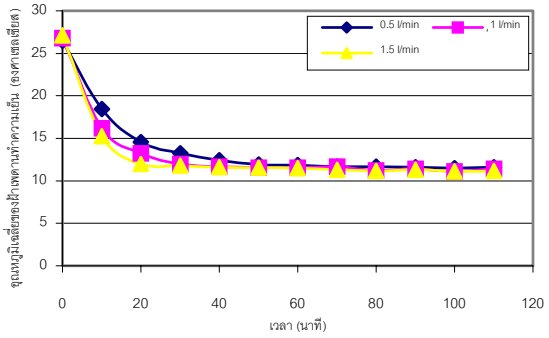
รูปที่ 6 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3, 8.5, 11.1, 14.4, และ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น ในรูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบในกรณีทดลองที่มีภาระความร้อนแบบเดียวกัน พบว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นมีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูงกว่าการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอยู่ในระดับต่ำกว่าการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่ลดลง ผลจากการที่สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ จะทำให้ฝ้าเพดาน

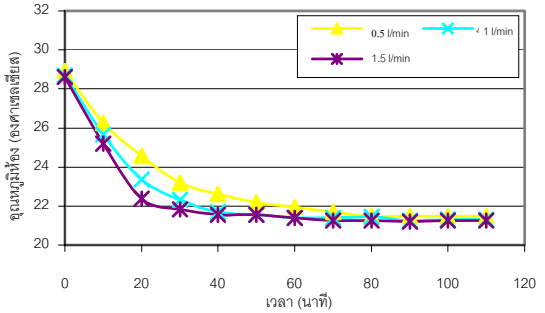
ทำความเย็นสามารถรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองให้ต่ำกว่าเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง ในกรณีที่ภาระความร้อนเป็นแบบเดียวกัน

4.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น

จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น นั่นคือเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิเดียวกัน ในกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำเย็นสูงกว่า จะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นเข้าสู่อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าในกรณีที่มีอัตราการไหลต่ำกว่า แต่ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ดังแสดงในรูปที่ 7



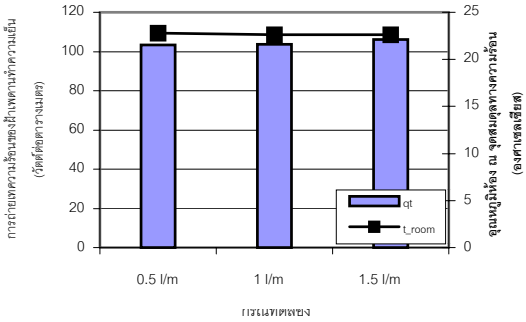
รูปที่ 7 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1, และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



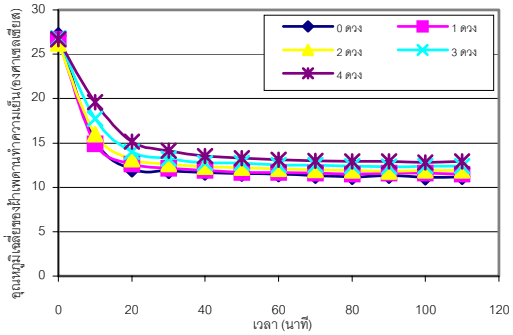
รูปที่ 8 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1, และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

ในทำนองเดียวกัน อัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้องเช่นเดียวกับอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น กล่าวคือเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิเดียวกัน ในกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำเย็นสูงกว่าจะทำให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องเข้าสู่อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าในกรณีที่มีอัตราการไหลต่ำกว่า แต่หากพิจารณาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องที่สภาวะคงตัว จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในห้องที่สภาวะคงตัว ดังแสดงในรูปที่ 8

เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นจ่ายที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น ในรูปที่ 9 เปรียบเทียบการทดลองที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง ในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากที่ผ่านมาพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว



รูปที่ 9 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5, 1, และ 1.5 ลิตร/นาที โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส



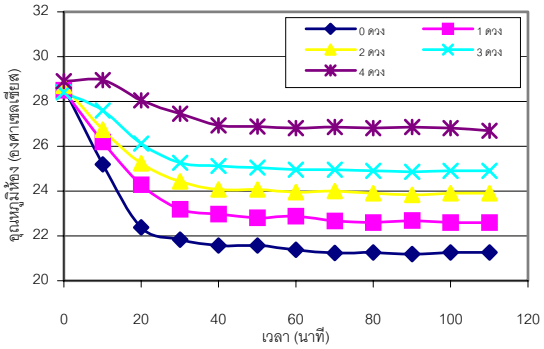
รูปที่ 10 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1, 2, 3, 4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส

4.3 ผลของภาระความร้อนที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว คือในกรณีที่ภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นมีปริมาณมากจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวสูงกว่าในกรณีที่มีภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็นน้อย

นอกจากนี้ภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นยังมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั่นคือในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็นมากอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะเปลี่ยนแปลงลดลงได้ช้ากว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็นน้อย ดังแสดงในรูปที่ 10

เมื่อพิจารณาผลของภาระความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิห้องจะพบว่ามีผลในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น กล่าวคือ ภาระความร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว ในรูปที่ 11 จะพบว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนสูงอุณหภูมิห้องจะลดลงจนกระทั่งคงที่ที่อุณหภูมิสูงกว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่ำ ในลักษณะเดียวกันปริมาณภาระความร้อนยังมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของอุณหภูมิห้องในช่วงแรกของการทดลองอีกด้วย นั่นคือในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนสูง อุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนแปลงลดลงได้ช้ากว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่ำ

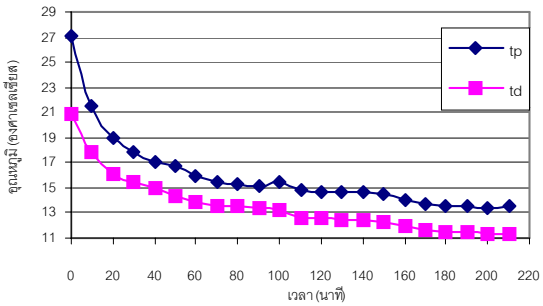


รูปที่ 11 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1, 2, 3, 4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส

4.4 พิจารณาการเกิดการควบแน่นที่พื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น

ในหลายกรณีของการทดลองมีการควบแน่นเกิดขึ้นที่ผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งจากการทดลองพบว่าการควบแน่นนี้จะเกิดขึ้นในช่วงแรกๆ ของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากการจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นลดต่ำลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ แม้ว่าจากผลที่ผ่านมาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจะลดต่ำลงด้วยเมื่อเริ่มมีการจ่ายน้ำเย็น แต่เนื่องจากฝ้าเพดานทำความเย็นเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเย็น และทำด้วยอลูมิเนียมที่มีสภาพการนำความร้อนสูง ทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้เร็วกว่า ดังนั้นอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจึงอยู่ในระดับต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ด้วยเหตุนี้ ในช่วงแรกๆ ของการทดลองจึงเกิดการควบแน่นขึ้น

อย่างไรก็ดี ได้มีการทำการทดลองเพื่อพยายามควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น ให้ลดต่ำลงอย่างช้าๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นที่ผิวฝ้าเพดานทำความเย็น โดยเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิสูงที่ 16.3 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิห้องเริ่มคงที่ แล้วทำการลดอุณหภูมิของน้ำเย็นลงเป็น 14.4 , 11.1 , 8.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในกรณีที่ใส่ภาระความร้อนภายในห้องเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 2 ดวง โดยได้มีการตรวจสอบการควบแน่นบนผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจากการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ-ความชื้น ที่ระยะห่างจากฝ้าเพดานทำความเย็น 5 เซนติเมตร เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น พบว่าการควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นให้ลดต่ำลงด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เร็วเกินไป จะช่วยป้องกันโอกาสที่จะเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นได้ จากรูปที่ 12 จะพบว่าตลอดช่วงเวลาของการทดลอง และช่วงเริ่มต้นของการทดลองอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น จะอยู่ในระดับสูงกว่าอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งทำให้อากาศที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นไม่มีโอกาสที่จะเกิดการควบแน่นที่ผิวของฝ้า



รูปที่ 12 : กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น

อย่างไรก็ดีจากผลการทดลองที่บันทึกได้ในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศในบริเวณที่ตรวจวัดมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโอกาสของการควบแน่นที่น่าจะเกิดขึ้น แต่ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นเกิดขึ้นบนผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากค่าอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศในรูปที่ 12 ดังนั้น การที่ข้อมูลทั้งสองมีความขัดแย้งกันอยู่นั้น มีความเป็นไปได้ด้วยข้อสันนิษฐานดังนี้คือ อาจเกิดจากอากาศที่รั่วเข้าบริเวณรอยต่อของฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับขึ้น ทำให้ลดโอกาสการก่อตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น นอกจากนั้นอากาศที่รั่วเข้านั้นอาจมีค่าอัตราส่วนความชื้นที่ต่ำกว่าอากาศภายในห้องจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอากาศในส่วนที่รั่วเข้านั้นไหลผ่านส่วนหลังของ

ฝ้าเพดานทำความเย็นเข้ามา เนื่องจากตัวท่อน้ำเย็นที่ยึดติดอยู่ทางด้านหลังของฝ้าเพดานทำความเย็นนั้นไม่มีการหุ้มฉนวน ดังนั้นจึงอาจเกิดการควบแน่นของอากาศรอบ ๆ ท่อทองแดง ทำให้ความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านเข้ามาทางรอยต่อของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าต่ำ เมื่อเข้ามาผสมกับอากาศในบริเวณที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็นซึ่งเป็นบริเวณที่ตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ จึงอาจทำให้ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ตรวจวัดได้มีการเปลี่ยนแปลงลดลง อีกทั้งการตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในการทดลองนี้กระทำที่ตำแหน่งห่างจากฝ้าเพดานทำความเย็น 5 เซนติเมตรเพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อาจถูกรบกวนด้วยผลของอากาศที่รั่วเข้าสู่ห้องดังที่กล่าวไปแล้ว ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ว่าอากาศส่วนอื่นๆ ภายในห้องที่อยู่ห่างจากฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีค่าอัตราส่วนความชื้นค่อนข้างคงที่จึงไม่ทำให้เกิดการควบแน่นขึ้น

5. การสร้างสมการจากการทดลอง

ข้อมูลจากการทดลองได้ถูกนำมาสร้างเป็นสมการแสดงสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบฝ้าเพดานทำความเย็นเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งวิธีการสร้างสมการมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.1 สร้างสมการเพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น

สมการดังกล่าวนี้จะอาศัยสมการพื้นฐานในเรื่องการนำความร้อนจากพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นไปสู่น้ำเย็นภายในท่อ โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น (R_u) โดยที่ความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นนั้นเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อนจากพื้นผิวของฝ้าเพดานไปสู่น้ำเย็นที่อยู่ภายในท่อ และเป็นตัวลดสมรรถนะการทำความเย็นของฝ้าเพดาน ซึ่งความต้านทานดังกล่าวเกิดขึ้นจากความต้านทานทางความร้อนของผนังท่อน้ำเย็น (r_t) ความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดาน (r_s) และสุดท้ายคือความต้านทานทางความร้อนของตัวฝ้าเพดานเอง (r_p)

พิจารณาค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่ติดตั้งบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตร

$$R_u = Mr_t + Mr_s + r_p \qquad (5)$$

เมื่อ

R_u = ความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น (m^2-K/ W)

r_t = ความต้านทานทางความร้อนของผนังท่อน้ำเย็นต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็น (m-K/ W)

r_s = ความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็น (m-K/ W)

r_p = ความต้านทานทางความร้อนของแผ่นฝ้าเพดาน (m^2-K/ W)

M = ระยะห่างของท่อน้ำเย็นวัดจากจุดศูนย์กลางแนวแกนท่อ (m)

ค่า r_t และ r_p ของฝ้าเพดานสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 6 และ 7 ดังนี้

$$r_t = ln(D_o/D_i)/2\pi k_t \qquad (6)$$

$$r_p = x_p/k_p \qquad (7)$$

เมื่อ

D_o, D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อน้ำเย็น (m)

k_p = สภาพการนำความร้อนของแผ่นฝ้าเพดาน (W/m-K)

x_p = ความหนาของแผ่นฝ้าเพดาน (m)

ในส่วนของค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็น ASHRAE(1992) ระบุว่าเป็นค่าความต้านทานทางความร้อนที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบในการยึดต่อท่อน้ำเย็นกับแผ่นฝ้าเพดาน ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของท่อน้ำเย็น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความต้านทานทางความร้อนดังกล่าวจากผลการทดลองดังนี้คือ หากสร้างกราฟระหว่างผลต่างอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นกับอุณหภูมิน้ำเย็นเฉลี่ย (Δt_m) ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 8

$$\Delta t_m = t_p - 0.5(t_{wi} + t_{wo}) \qquad (8)$$

เมื่อ

t_p = อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น (^oC)

t_{wi} = อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า (^oC)

t_{wo} = อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก (^oC)

กับค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (q_t) และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองจากข้อมูลผลการทดลองด้วยสมการในรูปแบบ

$$q_t = k\Delta t_m$$

หรือ

$$q_t = \Delta t_m/R_u \qquad (9)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ และใช้วิธีสมการถดถอย (Regression) เพื่อคำนวณค่า k จะได้ว่าความชันของกราฟ (k) ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น (U) ซึ่งก็คือส่วนกลับของความต้านทานรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นหรือ

$$R_u = 1/U \qquad (10)$$

จากวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นได้เป็น 47.46943 W/m^2- ^{O}C จากสมการที่ 10 จะได้ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นคือ 0.02107 m^2- ^{O}C/W

เมื่อทราบความต้านทานรวมดังกล่าวแล้วจะสามารถนำไปคำนวนหาค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานได้ตามสมการที่ 5 เมื่อทราบค่า r_t และ r_p ของชุดทดลองแล้ว ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็น (r_s) มีค่าเท่ากับ 0.2106 m-^{o}C/W

นำค่าความต้านทานทางความร้อนดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 5 แล้วนำสมการคำนวณความต้านทานทางความร้อนรวมที่ได้ไปแทนในสมการที่ 9 ซึ่ง Δt_m มีค่าตามสมการที่ 8 แล้วทำการจัดรูปสมการใหม่ เพื่อให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นอยู่ทางด้านซ้ายมือ จะได้สมการที่ใช้ในการทำนายอุณหภูมิของพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว เมื่อทราบมิติที่เกี่ยวข้องกับฝ้าเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิของน้ำเย็น ดังนี้

$$t_p = q_t[\, M(\ln(D_o/D_i)/2\pi k_t) + 0.2106M + (x_p/k_p)] + t_{w_avg} \quad (11)$$

เมื่อ

t_p = อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (^oC)

q_t = การถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (W/m^2)

t_{w_avg} = อุณหภูมิน้ำเย็นเฉลี่ย เข้า-ออก = 0.5 ($t_{wi}+t_{wo}$) (^oC)

M = ระยะห่างของท่อน้ำเย็นวัดจากจุดศูนย์กลางแนวแกนท่อ (m)

D_o = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อทองแดง (m)

D_i = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อทองแดง (m)

k_t = สภาพการนำความร้อนของท่อทองแดง (W/m-K)

x_p = ความหนาของแผ่นฝ้าเพดาน (m)

k_p = สภาพการนำความร้อนของแผ่นฝ้าเพดาน (W/m-K)

ซึ่งจะนำสมการดังกล่าวนี้ไปใช้เพื่อสร้างสมการแสดงสมรรถนะในการทำความเย็นต่อไป

5.2 สร้างสมการแสดงสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด นำมาสร้างสมการแสดงสมรรถนะการทำความเย็นโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง สมรรถนะการทำความเย็นของฝ้าเพดาน (ภาระความร้อนที่รับได้) อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ที่สภาวะคงตัว โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามในรูปสมการยกกำลังดังนี้

$$q_t = A(t_r - t_p)^B \quad (12)$$

เมื่อ

q_t = การถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (W/m^2)

t_r = อุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว (^oC)

t_p = อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (^oC)

จากข้อมูลทั้งหมดที่พิจารณาโดยใช้วิธีสมการถดถอยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ A และ B เป็น

A = 7.9194

B = 1.1675

หรือ

$$q_t = 7.9194(t_r - t_p)^{1.1675} \quad (13)$$

แทนค่า t_p จากสมการที่ 11 ลงในสมการที่ 13 จะได้

$$q_t = 7.9194\,[t_r - \{\, q_t\,[\, M\,(\ln(D_o/D_i)/2\pi k_t) + 0.2106M + (x_p/k_p)] + t_{w_avg}\}\,]^{1.1675} \quad (14)$$

ซึ่งเป็นสมการเพื่อแสดงสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิห้อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงยังได้นำเสนอสมการเพื่อคำนวณระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งได้รวมเอาผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นต่อระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาโดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองอีกด้วย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น เพื่อควบคุมให้ระดับอุณหภูมิห้องปรับตัวลดลงสู่ระดับอุณหภูมิห้องออกแบบในระยะเวลาที่เหมาะสม ดังนี้

5.3 สมการคำนวณระดับอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าระดับของอุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นการทดลอง และอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งระดับอุณหภูมิห้องมีค่าคงที่ที่จุดสมดุลทางความร้อนเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยในการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิห้องในช่วงสภาวะไม่คงตัวดังกล่าว ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ระดับอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และภาระการทำความเย็นที่สภาวะคงตัว อย่างไรก็ดีอาจมีตัวแปรอื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ ที่อาจมีผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับอุณหภูมิห้องในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วย เช่น ขนาดของท่อน้ำเย็นที่ยึดติดกับฝ้าเพดาน หรือระยะห่างของท่อน้ำเย็น ซึ่งในส่วนนี้ไม่ได้มีการแปรเปลี่ยนเนื่องจากใช้ชุดทดลองฝ้าเพดานทำความเย็นเพียงชุดเดียว

จากผลการทดลองทั้งหมดโดยใช้วิธีสมการถดถอยจะสามารถแสดงสมการคำนวณระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวได้เป็น

$$t_r(t) = t_{ro} - (t_{ro} - t_{rs})\left(1 - e^{-\frac{8.33Q^{0.4863}t}{t_{wi}^{0.5453}q^{0.8528}}}\right) \quad (15)$$

เมื่อ

$t_r(t)$ = อุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว (^oC)

t_{ro} = อุณหภูมิห้องที่เวลาเริ่มต้น (^oC)

t_{rs} = อุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว (^oC)

t = เวลา (min.)

Q = อัตราการไหลของน้ำเย็น (litre/min-m^2)

t_{wi} = อุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น (^oC)

q = ภาระการทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (W/m^2)

โดยสมการดังกล่าวได้จากการทดลองโดยใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีระยะห่างของท่อน้ำเย็น 100 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ในการทดลองเท่านั้น

นอกจากนี้โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถนำมาสร้างสมการเพื่อคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวได้ โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในลักษณะเดียวกับอุณหภูมิห้องตามเวลา ซึ่งจะได้สมการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวดังนี้คือ

$$t_p(t) = t_{po} - (t_{po} - t_{ps})(1 - e^{-\frac{13.74Q^{0.5191}t}{t_{wi}^{0.5921}q^{0.8355}}}) \qquad (16)$$

เมื่อ

$t_p(t)$ = อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นตาเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว (^{O}C)

t_{po} = อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่เวลาเริ่มต้น(^{O}C)

t_{ps} = อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (^{O}C)

t = เวลา (min.)

Q = อัตราการไหลของน้ำเย็น (litre/min-m^2)

t_{wi} = อุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น (^{O}C)

q = ภาระการทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (W/m^2)

โดยค่าคงที่ที่ปรากฏในสมการที่ 15 และ 16 นี้ พิจารณาเป็นค่าคงที่ของชุดทดลองฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่าคงที่นี้อาจเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรอื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ เช่น ขนาดของฝ้าเพดานทำความเย็น ความหนาของฝ้าเพดานทำความเย็น ระยะห่างของท่อหรือวัสดุที่ใช้ทำฝ้าเพดานทำความเย็น

6. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองที่ทำมาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1.อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่ออุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวอยู่ในระดับต่ำกว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิสูงในกรณีที่มีภาระความร้อนเดียวกัน

2.อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะไม่มีผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวอย่างเด่นชัด แต่จะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหลสูง จะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตรากรไหลต่ำ

3.ปริมาณภาระความร้อนจะมีผลต่อระดับของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว คือเมื่อมีภาระความร้อนสูงขึ้นอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว จะสมดุลที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

4.อัตราถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่การจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นมีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง ในทางตรงกันข้ามอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างเด่นชัด นั้นคือการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะไม่แสดงอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] ASHRAE. ASHRAE Systems and Equipment Handbooks (SI) 1992. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc, 1992.

[2] Incropera, F.P., and Dewitt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. New York : John Wiley & Sons, 1996.

[3] Walton, G.N. A new algorithm for radian interchange in room loads calculations. ASHRAE Transactions 86(1980):190-208.

[4] Schutrum, L.F. and J.D. Vouris. Effects of room size and non-uniformity of panel temperature on panel performance. ASHVE Transactions 60(1954):455.

[5] อายุส วัฒนวาณิชกร, การศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น,วิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2546.