# การศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น

นายอายุส วัฒนวาณิชกร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2413-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# A STUDY OF THE PERFORMANCE OF COOLING CEILING PANEL

Mr.Aryut Wattanawanichakorn

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-17-2413-6

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น |
| โดย | นายอายุส วัฒนวาณิชกร |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายอายุส วัฒนวาณิชกร : การศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น
(A STUDY OF THE PERFORMANCE OF COOLING CEILING PANEL)
อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์, 173 หน้า.ISBN 974-17-2413-6

ระบบปรับอากาศด้วยฝ้าเพดานทำความเย็นมีข้อดีหลายประการ เช่น เพิ่มระดับความสบายทางความร้อน ปราศจากเสียงรบกวน ลดภาระการทำความเย็นสูงสุด ให้ความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม ลดปัญหาเชื้อโรคหรือสารปนเปื้อนในอากาศ และลดค่าก่อสร้างต่อชั้นของอาคาร ด้วยคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ ระบบปรับอากาศด้วยฝ้าเพดานทำความเย็นจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยในการทดลองจะมีตัวแปรที่พิจารณาคือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และภาระการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว โดยการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวเพิ่มสูงขึ้น และยังส่งผลให้ระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวลดลงด้วย

ในทางตรงกันข้ามจากผลการทดลองพบว่า อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นไม่ส่งผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ดีอัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหลสูง จะส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง และการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วขึ้น

นอกจากนี้ภาระความร้อนยังมีผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวด้วย โดยในกรณีทดลองที่มีภาระความร้อนสูง ระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องจะสมดุลที่อุณหภูมิสูงขึ้น

จากผลการทดลองที่ได้ สามารถนำมาสร้างสมการเพื่อแสดงสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น ที่สภาวะคงตัวได้

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2545

# # 4270666821 : MAJOR Mechanical Engineering

KEYWORD : Cooling Ceiling Panel / Radiant Panel

ARYUT WATTANAWANICHAKORN : A STUDY OF THE PERFORMANCE OF COOLING CEILING PANEL, THESIS ADVISOR : CHIRDPUN VITOORAPORN Ph.D., 173 pp. ISBN 974-17-2413-6

The air conditioning system using cooling ceiling panel provides many advantages such as increase thermal comfort level without producing noises, lower peak cooling load, maintain architectural beauty, lessen germ or contaminant in the air, and reduce construction cost per floor of a building. With the above properties, the cooling ceiling system is, therefore, another interesting alternative for air conditioning system.

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.

Department Mechanical Engineering Student's Signature……

Field of Study Mechanical Engineering Advisor's Signature……

Academic year 2002

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ข้าพเจ้าขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าช่วยเหลือให้คำแนะนำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการวิจัย แนวทางแก้ปัญหา และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่นำมาซึ่งความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา และ อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ กรรมการ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ซึ่งอบรมสั่งสอน และให้กำลังใจตลอดเวลา จนสำเร็จการศึกษา

ผู้จัดทำงานวิจัย

นายอายุส วัฒนวาณิชกร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ ..... ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ภ

บทที่ 1 บทนำ ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ..... 2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ..... 2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ ..... 2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... 2

บทที่ 2 งานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ..... 3
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา..... ..... 3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 5

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 21
3.1 แผนการวิจัย..... ..... 21
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 22
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวิจัย..... 29
3.4 ขั้นตอนในการทดลอง..... 33

บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง ..... 36

บทที่ 5 การสร้างสมการจากการทดลอง..... 51
5.1 สร้างสมการเพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น..... 51
5.2 สร้างสมการแสดงสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น..... 55

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 สมการคำนวณระดับอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดาน ทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว..... 60

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... 68

6.1 สรุปผลการวิจัย..... 68

6.2 ข้อเสนอแนะ..... 69

รายการอ้างอิง ..... 71

ภาคผนวก ..... 73

ภาคผนวก ก. กราฟ และตารางแสดงผลการทดลอง..... 74

ภาคผนวก ข. การคำนวณ..... 165

ภาคผนวก ค. ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุ ..... 171

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 173

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ..... 40

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัวในกรณี ทดลองต่างๆ..... 41

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่ สภาวะคงตัวในกรณีทดลองต่างๆ..... 43

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อตรวจสอบการควบแน่นของอากาศ บนพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น..... 50

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิน้ำเย็น และความคลาดเคลื่อนที่ได้จาก สมการที่ 5.11..... 58

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่สภาวะคงตัวของกรณีทดลองเพื่อทดสอบ สมการที่ 5.11..... 59

ตารางที่ 5.3 แสดงความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยสมการที่ 5.11 เทียบกับ ผลการทดลองในกรณีการทดลองเพื่อทดสอบสมการที่ 5.11..... 59

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นเมื่อเริ่มการ ทดลอง และอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะ คงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ..... 159

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองเมื่อเริ่มการทดลอง และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ในกรณี ทดลองต่างๆ..... 160

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น เมื่อเริ่มการทดลอง และอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิว ที่ไม่ทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆแสดงความ ชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว..... 161

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาออกของฝ้าเพดานทำความเย็น (oC) ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ..... 162
ตารางที่ ก.5 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%RH) ภายในห้องจำลอง เมื่อเริ่มการทดลอง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ..... 163
ตารางที่ ก.6 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในห้องจำลองเมื่อเริ่มการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ..... 164

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าสภาพเปล่งรังสีความร้อนเฉลี่ยของผิววัตถุ..... 171
ตารางที่ ค.2 แสดงค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ..... 172

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญภาพ

**รูปที่** **หน้า**


รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น..... 5
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของฝ้าเพดานโลหะแบบที่หนึ่ง..... 6
รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของฝ้าเพดานโลหะแบบที่สอง..... 7
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของฝ้าเพดานโลหะแบบที่สาม..... 7
รูปที่ 2.5 แสดงสมดุลการแผ่รังสีของพื้นผิว i ตามสมการที่ 2.1..... 9
รูปที่ 2.6 แสดงสมดุลการแผ่รังสีตามสมการที่ 2.3..... 10
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบการแผ่รังสีของพื้นผิวด้วยวงจรทางไฟฟ้า..... 11
รูปที่ 2.8 การนำความร้อนผ่านแผ่นเรียบ..... 17
รูปที่ 2.9 การนำความร้อนผ่านผนังท่อทรงกระบอก..... 18
รูปที่ 2.10 แสดงแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นอย่างง่ายๆ..... 20

รูปที่ 3.1 เครื่องสูบน้ำ..... 22
รูปที่ 3.2 ถังเก็บน้ำเย็น..... 23
รูปที่ 3.3 เครื่องทำน้ำเย็น..... 24
รูปที่ 3.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็น..... 24
รูปที่ 3.5 ก แบบแสดงขนาดของฝ้าเพดานทำความเย็น..... 25
รูปที่ 3.5 ข ฝ้าเพดานทำความเย็นที่จัดทำขึ้น..... 26
รูปที่ 3.6 ห้องจำลอง..... 26
รูปที่ 3.7 เครื่องเก็บข้อมูล..... 27
รูปที่ 3.8 ถังตวงน้ำ..... 28
รูปที่ 3.9 ชุดหลอดไฟสร้างภาระความร้อน..... 29
รูปที่ 3.10 ระบบทางเดินของน้ำ..... 30
รูปที่ 3.11 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิว..... 32
รูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งการวางหลอดไฟในการทดลอง..... 34

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณกึ่งกลางห้อง และ อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น..... 47

# สารบัญภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น..... 48

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น..... 48

รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว และผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานกับอุณหภูมิน้ำเย็น ตามสมการที่ 5.4..... 54

รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และผลต่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานที่สภาวะคงตัวตามสมการที่ 5.4..... 56

รูปที่ 5.3 แสดงแนวโน้มของค่า $\theta$ ตามเวลาจากผลการทดลอง..... 61

รูปที่ 5.4 แสดงระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาเมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหล 2.33 ลิตร/นาที-แผ่นฝ้าเพดาน..... 67

รูปที่ ก.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 75

รูปที่ ก.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 76

รูปที่ ก.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 77

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 1 ดวง..... 78

รูปที่ ก.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 2 ดวง..... 79

รูปที่ ก.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 3 ดวง..... 80

รูปที่ ก.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 4 ดวง..... 81

รูปที่ ก.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 82

รูปที่ ก.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 83

รูปที่ ก.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 84

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 85

รูปที่ ก.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 86

รูปที่ ก.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส..... 87

รูปที่ ก.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส..... 88

รูปที่ ก.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส..... 89

# สารบัญภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส..... 90

รูปที่ ก.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส..... 91

รูปที่ ก.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 92

รูปที่ ก.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 93

รูปที่ ก.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 94

รูปที่ ก.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 1 หลอด..... 95

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 2 หลอด..... 96

รูปที่ ก.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 3 หลอด..... 97

รูปที่ ก.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 4 หลอด..... 98

รูปที่ ก.25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 99

รูปที่ ก.26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 100

รูปที่ ก.27 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 101

# สารบัญภาพ (ต่อ)


รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง. ..... 102

รูปที่ ก.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5, 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 103

รูปที่ ก.30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส..... 104

รูปที่ ก.31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส..... 105

รูปที่ ก.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส..... 106

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส..... 107
รูปที่ ก.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส..... 108
รูปที่ ก.35 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 109
รูปที่ ก.36 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 110
รูปที่ ก.37 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 111
รูปที่ ก.38 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 112

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.39 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 113
รูปที่ ก.40 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 114
รูปที่ ก.41 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 115
รูปที่ ก.42 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 116
รูปที่ ก.43 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 117
รูปที่ ก.44 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 118

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.45 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 119
รูปที่ ก.46 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 120
รูปที่ ก.47 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 121
รูปที่ ก.48 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 122
รูปที่ ก.49 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 123
รูปที่ ก.50 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 124

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.51 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 125
รูปที่ ก.52 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 126
รูปที่ ก.53 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 127
รูปที่ ก.54 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 128
รูปที่ ก.55 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 129
รูปที่ ก.56 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 130
รูปที่ ก.57 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับ ฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยมีภาระ ความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 131

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.58 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 132
รูปที่ ก.59 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง..... 133
รูปที่ ก.60 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง..... 134
รูปที่ ก.61 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง..... 135
รูปที่ ก.62 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง..... 136
รูปที่ ก.63 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง..... 137

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.64 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 138

รูปที่ ก.65 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 139

รูปที่ ก.66 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 140

รูปที่ ก.67 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 141

รูปที่ ก.68 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 142

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.69 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3ดวง..... 143

รูปที่ ก.70 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4ดวง..... 144

รูปที่ ก.71 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส..... 145

รูปที่ ก.72 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส..... 146

รูปที่ ก.73 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส..... 147

รูปที่ ก.74 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส..... 148

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.75 กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส..... 149

รูปที่ ก.76 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 150

รูปที่ ก.77 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 150

รูปที่ ก.78 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 151

รูปที่ ก.79 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 151

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.80 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 152

รูปที่ ก.81 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 152

รูปที่ ก.82 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 153

รูปที่ ก.83 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , และ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง..... 153

รูปที่ ก.84 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 และ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง..... 154

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.85 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 154
รูปที่ ก.86 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 155
รูปที่ ก.87 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 155
รูปที่ ก.88 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 156
รูปที่ ก.89 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง..... 156

# สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

รูปที่ ก.90 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง..... 157

รูปที่ ก.91 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง..... 157

รูปที่ ก.92 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 และ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง..... 158

รูปที่ ก.93 กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 และ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมี ภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง..... 158

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่ในอดีตมาถึงปัจจุบันนี้ มนุษย์มีความพยายาม และตั้งใจอย่างยิ่งในการจะเอาชนะธรรมชาติ เพื่อให้ได้มาซึ่งความปลอดภัย สภาวะความเป็นอยู่ที่เหมาะสม หรือแม้กระทั่งความสะดวกสบายในชีวิตความเป็นอยู่ โดยอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์ ประดิษฐ์อุปกรณ์ หรือเครื่องมือต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการเหล่านั้น ซึ่งในปัจจุบันนี้อุปกรณ์ และเครื่องมือที่จำเป็น หรืออำนวยความสะดวกนั้น ได้ถูกประดิษฐ์คิดค้นขึ้นมากมายจนเรียกได้ว่า เกือบครบทุกอย่างที่มนุษย์เคยฝันเอาไว้

อย่างไรก็ดีการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องมือเหล่านั้นจำเป็นต้องใช้พลังงาน ซึ่งอุปกรณ์ประเภทเดียวกัน วัตถุประสงค์ในการใช้งานเหมือนกัน อาจจะมีสมรรถนะ และประสิทธิ์ภาพแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ในการออกแบบ ปัจจุบันนี้ความสามารถของอุปกรณ์ที่ใช้มิได้พิจารณาเพียงแค่สามารถทำงานได้หรือไม่ แต่หากยังต้องพิจารณาถึงความสามารถในการทำงานว่ามีสมรรถนะ และประสิทธิภาพดีเพียงไรด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายที่สำคัญในการใช้อุปกรณ์ในระยะยาว ดังนั้นหน้าที่ของนักออกแบบในปัจจุบันจึงมักอยู่ที่การปรับปรุง หรือการคิดค้นรูปแบบใหม่ๆ ของอุปกรณ์ที่มีการคิดค้นขึ้นแล้วให้ทำงานได้โดยมีประสิทธิภาพทางด้านพลังงาน และสมรรถนะดีขึ้น

ระบบปรับอากาศ และทำความเย็นก็เช่นเดียวกัน ได้ถูกปรับปรุงคุณสมบัติด้านสมรรถนะและประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีต แต่มาถึงในปัจจุบันนี้การปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านอื่นๆ ก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน เช่น การติดตั้งระบบปรับอากาศ และทำความเย็นในอาคารสำนักงานต่างๆ นอกจากจะต้องคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพแล้ว ยังอาจจะต้องคำนึงถึงความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม และเรื่องของเสียงรบกวนอีกด้วย เป็นผลให้ระบบปรับอากาศแบบแผ่รังสีได้ถูกคิดค้นขึ้นโดยมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ซึ่งก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของระบบปรับอากาศที่น่าสนใจ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ระบบทำความเย็นแบบฝ้าเพดานทำความเย็น
2. นำผลที่ได้จากการศึกษามาเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบฝ้าเพดานทำความเย็น

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สร้างห้องทดลอง และฝ้าเพดานทำความเย็นเพื่อทดสอบระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี
2. ทำการทดลอง และเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาสมรรถนะการทำความเย็นโดยการแผ่รังสี และการพาความร้อนแบบธรรมชาติของฝ้าเพดานทำความเย็น
3. สร้างสมการแสดงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนโดยฝ้าเพดานทำความเย็นเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบทำความเย็บแบบฝ้าเพดานทำความเย็น

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. รับทราบถึงข้อดี และข้อเสียของระบบทำความเย็นแบบฝ้าเพดานทำความเย็น
2. นำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบฝ้าเพดานทำความเย็นสำหรับผู้ที่สนใจ
3. เป็นการนำเสนอระบบทำความเย็นแบบอื่นที่แตกต่างออกไปจากที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน และผลักดันให้มีการนำระบบทำความเย็นแบบฝ้าเพดานทำความเย็นไปใช้จริงในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย
2. จัดสร้างชุดทดลอง
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น
4. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง
5. จัดทำรายงาน และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

# บทที่ 2

# งานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

Jiang (1992) ได้ศึกษาผลของแหล่งความร้อนแผ่รังสี และฝ้าเพดานความเย็นที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิ และการกระจายของสารปนเปื้อนในห้องทำงานที่มีการติดตั้งหัวจ่ายลมด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยแบ่งการทดลองเป็น 4 กรณี โดยเลือกใช้ค่าของภาระความร้อนแผ่รังสีเป็น 20% และ 80% เปลี่ยนปริมาณการระบายอากาศ 2.1 air change เป็น 4.2 air change และเดินระบบฝ้าเพดานทำความเย็น กับไม่เดินระบบ

จากการทดลองพบว่าการใช้ฝ้าเพดานทำความเย็น นอกจากจะช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิในแนวดิ่งได้แล้ว ยังช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศด้วย ด้วยปริมาณภาระความร้อนรวมที่เท่ากัน การเพิ่มส่วนของภาระความร้อนแผ่รังสีจะช่วยเพิ่มการไหลของกระแสอากาศและการกระจายของสารปนเปื้อนได้ และอุณหภูมิของอากาศบริเวณกลางห้องยังต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้ใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นด้วย

Dale (1993) ทำการติดตั้งระบบผนังพื้นทำความร้อนแบบแผ่รังสี และระบบทำความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับในบ้านทดสอบเพื่อเก็บข้อมูล จากผลการที่ได้ชี้ให้เห็นว่าระบบทั้งสองไม่มีข้อแตกต่างในด้านประสิทธิภาพของพลังงานมากนัก โดยพลังงานรวมที่ใช้ในแต่ละระบบแตกต่างกันไม่เกิน 5 % แต่พบว่าในการใช้ผนังทำความร้อนแบบแผ่รังสีจะมีอุณหภูมิโดยรวมสูง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่สูงกว่า นอกจากนั้นยังพบว่าการกระจายของอุณหภูมิจากพื้นถึงเพดานมีรูปแบบที่แตกต่างกัน และที่ระดับพื้น และระดับเพดาน ระบบผนังทำความร้อนแบบแผ่รังสี สามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงกว่าระบบระบบทำความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ

Simmonds (1996) ทำการติดตั้งระบบผนังทำความเย็น ในงานวิจัยของเขาที่ทำในอาคารสำนักงานในประเทศจีน พื้นผิวทำความเย็นถูกต่อเข้ากับวงจรน้ำเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิน้ำเข้า 13 $^{O}$C และน้ำกลับ 17 $^{O}$C อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวทำความเย็นคือ 15 $^{O}$C อุณหภูมิของอากาศในห้องสามารถแปรเปลี่ยนระหว่าง 20 $^{O}$- 25 $^{O}$C ดังนั้นที่ความสามารถสูงสุด พื้นผิวทำความเย็นสามารถดึงความร้อนจากอากาศได้

$$q = \alpha(t_1 - t_2)$$

เมื่อ

q = ฟลักซ์ของการถ่ายเทความร้อน ($W/m^2$)

$\alpha$ = สัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวทำความเย็น และอากาศ (6 ถึง 8 $W/m^2$-K สำหรับการทำความเย็น)

$t_1$ = อุณหภูมิน้ำเข้า ($^OC$)

$t_2$ = อุณหภูมิน้ำออก ($^OC$)

Kochendorfer (1996) ได้ทำการทดสอบหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้โดยผนังทำความเย็น โดยห้องทดสอบที่ถูกปิดล้อมจะถูกใช้ในการทดสอบปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ทำได้ ความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยผนังทำความเย็น คำนวณได้โดยผลคูณของอัตราการไหลโดยมวล และความแตกต่างของเอนทาลปีของสารทำความเย็น โดยสมการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้ และความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็น แสดงได้เป็น

$$q = C \times \Delta t^n$$

ซึ่งค่าคงที่ (C) และ เลขชี้กำลัง (n ) ขึ้นอยู่กับระบบผนังทำความเย็น โดยแบบแบน และ ปิด มีเลขชี้กำลังประมาณ 1.1 สมการสำหรับความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็นคือ

$$\Delta t = \frac{(t_2 - t_1)}{ln[(t_{ref} - t_1)/(t_{ref} - t_2)]}$$

**เ มื่ อ**

$t_1$ = อุณหภูมิน้ำเข้า ( $^OC$ )

$t_2$ = อุณหภูมิน้ำกลับ ( $^OC$ )

$t_{ref}$ = อุณหภูมิอ้างอิง ( $^OC$ )

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

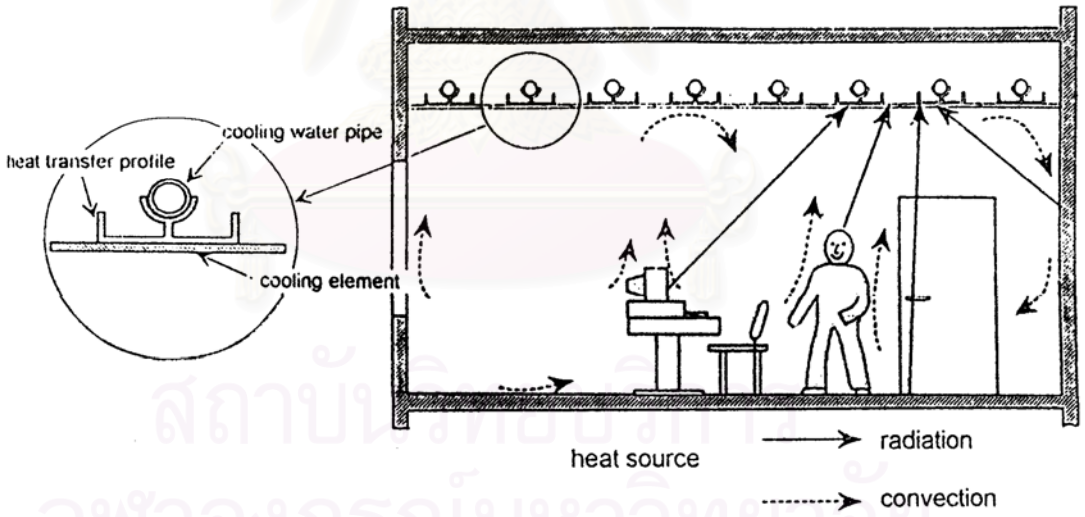
## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระบบผนังแผ่รังสีเป็นระบบทำความร้อน หรือทำความเย็นที่อาศัยการควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของผนัง เพดาน หรือพื้นที่จะทำหน้าที่เป็นผนังแผ่รังสี โดยอาศัยการไหลเวียนของน้ำ อากาศ หรือใช้กระแสไฟฟ้า โดยผนังแผ่รังสีนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อน หรือความเย็นหลักให้กับบริเวณปรับอากาศ และมีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญ 2 อย่างคือ การแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งระบบผนังแผ่รังสีที่ใช้ในระบบทำความเย็นโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ 2 รูปแบบคือ

1. แบบฝ้าเพดานโลหะ
2. แบบฝังท่อในเพดาน กำแพงหรือพื้น

แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงแบบฝ้าเพดานโลหะแต่เพียงอย่างเดียว

**ลักษณะและการทำงานของฝ้าเพดานโลหะทำความเย็น**

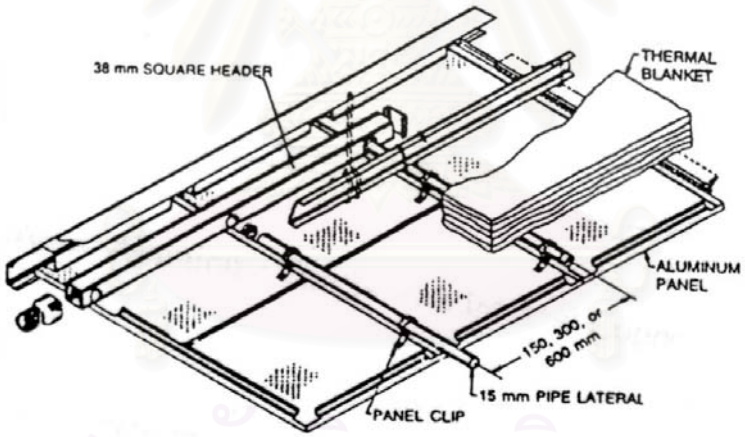



รูปที่ 2.1 แสดงกลไกการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น

ฝ้าเพดานทำความเย็นเป็นระบบทำความเย็นที่อาศัยกลไกการรับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรงจากผนังห้องในส่วนที่ไม่ได้ติดตั้งท่อที่มีสารทำความเย็นอยู่ภายใน รวมทั้งวัตถุ และบุคคลที่อยู่ภายในห้องด้วย และกลไกที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณชั้นอากาศที่อยู่ชิดกับผนังทำความเย็น แล้วอากาศที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนนี้จะเกิดการ

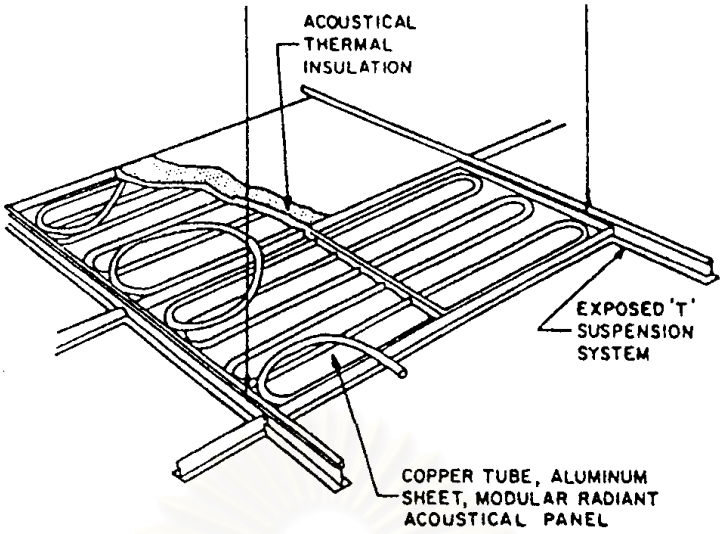
เคลื่อนตัวเข้าผสมกับอากาศที่อยู่ภายในห้องด้วยแรงลอยตัว กลไกที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เกิดจากฝ้าเพดานโลหะทำความเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาศัยอุปกรณ์ที่สำคัญคือ ท่อโลหะที่มีสารทำความเย็นไหลเวียนอยู่ภายในซึ่งสารทำความเย็นที่นิยมนำมาใช้คือน้ำ นำมายึดติดกับแผ่นโลหะน้ำหนักเบา แล้วอาศัยการนำความร้อนจากผนังทำความเย็นที่ได้รับจากการแผ่รังสีความร้อนจากผนัง วัตถุ และบุคคลในห้อง และการพาความร้อนจากอากาศภายในห้อง ผ่านท่อโลหะไปสู่น้ำหรือ สารทำความเย็นภายใน จากนั้นอาศัยเครื่องสูบน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำไปสู่เครื่องทำน้ำเย็น และไหลเวียนในระบบต่อไป

ฝ้าเพดานโลหะโดยทั่วไปมีอยู่ 3 รูปแบบ แบบที่หนึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างฝ้าเพดานโลหะทำความเย็นที่ใช้ท่อน้ำเย็นขนาด 15 mm ว่างห่างกัน 150 , 300 หรือ 600 มิลลิเมตร โดยต่อท่อน้ำเย็นแบบขนาน และจะมีแผ่นอลูมิเนียมเบาซึ่งถูกยึดด้วยคลิ๊ปติดกับท่อน้ำเย็นหล่านี้ และทำหน้าที่เป็นผนังทำความเย็นเมื่อมีน้ำเย็นไหลผ่านในท่อที่อยู่ด้านหลัง ส่วนทางด้านหลังจะมีฉนวนกันความร้อนปิดทับเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน



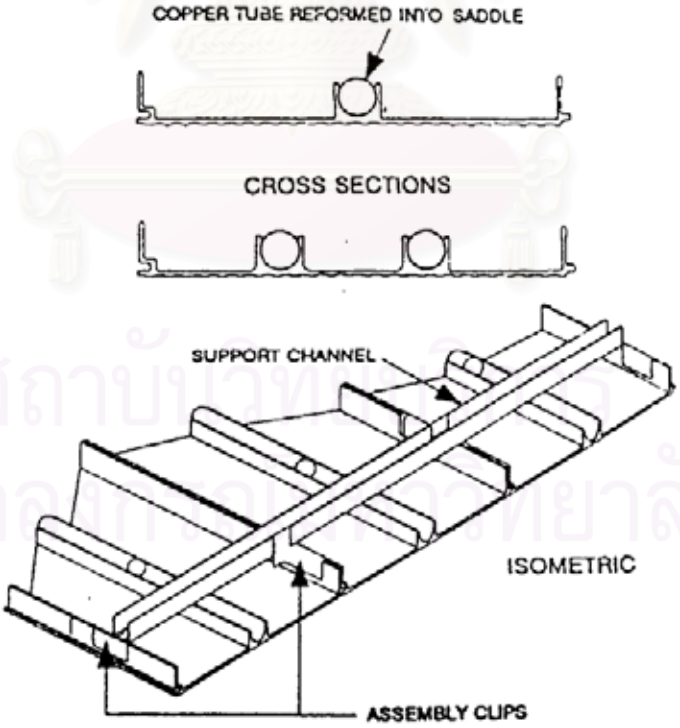

รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของฝ้าเพดานโลหะแบบที่หนึ่ง

ฝ้าเพดานโลหะแบบที่สองประกอบด้วยขดท่อทองแดง ยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้ปิดหน้าเพื่อจัดรูปแบบเป็นผนังโมดูล่าร์ ในรูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างฝ้าเพดานโลหะที่ใช้ท่อทองแดงฝังตัวในกรอบอลูมิเนียม อย่างไรก็ดีวิธีอื่นๆ ที่ใช้ยึดท่อทองแดงก็ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิผลเท่าเทียมกัน




รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของฝ้าเพดานโลหะแบบที่สอง

ฝ้าเพดานโลหะแบบที่สามเป็นแผ่นอลูมิเนียมสำเร็จรูป ซึ่งมีรางสำหรับยึดท่อทองแดงอยู่ด้านหลังดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของฝ้าเพดานโลหะแบบที่สาม

**ข้อดีของระบบผนังแผ่รังสีคือ**

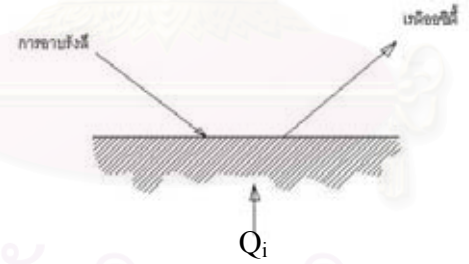
- ระดับความสบายดีกว่าระบบปรับอากาศแบบเดิม เนื่องจากภาระความร้อนแบบแผ่รังสีถูกกำจัดโดยตรง และการเคลื่อนที่ของอากาศในบริเวณปรับอากาศอยู่ในระดับความเร็วในการระบายอากาศตามปกติ เนื่องจากไม่ใช้พัดลมเป่าลมเย็น
- ไม่มีอุปกรณ์ในระบบที่จำเป็นจะต้องติดตั้งที่ด้านนอกของกำแพง ซึ่งจะช่วยในการออกแบบอาคารให้ง่ายขึ้น และเกิดความสวยงาม
- อุปกรณ์ทางกลเกือบทั้งหมดของระบบสามารถติดตั้งให้อยู่รวมกัน ซึ่งเป็นการง่ายต่อการเดินระบบ และการซ่อมบำรุง
- ไม่ต้องการพื้นที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทางกลภายในห้องปรับอากาศ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานในบริเวณพื้นที่จำกัดหรือจำเป็นเพื่อการอื่น และ บริเวณที่ต้องการความสะอาด
- ในระบบจะไม่มีคอยล์เย็นที่มีพื้นผิวเปียกซึ่งมีโอกาสในการเกิดเชื้อโรค หรือสารปนเปื้อนในอากาศ
- เสียงรบกวนที่เกิดจากคอยล์ และอุปกรณ์เหนี่ยวนำเช่นพัดลม จะถูกกำจัดออกไป
- ภาระทำความเย็นสูงสุดจะลดลงเนื่องจากการเก็บสะสมความเย็นภายในโครงสร้างของระบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**การแลกเปลี่ยนพลังงานการแผ่รังสีในพื้นผิวล้อมรอบปิด**

การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของฝ้าเพดานทำความเย็นสามารถทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวล้อมรอบปิดซึ่งเป็นเรื่องที่ซับซ้อน แต่สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้นโดยอาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ทุกพื้นผิวมีอุณหภูมิคงที่สม่ำเสมอ
2. ฟลักซ์การอาบรังสี (irradiation, G) และเรดิออซิตี้ (radiosity, J) มีค่าคงที่สม่ำเสมอบนแต่ละพื้นผิว
3. แต่ละพื้นผิวพิจารณาเป็นพื้นผิวแผ่รังสีแบบแพร่กระจายสม่ำเสมอ และเป็นพื้นผิวสะท้อนรังสีแบบแพร่กระจายสม่ำเสมอ และเป็นพื้นผิวเทา กล่าวคือสภาพเปล่งรังสี (emissiviity, $\varepsilon$) สภาพสะท้อนรังสี (reflectivity, $\rho$) และสภาพดูดกลืนรังสี (absorptivity, $\alpha$) ของแต่ละพื้นผิวมีค่าคงที่สม่ำเสมอไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง และความยาวคลื่น
4. ทุกพื้นผิวเป็นผิวทึบแสง
5. สิ่งแวดล้อมหรือแก๊สในพื้นผิวล้อมรอบปิดไม่มีผลต่อการแผ่รังสี




รูปที่ 2.5 แสดงสมดุลการแผ่รังสีของพื้นผิว i ตามสมการที่ 2.1

พิจารณาสมดุลการแผ่รังสีของพื้นผิว i ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อ $Q_i$ เป็นอัตราของพลังงานซึ่งถูกถ่ายเทให้กับพื้นผิวโดยตัวกลางอื่น เพื่อรักษาอุณหภูมิของพื้นผิวให้คงที่ ซึ่ง $Q_i$ นี้จะมีค่าเท่ากับอัตรารังสีสุทธิที่แผ่ออกจากพื้นผิว i คือมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างเรดิออซิตี้ และการอาบรังสีของพื้นผิว

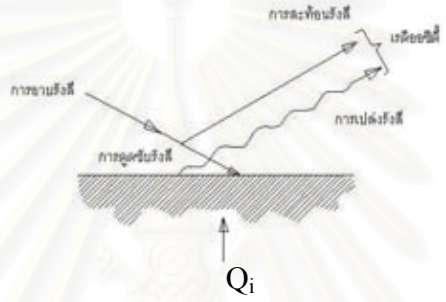
$$Q_i = A_i\left(J_i - G_i\right) \tag{2.1}$$

จากนิยามของเรดิออซิตี้คือผลรวมของรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวเองกับรังสีที่ถูกสะท้อนออกโดยพื้นผิว

$$J_i \equiv E_i + \rho_i G_i \tag{2.2}$$

นำไปแทนในสมการด้านบนจะได้

$$Q_i = A_i \left( E_i - \alpha_i G_i \right) \tag{2.3}$$




รูปที่ 2.6 แสดงสมดุลการแผ่รังสีตามสมการที่ 2.3

เมื่อ

$G_i$ = การอาบรังสีของพื้นผิว (W/m$^2$)

$J_i$ = เรดิออซิตี้ของพื้นผิว (W/m$^2$)

$E_i$ = การเปล่งรังสีของพื้นผิว (W/m$^2$)

$E_{bi}$ = กำลังการแผ่รังสีของวัตถุดำ (W/m$^2$) (มีค่าเท่ากับ $\sigma T_i^4$)

$\varepsilon_i$ = สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิว

$\rho_i$ = สภาพสะท้อนรังสีของพื้นผิว

$\alpha_i$ = สภาพดูดกลืนรังสีของพื้นผิว

$\sigma$ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มานน์ = 5.669 x 10-8 W/m$^2$-K$^4$

$T_i$ = อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

สำหรับพื้นที่ผิวทึบแสง แผ่รังสีแบบแพร่กระจายสม่ำเสมอ และเป็นพื้นผิวเทา เรดิออซิตี้จะแสดงได้เป็น

$$J_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) G_i \tag{2.4}$$

แก้สมการหาค่า $G_i$ และแทนกลับในสมการที่ 2.1 จะได้ว่า

$$Q_i = A_i\left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{bi}}{1-\varepsilon_i}\right) \tag{2.5}$$

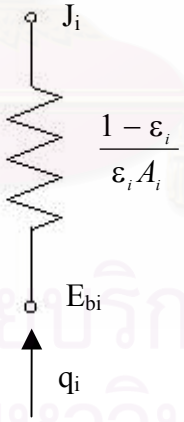
$$Q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1-\varepsilon_i)/\ \varepsilon_i A_i} \tag{2.6}$$

หรือ

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1-\varepsilon_i)/\ \varepsilon_i}$$

เมื่อ $q_i$ คืออัตราการแผ่รังสีต่อหน่วยพื้นที่ของพื้นผิว ($W/m^2$)

สมการที่ 2.6 เป็นสมการแสดงค่าอัตราการแผ่รังสีจากพื้นผิว เมื่อพิจารณาจากสมการจะพบว่าอัตราการแผ่รังสีนี้เกิดขึ้นด้วยค่าความแตกต่างของกำลังการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิพื้นผิว และเรดิออซิตี้ของพื้นผิว ( $E_{bi} - J_i$ ) และมีค่าความต้านทานการแผ่รังสีของพื้นผิวคือ $(1 - \varepsilon_i)/ \varepsilon_i A_i$ ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับวงจรทางไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7




รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบการแผ่รังสีของพื้นผิวด้วยวงจรทางไฟฟ้า

ในสมการที่ 2.6 การหาอัตราการแผ่รังสีของพื้นผิวหนึ่งจะต้องทราบค่าเรดิออซิตี้ของพื้นผิวนั้น ซึ่งในการหาค่าเรดิออซิตี้จำเป็นต้องพิจารณาการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวในบริเวณล้อมรอบปิดทั้งหมดพร้อมกันดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การอาบรังสีของพื้นผิว i สามารถหาได้จากเรดิออซิตี้ของพื้นผิวทั้งหมดในบริเวณล้อมรอบปิด ซึ่งนิยามของตัวประกอบรูปร่างอัตราการแผ่รังสีรวมของทุกพื้นผิวที่ไปสู่พื้นผิว i (รวมพื้นผิวตัวมันเองด้วย) คือ

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^{N} F_{ji} A_j J_j \tag{2.7}$$

จากความสัมพันธ์กลับไปมา

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^{N} A_i F_{ij} J_j \tag{2.8}$$

ขจัดค่า $A_i$ และแทนค่า $G_i$ ลงในสมการที่ 2.1 จะได้

$$Q_i = A_i \left( J_i - \sum_{j=1}^{N} F_{ij} J_j \right) \tag{2.9}$$

หรือ

$$q_i = \left( J_i - \sum_{j=1}^{N} F_{ij} J_j \right)$$

**การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี**

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของฝ้าเพดานทำความเย็นจะอาศัยสมการพื้นฐานการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวล้อมรอบปิดสมการที่ 2.9 นี้ เมื่อพิจารณาพื้นผิว i คือพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น

$$q_r = J_p - \sum_{j=1}^{n} F_{pj} J_j \tag{2.10}$$

เมื่อ

$q_r$ = การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสุทธิต่อพื้นที่โดยฝ้าเพดานทำความเย็น ($W/m^2$)

$J_p$ = เรดิออซิตี้รวมที่ปลดปล่อยออกจากพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($W/m^2$)

$J_j$ = เรดิออซิตี้จากพื้นผิวอื่นที่ไม่ทำความเย็นในห้อง ($W/m^2$)

$F_{pj}$ = ตัวประกอบมุมการแผ่รังสีระหว่างฝ้าเพดานทำความเย็น และพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ทำความเย็นในห้อง

n = จำนวนพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็นภายในห้อง

การพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสุทธิของฝ้าเพดานทำความเย็นด้วยสมการที่ 2.10 จำเป็นต้องคำนวณค่าเรดิออซิตี้ และตัวประกอบมุมการแผ่รังสีของแต่ละพื้นผิว แต่อย่างไรก็ดีวิธีการหลายวิธีถูกพัฒนาขึ้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวล้อมรอบปิด วิธีการหนึ่งถูกเสนอโดย Walton(1980) ซึ่งได้เสนอวิธีหาค่าการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างพื้นผิวล้อมรอบปิดด้วยวิธีอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (MRT) โดยการลดพื้นผิวที่มีอยู่หลายพื้นผิว แทนที่โดยประมาณด้วยสองพื้นผิว ในกรณีของการแลกเปลี่ยนรังสีของผนังภายในห้อง พื้นผิวหนึ่งคือพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อีกพื้นผิวหนึ่งคือพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ประกอบรวมเป็นพื้นผิวล้อมรอบปิด ถูกสมมติรวมเป็นพื้นผิวเดียวกันซึ่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมอเท่ากับ $T_r$ โดยพื้นผิวที่สมมติขึ้นนี้จะมีพื้นที่การแผ่รังสีเท่ากับผลรวมของพื้นผิวอื่นๆ ที่ไม่ใช่ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ประกอบรวมเป็นพื้นผิวล้อมรอบปิด และมีอุณหภูมิของพื้นผิว ที่ทำให้เกิดปริมาณการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจากพื้นผิวที่สมมติขึ้นเท่ากับพื้นผิวที่มีหลายพื้นผิวที่เป็นพื้นผิวจริง ซึ่งสมการที่ได้จากวิธี MRT นี้คือ

$$q_r = \sigma F_r \left[ T_p^4 - T_r^4 \right] \qquad (2.11)$$

เมื่อ

$q_r$ = ฟลักซ์ของการถ่ายเทความร้อนสุทธิโดยการแผ่รังสีของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($W/m^2$)

$F_r$ = ตัวประกอบการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสี

$T_p$ = อุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น (K)

$T_r$ = อุณหภูมิของพื้นผิวสมมติ (K)

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

โดยอุณหภูมิของพื้นผิวที่สมมติขึ้นคำนวนได้โดยใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ และสภาพเปล่งรังสีของทุกพื้นผิวที่ไม่ได้ทำความเย็นดังแสดงในสมการ

$$T_r = \frac{\sum_{j \neq p}^{n} A_j \varepsilon_j T_j}{\sum_{j \neq p}^{n} A_j \varepsilon_j} \qquad (2.12)$$

เมื่อ

$A_j$ = พื้นที่ของแต่ละพื้นผิวที่ไม่ใช่ฝ้าเพดานทำความเย็น ($m^2$)

$\varepsilon_j$ = สภาพเปล่งรังสีของแต่ละพื้นผิวที่ไม่ใช่ฝ้าเพดานทำความเย็น

$T_j$ = อุณหภูมิของแต่ละพื้นผิวที่ไม่ใช่ฝ้าเพดานทำความเย็น (K)

เมื่อค่าของสภาพเปล่งรังสีของแต่ละพื้นผิวมีค่าใกล้เคียงกันแล้ว สมการที่ 2.12 จะกลายเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น (AUST) ซึ่งจะใช้เป็นอุณหภูมิตัวแทนของพื้นผิวทั้งหมดดังกล่าว

ส่วนตัวประกอบการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีของสองพื้นผิวคือ ฝ้าเพดานทำความเย็น และพื้นผิวสมมติคือ

$$F_r = \frac{1}{\frac{1}{F_{p-r}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_p} - 1\right) + \frac{A_p}{A_r}\left(\frac{1}{\varepsilon_r} - 1\right)} \qquad (2.13)$$

เมื่อ

$F_{p-r}$ = ตัวประกอบรูปร่างของฝ้าเพดานทำความเย็นสู่พื้นผิวสมมติ

$A_p$ = พื้นที่ของฝ้าเพดานทำความเย็น ($m^2$)

$A_r$ = พื้นที่ของพื้นผิวสมมติ ($m^2$)

$\varepsilon_p$ = สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น

$\varepsilon_r$ = สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวสมมติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในทางปฏิบัติค่าของสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวที่ไม่ใช่โลหะ หรือพื้นผิวโลหะที่ทาสีแล้วจะมีค่าประมาณ 0.9 เมื่อนำค่าของสภาพเปล่งรังสีนี้ไปใช้ในสมการที่ 2.13 ตัวประกอบการแลกเปลี่ยนการแผ่รังสี จะมีค่าประมาณ 0.87 สำหรับห้องส่วนใหญ่ แทนค่านี้ลงในสมการที่ 2.11 ค่า $\sigma F_r$ จะมีค่าประมาณ $5 \times 10^{-8}$ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าเท่ากับ

$$q_r = 5 \times 10^{-8} \left[ (AUST + 273)^4 - (t_p + 273)^4 \right] \qquad (2.14)$$

เมื่อ

$t_p$ = อุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^{o}C$)

AUST = อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น ($^{o}C$)

**การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน**

การพาความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบที่ใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นโดยปกติจะเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ นั้นคือการเคลื่อนที่ของมวลอากาศเกิดโดยการถ่ายเทความร้อนออกจากชั้นอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติปัจจัยหลายอย่างเช่น ลมรั่วเข้าสู่ห้อง หรือการเคลื่อนที่ของคนก็อาจรบกวน และมีผลกระทบต่อกลไกการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และเหนี่ยวนำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับได้

อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับไม่ควรนำมาใช้ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นส่วนที่คาดการได้ยากในรูปแบบและ สมรรถนะ อีกทั้งการพาความร้อนแบบบังคับก็ไม่ได้เพิ่มสมรรถนะในการทำความเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย

Min et al. (1956) ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ตำแหน่งกึ่งกลางห้องขนาด 3000 mm x 6000 mm ($D_e$= 4 m) ซึ่งสมการที่ได้จากการวิจัยนี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวนการพาความร้อนแบบธรรมชาติของฝ้าเพดานทำความเย็นได้คือ

$$q_c = \frac{2.42\left(t_p - t_a\right)^{1.31}}{D_e^{0.08}} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$q_c$ = ฟลักซ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ($W/m^2$)

$t_p$ = อุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^oC$)

$t_a$ = อุณหภูมิของอากาศในห้อง ($^oC$)

$D_e$ = เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของฝ้าเพดานทำความเย็น มีค่าเท่ากับ (4x พื้นที่ / เส้นรอบรูป) (m)

อย่างไรก็ดี Schutrum และ Vouris (1954) ได้ทำการทดลองพบว่าขนาดห้องโดยปกติแล้วจะไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ยกเว้นในกรณีพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่มากๆ เช่น โรงเก็บเครื่องบิน หรือคลังสินค้า ขนาดของพื้นที่จึงจะมีผลกระทบต่ออัตราการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งในกรณีเช่นนั้นการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติควรใช้สมการที่ 2.15 แต่ในกรณีห้องที่มีขนาดปกติสมการที่ได้จากงานวิจัยของ Schutrum และ Vouris (1954) จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณอัตราการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

$$q_c = 2.12\left(t_a - t_p\right)^{1.31} \quad (2.16)$$

**ความร้อนจากการแผ่รังสีของหลอดไฟ**

$$q_b = n_b A_{b-p} \varepsilon_b \sigma (T_b^4 - T_p^4) \quad (2.17)$$

เมื่อ

$q_b$ = การแผ่รังสีของหลอดไฟไปสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น ($W/m^2$)

$T_b$ = อุณหภูมิของผิวแก้วของหลอดไฟ (K)

$T_p$ = อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น (K)

$A_{b-p}$ = พื้นที่ผิวของหลอดไฟ ($m^2$)

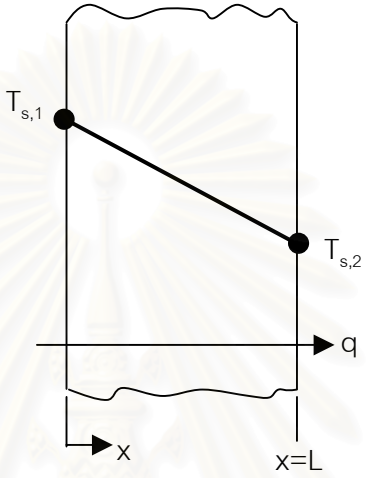
$n_b$ = จำนวนหลอดไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ดวง/$m^2$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\varepsilon_b$ = สภาพเปล่งรังสีของผิวแก้วของหลอดไฟ

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

**การนำความร้อนผ่านผนัง**




รูปที่ 2.8 การนำความร้อนผ่านแผ่นเรียบ

การกระจายของอุณหภูมิในแนวความลึกผนังพิจารณาได้โดยใช้สมการความร้อน สำหรับกรณีสภาวะคงตัว และไม่มีการสร้างความร้อนภายใน และสภาพการนำความร้อนของผนังมีค่าคงที่สม่ำเสมอ สมการความร้อนคือ

$$\frac{d}{dx}\left(k\frac{dT}{dx}\right)=0 \qquad (2.18)$$

โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต

$$T(0) = T_{s,1} \quad \text{และ} \quad T(L) = T_{s,2}$$

จะได้การกระจายอุณหภูมิในแนวความลึกของผนังคือ

$$T(x)=(T_{s,2}-T_{s,1})\frac{x}{L}+T_{s,1} \qquad (2.19)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการฟูเรียร์จะได้อัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็น

$$q = -kA\frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) \qquad (2.20)$$

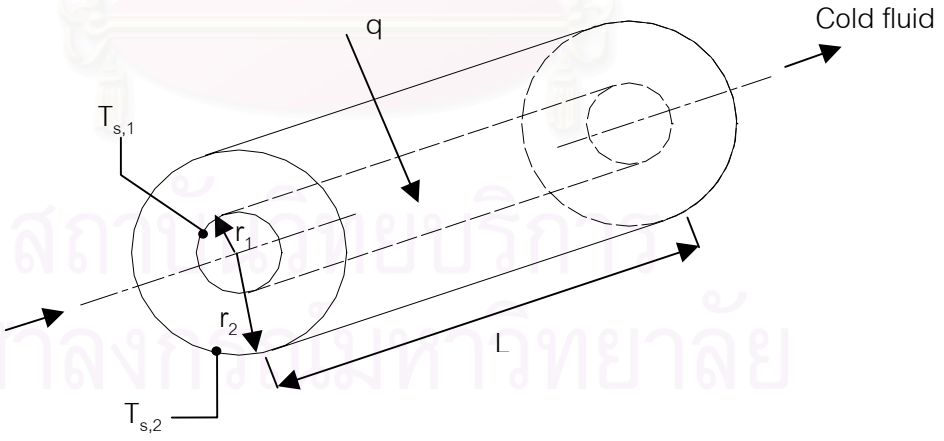
เมื่อ A คือพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของการถ่ายเทความร้อน และจะได้อัตราการนำความร้อนผ่านผนังต่อหน่วยพื้นที่เป็น

$$q'' = \frac{q}{A} = \frac{k}{L}(T_{s,1} - T_{s,2}) \qquad (2.21)$$

ดังนั้นความต้านทานทางความร้อนของผนังหนึ่งหน่วยพื้นที่แสดงได้เป็น

$$r_{p,cond} = \frac{L}{k} \qquad (2.22)$$

**การนำความร้อนผ่านผนังท่อทรงกระบอก**




รูปที่ 2.9 การนำความร้อนผ่านผนังท่อทรงกระบอก

สำหรับท่อทรงกระบอกที่สภาวะคงตัว และไม่มีการสร้างความร้อนภายใน สมการความร้อนในพิกัดทรงกระบอกคือ

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(kr\frac{dT}{dr}\right)=0 \qquad (2.23)$$

การกระจายของอุณหภูมิในผนังท่อตามแนวรัศมีหาได้โดยการแก้สมการที่ 2.23 ซึ่งมีสมมติฐานว่าค่าสภาพการนำความร้อนของผนังท่อมีค่าคงที่สม่ำเสมอ ทำการอินทีเกรตสมการที่ 2.23 สองครั้ง และใช้เงื่อนไขขอบเขต

$$T(r_1) = T_{s,1} \quad \text{และ} \quad T(r_2) = T_{s,2}$$

จะได้การกระจายอุณหภูมิในผนังท่อตามแนวรัศมีเป็น

$$T(r)=\frac{T_{s,1}-T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)}\ln\left(\frac{r}{r_2}\right)+T_{s,2} \qquad (2.24)$$

แทนสมการของการกระจายของอุณหภูมิลงในสมการฟูเรียร์

$$q=-kA\frac{dT}{dr}=-k(2\pi rL)\frac{dT}{dr} \qquad (2.25)$$

จะได้อัตราการนำความร้อนผ่านผนังท่อเป็น

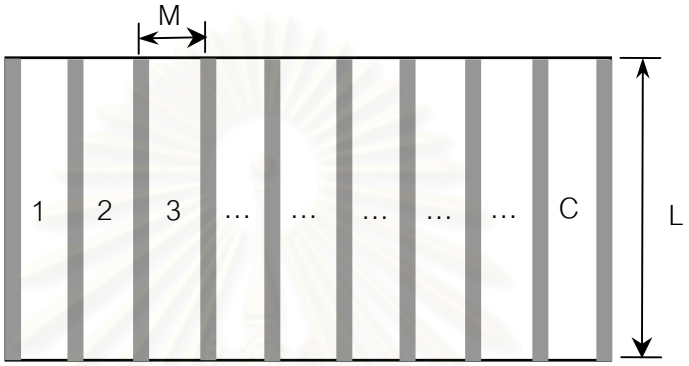
$$q=\frac{2\pi Lk(T_{s,1}-T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \qquad (2.26)$$

ดังนั้นความต้านทานทางความร้อนของผนังท่อทรงกระบอกแสดงได้เป็น

$$R_{t,cond}=\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \qquad (2.27)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณาแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีความกว้างเท่ากับ L มีระยะห่างระหว่างท่อน้ำเย็นวัดจากจุดศูนย์กลางเท่ากับ M และมีจำนวนระยะห่างระหว่างท่อน้ำเย็นเป็น C




รูปที่ 2.10 แสดงแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นอย่างง่ายๆ

ซึ่งจะได้พื้นที่ของฝ้าเพดานทำความเย็นเป็น

$$A_{panel} = CML \tag{2.28}$$

จาก $R_{t,cond} = \ln(r_2/r_1)/(2\pi Lk)$ ทำการเปลี่ยนค่า $R_{t,cond}$ ที่เป็นค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อน้ำเย็นคิดเทียบต่อความยาวของท่อ ไปเป็นค่า $r_t$ ที่เป็นค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อน้ำเย็นคิดเทียบต่อพื้นที่ของแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็น ต่อระยะห่างของท่อน้ำเย็นดังนี้

$$A_{panel}R_{t,cond} = CML\frac{ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}$$

$$A_{panel}R_{t,cond} = CM\frac{ln(r_2/r_1)}{2\pi k}$$

$$\therefore r_{t,cond} = \frac{A_{panel}R_{t,cond}}{CM} = \frac{ln(r_2/r_1)}{2\pi k} \tag{2.29}$$

# บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยได้ทำการติดตั้งแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นที่จัดทำขึ้นขนาด 50 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร จำนวน 8 แผ่น บนห้องจำลองขนาด 1 เมตร x 2 เมตร ที่มีความสูง 1 เมตร ทั้งนี้การติดตั้งแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นในการทดลองจะทำการต่ออนุกรมกัน 2 แผ่นฝ้าเพดาน และต่อขนานกัน 4 ชุด ซึ่งในการศึกษาจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็น และภาระความร้อน เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ที่มีต่อสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น

ค่าตัวแปรที่พิจารณาในการวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 แบบ คือ ตัวแปรกำหนด ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ตัวแปรกำหนดที่ควบคุมให้คงที่ ได้แก่ อุณหภูมิแวดล้อมของห้องจำลองซึ่งจะอยู่ในช่วง 30 +/-1 $^{O}$C

2. ตัวแปรอิสระ เป็นตัวแปรที่จะแปรเปลี่ยนในแต่ละกรณีของการทดลอง ซึ่งจะมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และภาระความร้อนที่ใส่ให้กับห้องจำลอง

3. ตัวแปรตาม เป็นค่าที่แปรเปลี่ยนไปเมื่อตัวแปรอิสระมีการเปลี่ยนแปลง ในการวิจัยนี้ได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น อุณหภูมิของน้ำเย็นขาออกของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศภายในห้อง การถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น

## 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสูบน้ำ

- MARQUIS รุ่น MQP60 แบบเซนติฟูกัล ขนาด 1/2 แรงม้า
- มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลท์ กระแส 2.5 A กำลังไฟ 0.37 KW ความเร็วรอบ 2900 รอบต่อนาที
- ท่อด้านส่ง และด้านดูดขนาด 1 นิ้ว
- หัวน้ำในการส่งสูงสุด 42 เมตร หัวน้ำด้านดูด 9 เมตร
- อัตราการไหลสูงสุด 40 ลิตรต่อนาที

ดังแสดงในรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 เครื่องสูบน้ำ

2. ท่อน้ำและข้อต่อต่างๆ

ในการทดลองนี้จะใช้ท่อน้ำ และข้อต่อ PVC class 13.5 2 ขนาดคือ 1 นิ้ว และ ½ นิ้ว โดยท่อน้ำ และข้อต่อต่างๆ ขนาด 1 นิ้ว ใช้ในช่วงท่อส่งน้ำกลับ จนถึงช่วงท่อส่งน้ำเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น ส่วนท่อน้ำ และข้อต่อต่างๆ ขนาด ½ นิ้ว ใช้ในช่วงแยกส่งน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. วาล์วน้ำ

ในการทดลองนี้จะใช้วาล์วน้ำชนิด Gate valve 2 ขนาด ตามขนาดของท่อน้ำ และข้อต่อต่างๆ

วาล์วขนาด 1 นิ้ว ใช้ 2 ตัวในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น และ ควบคุมน้ำเย็นบายพาทกลับเข้าสู่ถังเก็บน้ำ

วาล์วขนาด ½ นิ้ว ใช้ 4 ตัว เพื่อเฉลี่ยปริมาณการไหลของน้ำที่เข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็นทุกแผ่น

4. ถังเก็บน้ำเย็น

ถังเก็บน้ำเย็นที่ใช้ในการทดลองทำจากแผ่นเหล็กกล้ากันสนิม รูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 70 เซนติเมตร จุน้ำเย็นได้สูงสุด 137 ลิตร หุ้มด้วยฉนวนยางความหนาแน่น 5 ปอนด์/ลบ.ฟุต มีสภาพการนำความร้อน 0.26 BTU-in / $ft^2$-hr-$^oF$ ความหนา ½ นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ถังเก็บน้ำเย็น

5. เครื่องทำน้ำเย็น

เครื่องทำน้ำเย็นที่ใช้การทดลองนี้เป็นเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ใช้สารทำความเย็น R-22 ระบบไฟฟ้า 220-240 โวลท์ 1 เฟส กระแสไฟที่คอมเพรสเซอร์ 11.3 A กระแสไฟที่มอเตอร์พัดลม 0.46 A ขนาดทำความเย็นสูงสุด 7.03 กิโลวัตต์ ขนาดท่อน้ำเข้า - ออก 1 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 เครื่องทำน้ำเย็น

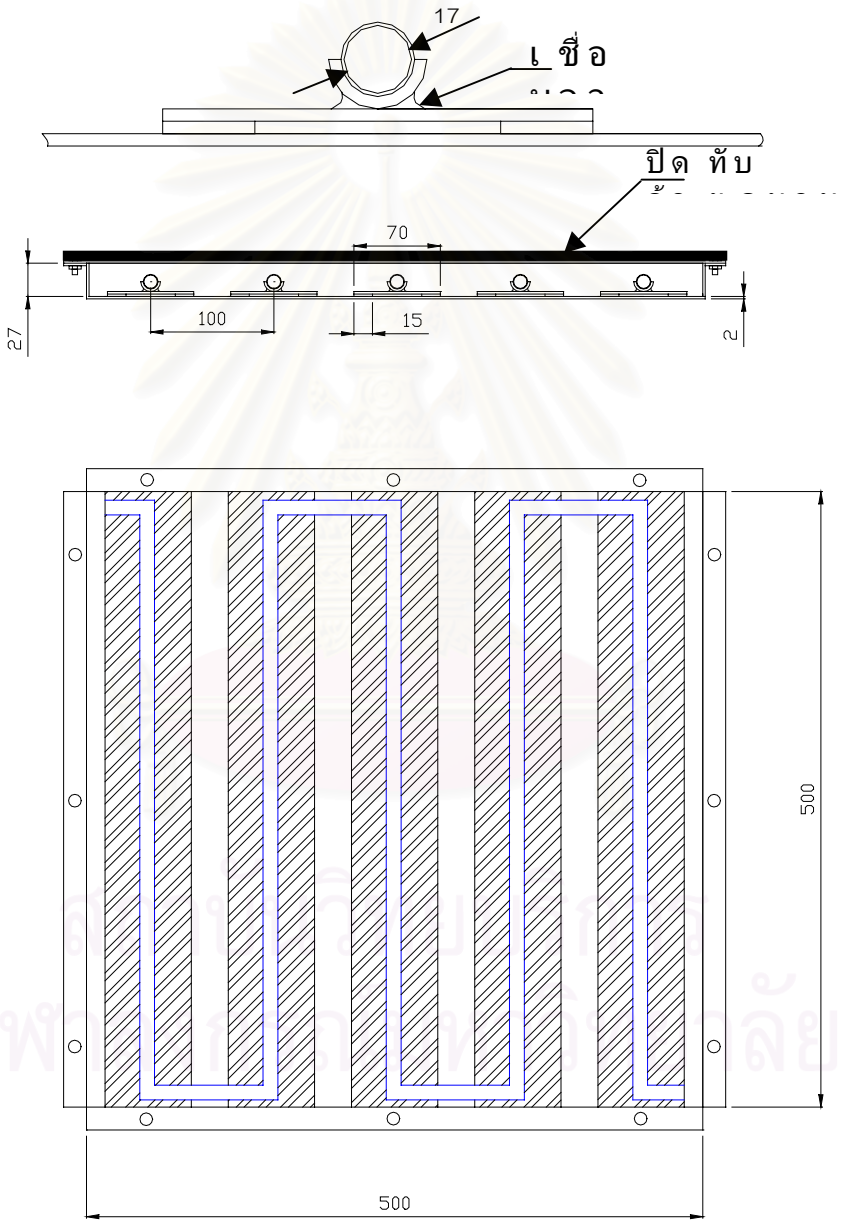
6. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็น

เครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบดิจิตอล ใช้ระบบไฟฟ้า 220 โวลต์ ช่วงอุณหภูมิทำงาน - 5 องศาเซลเซียส ถึง 55 องศาเซลเซียส มีความละเอียด 0.1 $^{o}$C ช่วงตัดต่ออุณหภูมิ +/- 0.1 $^{o}$C ดังแสดงในรูปที่ 3.4

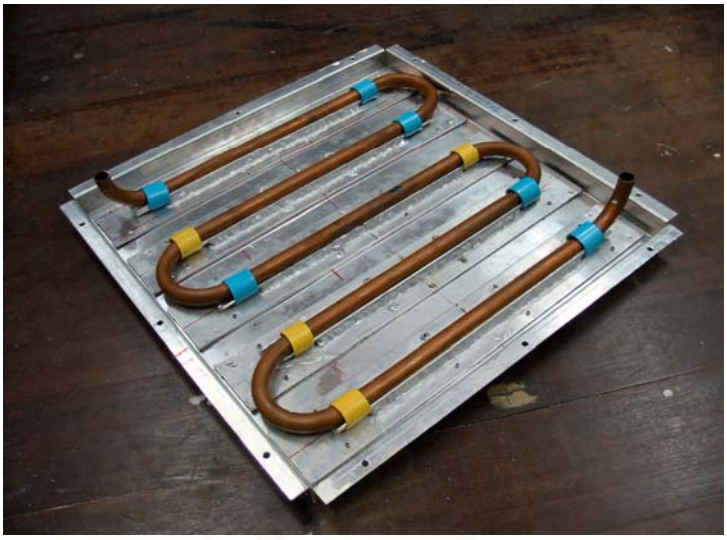
รูปที่ 3.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็น

7. ฝ้าเพดานทำความเย็น

ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในการทดลองทำจากแผ่นอลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร พับขึ้นรูป มีขนาด 50 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร และมีท่อทองแดงสำหรับน้ำเย็นไหลผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 17 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 19 มิลลิเมตร ยึดติดทางด้านหลังแล้วปิดทับด้วยฉนวนยางเช่นเดียวกับถังเก็บน้ำเย็นดังแสดงในรูปที่ 3.5




รูปที่ 3.5 ก แบบแสดงขนาดของฝ้าเพดานทำความเย็น



รูปที่ 3.5 ข ฝ้าเพดานทำความเย็นที่จัดทำขึ้น

8.ห้องจำลอง

ห้องจำลองในการทดลองนี้มีขนาด 1 เมตร x 2 เมตร สูง 1 เมตร ทำจากไม้อัดหนา 4 มิลลิเมตร โครงสร้างยึดด้วยเหล็กฉากเจาะรู ติดตั้งด้วยแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นที่ต่อขนานกัน 4 ชุด ทางด้านบนโดยแต่ละชุดเป็นการต่ออนุกรมกัน 2 แผ่นฝ้าเพดาน ดังแสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 ห้องจำลอง

9. เครื่องเก็บข้อมูล

เครื่องเก็บข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ใช้ร่วมกับตัวเลือกช่องสัญญาณ สามารถวัดอุณหภูมิได้ 25 ช่อง มีความละเอียด 0.1 °C ดังแสดงในรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 เครื่องเก็บข้อมูล

10. เทอร์โมคัปเปิล

ในการทดลองนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล ติดตั้งจำนวน 25 จุด

11. เทอร์โมมิเตอร์

ในการทดลองนี้ใช้เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแก้ว พิสัยวัดอุณหภูมิ 10 °C ถึง 50 °C ความละเอียด 0.5 °C เพื่อวัดอุณหภูมิแวดล้อมห้องจำลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ – ความชื้น

เครื่องมือวัดอุณหภูมิ-ความชื้นที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบดิจิตอล มีความละเอียดในการวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ 0.1 °C และ 0.1% ตามลำดับ

13. ถังตวงน้ำ

ใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นโดยใช้ร่วมกับนาฬิกาจับเวลา ทำจากถังน้ำพลาสติก ซึ่งทำมาตราส่วนบนถัง ขนาดความจุ 9 ลิตร มีความละเอียด 1 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 ถังตวงน้ำ

14. ชุดหลอดไฟสร้างภาระความร้อน

ในการทดลองนี้ใช้หลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 220 โวลต์ พร้อมฐานรองหลอดไฟ จำนวน 4 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 ชุดหลอดไฟสร้างภาระความร้อน

15. ฉนวนกันความร้อน

ในการทดลองนี้ใช้ฉนวนยาง ความหนาแน่น 5 ปอนด์/ลบ.ฟุต มีสภาพการนำความร้อน 0.26 BTU-in / $ft^2$-hr-$^{\circ}$F ความหนา ½ นิ้ว ใช้หุ้มถังเก็บน้ำเย็น ท่อส่งน้ำเย็น ส่วนบนของฝ้าเพดานทำความเย็น และปิดทับบริเวณพื้นผิวที่ต้องวัดอุณหภูมิพื้นผิวด้วยเทอร์โมคัปเปิล เพื่อป้องกันการรบกวนเนื่องจากอุณหภูมิอากาศ

## 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้ทำการจัดสร้างชุดทดลองขึ้นเพื่อทำการทดลอง โดยชุดทดลองที่ใช้ในการวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. อุปกรณ์ในระบบทางเดินของน้ำ ได้แก่

    1.1 เครื่องสูบน้ำ

    1.2 ท่อน้ำ และข้อต่อต่างๆ

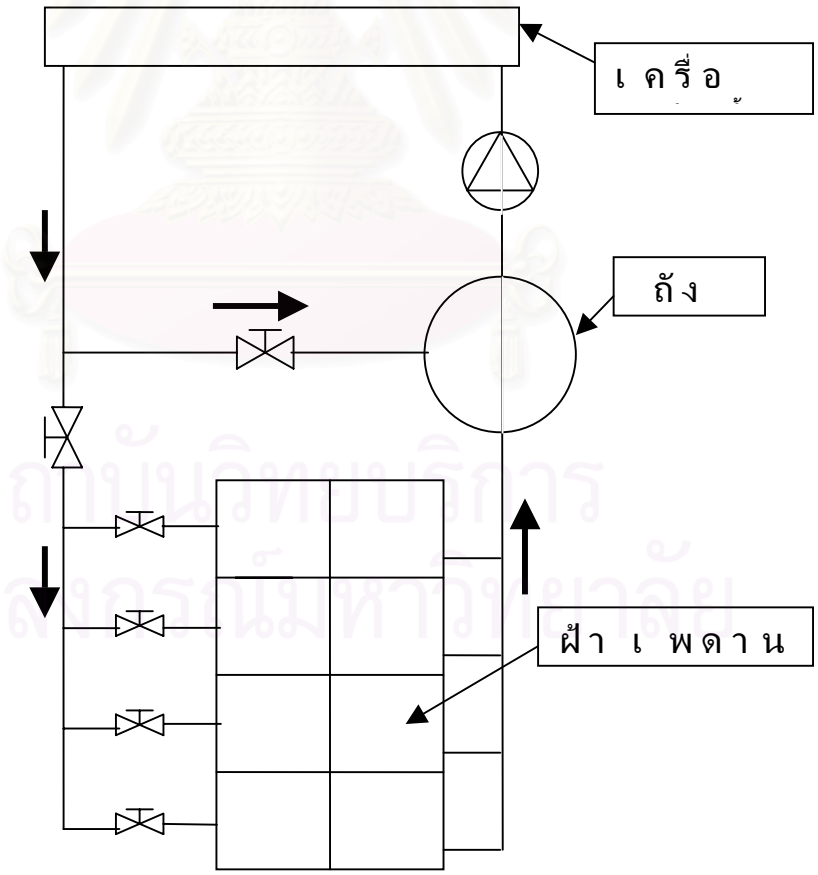
    1.3 วาล์วน้ำ

    1.4 ถังเก็บน้ำเย็น

    1.5 ฉนวนกันความร้อน

    1.6 ถังตวงน้ำ

ในส่วนของระบบทางเดินของน้ำดังรูปที่ 3.10 น้ำจะถูกสูบจากถังเก็บน้ำเย็น โดยเครื่องสูบน้ำผ่านท่อขนาด 1 นิ้ว ไปยังเครื่องทำน้ำเย็น และถูกลำเลียงกลับไปยังถังเก็บน้ำเย็นเป็นวงจรเช่นนี้ เพื่อทำอุณหภูมิน้ำเย็นให้ได้ตามต้องการในช่วงก่อนการทดลอง เมื่อน้ำเย็นมีอุณหภูมิในระดับที่ต้องการแล้วจะปิดวาล์วด้านส่งน้ำเย็นกลับ และจะเปิดวาล์วในส่วนที่จะจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นผ่านท่อขนาด 1 นิ้ว ในกรณีอัตราการไหลรวม 2 ลิตรต่อนาที จะเปิดวาล์วด้านส่งน้ำกลับบางส่วนเพื่อควบคุมอัตราการไหล จากนั้นน้ำเย็นจะถูกลำเลียงผ่านท่อแยกไหลขนาด ½ นิ้ว ซึ่งมีวาล์วสำหรับเฉลี่ยอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จะเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็นแต่ละชุดที่ต่อขนานกัน 4 ชุด โดยที่แต่ละชุดเป็นการนำฝ้าเพดานทำความเย็นขนาด 50 cm x 50 cm จำนวน 2 แผ่นฝ้าเพดานมาต่ออนุกรมกัน ดังแสดงในรูป จากนั้นน้ำเย็นที่ออกจากฝ้าเพดานทำความเย็นจะไหลมารวมกันที่ท่อส่งน้ำเย็นกลับขนาด 1 นิ้ว แล้วถูกลำเลียงกลับไปยังถังเก็บน้ำเย็นต่อไป ซึ่งในช่วงเริ่มการทดลองจะมีการตวงน้ำ และจับเวลา เพื่อตรวจสอบอัตราการไหลของน้ำเย็นโดยรวม




รูปที่ 3.10 ระบบทางเดินของน้ำ

2. อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า และควบคุม ได้แก่

2.1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
2.2 เครื่องทำน้ำเย็น

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตน้ำเย็นเป็นไฟ 220 โวลต์ ต่อผ่าน Braker และ Magnetic Contractor แล้วผ่านไปยังเครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งมี Magnetic Contractor ทำหน้าที่ตัด - ต่อไฟฟ้าที่จะผ่านไปยังคอมเพรสเซอร์ของเครื่องทำน้ำเย็น ซึ่งควบคุมโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการตัด-ต่อไฟฟ้าของ Magnetic Contractor โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะอ่านค่าอุณหภูมิจากตัววัดอุณหภูมิที่ติดตั้งที่ท่อจ่ายน้ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น เมื่อเครื่องควบคุมอุณหภูมิอ่านค่าอุณหภูมิของน้ำที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นอยู่ในระดับที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะจ่ายไฟฟ้าไปยังขดลวดของ Magnetic Contractor ทำให้ไฟฟ้าที่มาจาก Breaker จะสามารถไหลผ่าน Magnetic Contractor ไปยังเครื่องทำน้ำเย็น เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำเย็นลง และเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นลดต่ำลงถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้แล้ว เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะตัดไฟฟ้าที่ต่อไปยังขดลวดใน Magnetic Contractor ทำให้ไฟฟ้าที่มาจาก Breaker ไม่สามารถไหลผ่าน Magnetic Contractor ไปได้ เครื่องทำน้ำเย็นจะหยุดทำงาน

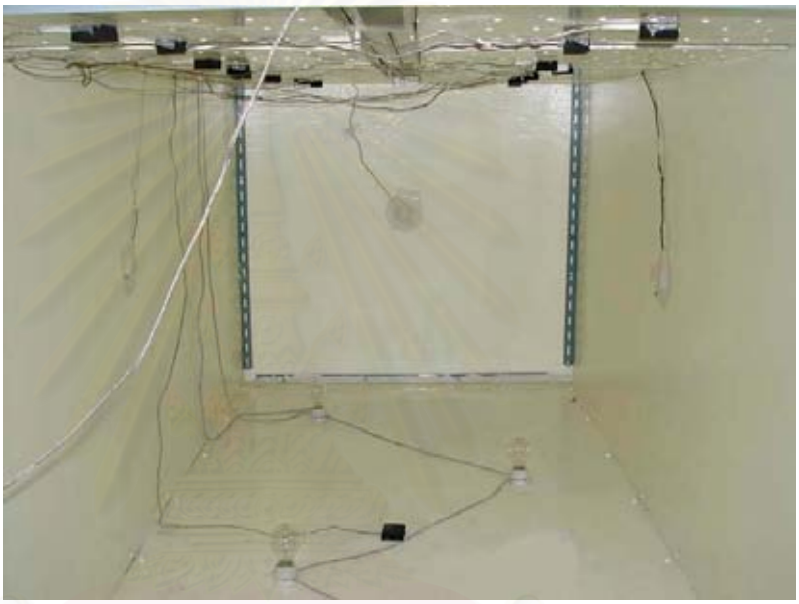
3. อุปกรณ์วัดต่างๆ ได้แก่

3.1 เทอร์โมคัปเปิล
3.2 เครื่องเก็บข้อมูล
3.3 เทอร์โมมิเตอร์
3.4 เครื่องวัดอุณหภูมิ- ความชื้น
3.5 ถังตวงน้ำ
3.6 นาฬิกาจับเวลา

การวัดอุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น พื้น และผนังห้องด้านใน อุณหภูมิของน้ำในท่อส่งน้ำเข้า และส่งน้ำกลับจะใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูลในการวัดอุณหภูมิ ในการวัดอุณหภูมิพื้นผิวกระทำโดยแนบส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลให้ติดกับพื้นผิวที่ทำการวัดอุณหภูมิ ทาด้วยซิลิโคนนำความร้อนในส่วนที่สัมผัสกัน แล้วปิดทับในส่วนปลายของเทอร์โมคัป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปิลให้แนบติดกับพื้นผิวด้วยฉนวนยาง การวัดอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวฝ้าเพดานแผ่นละ 2 จุด คือวัดอุณหภูมิพื้นผิวในตำแหน่งที่อยู่ในแนวท่อน้ำเย็น และวัดอุณหภูมิพื้นผิวในตำแหน่งที่อยู่ระหว่างแนวท่อน้ำเย็น แล้วหาค่าเฉลี่ยของทุกแผ่นในส่วนการวัดอุณหภูมิของพื้น และผนังกระทำแบบเดียวกัน โดยจะวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางพื้น และผนังแต่ละด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 การวัดอุณหภูมิของน้ำเย็นในท่อส่งน้ำเข้า และส่งน้ำกลับ จะทำการเจาะรูท่อเพื่อสอดปลายของเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปภายในท่อเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำเย็น



รูปที่ 3.11 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิพื้นผิว

การวัดอุณหภูมิห้องและ ความชื้นสัมพัทธ์ จะใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ-ความชื้น โดยสอดหัววัดอุณหภูมิ - ความชื้นจากทางด้านบนลงมา เพื่อวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณกึ่งกลางห้อง ยกเว้นในส่วนของการทดลองที่จะต้องตรวจสอบอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณใกล้กับฝ้าเพดาน จะติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ – ความชื้น ใกล้กับฝ้าเพดานโดยห่างจากฝ้าเพดาน 5 เซนติเมตร และใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิอากาศบริเวณกึ่งกลางห้อง

ในส่วนของการวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นจะใช้การวัดปริมาณน้ำเย็นด้วยถังตวงน้ำที่ทำมาตราส่วน แล้วทำการจับเวลา

4. อุปกรณ์ที่ประกอบเป็นห้องจำลอง ได้แก่

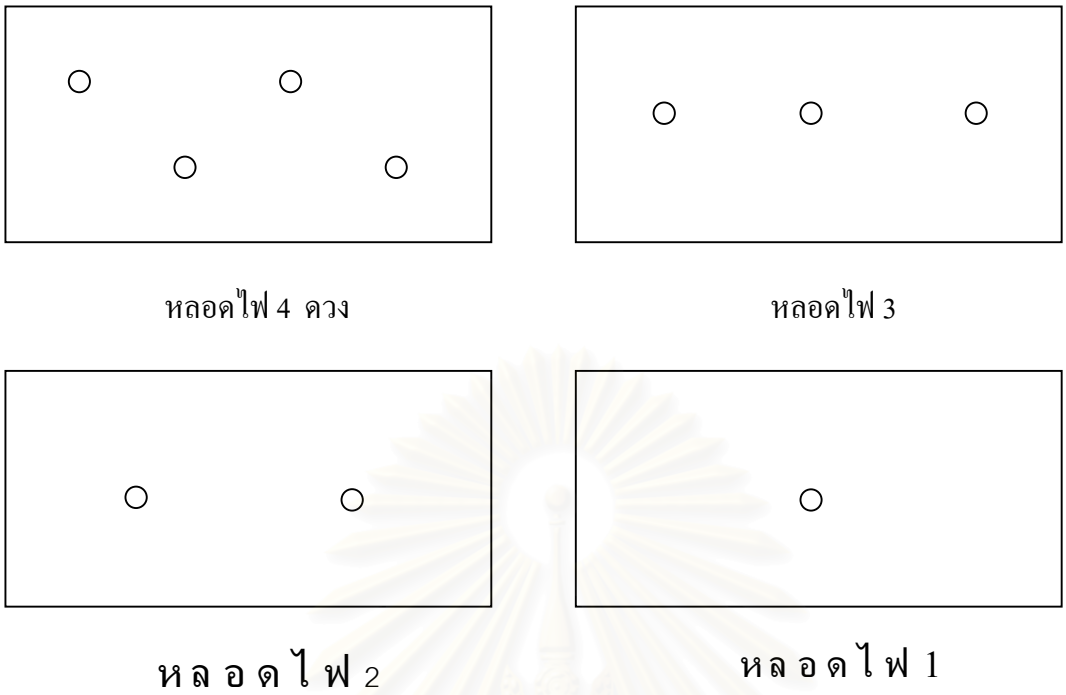
4.1 ห้องจำลอง
4.2 ฝ้าเพดานทำความเย็น
4.3 ชุดหลอดไฟสร้างภาระความร้อน

ภายในห้องจำลองจะติดตั้งด้วยฝ้าเพดานทำความเย็น และมีการใส่ภาระความร้อนภายในห้องจำลองด้วยหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 , 2 , 3 และ 4 ดวง สำหรับกรณีทดลองที่ต้องการภาระความร้อนภายในห้องจำลอง ตามกรณีทดลองที่จะกล่าวถึงต่อไป

## 3.4 ขั้นตอนในการทดลอง

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์และชุดทดลองในหัวข้อที่ 3.3 แล้ว ในแต่ละกรณีการทดลองจะมีขั้นตอนในการทดลองซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ติดตั้งหลอดไฟตามจำนวนในแต่ละกรณีของการทดลอง และจัดวางหลอดไฟตามตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.12
2. ตั้งอุณหภูมิ และเดินเครื่องทำน้ำเย็น ปิดวาล์วด้านส่งน้ำเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น และเปิดวาล์วด้านส่งน้ำกลับสู่ถังเก็บน้ำเย็น ให้น้ำหมุนเวียนผ่านเครื่องทำน้ำเย็น จนกระทั่งน้ำเย็นมีอุณหภูมิตามที่ต้องการ
3. เปิดวาล์วด้านส่งน้ำเย็นเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น ปิดวาล์วด้านส่งน้ำเย็นกลับสู่ถังเก็บน้ำเย็น ยกเว้นในกรณีอัตรากรไหลรวม 2 ลิตรต่อนาที จะเปิดวาล์วด้านส่งน้ำเย็นกลับบางส่วนเพื่อควบคุมอัตราการไหล
4. วัดอุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิของพื้น ผนังด้านใน อุณหภูมิน้ำเย็นเข้า-ออกของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง ทำการบันทึกค่าที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งอุณหภูมิทุกจุดเข้าสู่สภาวะคงตัว และวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สภาวะเริ่มการทดลอง และเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว




รูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งการวางหลอดไฟในการทดลอง

การทดลองทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 35 กรณีของการทดลองซึ่งมีตัวแปรแตกต่างกันในแต่ละการทดลองคือ จะเริ่มทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นไว้ที่ 6.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในช่วงตัดต่อของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิน้ำเย็นค่าหนึ่งๆ จะทำการทดลอง 7 กรณีดังนี้คือ

1. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 0.5 ลิตรต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระความร้อน
2. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1 ลิตรต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระความร้อน
3. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระความร้อน
4. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟโคม ขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ดวง
5. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟโคม ขนาด 40 วัตต์ จำนวน 2 ดวง
6. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟโคม ขนาด 40 วัตต์ จำนวน 3 ดวง
7. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟโคม ขนาด 40 วัตต์ จำนวน 4 ดวง

โดยที่อัตราการไหลของน้ำเย็นที่ระบุไว้คือ อัตราการไหลของน้ำเย็นเฉลี่ยที่จ่ายผ่านฝ้าเพดานทำความเย็นแต่ละชุดที่ต่อขนานกัน จำนวน 4 ชุด โดยแต่ละชุดเป็นการนำแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นขนาด 50 cm x 50 cm 2 แผ่นฝ้าเพดาน มาต่ออนุกรมกัน

เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวมาครบในทุกกรณีแล้ว จะเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นเป็น 8.5 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดลองในกรณีที่ 1 - 7 จากนั้นจะเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นเป็น 11.1 องศาเซลเซียส 14.4 องศาเซลเซียส และ 16.3 องศาเซลเซียส ในแต่ค่าของอุณหภูมิน้ำเย็นจะทำการทดลองในกรณีที่ 1-7 ตามลำดับจนครบทุกกรณี

จากนั้นจะนำผลการทดลองที่ได้ทุกกรณีมาวิเคราะห์ แบ่งตามเงื่อนไขการทดลองดังนี้

1. ผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น
2. ผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น
3. ผลของปริมาณภาระความร้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากวิธีดำเนินการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยการทดลองใน 35 กรณีคือ ทำการทดลองโดยจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ16.3 $^{\circ}$C โดยที่อุณหภูมิน้ำเย็นค่าหนึ่งที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทดลองใน 7 กรณี คือ

1. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 0.5 ลิตร/นาที โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

2. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1 ลิตร/นาที โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

3. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1.5 ลิตร/นาที โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

4. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 1 ดวง

5. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 2 ดวง

6. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 3 ดวง

7. ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 4 ดวง

ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์แยกตามหัวข้อดังนี้

1. พิจารณาลักษณะโดยทั่วไป

2. พิจารณา และเปรียบเทียบกรณีทดลองที่มีอัตราการไหลของน้ำเย็นเท่ากัน แต่มีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองขนาดต่างๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. พิจารณา และเปรียบเทียบกรณีทดลองที่มีอุณหภูมิของน้ำเย็นเท่ากัน แต่มีการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น

4. พิจารณา และเปรียบเทียบการทดลองที่มีอุณหภูมิของน้ำเย็นเท่ากัน ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นเฉลี่ยที่จ่ายเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ 1.5 ลิตร/นาที โดยแปรเปลี่ยนภาระความร้อนภายในห้องจำลอง เพื่อศึกษาผลของภาระความร้อนที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น

5. พิจารณาการเกิดการควบแน่นที่พื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น

## 1. ลักษณะโดยทั่วไป

### พิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น

รูปที่ ก.1 ถึง ก.3 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิของผิวฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง ในรูปที่ ก.4 ถึง ก.7 เป็นการทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนที่เป็นหลอดไฟโคมจำนวน 1 ,2 ,3 และ 4 ดวงเข้าไปภายในห้องตามลำดับ โดยทุกกรณีเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีการแปรเปลี่ยนในการทดลอง

จากกราฟจะพบว่าในทุกกรณีอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีค่าลดลงตามเวลา ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานจะมีค่าสูงในช่วงแรก และค่อยๆ ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรืออุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดาน มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของโครงสร้างของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าความแตกต่างสูงในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายน้ำเย็น ซึ่งจะทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากโครงสร้างของฝ้าเพดานทำความเย็นถ่ายเทไปสู่น้ำเย็นสูง อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของโครงสร้างของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าลดลง ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากฝ้าเพดานทำความเย็นไปสู่น้ำเย็นลดลง อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจึงมีค่าลดลง จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว

**พิจารณาอุณหภูมิห้อง**

รูปที่ ก.18 ถึง ก.20 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิภายห้องจำลองตามเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง รูปที่ ก.21 ถึง ก.24 เป็นการทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนที่เป็นหลอดไฟโคมจำนวน 1 ,2 ,3 และ 4 ดวงเข้าไปภายในห้องตามลำดับ โดยทุกกรณีเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีการแปรเปลี่ยนในการทดลอง

จากกราฟจะพบว่าอุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น คืออุณหภูมิห้องจะมีค่าต่ำลงตามเวลา ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิห้องในช่วงเริ่มต้นจะมีค่าสูง และเปลี่ยนแปลงช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรืออุณหภูมิห้อง มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งค่าของอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวนี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

**พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น**

รูปที่ ก.35 ถึง ก.63 เป็นกราฟแสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นในแต่ละกรณีของการทดลอง

จากกราฟจะพบว่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น ทั้งการการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี และ การพาความร้อน จะมีค่าน้อยที่สุดที่เวลาเริ่มต้นของการทดลอง และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น กับอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น และอัตราการพาความร้อนของอากาศภายในห้องขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นกับอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง จากการทดลองพบว่าทั้งอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น และ อุณหภูมิห้อง จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงตามเวลา แต่อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเร็วกว่า อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น และ อุณหภูมิห้อง เนื่องจากฝ้า

เพดานทำความเย็นเป็นส่วนที่มีน้ำเย็นไหลผ่าน และสร้างขึ้นจากอลูมิเนียมที่มีสภาพการนำความร้อนสูง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น ทั้งการแผ่รังสี และการพาความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งอุณหภูมิทั้งสามมีค่าคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ด้วย

2. **พิจารณา และเปรียบเทียบกรณีทดลองที่มีอัตราการไหลของน้ำเย็นเท่ากัน แต่มีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองขนาดต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น**

**พิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น**

รูปที่ ก.1 ถึง ก.3 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิของผิวฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง ในรูปที่ ก.4 ถึง ก.7 เป็นการทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนที่เป็นหลอดไฟโคมจำนวน 1 ,2 ,3 และ 4 ดวงเข้าไปภายในห้องตามลำดับ โดยทุกกรณีเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีการแปรเปลี่ยนในการทดลอง

จากกราฟทั้งหมดในทุกกรณีจะเห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันคือ มีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มการทดลอง และการเปลี่ยนแปลงจะช้าลงจนกระทั่งอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจากการทดลองจะพบว่าในกรณีที่มีภาระความร้อนแบบเดียวกัน และมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่างๆ กัน การจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวมีค่าต่ำกว่า ในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นดังแสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นยังมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั้นคือในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้เร็วกว่าในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

| กรณีทดลอง | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายในหลอดไฟ 40 วัตต์ (ดวง) | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น (°C) | | | | |
| 0.5 | 0 | 9.6 | 11.6 | 13.8 | 16.4 | 18.0 |
| 1 | 0 | 9.4 | 11.4 | 13.6 | 16.5 | 17.9 |
| 1.5 | 0 | 9.2 | 11.2 | 13.4 | 16.3 | - |
| 1.5 | 1 | 9.8 | 11.5 | 13.8 | 16.6 | 18.2 |
| 1.5 | 2 | 10.1 | 11.9 | 14.1 | 16.9 | 18.7 |
| 1.5 | 3 | 10.4 | 12.4 | 14.6 | - | - |
| 1.5 | 4 | 11.0 | 12.9 | - | - | - |

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (°C) ในกรณีทดลองต่างๆ

**พิจารณาอุณหภูมิห้อง**

รูปที่ ก.18 ถึง ก.20 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิห้องตามเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง รูปที่ ก.21 ถึง ก.24 คือกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนที่เป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ,3 และ 4 ดวงเข้าไปภายในห้องตามลำดับ โดยทุกกรณีเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีการแปรเปลี่ยนในการทดลอง

จากกราฟทั้งหมดจะเห็นได้ว่าในทุกกรณีอุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันคือ ในช่วงเริ่มการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเร็ว และจะช้าลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอุณหภูมิห้องคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ยกเว้นในกรณีที่มีภาระความร้อนสูง และมีการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูงเช่นในการทดลองที่มีการใส่หลอดไฟจำนวน 3 หลอด และจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 °C พบว่าอุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มการทดลองและจนกระทั่งหยุดนิ่ง หลังจากนั้นอุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนแปลงลดลง จนกระทั่งหยุดนิ่งอีกครั้งเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเริ่มการทดลองอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นยังไม่ต่ำเพียงพอที่จะรับภาระความร้อนได้ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความ

เย็นจะต่ำลงซึ่งทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนออกไปได้ อุณหภูมิห้องจึงลดลงจนกระทั่งหยุดนิ่งเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีต่ออุณหภูมิห้อง ในกรณีที่มีภาระความร้อนแบบเดียวกัน และมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จะพบว่าการจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ยังพบอีกว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิห้องในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั้นคือในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้เร็วกว่าในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูงกว่า

| กรณีทดลอง | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายในหลอดไฟ 40 วัตต์ (ดวง) | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง (°C) | | | | |
| 0.5 | 0 | 20.5 | 21.5 | 22.8 | 23.5 | 23.8 |
| 1 | 0 | 20.4 | 21.3 | 22.6 | 23.5 | 23.8 |
| 1.5 | 0 | 20.2 | 21.3 | 22.6 | 23.5 | - |
| 1.5 | 1 | 21.9 | 22.6 | 23.9 | 24.7 | 25.2 |
| 1.5 | 2 | 23.2 | 23.9 | 25.0 | 25.8 | 26.9 |
| 1.5 | 3 | 24.3 | 24.9 | 26.3 | - | - |
| 1.5 | 4 | 25.7 | 26.7 | - | - | - |

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว (°C) ในกรณีทดลองต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น**

ในตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่มีภาระความร้อนแบบเดียวกัน พบว่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว นั้นคือการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นมีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูงกว่าการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำควาเย็นที่สภาวะคงตัวอยู่ในระดับต่ำกว่าการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่ลดลง ดังนั้นสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นลง ซึ่งผลของสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนที่สูงเมื่อการจ่ายน้ำย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ จะทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นสามารถรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองให้ต่ำกว่าเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง ในกรณีที่ภาระความร้อนแบบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ ก.64 ถึง ก.66 ซึ่งเป็นกราฟแสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และระดับอุณหภูมิของอากาศในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ตามลำดับ โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง และรูปที่ ก.67 ถึง ก.70 คือกรณีที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที และมีการใส่ภาระความร้อนที่เป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ,3 และ 4 ดวงเข้าไปภายในห้องตามลำดับ โดยทุกกรณีเป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีการแปรเปลี่ยนในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| กรณีทดลอง | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายในหลอดไฟ 40 วัตต์ (ดวง) | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น($W/m^2$) | | | | |
| 0.5 | 0 | 123.33 | 109.63 | 95.93 | 77.69 | 63.96 |
| 1 | 0 | 126.00 | 113.75 | 99.55 | 74.02 | 63.86 |
| 1.5 | 0 | 122.90 | 114.20 | 100.52 | 77.61 | - |
| 1.5 | 1 | 140.04 | 130.06 | 115.03 | 92.74 | 82.08 |
| 1.5 | 2 | 158.75 | 145.39 | 130.15 | 108.05 | 99.19 |
| 1.5 | 3 | 175.15 | 158.86 | 145.26 | - | - |
| 1.5 | 4 | 190.85 | 179.04 | - | - | - |

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ($W/m^2$) ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ

3. **พิจารณา และเปรียบเทียบกรณีทดลองที่มีอุณหภูมิของน้ำเย็นเท่ากัน แต่มีการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น**

**พิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น**

รูปที่ ก.8 ถึง ก.12 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , และ 16.3 °C ตามลำดับ เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

จากกราฟจะพบว่าในทุกกรณีของอุณหภูมิน้ำเย็นจ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และช้าลงเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิเดียวกันในแต่ละค่า คือ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , และ 16.3 °C อัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้น

ผิวฝ้าเพดานทำความเย็น คือเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิเดียวกัน ในกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำเย็นสูงอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นจะเข้าสู่อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าในกรณีที่มีอัตราการไหลต่ำ แต่ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวในแต่ละค่าของอุณหภูมิน้ำเย็น จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ดังแสดงในกราฟ

**พิจารณาอุณหภูมิห้อง**

รูปที่ ก.25 ถึง ก.29 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้อง ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , และ 16.3 $^{\circ}$C ตามลำดับ เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

จากกราฟจะพบว่าในทุกกรณีของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที อุณหภูมิของอากาศภายในห้องจะเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งอุณหภูมิอากาศภายในห้องคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิเดียวกันในแต่ละค่า คือ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , และ 16.3 $^{\circ}$C อัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิอากาศภายในห้องเช่นเดียวกับอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น คือเมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิเดียวกัน ในกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำเย็นสูงอุณหภูมิอากาศภายในห้องจะเข้าสู่อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าในกรณีที่มีอัตราการไหลต่ำ แต่หากพิจารณาอุณหภูมิของอากาศที่สภาวะคงตัวในแต่ละค่าของอุณหภูมิน้ำเย็น จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในห้องที่สภาวะคงตัว ดังแสดงในกราฟ

**พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น**

ในตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อพิจารณาในกรณีทดลองสามกรณีแรก คือกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำเป็น 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตร/นาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง ในแต่ละค่าของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดาน จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากที่

ผ่านมาพบว่าอัตราการไหลของน้ำเย็นจะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว

4. **พิจารณา และเปรียบเทียบการทดลองที่มีอุณหภูมิของน้ำเย็นเท่ากัน ควบคุมอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็นที่จ่ายเข้าสู่ฝ้าเพดานทำความเย็นที่ 1.5 ลิตร/นาที โดยแปรเปลี่ยนภาระความร้อนภายในห้องจำลอง เพื่อศึกษาผลของภาระความร้อนที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น**

**พิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา**

รูปที่ ก.13 ถึง ก.17 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นเมื่อมีการแปรเปลี่ยนภาระความร้อนภายในห้องจำลองในปริมาณต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 $^{o}$C ตามลำดับ

จากกราฟจะพบว่าในทุกกรณีของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น จะพบว่าปริมาณภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว คือในกรณีที่ภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นมีปริมาณมากจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวสูงกว่าในกรณีที่มีภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็นน้อย

นอกจากนี้ภาระความร้อนที่มีต่อฝ้าเพดานทำความเย็นยังมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั่นคือในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็นมากอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะเปลี่ยนแปลงลดลงได้ช้ากว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็นน้อย

**พิจารณาอุณหภูมิห้อง**

รูปที่ ก.30 ถึง ก.34 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องจำลองเมื่อมีการแปรเปลี่ยนภาระความร้อนภายในห้องจำลองในปริมาณต่างๆ ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที ในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 $^{o}$C ตามลำดับ

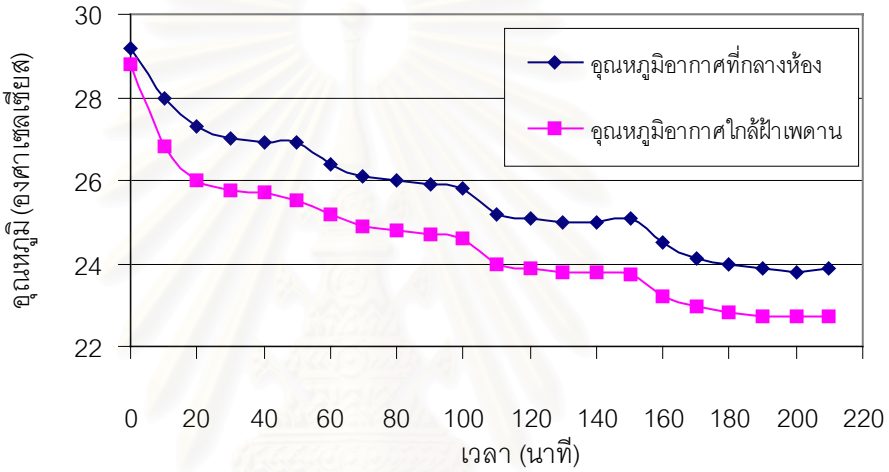
เมื่อพิจารณาผลของภาระความร้อนที่มีต่ออุณหภูมิห้องจะพบว่ามีผลในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นคือ ภาระความร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว จากกราฟจะพบว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนสูงอุณหภูมิห้องจะลดลงจนกระทั่งคงที่ที่อุณหภูมิสูงกว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่ำ ในลักษณะเดียวกันปริมาณภาระความร้อนยังมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของอุณหภูมิห้องในช่วงแรกของการทดลองด้วย นั่นคือในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนสูง อุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนแปลงลดลงได้ช้ากว่าในกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนต่ำ แต่ในบางกรณีที่มีปริมาณภาระความร้อนสูง และมีการจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง เช่น ในกรณีที่ใส่ภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 4 ดวง และจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 และ 16.3 $^{\circ}$C อุณหภูมิห้องจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นก่อนในช่วงแรก จากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจนกระทั่งคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว

**5. พิจารณาการเกิดการควบแน่นที่พื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น**

เมื่อพิจารณาการเกิดการควบแน่นบนผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจะพบว่า ในหลายกรณีของการทดลองจะมีการควบแน่นเกิดขึ้นที่ผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นอยู่ในระดับต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำค้าง (dew point temperature) ของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งจากการทดลองจะพบว่าการควบแน่นนี้จะเกิดในช่วงแรกๆ ของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากการจ่ายน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นลดต่ำลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาสั้นๆ แม้ว่าจากผลที่ผ่านมาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจะลดต่ำลงด้วยเมื่อเริ่มมีการจ่ายน้ำเย็น แต่เนื่องจากฝ้าเพดานทำความเย็นเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเย็น และทำด้วยอลูมิเนียมที่มีสภาพการนำความร้อนสูง ทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้เร็วกว่า ดังนั้นอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นจึงอยู่ในระดับต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ในช่วงแรกๆ ของการทดลองจึงเกิดการควบแน่น

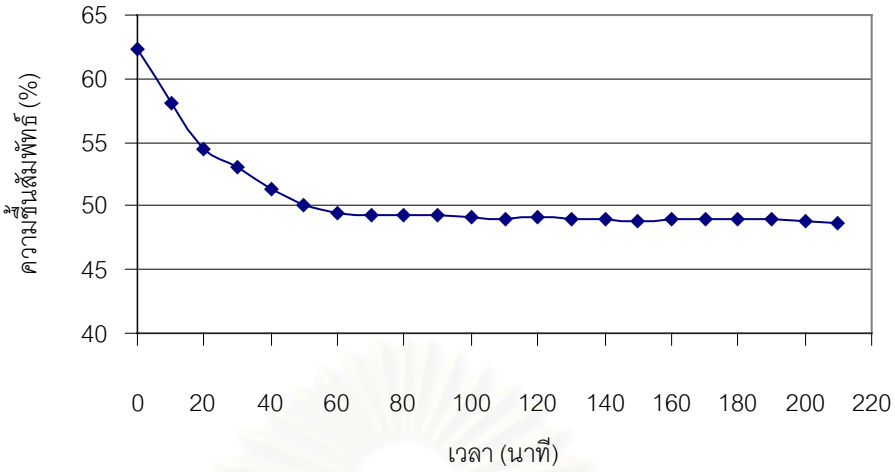
อย่างไรก็ดี ได้มีการทำการทดลองเพื่อพยายามควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น ให้ลดต่ำลดอย่างช้าๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการควบแน่นที่ผิวฝ้าเพดานทำความเย็น โดยเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเริ่มจ่ายน้ำเย็นที่ 16.3 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที จนกระทั่งอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง

เริ่มคงที่ แล้วทำการลดอุณหภูมิของน้ำเย็นลงเป็น 14.4 , 11.1 , 8.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในกรณีที่ใส่ภาระความร้อนภายในห้องเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 2 ดวง โดยได้มีการตรวจสอบการควบแน่นบนผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นโดยติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ-ความชื้น ที่ระยะห่างจากฝ้าเพดานทำความเย็น 5 เซนติเมตร เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งมีผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3 และตารางที่ 4.4

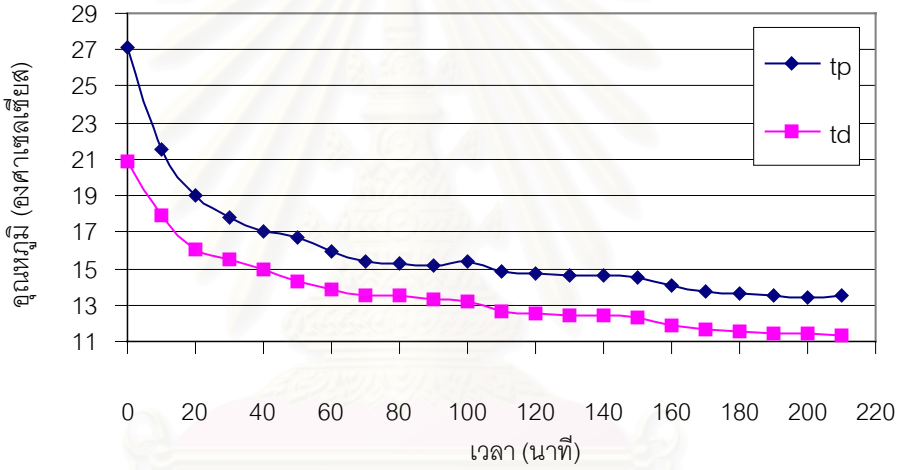



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงอุณหภูมิของอากาศที่บริเวณกึ่งกลางห้อง และ อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น

จากกราฟจะพบว่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น มีการเปลี่ยนแปลงลดลง และคงที่เป็นขั้นๆ ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ในส่วนของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น จะมีค่าลดลงจากค่าเริ่มต้น จนกระทั่งมีค่าคงที่




รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น




รูปที่ 4.3 กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น

จากการทดลองพบว่าการควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นให้ลดต่ำลงด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เร็วเกินไป จะช่วยป้องกันโอกาสที่จะเกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศในบริเวณที่ตรวจวัดค่อนข้างคงที่ หรือมีอัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่น้อยมากในช่วงของการทดลองที่อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นมีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาน้อย ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.3 จะพบว่าตลอดช่วงเวลาของการทดลอง และช่วงเริ่มต้นของการทดลองอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น จะอยู่ในระดับสูงกว่าอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งทำให้อากาศที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นไม่มีโอกาสที่จะ

เกิดการควบแน่นที่ผิวของฝ้าเพดาน และสอดคล้องกับผลของการสังเกตที่ไม่พบการควบแน่นบนพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น

อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาในช่วงเริ่มต้นของการทดลองที่พบอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศในบริเวณที่ตรวจวัดค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโอกาสของการควบแน่นที่น่าจะเกิดขึ้น แต่ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นเกิดขึ้นบนผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากค่าอุณหภูมิน้ำค้างของอากาศ การที่ข้อมูลทั้งสองมีความขัดแย้งกันอยู่นั้น อาจมีความเป็นไปได้ด้วยข้อสันนิษฐานดังนี้คือ

อาจเกิดจากอากาศที่รั่วเข้าบริเวณรอยต่อของฝ้าเพดานทำความเย็น ที่อาจเหนี่ยวนำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับขึ้น ซึ่งจะลดโอกาสการก่อตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น นอกจากนั้นอากาศที่รั่วเข้านั้นอาจมีค่าอัตราส่วนความชื้นที่ต่ำกว่าอากาศภายในห้องจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากอากาศในส่วนที่รั่วเข้านั้นไหลผ่านส่วนหลังของฝ้าเพดานทำความเย็นเข้ามา เนื่องจากตัวท่อน้ำเย็นที่ยึดติดอยู่ทางด้านหลังของฝ้าเพดานทำความเย็นนั้นไม่มีการหุ้มฉนวน ดังนั้นจึงอาจเกิดการควบแน่นของอากาศรอบๆ ท่อทองแดง ทำให้ความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านเข้ามาทางรอยต่อของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าต่ำ เมื่อเข้าผสมกับอากาศในบริเวณที่อยู่ใกล้กับฝ้าเพดานทำความเย็นซึ่งเป็นบริเวณที่ตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ จึงอาจทำให้ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ตรวจวัดได้มีการเปลี่ยนแปลงลดลง อีกทั้งการตรวจวัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในการทดลองนี้กระทำที่ตำแหน่งห่างจากฝ้าเพดานทำความเย็น 5 เซนติเมตรเพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อาจถูกรบกวนด้วยผลของอากาศที่รั่วเข้าสู่ห้องดังที่กล่าวไปแล้ว ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าอากาศส่วนอื่นๆ ภายในห้องที่อยู่ห่างจากฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีค่าอัตราส่วนความชื้นค่อนข้างคงที่จึงไม่ทำให้เกิดการควบแน่นขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| time(min) | $t_{wi}$(°C) | อุณหภูมิอากาศที่กลางห้อง (°C) | อุณหภูมิอากาศใกล้ฝ้าเพดาน (°C) | % RH | td (°C) | w ($kg_w/kg_{da}$) | tp (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 16.3C | 29.2 | 28.8 | 62.4 | 20.9 | 0.01562394 | 27.1 |
| 10 | 16.3C | 28.0 | 26.8 | 58.1 | 17.88 | 0.01288821 | 21.5 |
| 20 | 16.3C | 27.3 | 26.0 | 54.4 | 16.1 | 0.01148553 | 19 |
| 30 | 16.3C | 27.0 | 25.8 | 53.0 | 15.51 | 0.01105056 | 17.8 |
| 40 | 16.3C | 26.9 | 25.7 | 51.3 | 14.91 | 0.01062573 | 17.0 |
| 50 | 16.3C | 26.9 | 25.5 | 50.0 | 14.33 | 0.01022777 | 16.7 |
| 60 | 14.4C | 26.4 | 25.2 | 49.4 | 13.86 | 0.0099215 | 15.9 |
| 70 | 14.4C | 26.1 | 24.9 | 49.2 | 13.53 | 0.009702806 | 15.4 |
| 80 | 14.4C | 26.0 | 24.8 | 49.3 | 13.47 | 0.009664053 | 15.3 |
| 90 | 14.4C | 25.9 | 24.7 | 49.2 | 13.34 | 0.009585803 | 15.2 |
| 100 | 14.4C | 25.8 | 24.6 | 49.1 | 13.22 | 0.009508113 | 15.4 |
| 110 | 11.1C | 25.2 | 24.0 | 49.0 | 12.64 | 0.00914823 | 14.8 |
| 120 | 11.1C | 25.1 | 23.9 | 49.1 | 12.58 | 0.009111421 | 14.7 |
| 130 | 11.1C | 25.0 | 23.8 | 49.0 | 12.46 | 0.009037258 | 14.6 |
| 140 | 11.1C | 25.0 | 23.8 | 48.9 | 12.43 | 0.009018547 | 14.6 |
| 150 | 11.1C | 25.1 | 23.7 | 48.8 | 12.3 | 0.008945036 | 14.5 |
| 160 | 8.5C | 24.5 | 23.2 | 49.0 | 11.91 | 0.008675445 | 14.1 |
| 170 | 8.5C | 24.1 | 23.0 | 48.9 | 11.69 | 0.008587451 | 13.7 |
| 180 | 8.5C | 24.0 | 22.8 | 49.0 | 11.54 | 0.008500167 | 13.6 |
| 190 | 8.5C | 23.9 | 22.7 | 48.9 | 11.42 | 0.008430578 | 13.5 |
| 200 | 8.5C | 23.8 | 22.7 | 48.8 | 11.39 | 0.008413104 | 13.4 |
| 210 | 8.5C | 23.9 | 22.7 | 48.7 | 11.36 | 0.008395632 | 13.5 |

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อตรวจสอบการควบแน่นของอากาศบนผิวฝ้าเพดานทำความเย็น

# บทที่ 5

## การสร้างสมการจากการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการแสดงสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบฝ้าเพดานทำความเย็นเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งวิธีการสร้างสมการมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 1. สร้างสมการเพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น

เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นนั้นเป็นตัวแปรสำคัญต่อสมรรถนะการทำความเย็น ดังนั้นการสร้างสมการเพื่อแสดงสมรรถนะการทำความเย็นจะอาศัยสมการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ อุณหภูมิของน้ำเย็นเฉลี่ยเข้า-ออก ที่จ่ายให้กับฝ้าเพดาน ฟลักซ์ของความร้อนที่ถ่ายเทผ่านฝ้าเพดาน และ ความต้านทานทางความร้อนของฝ้าเพดานซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น ($R_u$) นั้นเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทฟลักซ์ความร้อนจากพื้นผิวของฝ้าเพดานไปสู่น้ำเย็นที่อยู่ภายในท่อ และเป็นตัวลดสมรรถนะการทำความเย็นของฝ้าเพดาน ซึ่งความต้านทานดังกล่าวเกิดขึ้นจากความต้านทานทางความร้อนของผนังท่อน้ำเย็น ($r_t$) ความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดาน ($r_s$) และสุดท้ายคือความต้านทานทางความร้อนของตัวฝ้าเพดานเอง ($r_p$) ดังนี้

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่ติดตั้งบนพื้นที่หนึ่งตารางเมตร

$$R_u = Mr_t + Mr_s + r_p \qquad (5.1)$$

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 5.2 และ 5.3 ดังนี้

เมื่อพิจารณาว่าท่อน้ำเย็นบนแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นเรียงต่อในแนวเดียวกัน จะได้ว่าความยาวของท่อน้ำเย็นบนแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นที่ติดตั้งบนพื้นที่ขนาดหนึ่งตารางเมตร แต่ละแถวจะมีความยาวประมาณ 1 เมตร ซึ่งค่าความต้านทานทางความร้อนต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อทรงระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ( $D_i$ ) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ( $D_o$ ) มีความยาว 1 เมตร และมีสภาพการนำความร้อนของท่อ( $k_t$ ) คือ

$$r_t = ln( D_o/ D_i )/2\pi k_t \quad (5.2)$$

ความต้านทานทางความร้อนของแผ่นฝ้าเพดานคำนวณได้จาก

$$r_p = x_p/k_p \quad (5.3)$$

เมื่อ

$k_p$ = สภาพการนำความร้อนของแผ่นฝ้าเพดาน (W/m-K)

$x_p$ = ความหนาของแผ่นฝ้าเพดาน (m)

ในส่วนของค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็น ASHRAE(1992) ระบุว่าเป็นค่าความต้านทานทางความร้อนที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบในการยึดต่อท่อน้ำเย็นกับแผ่นฝ้าเพดาน ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของท่อน้ำเย็น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความต้านทานทางความร้อนดังกล่าวจากผลการทดลองดังนี้คือ หากสร้างกราฟระหว่างผลต่างอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นกับอุณหภูมิน้ำเย็นเฉลี่ย ($\Delta t_m$) ซึ่งมีค่าตามสมการที่ 5.4

$$\Delta t_m = t_p - 0.5( t_{wi} + t_{wo} ) \quad (5.4)$$

เมื่อ

$t_p$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^oC$)

$t_{wi}$ = อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า ($^oC$)

$t_{wo}$ = อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก ($^oC$)

กับค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ($q_t$) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองจากข้อมูลผลการทดลองด้วยสมการในรูปแบบ

$$q_t = k\Delta t_m$$

หรือ

$$q_t = \Delta t_m / R_u \quad (5.5)$$

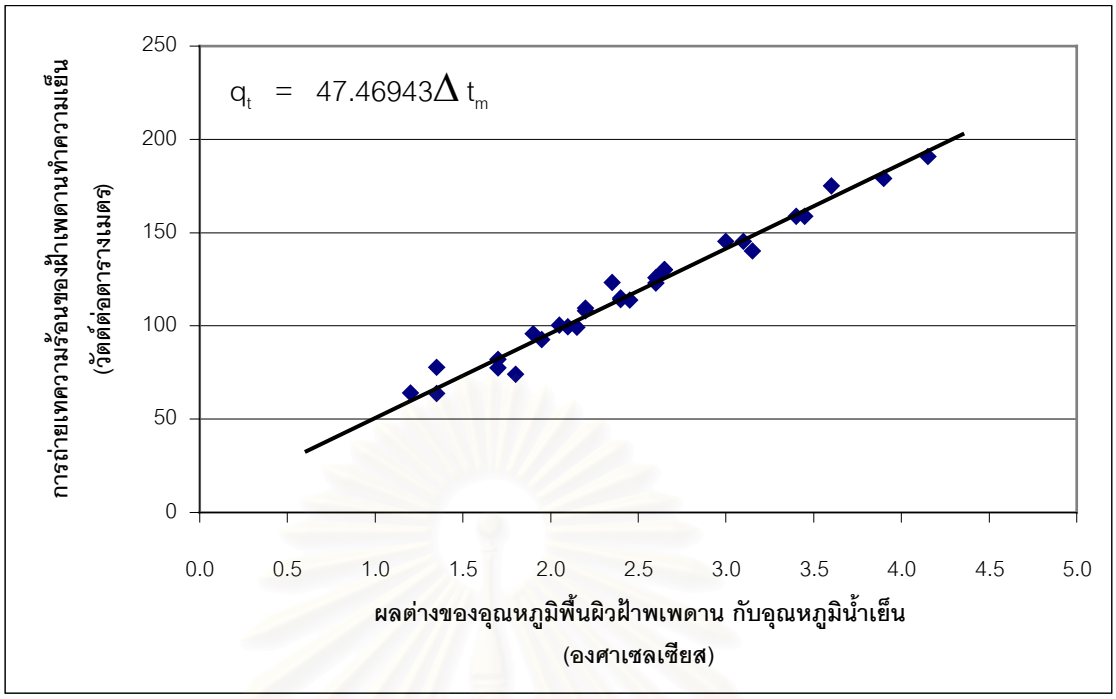
เมื่อ k คือค่าคงที่

โดยใช้วิธีสมการถดถอย (Regression) เพื่อคำนวณค่า k* จะได้ว่าความชันของกราฟ (k) ที่ได้จากการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น (U) , ซึ่งคือส่วนกลับของความต้านทานรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นหรือ

$$R_u = 1/U \quad (5.6)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ค่า k ที่ได้ไม่รวมผลของกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 4 ดวง และกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 3 ดวง




รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว และผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานกับอุณหภูมิน้ำเย็น ตามสมการที่ 5.4

จากวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นได้เป็น 47.46943 $W/m^2$- $^OC$ จากสมการที่ 5.6 จะได้ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นคือ 0.02107 $m^2$- $^OC/W$

เมื่อทราบความต้านทานรวมดังกล่าวแล้วจะสามารถนำไปคำนวนหาค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานได้ตามสมการที่ 5.1 เมื่อทราบค่า $r_t$ และ $r_p$ ของชุดทดลองแล้ว ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นกับตัวฝ้าเพดานต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็นมีค่าเท่ากับ (ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข)

$$r_s = 0.2106 \quad m\text{-}^oC/W$$

นำค่าความต้านทานทางความร้อนดังกล่าวแทนลงในสมการที่ 5.1 แล้วนำสมการคำนวณความต้านทานทางความร้อนรวมที่ได้ไปแทนในสมการที่ 5.5 ซึ่ง $\Delta t_m$ มีค่าตามสมการที่ 5.4 แล้วทำการจัดรูปสมการใหม่เพื่อให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นอยู่ทางด้านซ้ายมือ จะได้

สมการที่ใช้ในการทำนายอุณหภูมิของพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว เมื่อทราบมิติที่เกี่ยวข้องกับฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของน้ำเย็น ดังนี้

$$t_p = q_t[\, M(\ln(D_o/D_i)/2\pi k_t) + 0.2106M + (x_p/k_p)] + t_{w_avg} \qquad (5.7)$$

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

## 2. สร้างสมการแสดงสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น

จากผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด นำมาสร้างสมการแสดงสมรรถนะการทำความเย็นโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่าง สมรรถนะการทำความเย็นของฝ้าเพดาน (ภาระความร้อนที่รับได้) อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ที่สภาวะคงตัว โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามในรูปสมการยกกำลังดังนี้

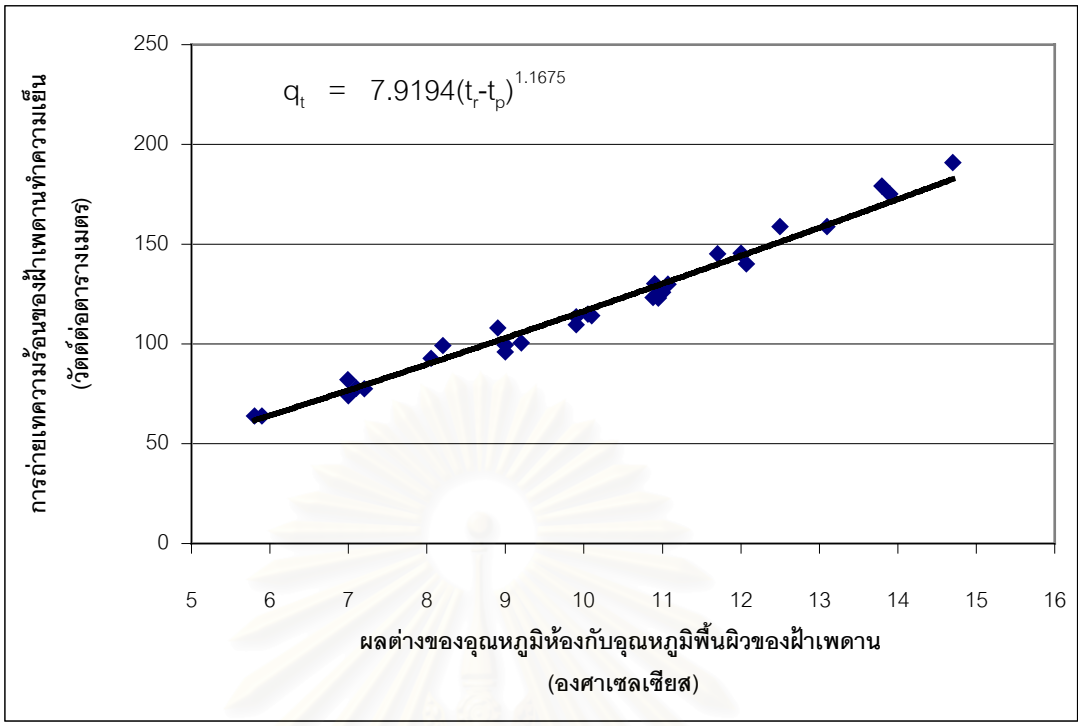
$$q_t = A(t_r - t_p)^B \qquad (5.8)$$

เมื่อ

$q_t$ = การถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ($W/m^2$)

$t_r$ = อุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ($^oC$)

$t_p$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ($^oC$)




รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และผลต่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานที่สภาวะคงตัวตามสมการที่ 5.4

จากข้อมูลทั้งหมดที่พิจารณาโดยใช้วิธีสมการถดถอยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ A และ B เป็น

A = 7.9194*

B = 1.1675**

หรือ

$$q_t = 7.9194(t_r-t_p)^{1.1675} \quad (5.9)$$

แทนค่า $t_p$ จากสมการที่ 5.7 ลงในสมการที่ 5.9 จะได้

* , ** ค่า A และ B ที่ได้ไม่รวมผลของกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 4 ดวง และกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 3 ดวง

$$q_t = 7.9194\,[t_r - \{ q_t\,[\,M\,(\ln(D_o/D_i)/2\pi k_l) + 0.2106M + (x_p/k_p)] + t_{w_avg}\}\,]^{1.1675} \quad (5.10)$$

ซึ่งเป็นสมการเพื่อแสดงสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการทดสอบสมการที่สร้างขึ้น ได้มีการนำสมการที่ได้ไปทดสอบกับทุกกรณีของการทดลอง ในการทดสอบสมการจะทำโดยการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการที่ 5.11 เพื่อใช้คำนวณอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ต้องจ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น เมื่อทราบภาระความร้อน นำไปตรวจสอบกับอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่ามีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.6 $^{O}$C

$$t_{w_avg} = t_r - (q_t/7.9194)^{1/1.1675} - \{ q_t[\,M(\ln(D_o/D_i)/2\pi k_l) + 0.2106M + (x_p/k_p)]\} \quad (5.11)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| การทดลองที่ | ภาระความร้อน (W/m2) | อุณหภูมิห้อง (oC) | อุณหภูมิน้ำเข้า (oC) | อุณหภูมิน้ำออก (oC) | อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย (oC) | อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยจากการคำนวณด้วยสมการ (oC) | ความผิพลาดจากการคำนวณด้วยสมการ (oC) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 123.33 | 20.5 | 6.3 | 8.2 | 7.3 | 7.4 | 0.1 |
| 2 | 126.00 | 20.4 | 6.3 | 7.3 | 6.8 | 7.0 | 0.2 |
| 3 | 122.90 | 20.2 | 6.3 | 6.9 | 6.6 | 7.1 | 0.5 |
| 4 | 140.04 | 21.9 | 6.3 | 7.0 | 6.7 | 7.2 | 0.5 |
| 5 | 158.75 | 23.2 | 6.3 | 7.1 | 6.7 | 6.8 | 0.1 |
| 6 | 175.15 | 24.3 | 6.3 | 7.3 | 6.8 | 6.4 | -0.4 |
| 7 | 190.85 | 25.7 | 6.3 | 7.4 | 6.9 | 6.4 | -0.5 |
| 8 | 109.63 | 21.5 | 8.5 | 10.3 | 9.4 | 9.7 | 0.3 |
| 9 | 113.75 | 21.3 | 8.5 | 9.4 | 9.0 | 9.1 | 0.1 |
| 10 | 114.20 | 21.3 | 8.5 | 9.1 | 8.8 | 9.1 | 0.3 |
| 11 | 130.06 | 22.6 | 8.5 | 9.2 | 8.9 | 8.8 | -0.1 |
| 12 | 145.39 | 23.9 | 8.5 | 9.3 | 8.9 | 8.7 | -0.2 |
| 13 | 158.86 | 24.9 | 8.5 | 9.4 | 9.0 | 8.5 | -0.5 |
| 14 | 179.04 | 26.7 | 8.5 | 9.5 | 9.0 | 8.5 | -0.5 |
| 15 | 95.93 | 22.8 | 11.1 | 12.7 | 11.9 | 12.3 | 0.4 |
| 16 | 99.55 | 22.6 | 11.1 | 11.9 | 11.5 | 11.8 | 0.3 |
| 17 | 100.52 | 22.6 | 11.1 | 11.6 | 11.4 | 11.7 | 0.3 |
| 18 | 115.03 | 23.9 | 11.1 | 11.7 | 11.4 | 11.5 | 0.1 |
| 19 | 130.15 | 25.0 | 11.1 | 11.8 | 11.5 | 11.3 | -0.2 |
| 20 | 145.26 | 26.3 | 11.1 | 11.9 | 11.5 | 11.2 | -0.3 |
| 21 | 77.69 | 23.5 | 14.4 | 15.7 | 15.1 | 14.8 | -0.3 |
| 22 | 74.02 | 23.5 | 14.4 | 15.0 | 14.7 | 15.2 | 0.5 |
| 23 | 77.61 | 23.5 | 14.4 | 14.8 | 14.6 | 14.8 | 0.2 |
| 24 | 92.74 | 24.7 | 14.4 | 14.9 | 14.7 | 14.5 | -0.2 |
| 25 | 108.05 | 25.8 | 14.4 | 15.0 | 14.7 | 14.1 | -0.6 |
| 26 | 63.96 | 23.8 | 16.3 | 17.3 | 16.8 | 16.5 | -0.3 |
| 27 | 63.86 | 23.8 | 16.3 | 16.8 | 16.6 | 16.5 | -0.1 |
| 28 | 82.08 | 25.2 | 16.3 | 16.7 | 16.5 | 16.1 | -0.4 |
| 29 | 99.19 | 26.9 | 16.3 | 16.8 | 16.6 | 16.1 | -0.5 |

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิน้ำเย็น และความคลาดเคลื่อนที่ได้จากสมการที่ 5.11

หมายเหตุ: การทดลองที่ 1 - 7 , 8 – 14 คือการทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 6.3 และ 8.5 องศาเซลเซียส ตามกรณีทดลองที่ 1- 7
การทดลองที่ 15 – 20 คือการทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 11.1 องศาเซลเซียส ตามกรณีทดลองที่ 1 - 6
และ การทดลองที่ 21 - 25 , 26 – 30 คือการทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส
ตามกรณีทดลองที่ 1 - 7

นอกจากนี้ยังได้นำสมการที่ 5.11 นี้ไปตรวจกับกรณีทดลองที่เพิ่มเติมขึ้นนอกเหนือจากการทดลองที่ผ่านมา โดยนำสมการดังกล่าวไปตรวจสอบกับผลการทดลองจากกรณีทดลองดังนี้

1. ทดลองโดยจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 12.8 °C ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

2. ทดลองโดยจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 7.5 °C ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 3 ดวง

จากการทดลองสามารถวัดค่าอุณหภูมิต่างๆ เมื่อการทดลองเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และ แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองไปตรวจสอบกับสมการที่ 5.11 ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าในกรณีทดลองเพิ่มเติมที่ 1 ผลที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 5.11 มีความคลาดเคลื่อน 0.5 °C และในกรณีทดลองเพิ่มเติมที่ 2 ผลที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 5.11 มีความคลาดเคลื่อน -0.4 °C

| ข้อมูลที่สภาวะคงตัว | กรณีทดลองเพิ่มเติมที่ | |
|---|---|---|
| | 1 | 2 |
| อัตราการไหลของน้ำเย็น (ลิตร/นาที) | 1.5 | 1.5 |
| จำนวนหลอดไฟขนาด 40 วัตต์ (ดวง) | 0 | 3 |
| อุณหภูมิห้อง (°C) | 23.1 | 24.6 |
| อุณหภูมิน้ำเย็นเข้า/ออก (°C) | 12.5/13.1 | 7.5/8.4 |
| อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้น | 25.9 | 27.9 |
| อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวฝ้าเพดานทำ | 14.9 | 11.5 |

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่สภาวะคงตัวของกรณีทดลองเพื่อทดสอบสมการที่ 5.11

| การทดลองที่ | การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2$) | อุณหภูมิห้อง (°C) | อุณหภูมิน้ำเข้า (°C) | อุณหภูมิน้ำออก (°C) | อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย (°C) | อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยจากการคำนวณด้วยสมการ (°C) | ความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยสมการ (°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 89.05 | 23.1 | 12.5 | 13.1 | 12.8 | 13.2 | 0.4 |
| 2 | 166.19 | 24.6 | 7.5 | 8.4 | 8.0 | 7.5 | -0.5 |

ตารางที่ 5.3 แสดงความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยสมการที่ 5.11 เทียบกับผลการทดลองในกรณีการทดลองเพื่อทดสอบสมการที่ 5.11

### 3. สมการคำนวณระดับอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอสมการซึ่งสามารถใช้คำนวณระดับอุณหภูมิห้องที่สภาวะคง ดังแสดงในสมการที่ 5.10 แต่อย่างไรก็ดีระดับของอุณหภูมิห้องตามเวลาในสภาวะไม่คงตัว หรือในช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวก็เป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบระบบทำความเย็นด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากสมการที่สภาวะคงตัวทำให้เราทราบระดับอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว แต่ไม่ทำให้ทราบระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนั้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิห้อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงยังได้นำเสนอสมการเพื่อคำนวณระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาในสภาวะไม่คงตัว ซึ่งได้รวมเอาผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นต่อระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาโดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองอีกด้วย เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น เพื่อควบคุมให้ระดับอุณหภูมิห้องปรับตัวลดลงสู่ระดับอุณหภูมิห้องออกแบบในระยะเวลาที่เหมาะสม

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

โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองสามารถสร้างสมการเพื่อคำนวณระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวได้ดังนี้

กำหนดให้ $\theta$ มีค่าเป็น

$$\theta_{(t)} = \frac{t_r(t) - t_{rs}}{t_{ro} - t_{rs}} \qquad (5.12)$$

เมื่อ

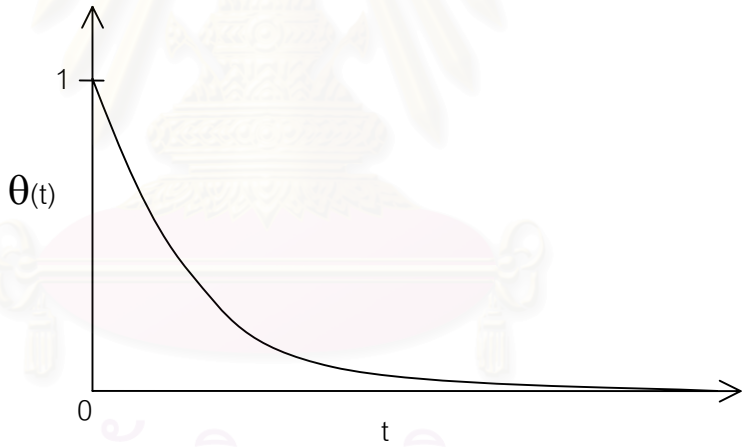
$t_r(t)$ = อุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว ( $^{O}C$)

$t_{ro}$ = อุณหภูมิห้องที่เวลาเริ่มต้น ( $^{O}C$)

$t_{rs}$ = อุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว ( $^{O}C$)

t = เวลา (min.)

เมื่อสร้างกราฟแสดงค่า $\theta$ ตามเวลาจากผลการทดลองที่ได้จะพบว่า $\theta$ มีค่าเท่ากับ 1 ที่เวลาเริ่มต้น และจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงช้าลงและลู่เข้าสู่ค่าศูนย์เมื่อเวลาผ่านไปดังแสดงในรูปที่ 5.3




รูปที่ 5.3 : แสดงแนวโน้มของค่า $\theta$ ตามเวลาจากผลการทดลอง

จากแนวโน้มของค่า $\theta$ ตามเวลาที่ได้จากผลการทดลอง เลือกใช้ฟังก์ชั่นเอกซ์โปเนนเชียลเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของค่า $\theta$ กับเวลาดังนี้

$$\theta_{(t)} = e^{-\alpha t} \qquad (5.13)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งค่า $\alpha$ เป็นค่าที่มีผลต่ออัตราการลู่เข้าสู่ศูนย์ของค่า $\theta$ และมีค่าแตกต่างกันในแต่ละกรณีของการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้มีการแปรเปลี่ยนตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวคือ อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น (Q) อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ($t_{wi}$) และ ภาระการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น (q) ดังนั้นค่า $\alpha$ จึงพิจารณาอยู่ในรูปแบบตามสมการที่ 5.14

$$\alpha = kQ^{a}t_{wi}^{b}q^{c} \qquad (5.14)$$

ซึ่งค่า k นี้พิจารณาเป็นค่าคงที่ของชุดทดลองฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นเพียงชุดเดียว โดยที่ค่า k นี้อาจเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรอื่นๆ เช่น ขนาดท่อน้ำเย็น และระยะห่างของท่อน้ำเย็น

นำค่า $\alpha$ ที่ได้จากแต่ละกรณีของการทดลอง มาหาค่าสัมประสิทธิ์ k , a , b และ c ด้วยวิธีสมการถดถอยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวคือ

k = 8.33*

a = 0.4863

b = -0.5453

c = -0.8528

ซึ่งจะได้ค่า

$$\alpha = \frac{8.33Q^{0.4863}}{t_{wi}^{0.5453}q^{0.8528}} \qquad (5.15)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ค่า k , a , b และ c ที่ได้ไม่รวมผลของกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 4 ดวง และกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภาย ในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 3 ดวง

แทนค่า $\alpha$ ที่ได้จากสมการที่ 5.15 และ $\theta$(t) จากสมการที่ 5.12 ลงในสมการที่ 5.13 แล้วจัดรูปสมการ จะได้สมการคำนวณระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวได้ดังแสดงในสมการที่ 5.16

$$t_r(t) = t_{ro} - (t_{ro} - t_{rs})(1 - e^{-\frac{8.33Q^{0.4863}t}{t_{wi}^{0.5453}q^{0.8528}}}) \qquad (5.16)$$

เมื่อ

$t_r(t)$ = อุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัว ( $^{O}$C)

$t_{ro}$ = อุณหภูมิห้องที่เวลาเริ่มต้น ( $^{O}$C)

$t_{rs}$ = อุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว ( $^{O}$C)

t = เวลา (min.)

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

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

q = ภาระการทำความเย็นที่สภาวะคงตัว (W/m$^2$)

โดยสมการดังกล่าวได้จากการทดลองโดยใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีระยะห่างของท่อน้ำเย็น 100 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ในการทดลองเท่านั้น

ซึ่งอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.11 จากการวิเคราะห์ในบทที่ 4 พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นแม้จะไม่ส่งผลต่อระดับอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อนที่สภาวะคงตัว แต่อย่างไรก็ดีอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของระดับอุณหภูมิห้องในช่วงสภาวะไม่คงตัว เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 5.16 จะพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะส่งผลให้ระดับอุณหภูมิห้องมีอัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงรวดเร็วขึ้น นอกจากนั้นการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำก็ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงลดลงของอุณหภูมิห้องในทางเดียวกัน

สมการคำนวณระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวที่นำเสนอนี้ได้ถูกนำไปตรวจสอบ เปรียบเทียบกับผลของการทดลองในทุกกรณีทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก.76 - ก.84

นอกเหนือจากนี้โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถนำมาสร้างสมการเพื่อคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวได้ โดยพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในลักษณะเดียวกับอุณหภูมิห้องตามเวลา ซึ่งจะได้สมการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวดังนี้คือ

$$t_p(t) = t_{po} - (t_{po} - t_{ps})(1 - e^{-\frac{13.74Q^{0.5191}t}{t_{wi}^{0.5921}q^{0.8355}}}) \qquad (5.17)$$

เมื่อ

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

$t_{po}$ = 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 5.17 นี้ (เช่นเดียวกับสมการที่ 5.16) พิจารณาเป็นค่าคงที่ของชุดทดลองฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่าคงที่นี้อาจเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรอื่นๆ ที่อยู่นอกเหนือจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ เช่น ขนาดของฝ้าเพดานทำความเย็น ความหนาของฝ้าเพดานทำความเย็น หรือวัสดุที่ใช้ทำฝ้าเพดานทำความเย็น

สมการคำนวณระดับอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวที่นำเสนอนี้ได้ถูกนำไปตรวจสอบ เปรียบเทียบกับผลของการทดลองในทุกกรณีทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ก.85 - ก.93

สมการที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการออกแบบระบบทำความเย็นด้วยฝ้าเพดานทำความเย็น หรืออาจใช้สมการที่ได้จากงานวิจัยนี้เพื่อเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบระบบทำความเย็นด้วยฝ้าเพดานทำความเย็นสำหรับผู้ที่สนใจได้ ทั้งนี้จะขอยกตัวอย่างการนำสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบทำความเย็นด้วยฝ้าเพดานทำความเย็นดังนี้

พิจารณาห้องในอาคารสำนักงานที่มีขนาดพื้นที่ 25 x 10 ตารางเมตร มีภาระในการทำความเย็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของห้อง 170 วัตต์/ตารางเมตรของพื้นที่ห้อง และใช้พื้นที่ติดตั้งหลอดไฟเพื่อให้แสงสว่าง 5.5 เปอร์เซนต์ของพื้นที่ห้อง ต้องการออกแบบฝ้าเพดานอลูมิเนียมทำความเย็น ขนาด 0.5 เมตร x 1 เมตร เพื่อติดตั้งภายในห้องดังกล่าว โดยมีอุณหภูมิห้องออกแบบ 24 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเริ่มต้นภายในห้อง 30 องศาเซลเซียส และน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นมีอุณหภูมิ 6.5 องศาเซลเซียส

ห้องขนาดพื้นที่ 250 ตารางเมตร และมีภาระการทำความเย็น 170 วัตต์/ตารางเมตร ดังนั้นห้องดังกล่าวจะมีภาระการทำความเย็นรวม

$Q_t$ = 250 x 170 = 42.5 กิโลวัตต์

เมื่อหักพื้นที่สำหรับติดตั้งหลอดไฟเพื่อให้แสงสว่าง 5.5 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่รวม จะเหลือพื้นที่สำหรับติดตั้งฝ้าเพดานทำความเย็น

$A_p$ = 0.945 x 250 = 236.25 ตารางเมตร

ซึ่งต้องติดตั้งด้วยฝ้าเพดานทำความเย็นขนาด 0.5 เมตร x 1 เมตร จำนวน 472 แผ่น และจะมีภาระการทำความเย็นของฝ้าเพดานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของฝ้าเพดานทำความเย็นเป็น

$q = 42.5x10^3/236.25 = 179.89$ วัตต์/ตารางเมตร$_{ฝ้าเพดาน}$

เลือกอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น

Q = 140 ลิตร/ชั่วโมง-แผ่นฝ้าเพดาน
= 2.33 ลิตร/นาที-แผ่นฝ้าเพดาน

ซึ่งจะใช้อัตราการไหลของน้ำเย็นรวมที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นทั้งหมดเป็น

TOTAL FLOW RATE = 2.33 x 472 = 1099.76 ลิตร/นาที ~ 290.3 GPM

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาระการทำความเย็นต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของฝ้าเพดานทำความเย็น 179.89 วัตต์/ตารางเมตร$_{ฝ้าเพดาน}$ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่กำหนดไว้ 6.5 องศาเซลเซียส และเลือกออกแบบอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวเป็น 24 องศาเซลเซียส เลือกขนาดท่อน้ำเย็นสำหรับยึดติดกับแผ่นฝ้าเพดานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 14 มิลลิเมตร ซึ่งท่อทองแดงมีสภาพการนำความร้อน 390 วัตต์/เมตร-เซลเซียส และตัวแผ่นฝ้าเพดานอลูมิเนียมมีความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีสภาพการนำความร้อน 237 วัตต์/เมตร-องศาเซลเซียส และจากสมการที่ 5.10 จะได้ระยะห่างของท่อน้ำเย็นเป็น

$$M = \frac{\frac{24 - (179.89/7.9194)^{1/1.1675} - 6.5}{179.89} - (2x10^{-3}/237)}{\frac{ln(14x10^{-3}/12x10^{-30})}{2\pi(390)} + 0.2106}$$

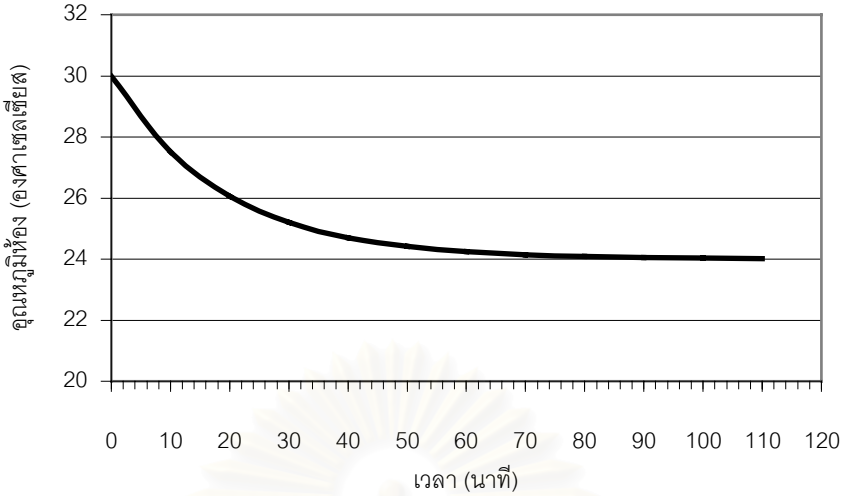
M = 79 มิลลิเมตร

เมื่อตรวจสอบความเร็วของน้ำเย็นภายในท่อขนาด 12 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำเย็นต่อหนึ่งแผ่นฝ้าเพดาน 2.33 ลิตร/นาที-แผ่นฝ้าเพดาน จะได้ความเร็วของน้ำเย็นภายในท่อ

$V_w$ = 0.34 เมตร/วินาที

เมื่อตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการปรับตัวลดลงของอุณหภูมิห้องจากอุณหภูมิเริ่มต้นภายในห้องที่ 30 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีระดับอุณหภูมิห้องเป็น 24 องศาเซลเซียส จากสมการที่ 5.16 โดยแสดงผลในรูปที่ 5.4 จะใช้ระยะเวลาประมาณ 76 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




รูปที่ 5.4 แสดงระดับอุณหภูมิห้องตามเวลาเมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหล 2.33 ลิตร/นาที-แผ่นฝ้าเพดาน

พิจารณาผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าและ ออกของฝ้าเพดานทำความเย็นเมื่อใช้อัตราการไหลรวมของน้ำเย็นจ่าย 1099.76 ลิตร/นาที (290.53 GPM) เมื่อมีภาระการทำความเย็นรวม 42.5 กิโลวัตต์ โดยไม่คิดค่าความสูญเสียทางความร้อนใดๆ

$$\text{TOTAL COOLING LOAD} = \rho \times \text{TOTAL FLOW RATE} \times C_p \times \Delta t$$

$$42500 = 1000 \times (1099.76/1000 \times 60) \times 4200 \times \Delta t$$

$$\Delta t = 0.55\ ^{O}C$$

ซึ่งการใช้อัตราการไหลของน้ำเย็นขนาด 290.53 GPM จากการคำนวณจะพบว่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า และขาออก มีค่า 0.55 $^{O}$C ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นโดยใช้น้ำเย็นโดยทั่วไป ที่มีผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า และออก 5.55 $^{O}$C ซึ่งในกรณีที่มีภาระการทำความเย็นขนาดเดียวกันจะใช้อัตราการไหลของน้ำเย็นรวม

$$(\text{TOTAL FLOW RATE} \times \Delta t)_{\text{conventional}} = (\text{TOTAL FLOW RATE} \times \Delta t)_{\text{panel}}$$

$$\text{TOTAL FLOW RATE}_{\text{conventional}} \times 5.55 = 290.53 \times 0.55$$

$$\text{TOTAL FLOW RATE}_{\text{conventional}} = 28.79\ \text{GPM}$$

# บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น โดยในการวิจัยนี้มีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานทำความเย็น 3 ตัวแปรคือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และภาระความร้อนต่อฝ้าเพดานทำความเย็น ซึ่งจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญที่ได้จากการทดลองได้ดังนี้

1.อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะมีผลต่ออุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวอยู่ในระดับต่ำกว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิสูงในกรณีที่มีภาระความร้อนเดียวกัน

2.อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะไม่มีผลต่อระดับอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัวอย่างเด่นชัด แต่จะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหลสูง จะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อัตรากรไหลต่ำ

3.ปริมาณภาระความร้อนจะมีผลต่อระดับของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว คือเมื่อมีภาระความร้อนสูงขึ้นอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้องที่สภาวะคงตัว จะสมดุลที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

4.อัตราถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น โดยที่การจ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ฝ้าเพดานทำความเย็นมีสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าในกรณีที่จ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิสูง ในทางตรงกันข้ามอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างเด่นชัด นั้นคือการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นจะไม่แสดงอิทธิพลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

## 6.2 **ข้อเสนอแนะ**

เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ผู้ทำการวิจัยได้ทดลองโดยใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นเพียงชุดเดียวตลอดการทดลอง โดยชุดฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ท่อน้ำเย็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 17 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 19 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างท่อน้ำเย็น 100 มิลลิเมตร ดังนั้นงานวิจัยในเรื่องการศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็นนี้ยังสามารถขยายขอบเขตของการวิจัยออกไปได้โดยการเลือกออกแบบฝ้าเพดานทำความเย็นที่มีระยะห่างระหว่างท่อน้ำเย็น หรือขนาดของท่อน้ำเย็นที่แตกต่างออกไปจากฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อตรวจสอบสมรรถนะในการทำความเย็นที่ได้กับสมการที่ได้จากงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ค่าอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้มีผลทำให้เกิดช่วงการไหลแบบราบเรียบภายในท่อ เนื่องจากการใช้อัตราการไหลของน้ำเย็นที่ต่ำเมื่อเทียบกับขนาดของท่อน้ำเย็นที่ใช้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าลักษณะการไหลแบบราบเรียบที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้อัตราการไหลที่มีการแปรเปลี่ยนในการทดลองไม่อาจแสดงผลกระทบที่ชัดเจนต่ออุณหภูมิ ณ จุดคงตัวได้ ดังนั้นจึงแนะนำให้ทำการทดลองที่อัตราการไหลที่สูงขึ้น เพื่อให้ได้การไหลภายในท่ออยู่ในย่านการไหลแบบปั่นป่วน อันอาจจะทำให้อัตราการไหลมีผลกระทบต่ออุณหภูมิ ณ จุดคงตัว แทนที่จะไม่มีดังที่ได้สรุปไว้ในงานวิจัยนี้

จากการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า และขาออกของฝ้าเพดานทำความเย็นยังมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นด้วยน้ำเย็นโดยทั่วไป อันเนื่องมาจากการให้ปริมาณภาระความร้อนในการทดลองต่ำเกินไป ซึ่งแนะนำให้ทำการทดลอง

โดยเพิ่มปริมาณภาระความร้อนให้สูงขึ้น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำเย็นขากลับให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นที่สูงขึ้น ในขณะที่ใช้อัตราการไหลของน้ำเย็นน้อยลง

ในการทำการทดลองนั้นควรคำนึงถึงการป้องกันพลังงานสูญเสียที่จะเกิดขึ้นด้วย เช่นการใช้ซิลิโคนนำความร้อนที่มีสภาพการนำความร้อนสูง เป็นตัวประสานระหว่างท่อน้ำเย็น และตัวฝ้าเพดานเพื่อกำจัดช่องว่างอากาศระหว่างรอยต่อของท่อน้ำเย็นกับแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็น รวมถึงการซีลตามรอยต่อของผนังหรือ ฝ้าเพดาน ด้วยซิลิโคนยาง หรือเทปกาว ก็เป็นสิ่งจำเป็น เพื่อป้องกันลมรั่วเข้าสู่ห้องทดลอง ซึ่งจะมีผลให้อัตราส่วนความชื้นของอากาศในห้องทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลง และพลังงานสูญเสียที่จะเกิดขึ้นด้วย ในส่วนของพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้จากการตรวจสอบอย่างคร่าวๆ โดยการคำนวณผลต่างของพลังงานที่ใส่ให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น และพลังงานที่ได้รับ ยกตัวอย่างเช่นกรณีการทดลองที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ 2 ดวง ซึ่งจากการทดลองที่สภาวะคงตัวสามารถคำนวณพลังงานที่ใส่ให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นได้จากผลคูณของอัตราการไหลโดยมวลต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตรของฝ้าเพดาน(2x1.5/60 = 0.05 kg/s) กับความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเย็น (4200 J/kg-$^{o}$C) และผลต่างของอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า และขาออกที่สภาวะคงตัวของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีทดลองดังกล่าว (0.7$^{o}$C) มีค่าเป็น 147 วัตต์/ตารางเมตร และพลังงานที่ได้รับพิจารณาจากผลรวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น การพาความร้อน และจากการแผ่รังสีของหลอดไฟตามสมการที่ 2.14 , 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีทดลองดังกล่าวมีค่าเป็น 130.15 วัตต์/ตารางเมตร ทั้งนี้มีพลังงานสูญเสียเป็น 16.85 วัตต์/ตารางเมตร เมื่อพิจารณาพลังงานสูญเสียในลักษณะเดียวกันในกรณีของการทดลองอื่นๆ พบว่ามีพลังงานสูญเสียไม่คงที่ ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการทำการทดลองในแต่ละกรณีในระยะเวลาติดกัน ซึ่งอาจทำให้ตัวฝ้าเพดานยังคงมีความเย็นสะสมอยู่ภายในโครงสร้าง ทำให้พลังงานสูญเสียที่คำนวณได้ในแต่ละกรณีของการทดลองมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นการทำการทดลองในแต่ละกรณีควรมีระยะเวลาห่างกันพอสมควร

นอกจากนั้นแล้วห้องที่ใช้ทำการทดลองควรมีการหุ้มฉนวนกันความร้อน เพื่อป้องกันภาระความร้อนจากภายนอกที่ควบคุมได้ยาก ซึ่งการทำการทดลองควรมีเฉพาะภาระความร้อนภายในเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถควบคุม และตรวจสอบได้ ซึ่งจะทำให้สมรรถนะในการทำความเย็นของฝ้าเพดานที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้อง แม่นยำเพิ่มขึ้น

# รายการอ้างอิง


**ภาษาไทย**

มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร: วิทยพัฒน์, 2542.

**ภาษาอังกฤษ**

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

Dale, J.D. The Thermal Performance of a Radiant Panel Floor-Heating System. ASHRAE Transactions 99(1993) : 24-34.

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

Jiang, Z. Indoor Airflow with Cooling Panel and Radiative/Convective Heat Source. ASHRAE Transactions 98(1): 33-42.

Kochendorfer, C. Testing of Cooling Panels and Their Use in System Planning. ASHRAE Transactions 102(1996): 651-658.

Kreith, F. and Kreider, J.F. Principals of Solar Energy. New York: Hemisphere Publishing, 1978.

Min, T.C., et al. Natural convection and radiation in a panel heated room. ASHRAE Research Report No. 1576. ASHRAE Transactions 62(1956): 337.

Simmonds, P. Practical Applications of Radiant Heating and Cooling to Maintain Comfort Conditions. ASHRAE Transactions 102(1996): 659-666.


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Stoecker, W. F. Design of Thermal Systems. 3rd ed. Malaysia. McGraw-Hill, 1989.

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



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

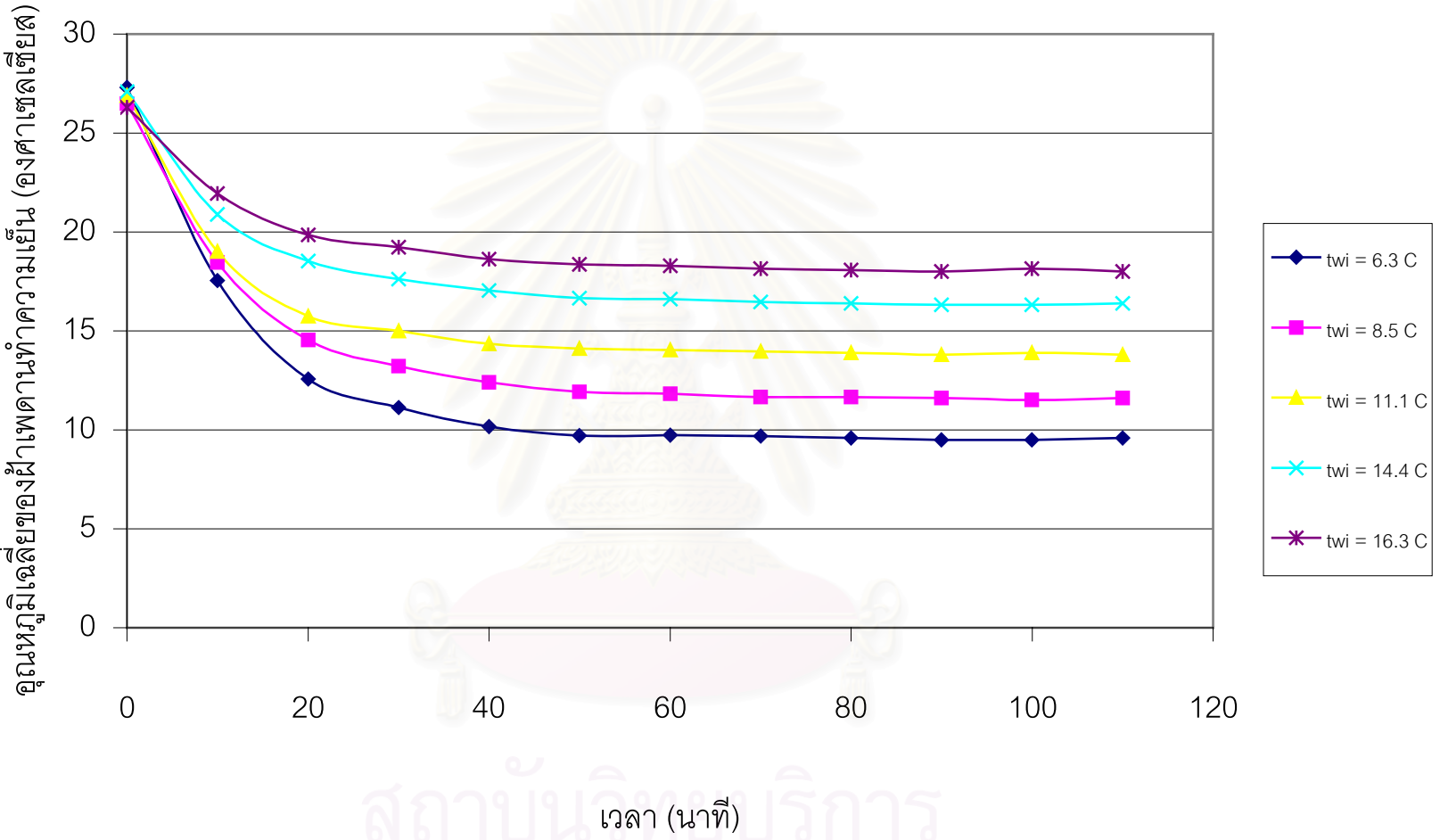
# ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

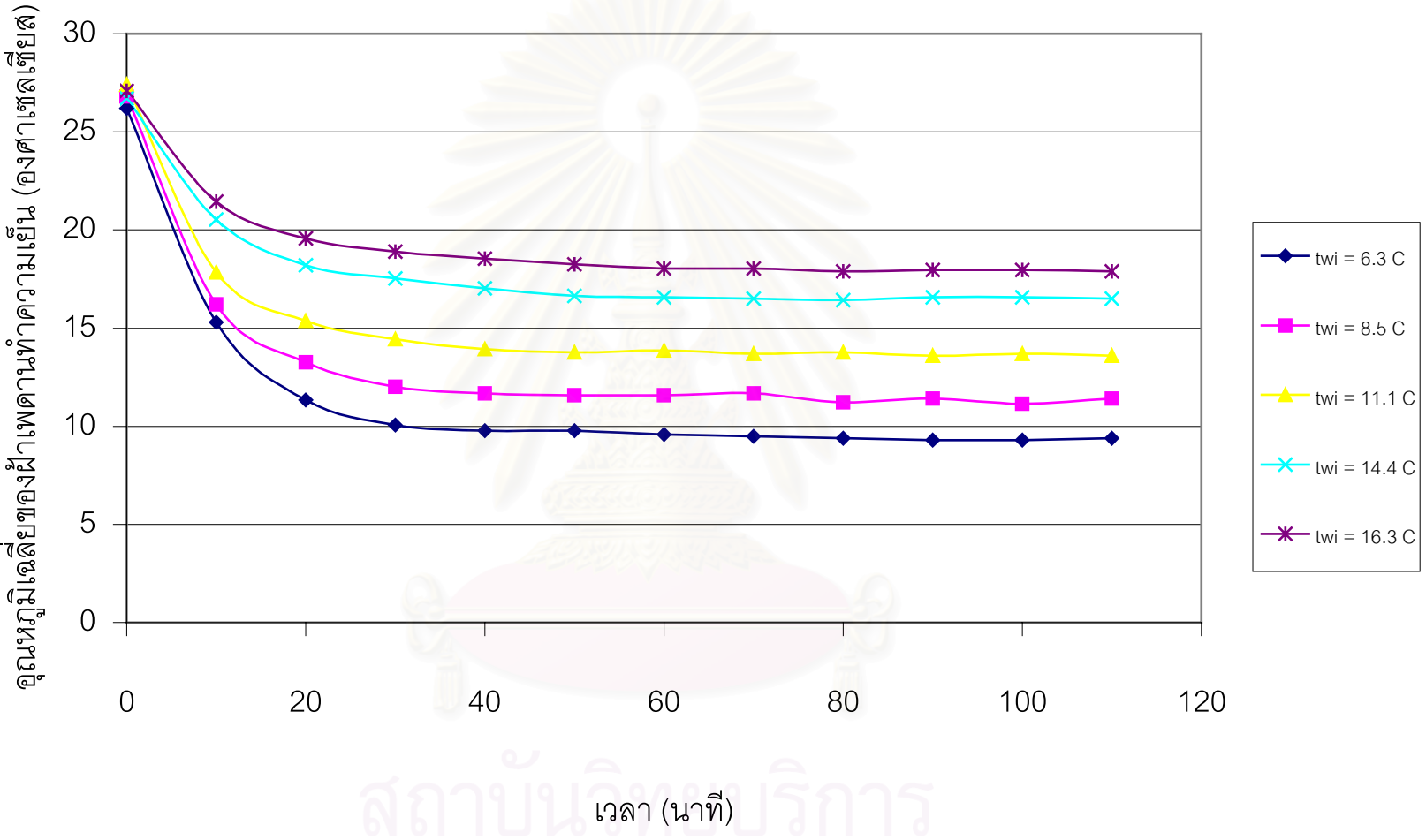
# ภาคผนวก ก

## กราฟ และตารางแสดงผลการทดลอง

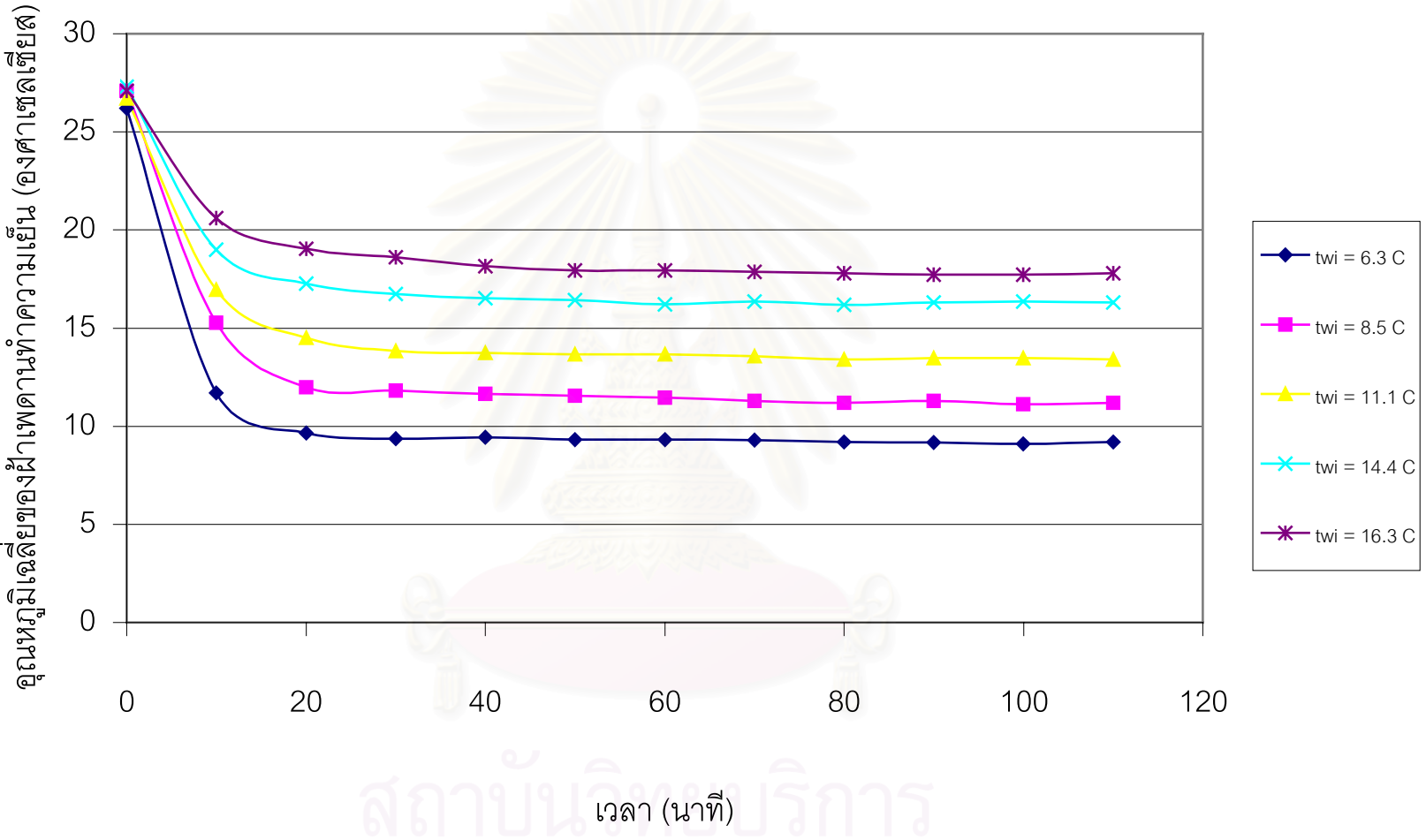
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



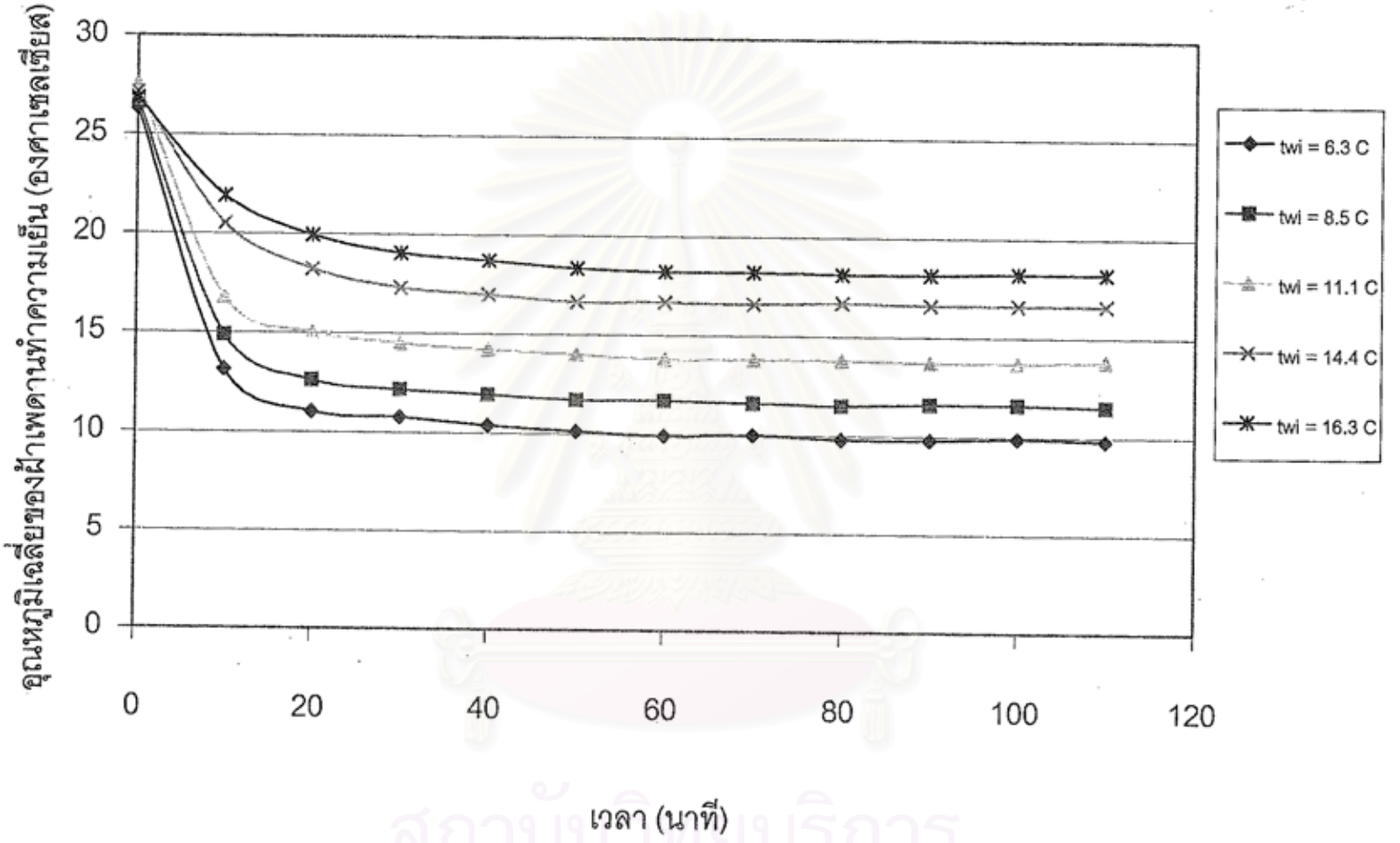

รูปที่ ก.1 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



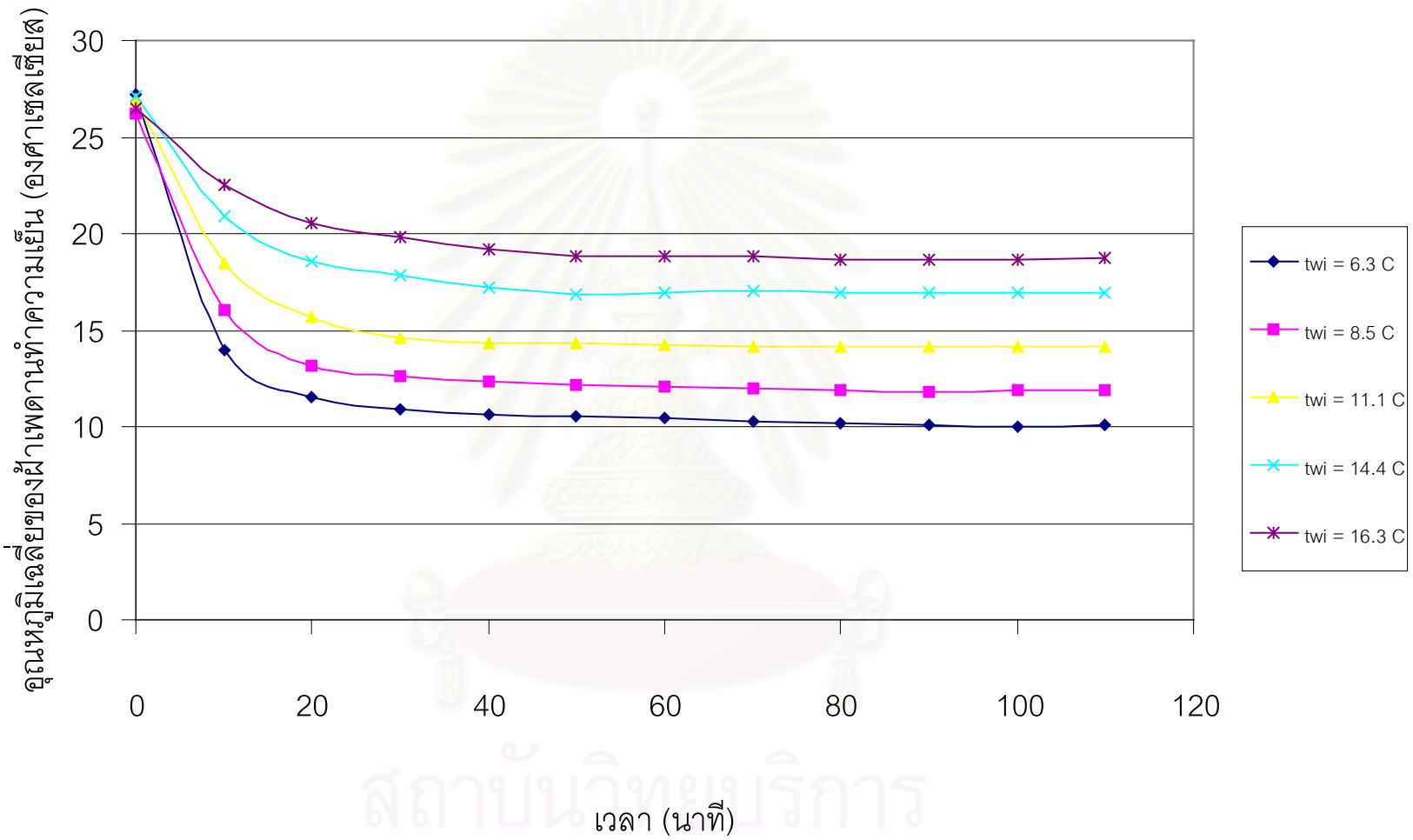

รูปที่ ก.2 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



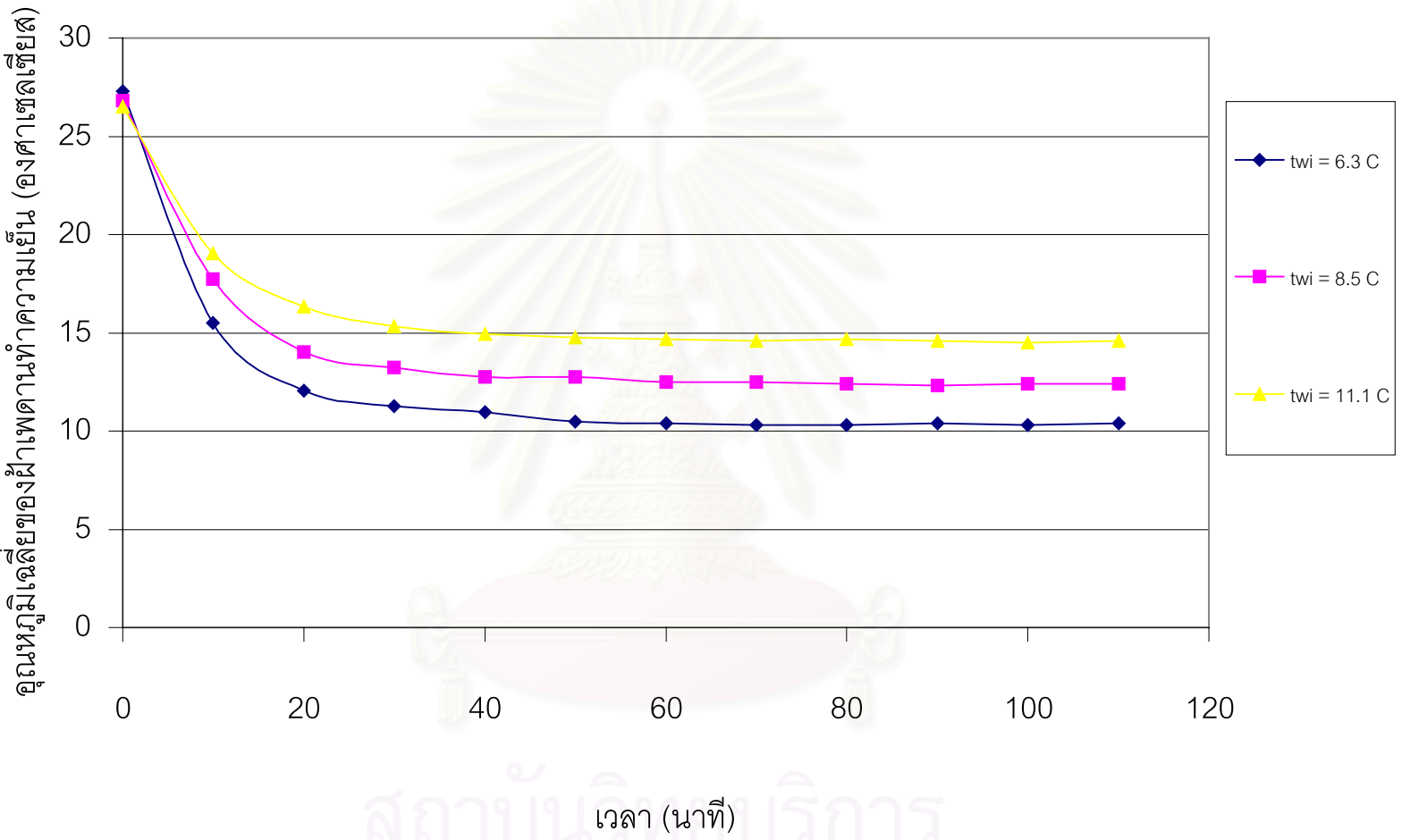

รูปที่ ก.3 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



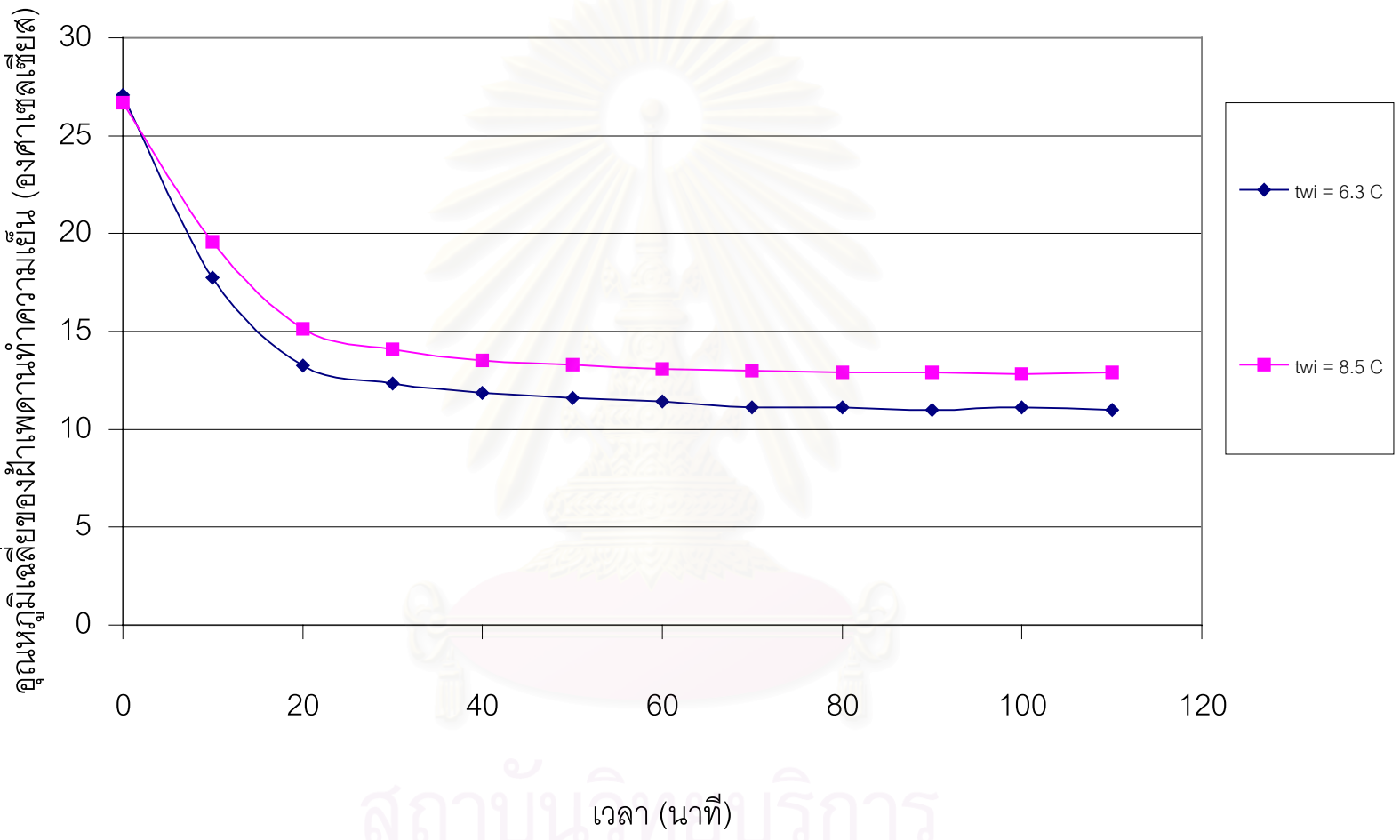

รูปที่ ก.4 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 1 ดวง



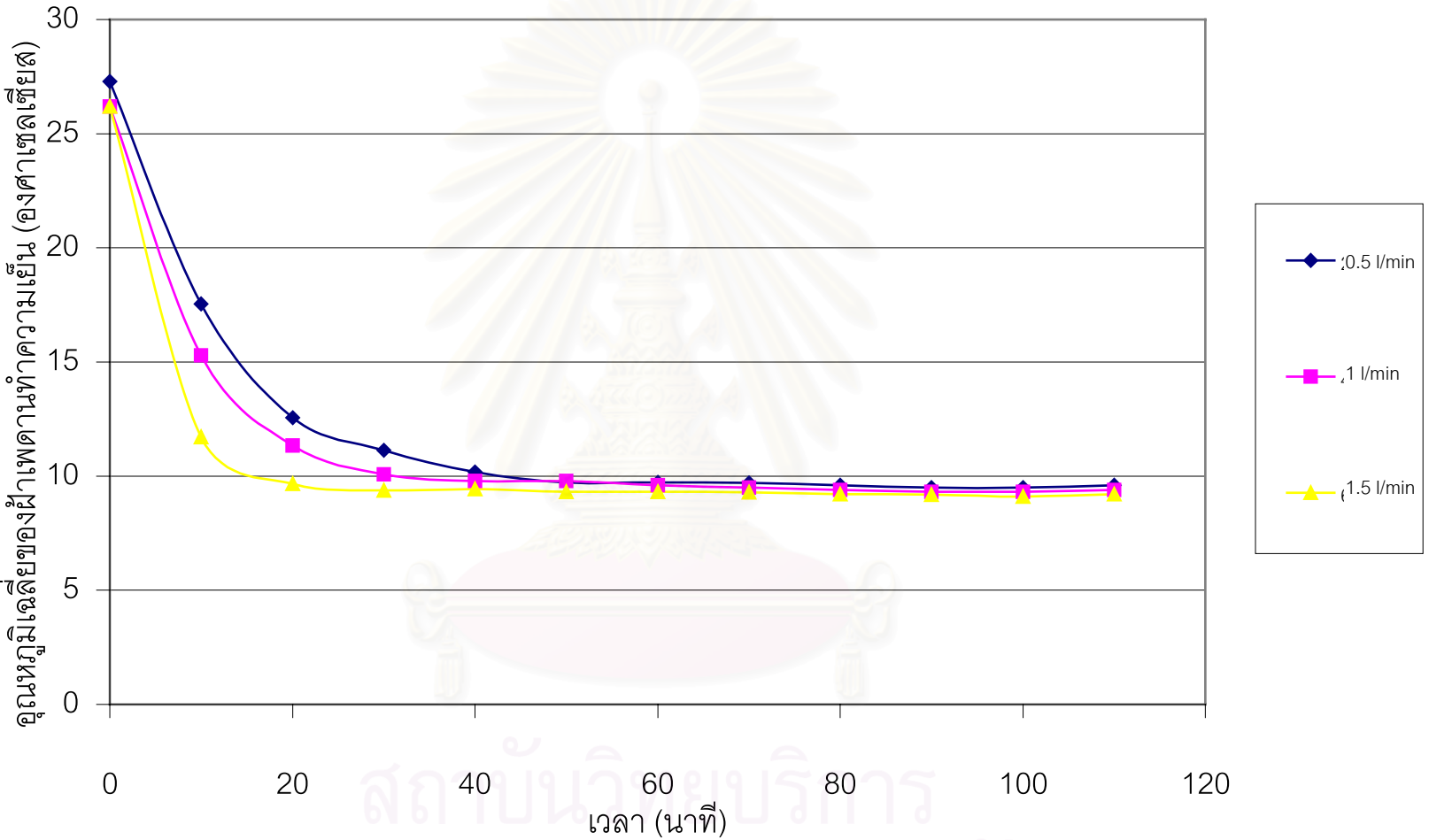

รูปที่ ก.5 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 2 ดวง



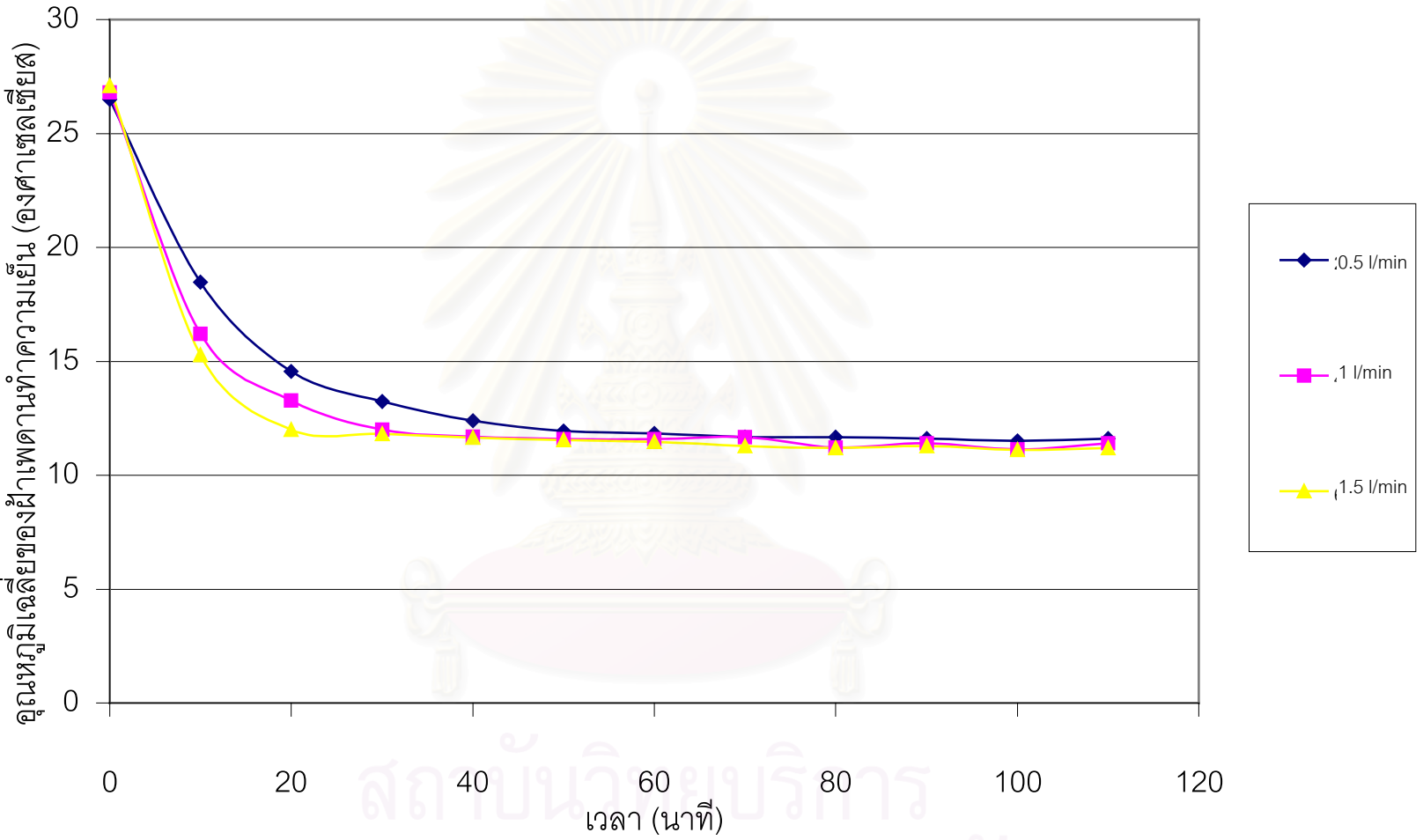

รูปที่ ก.6 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 3 ดวง



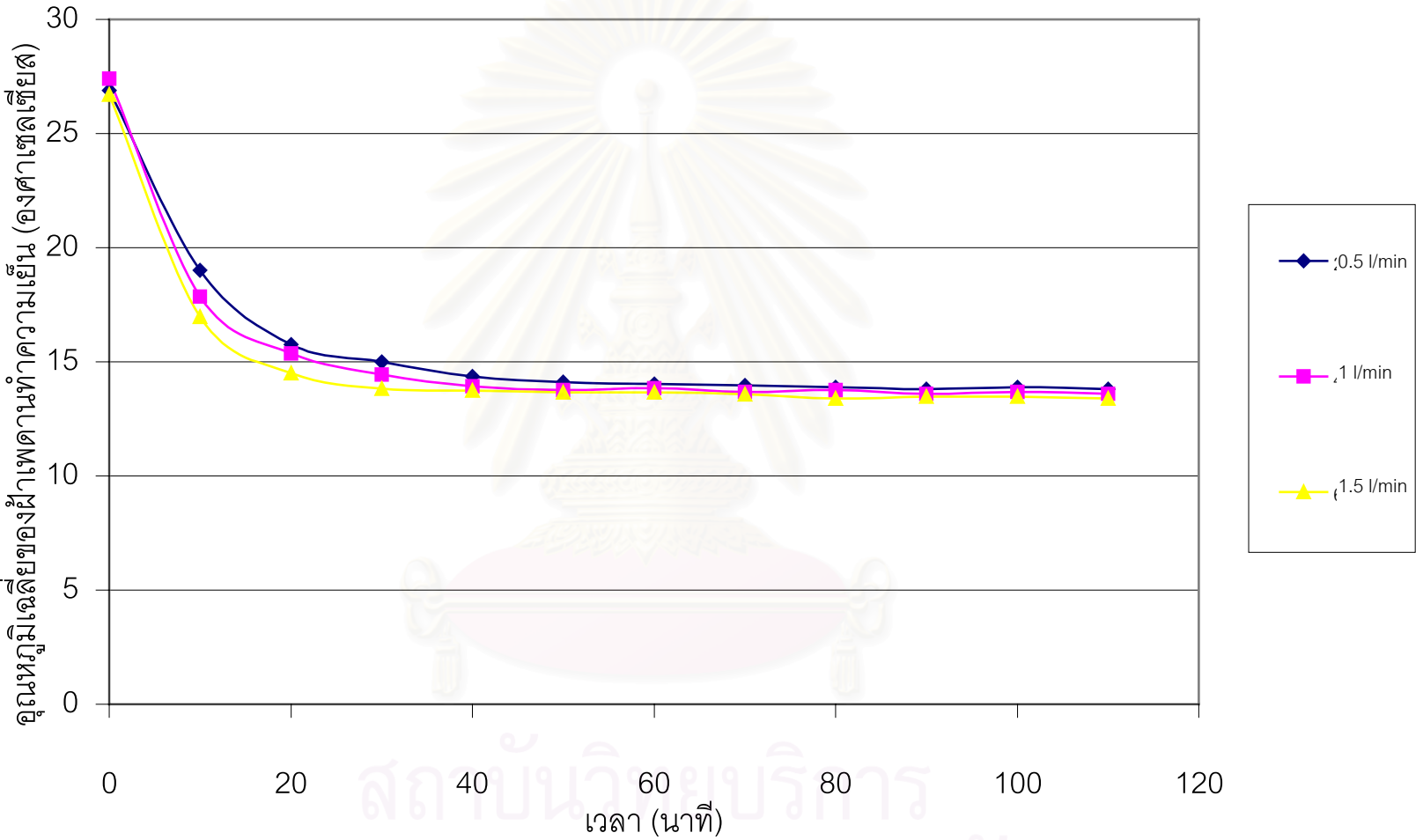

รูปที่ ก.7 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟ 4 ดวง



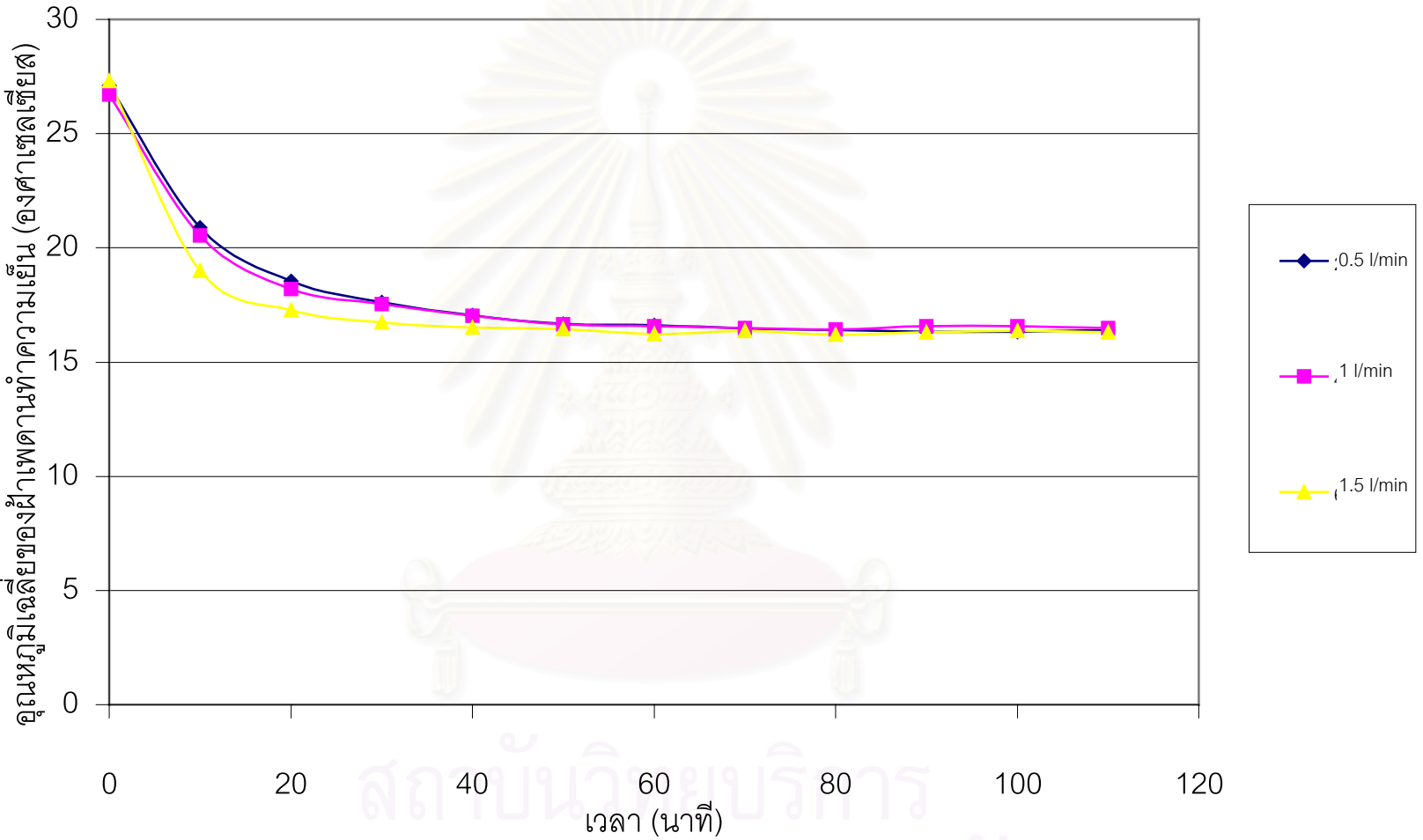

รูปที่ ก.8 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



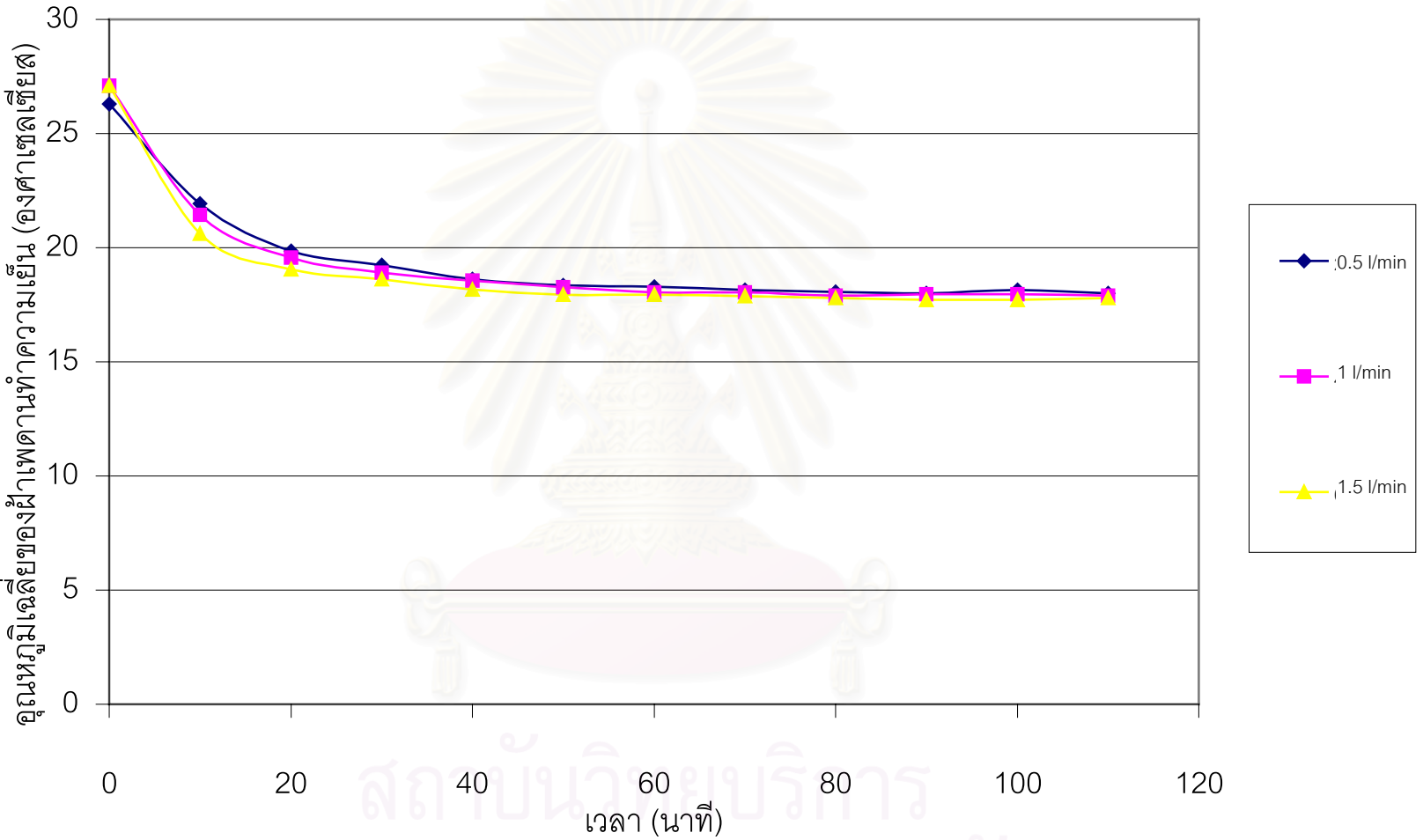

รูปที่ ก.9 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



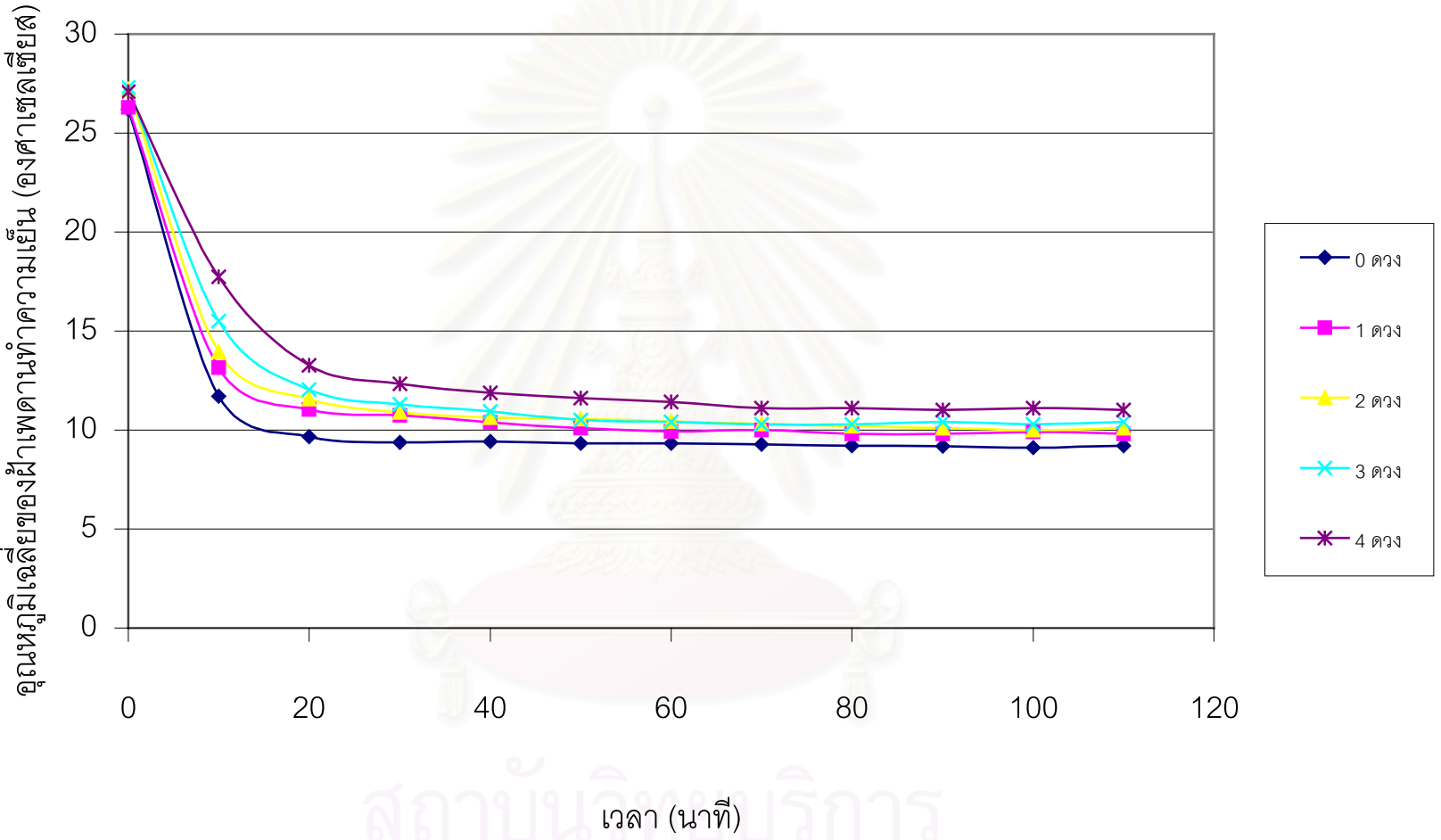

รูปที่ ก.10 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



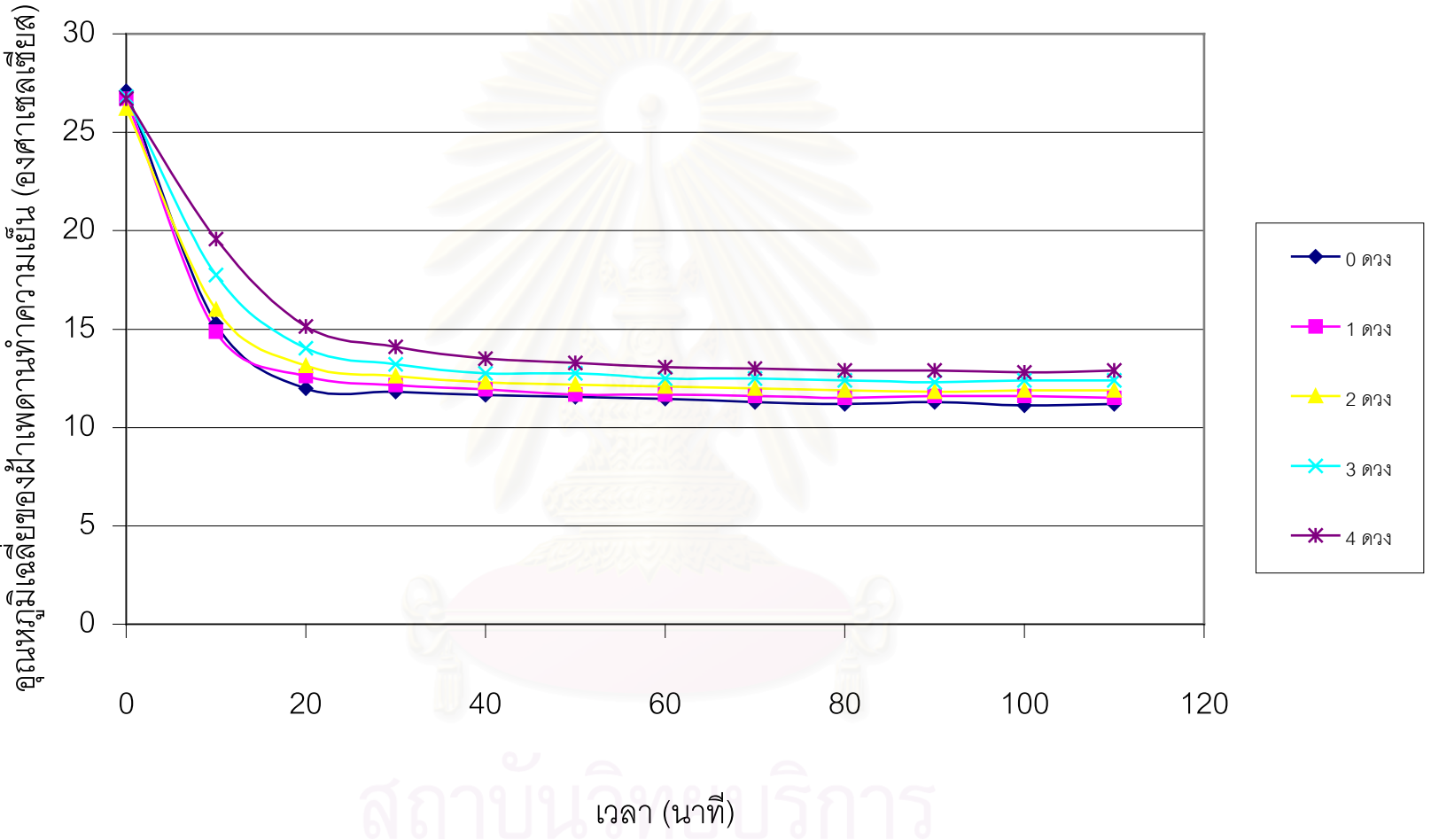

รูปที่ ก.11 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



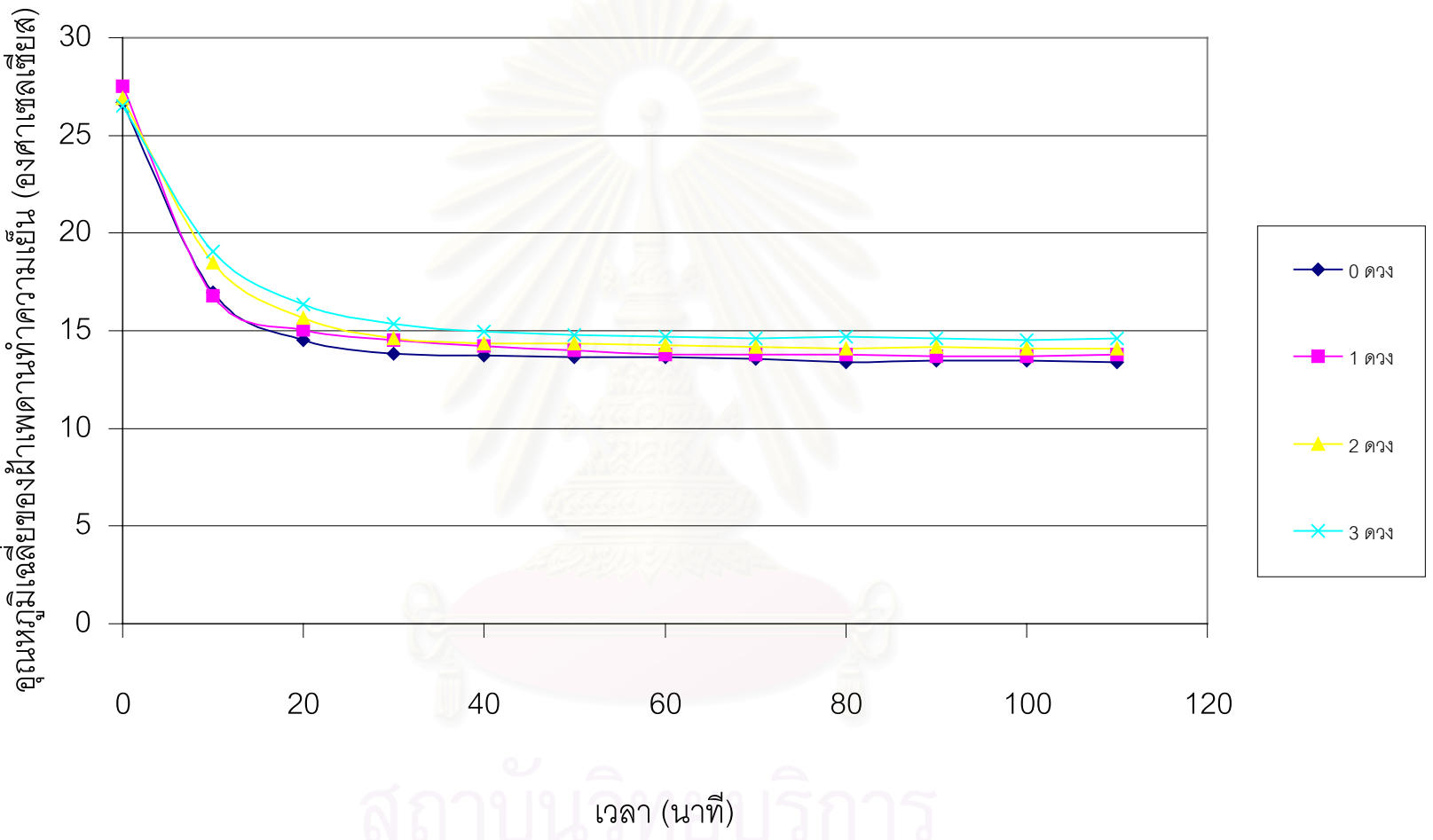

รูปที่ ก.12 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



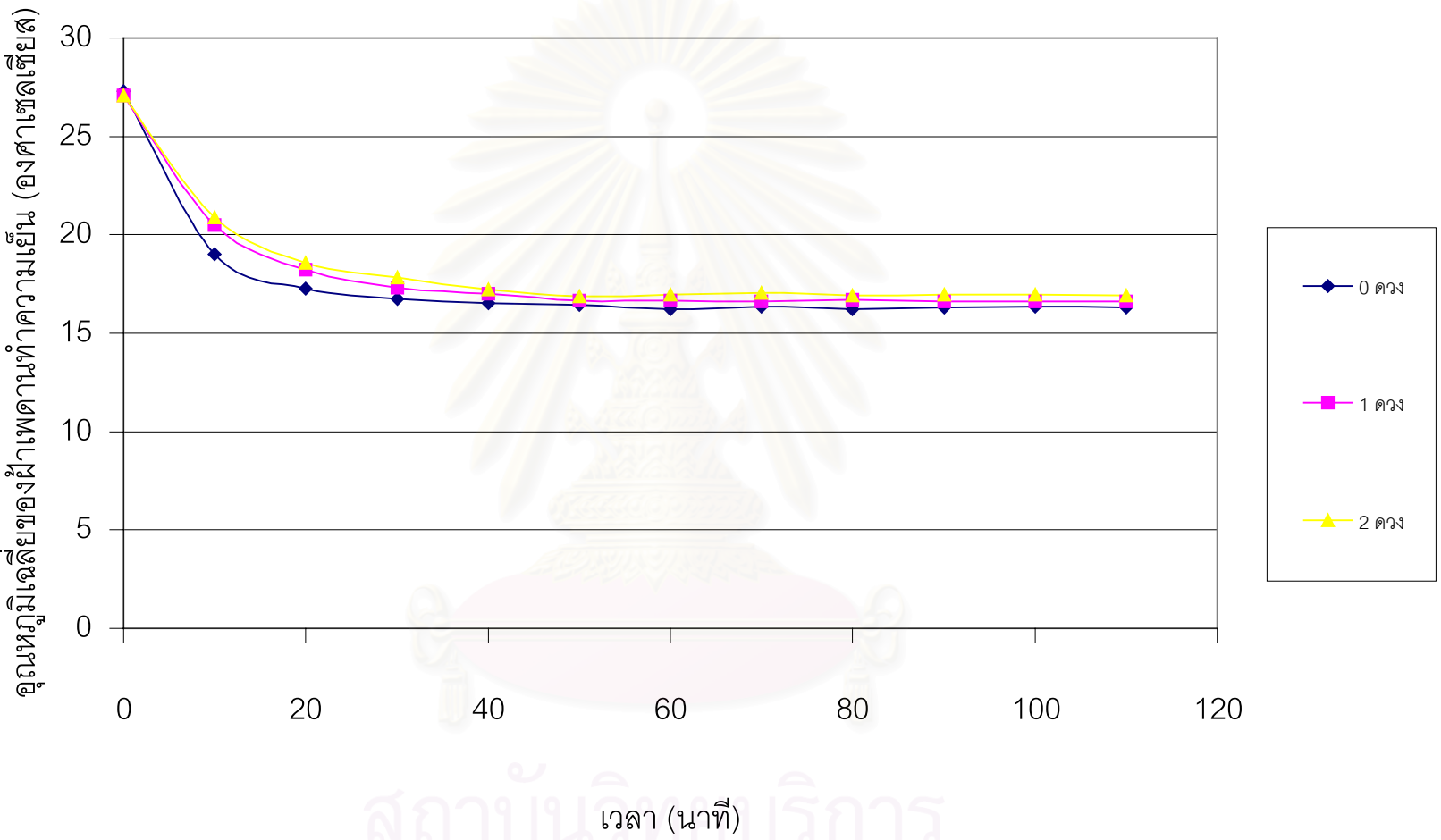

รูปที่ ก.13 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส



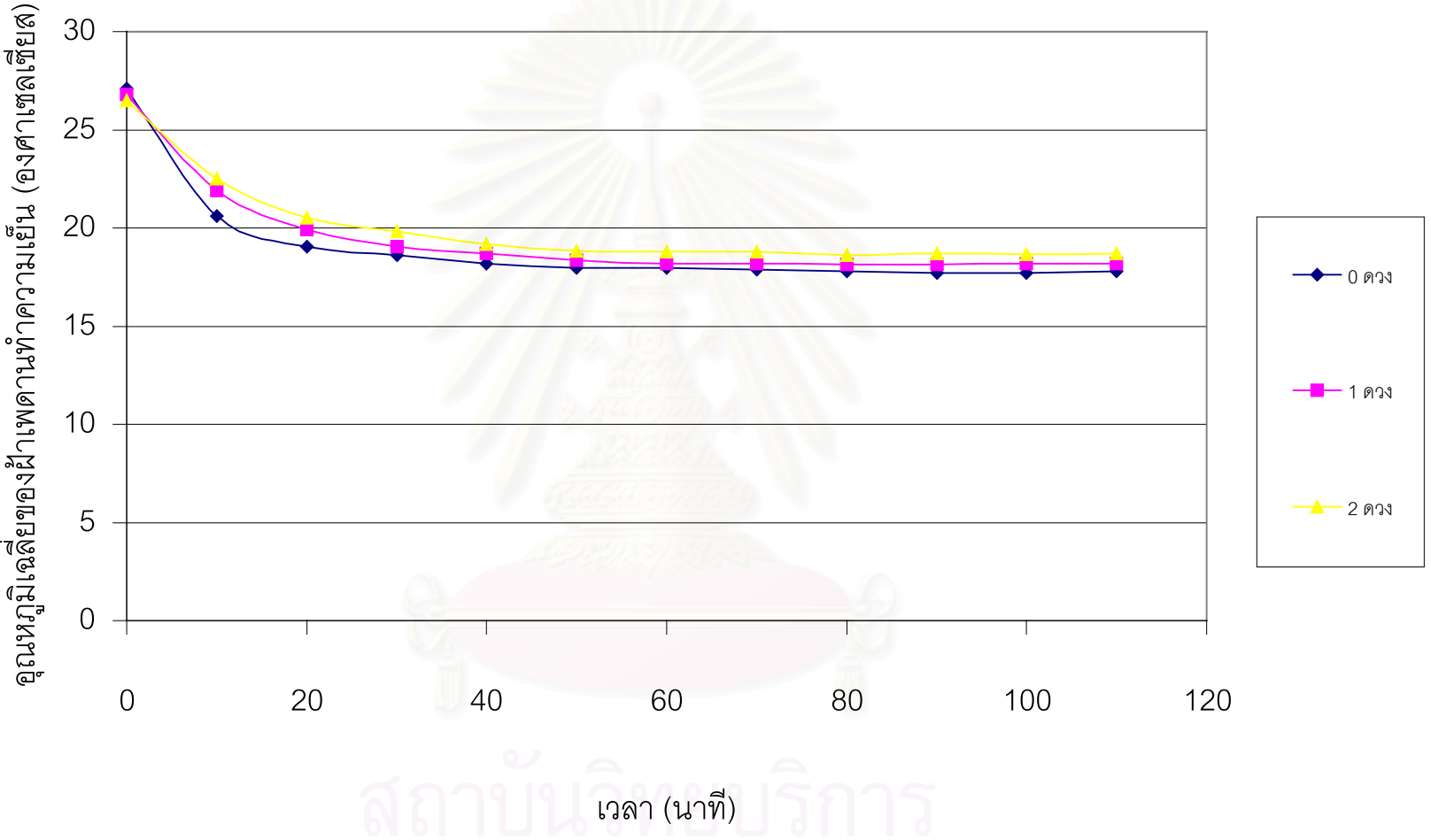

รูปที่ ก.14 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส



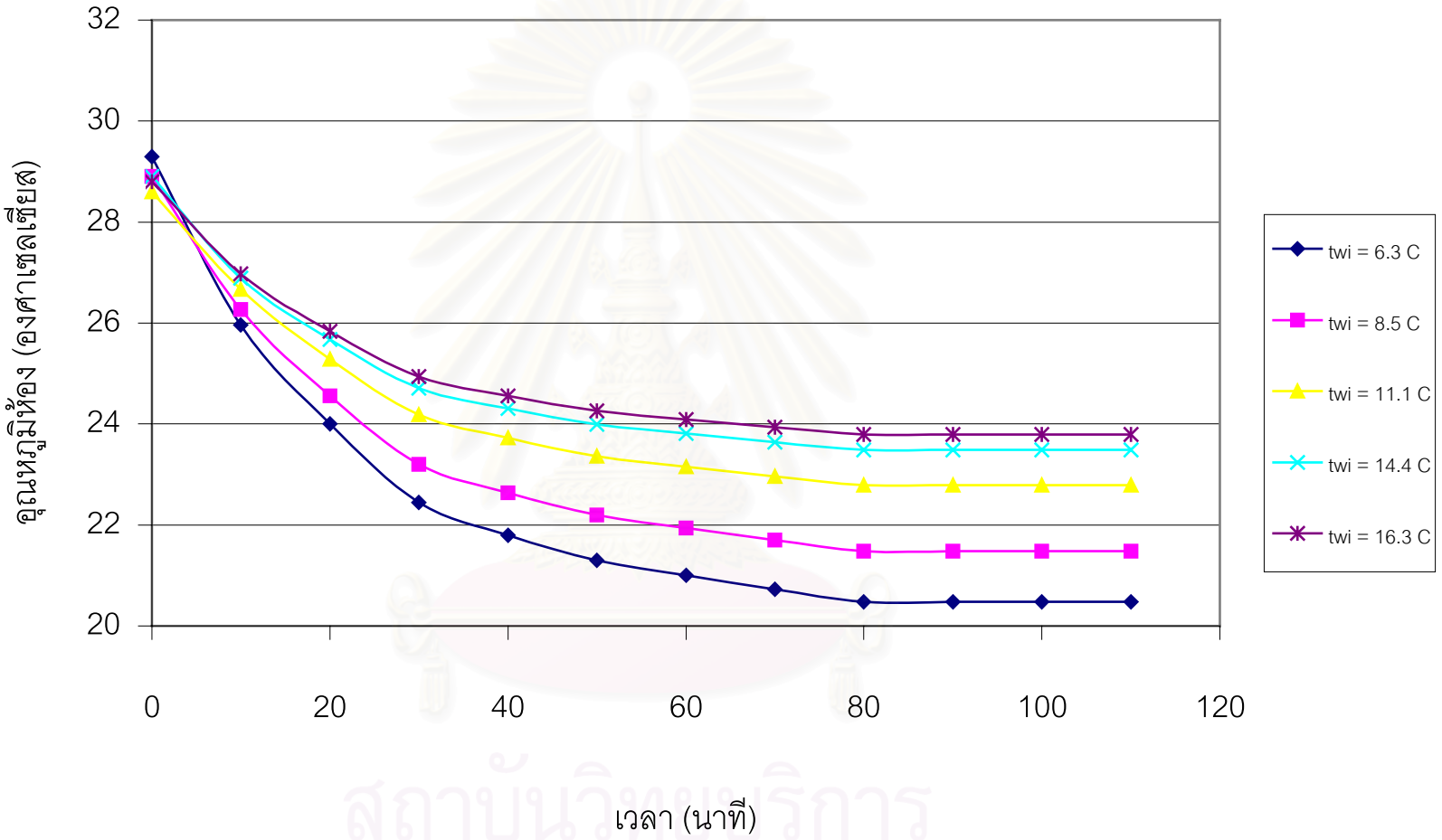

รูปที่ ก.15 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ,3 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส



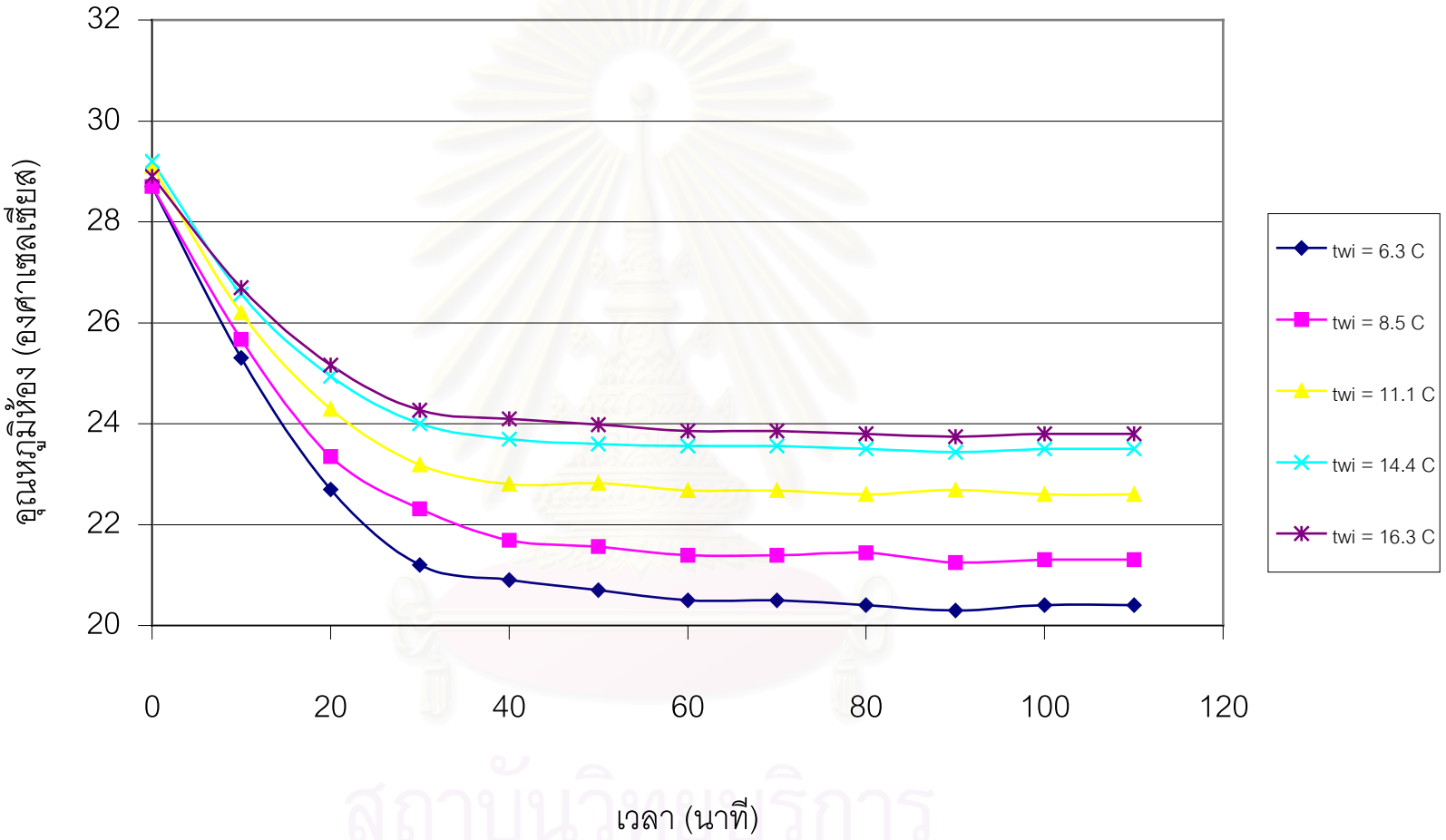

รูปที่ ก.16 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส



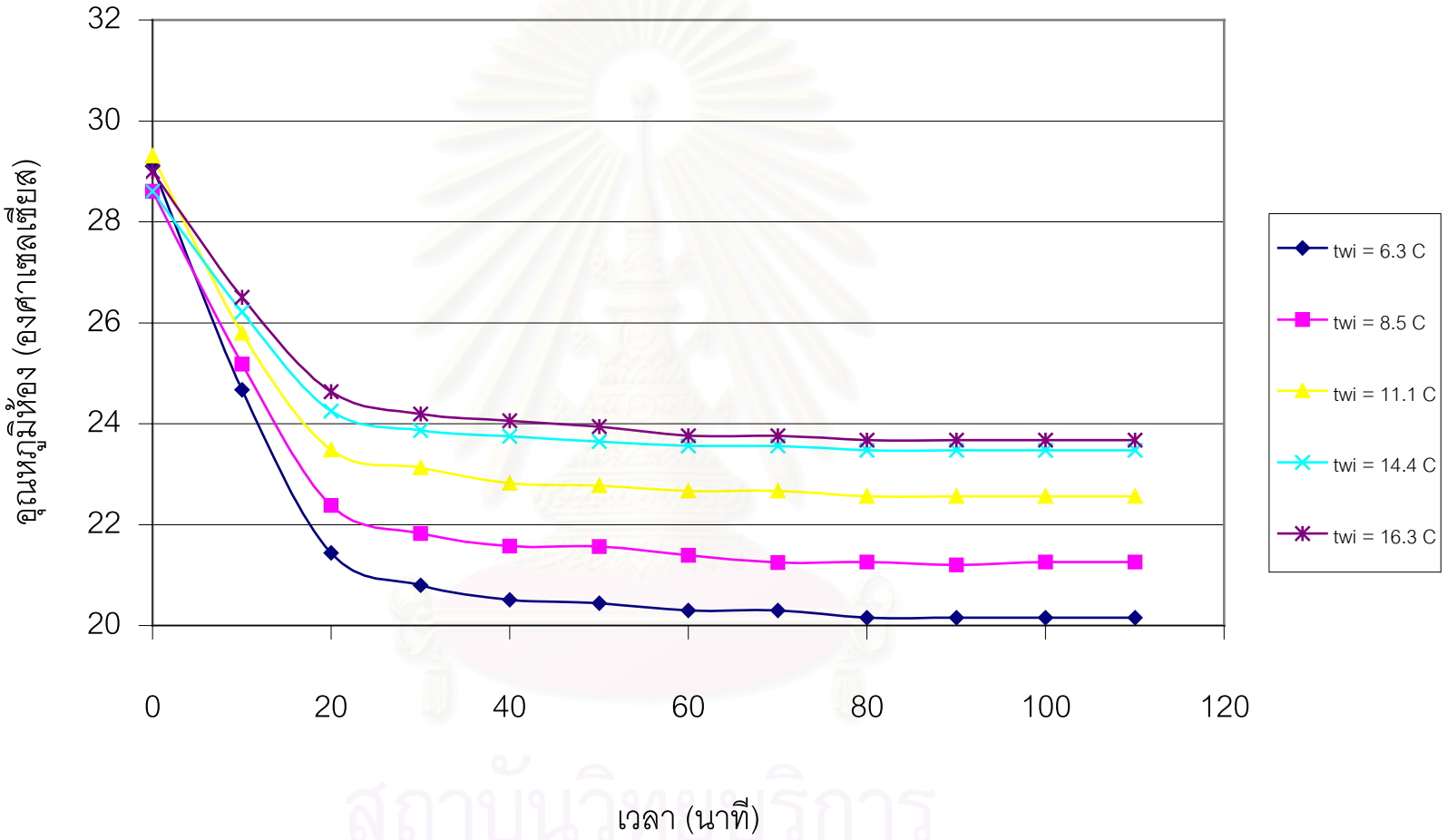

รูปที่ ก.17 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส



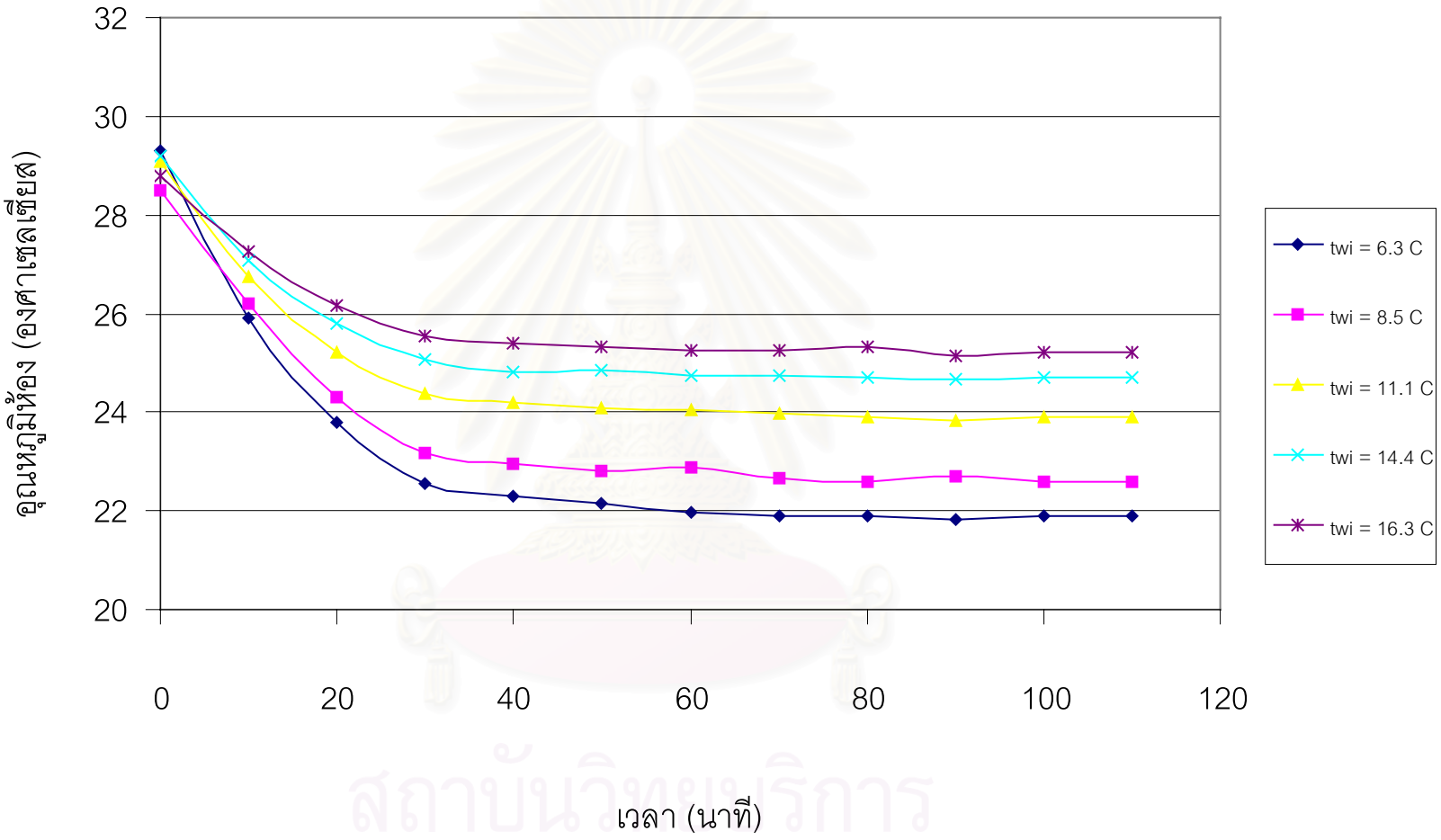

รูปที่ ก.18 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



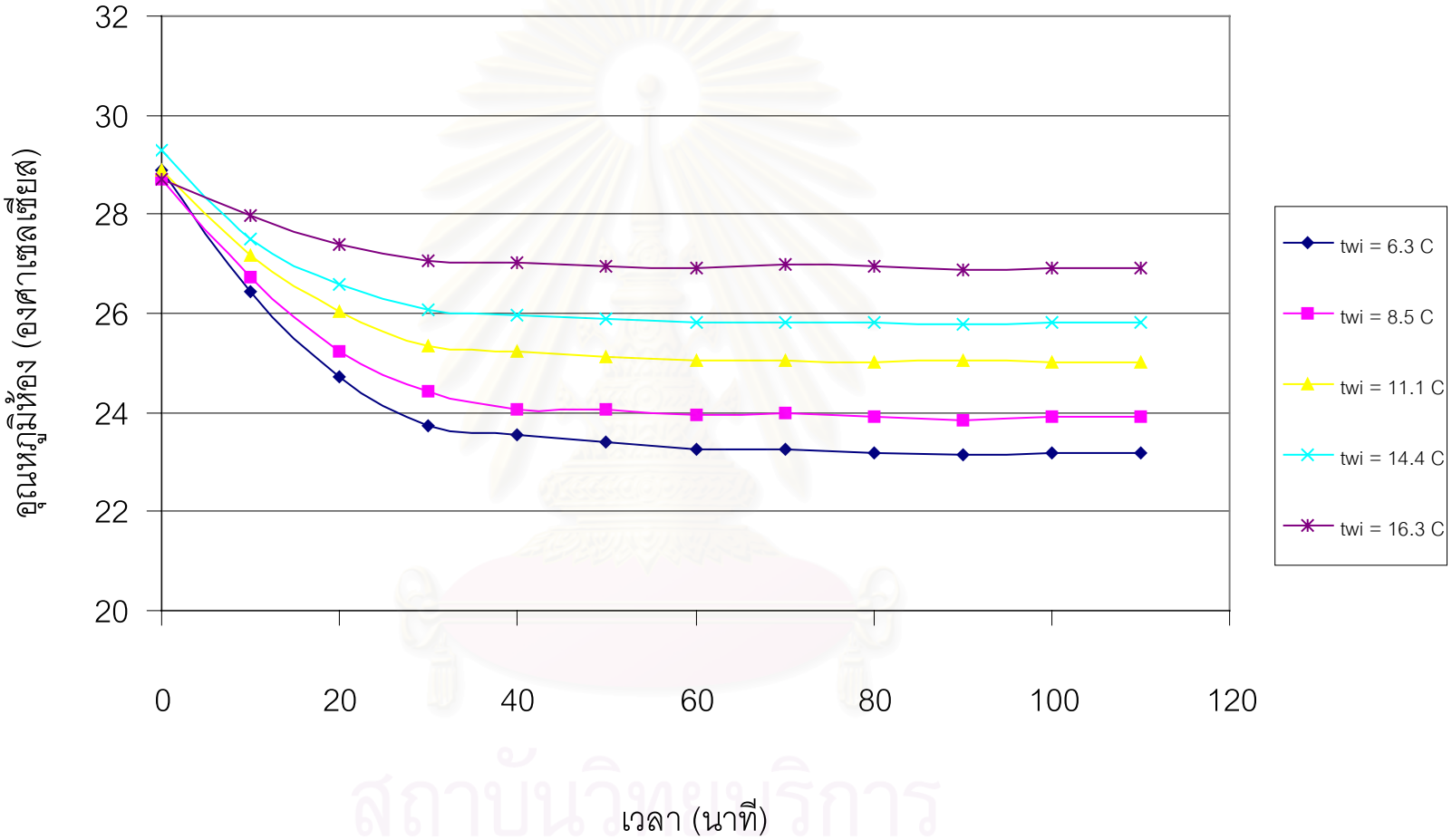

รูปที่ ก.19 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



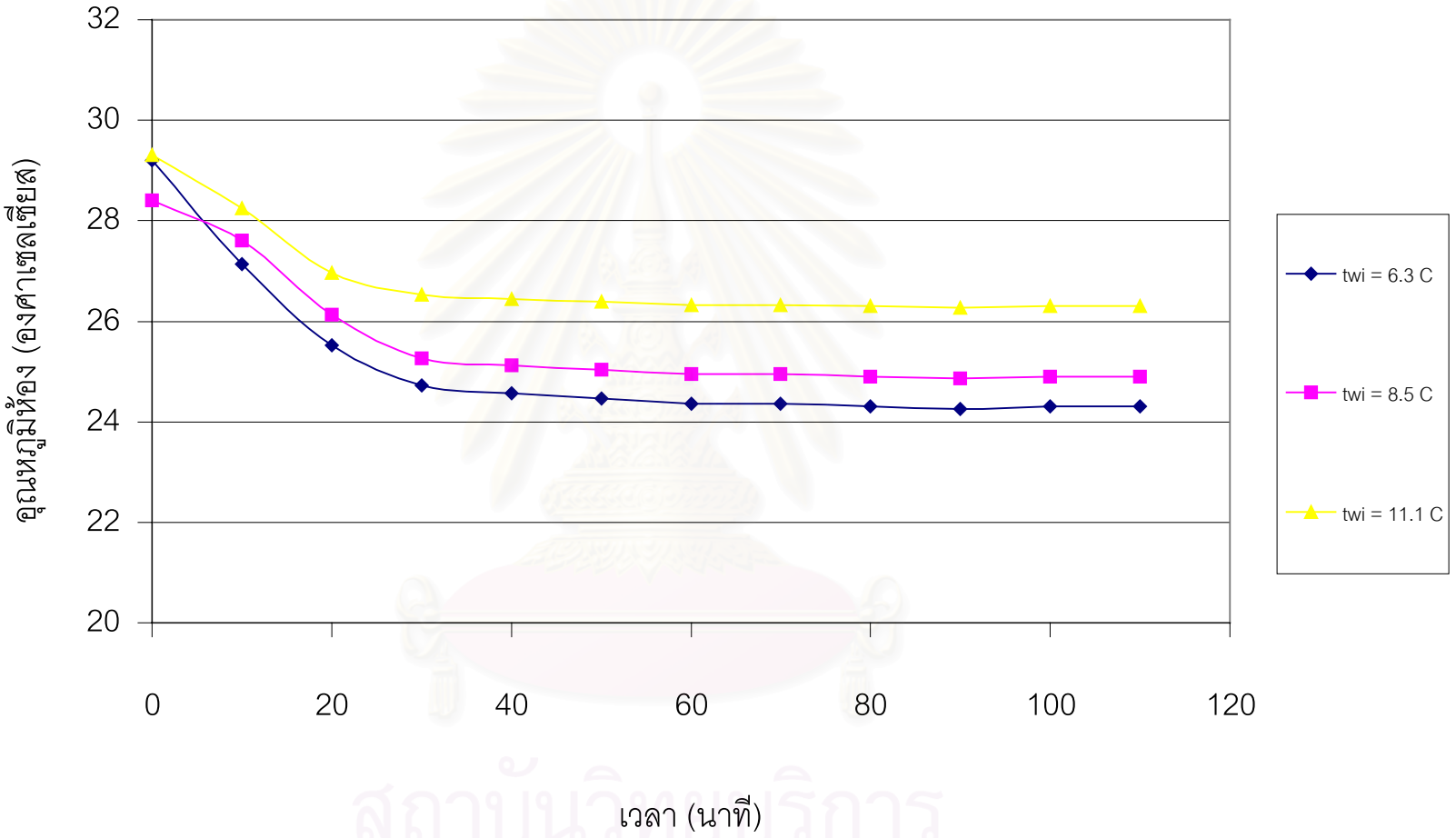

รูปที่ ก.20: กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



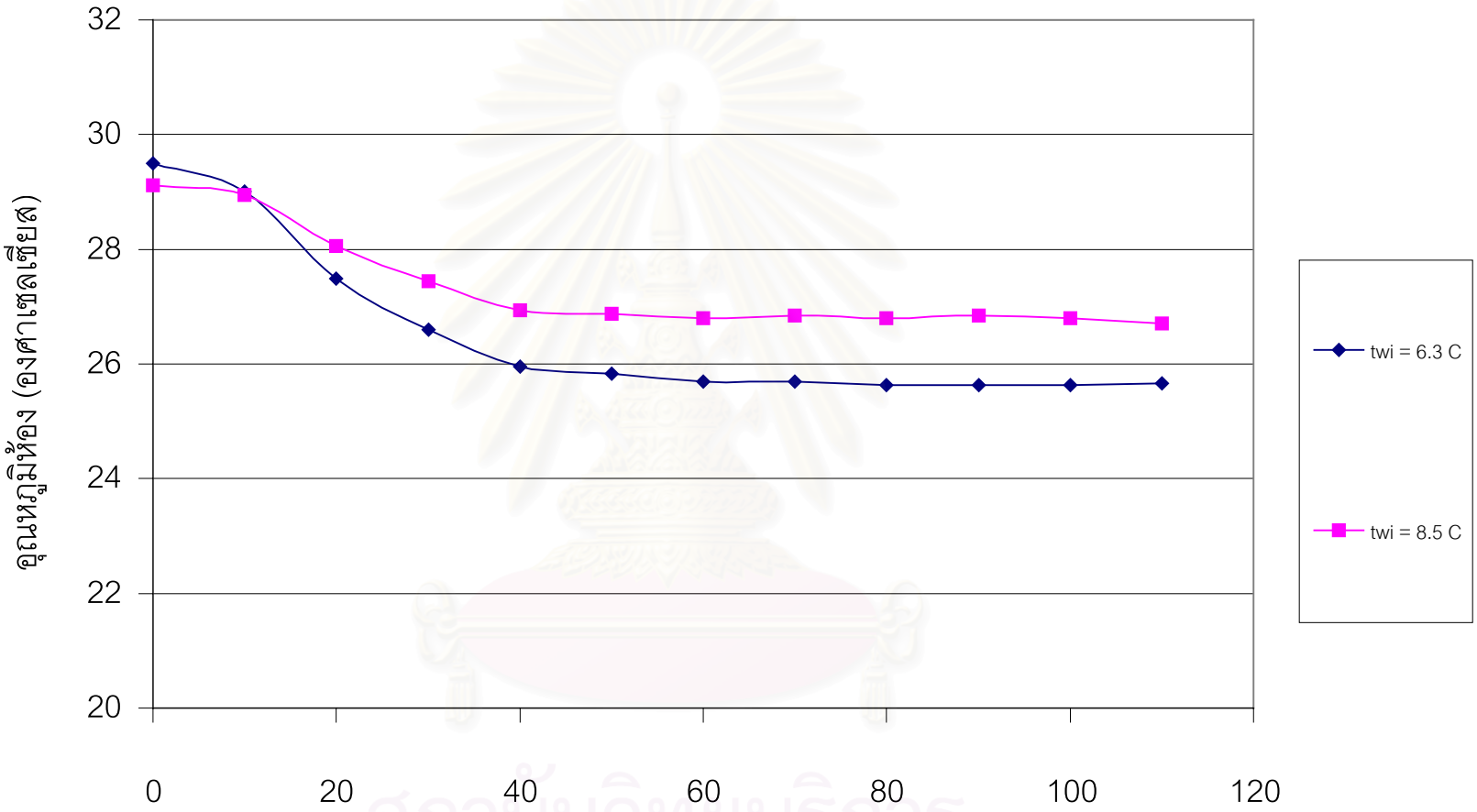

รูปที่ ก.21 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 1 หลอด



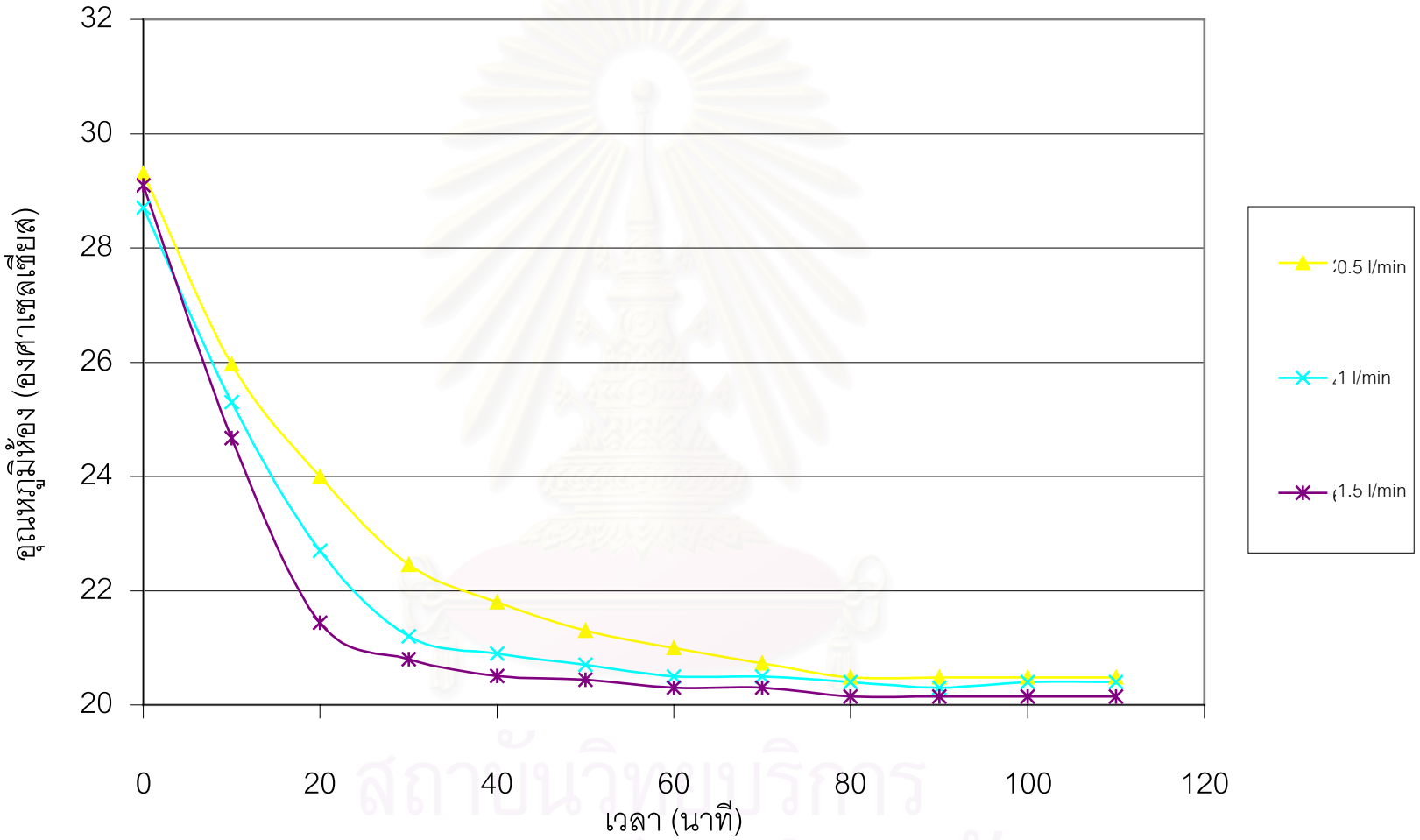

รูปที่ ก.22 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 14.4 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 2 หลอด



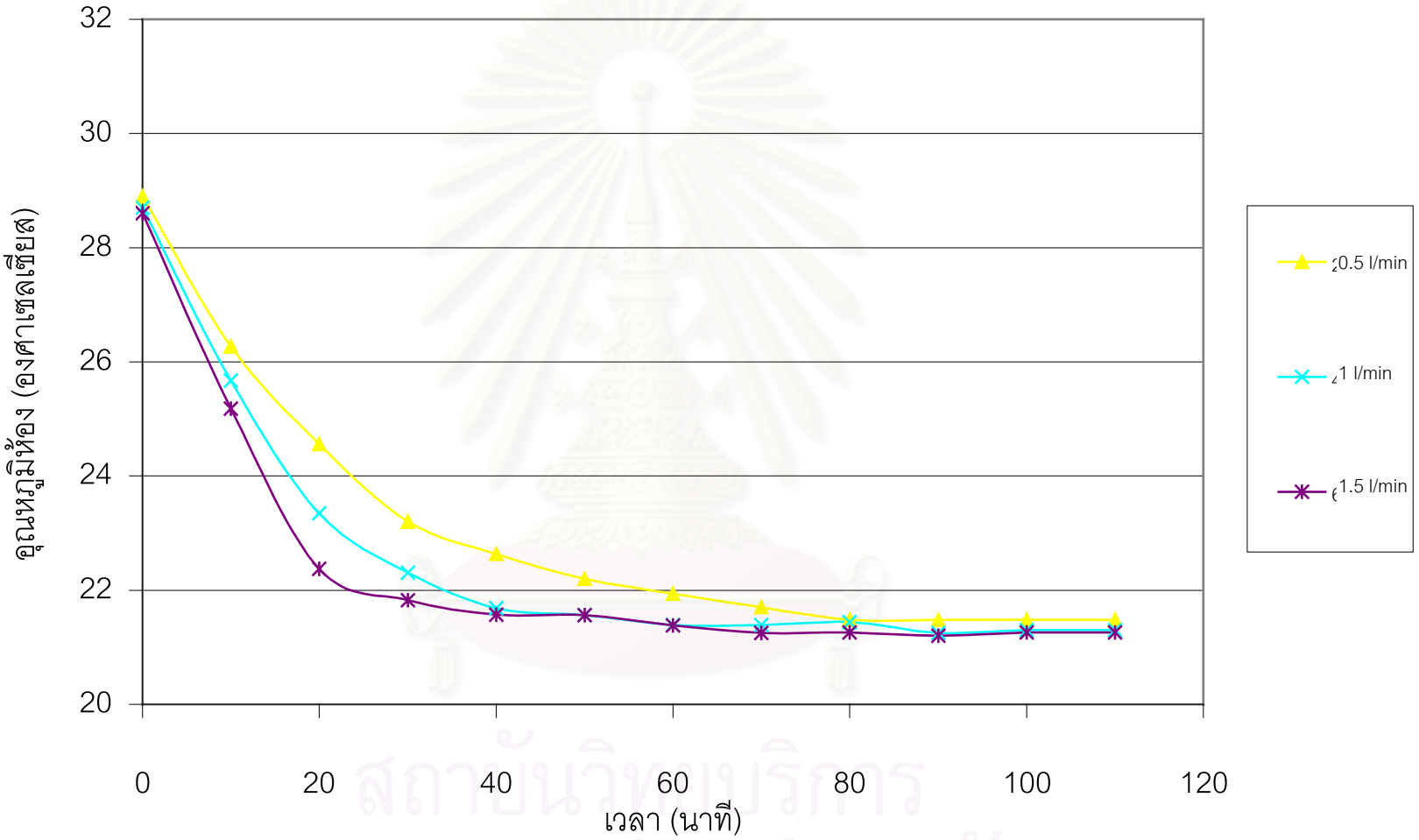

รูปที่ ก.23 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 3 หลอด



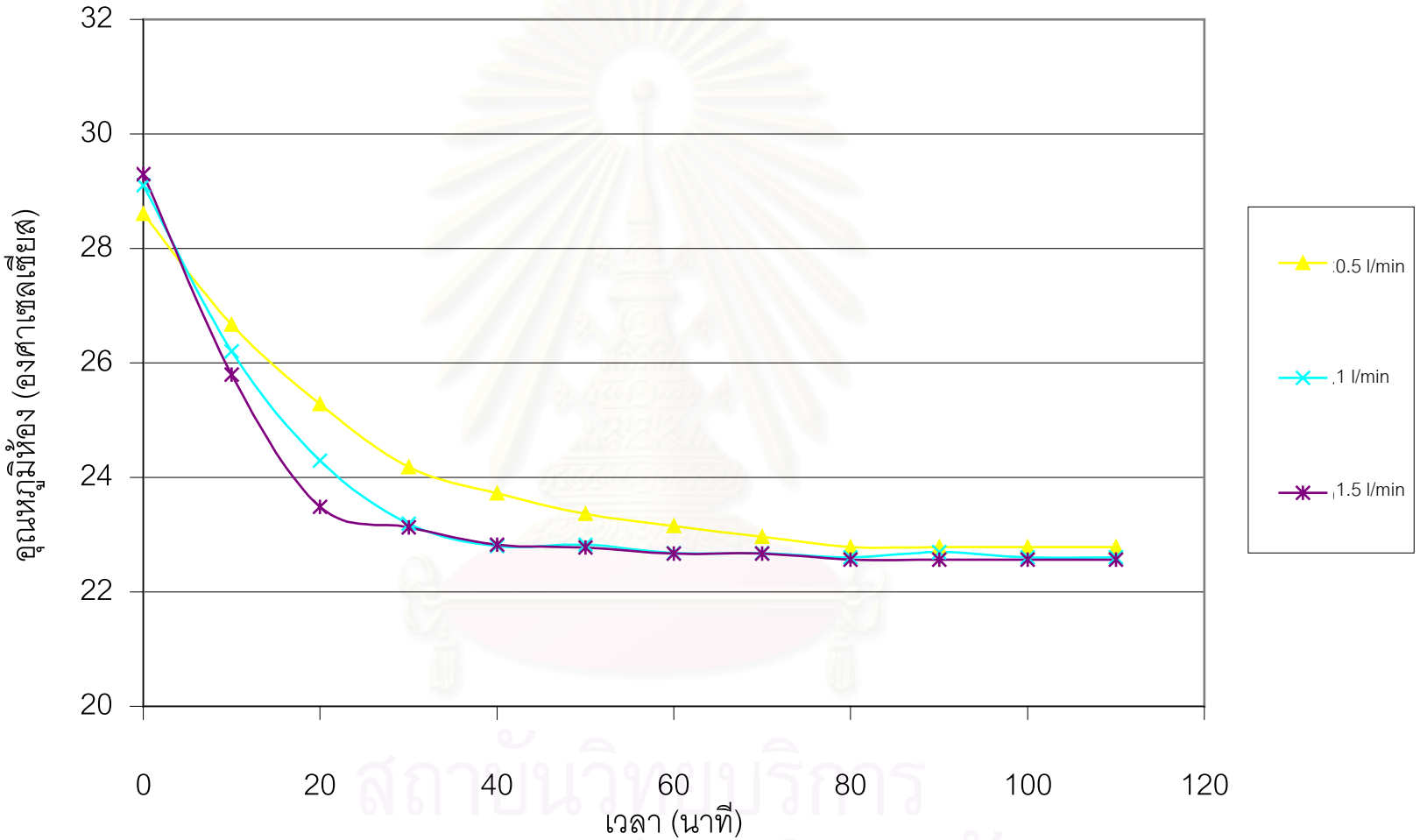

รูปที่ ก.24 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 4 หลอด



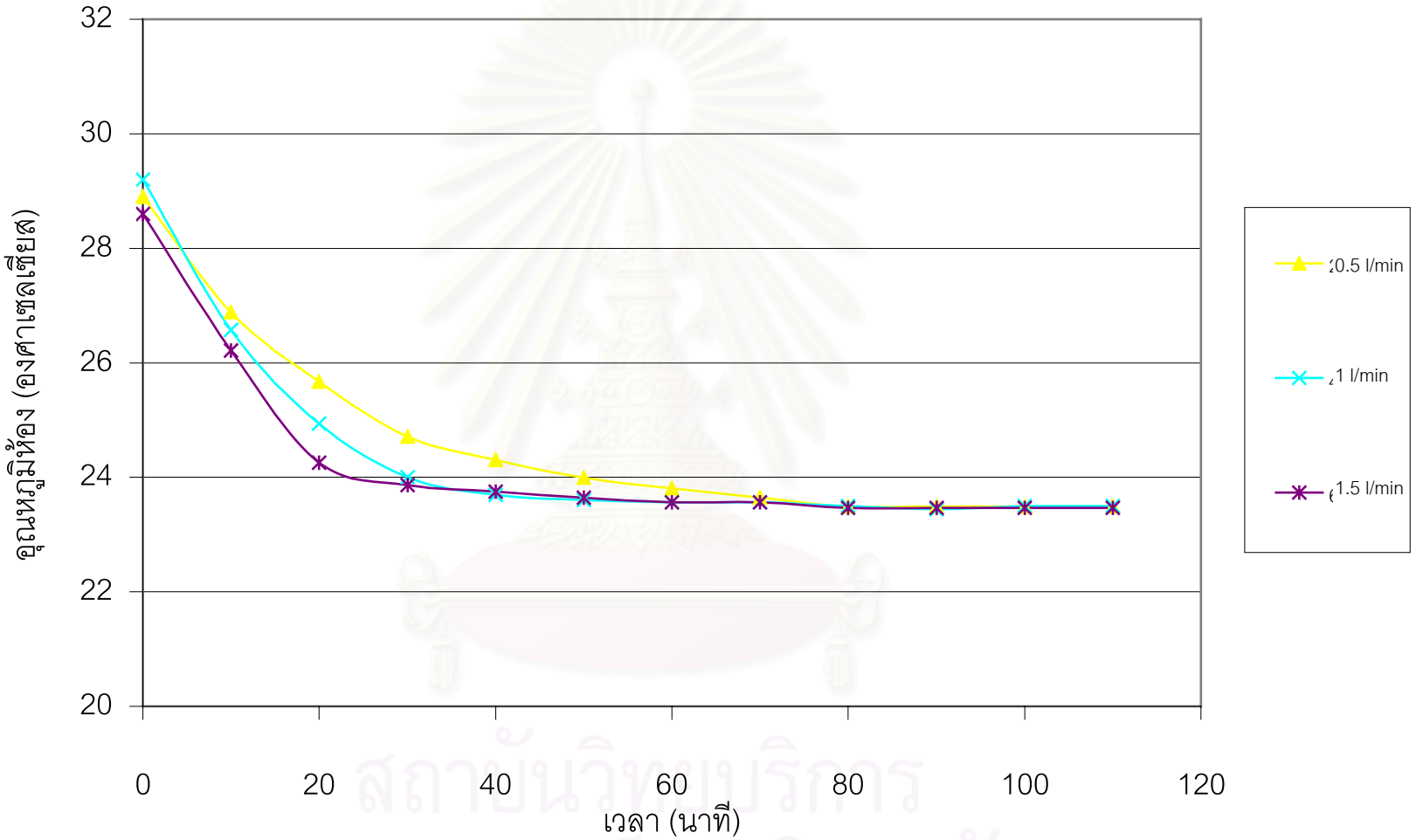

รูปที่ ก.25 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



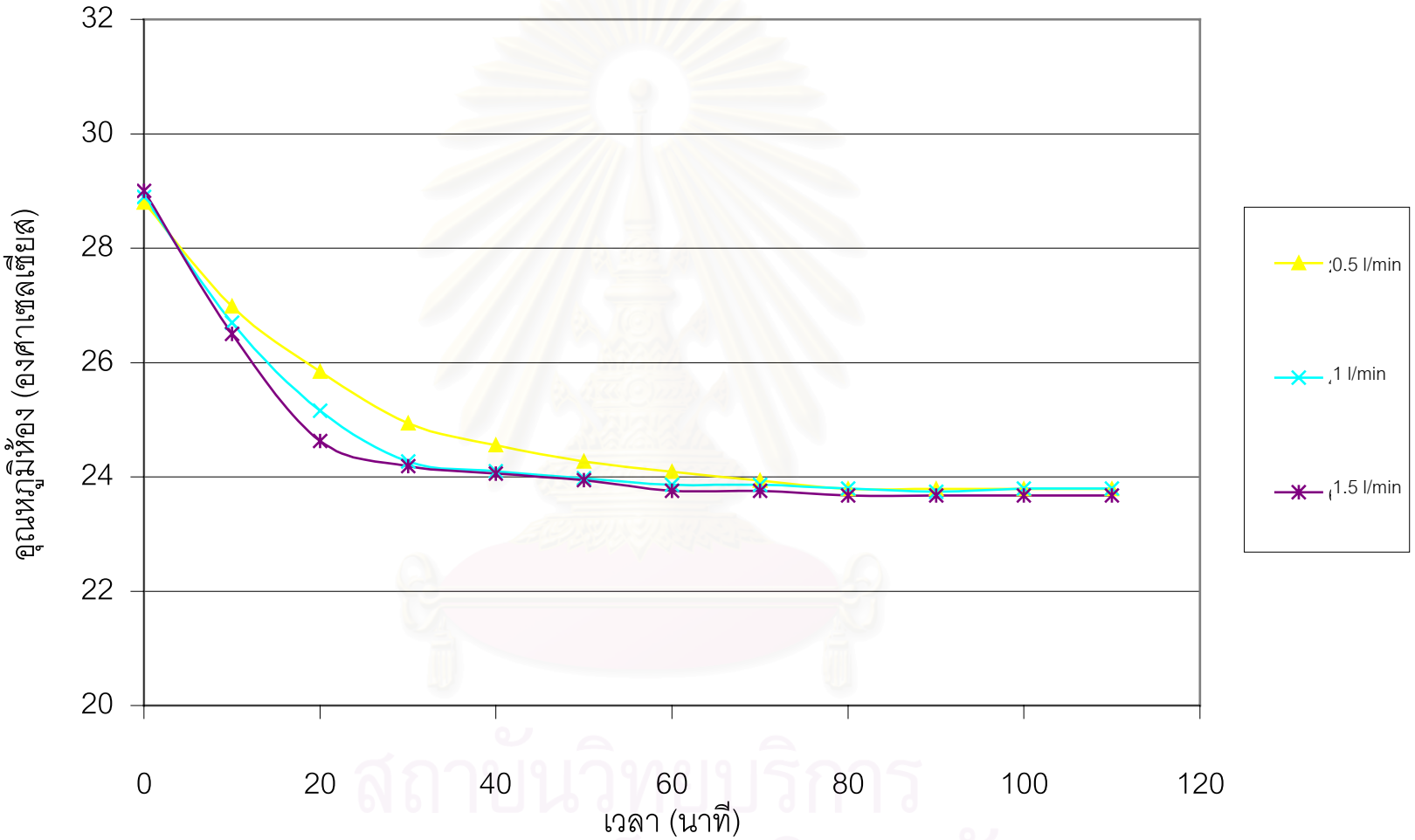

รูปที่ ก.26 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



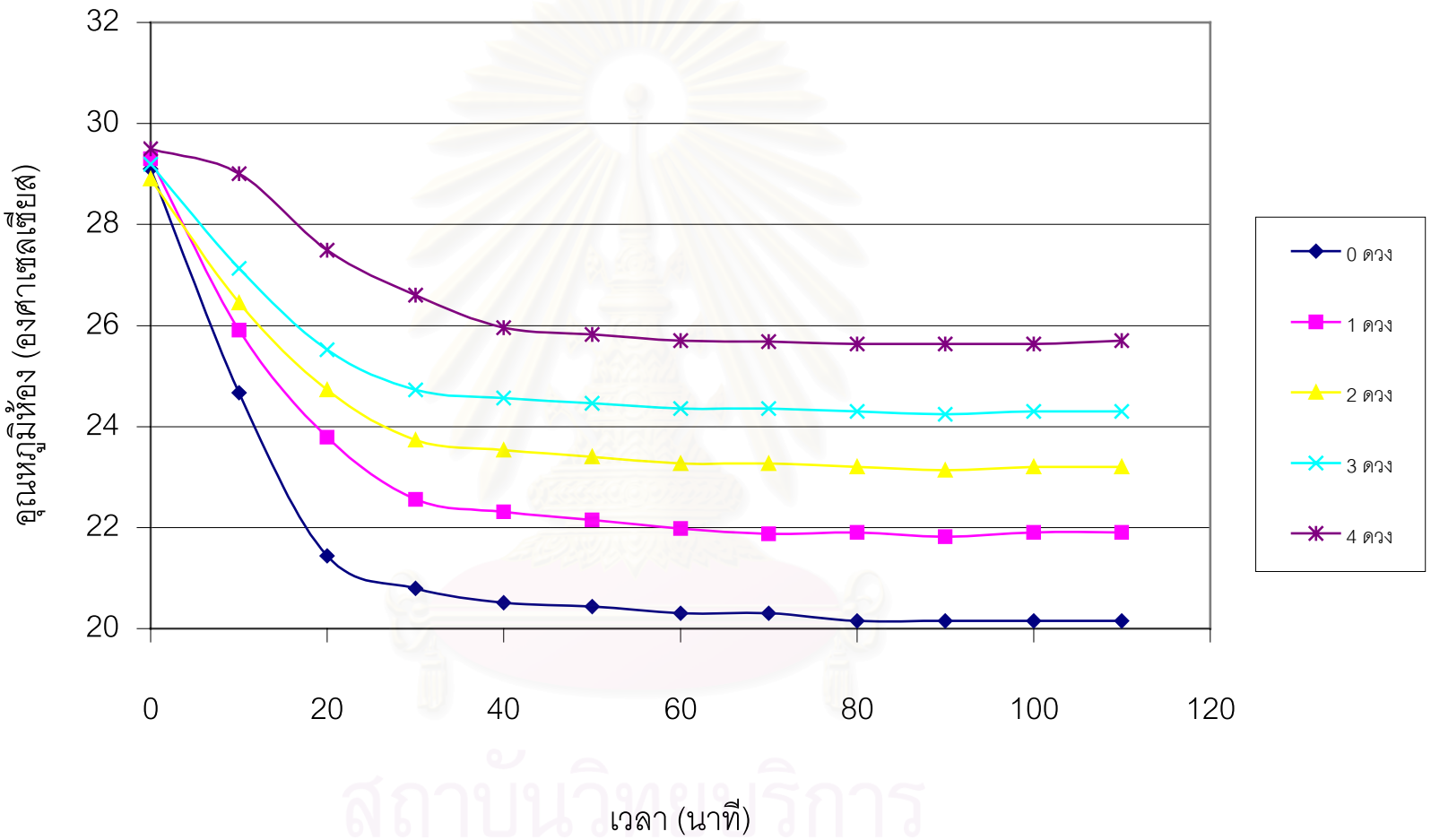

รูปที่ ก.27 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



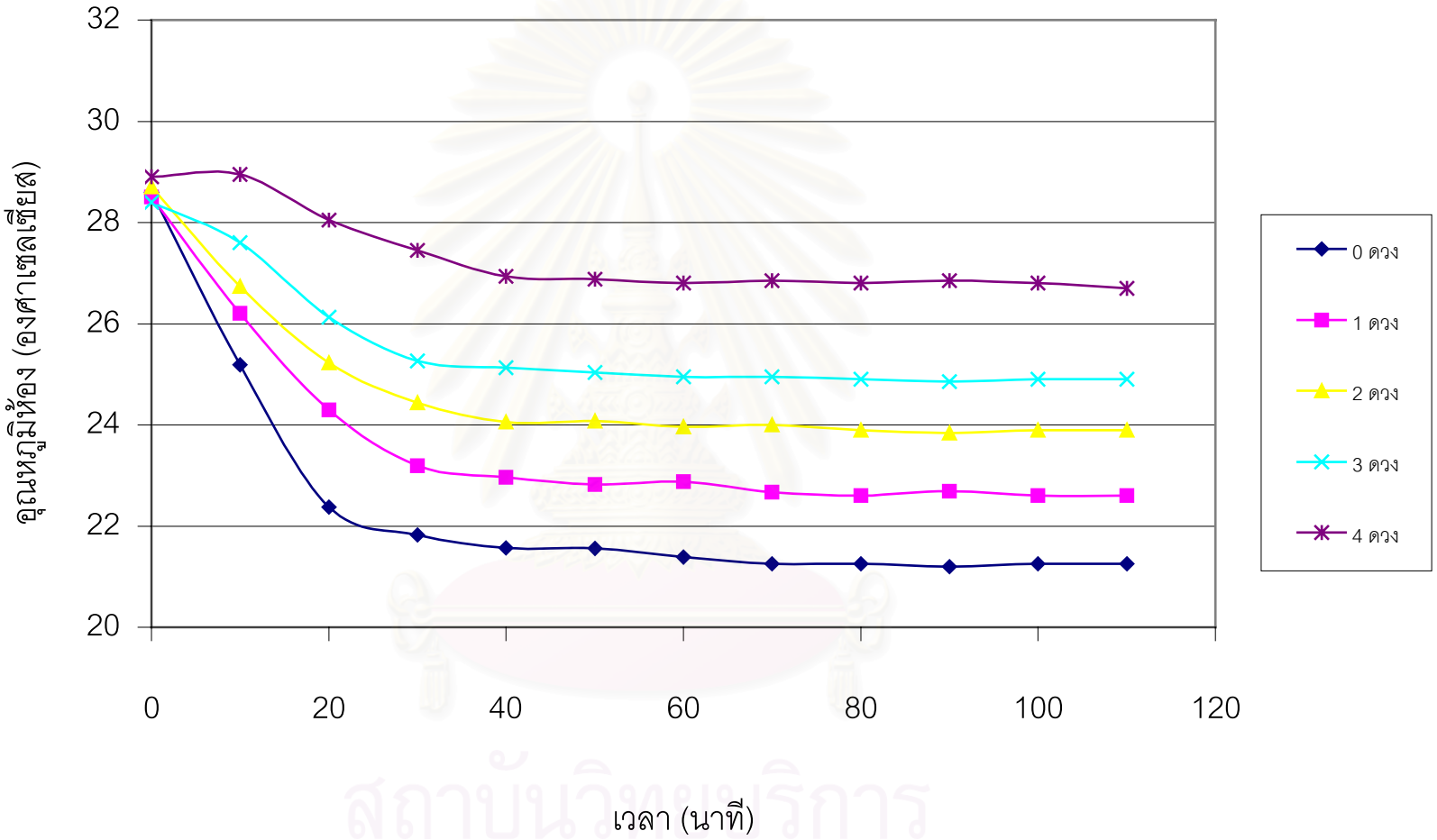

รูปที่ ก.28 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



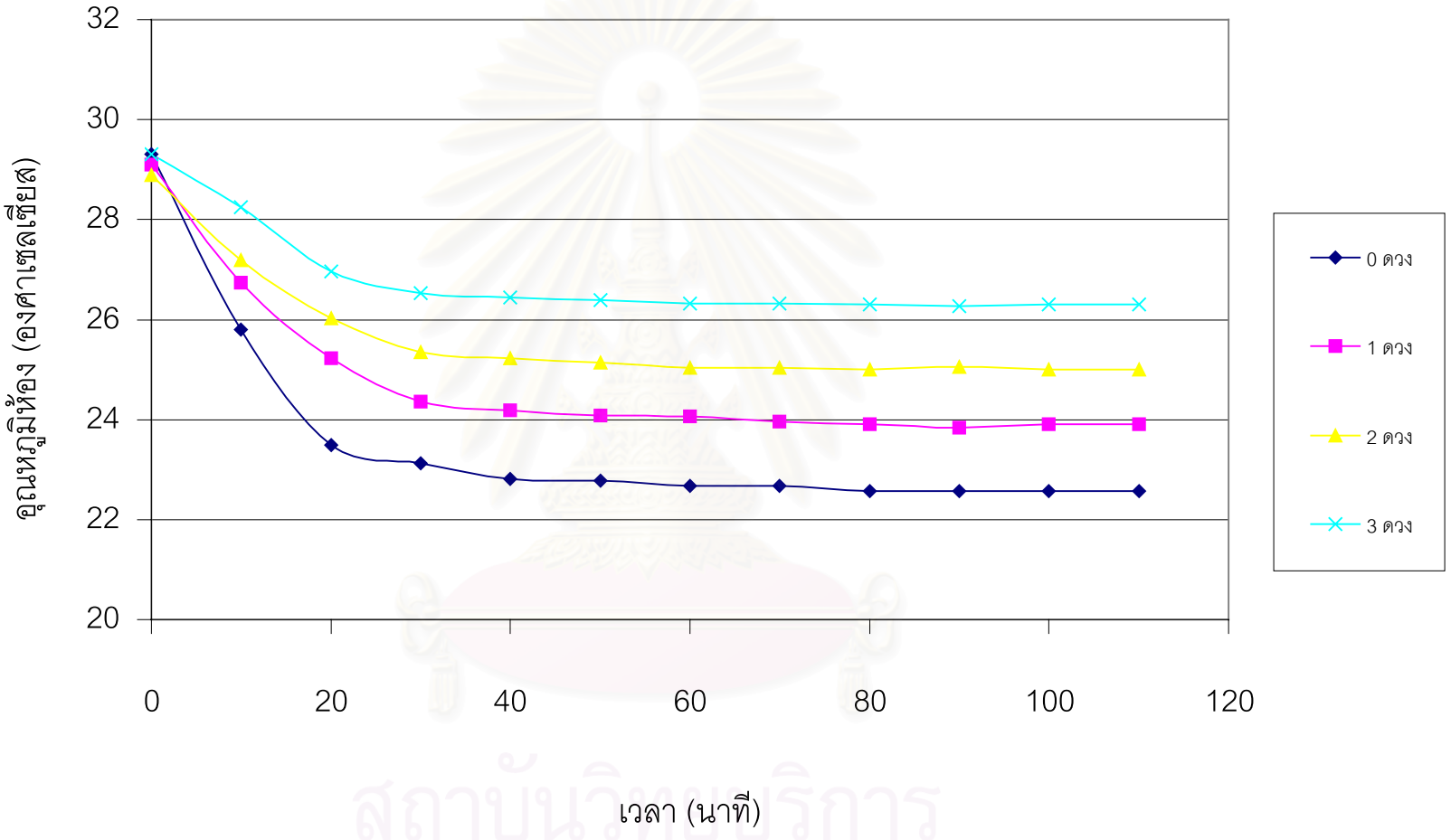

รูปที่ ก.29 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 , 1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



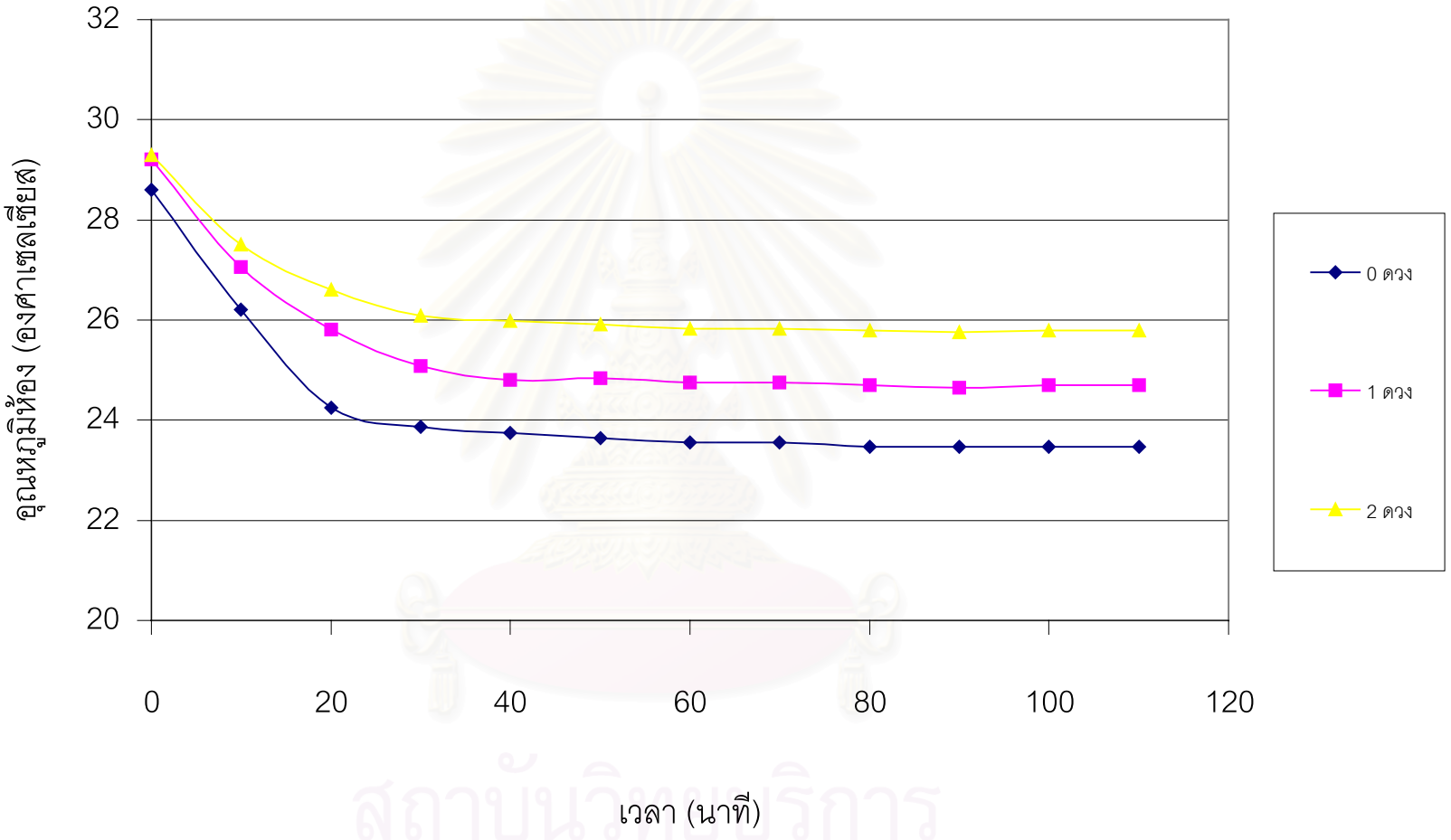

รูปที่ ก.30 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส



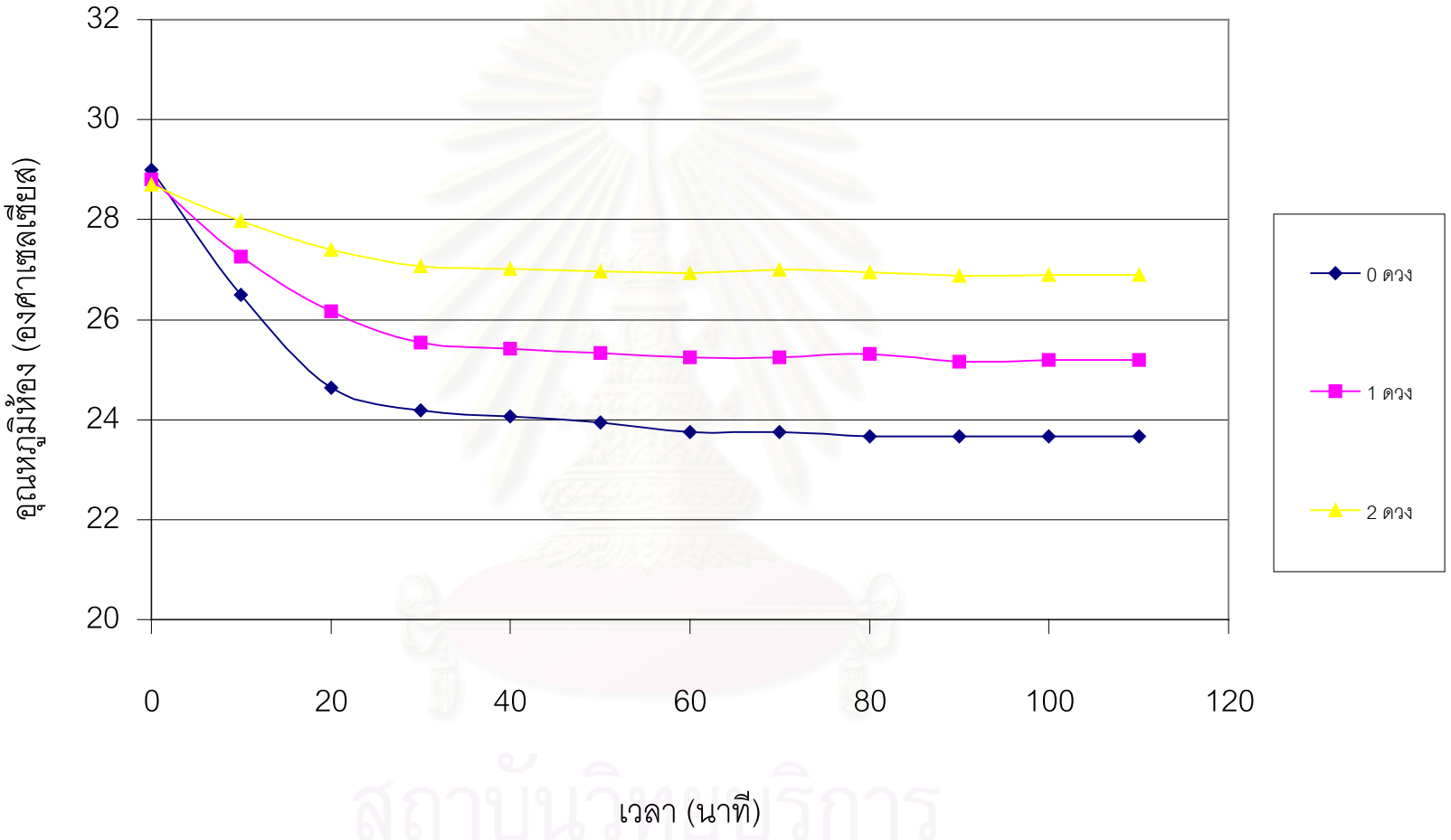

รูปที่ ก.31 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ,3 ,4 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส



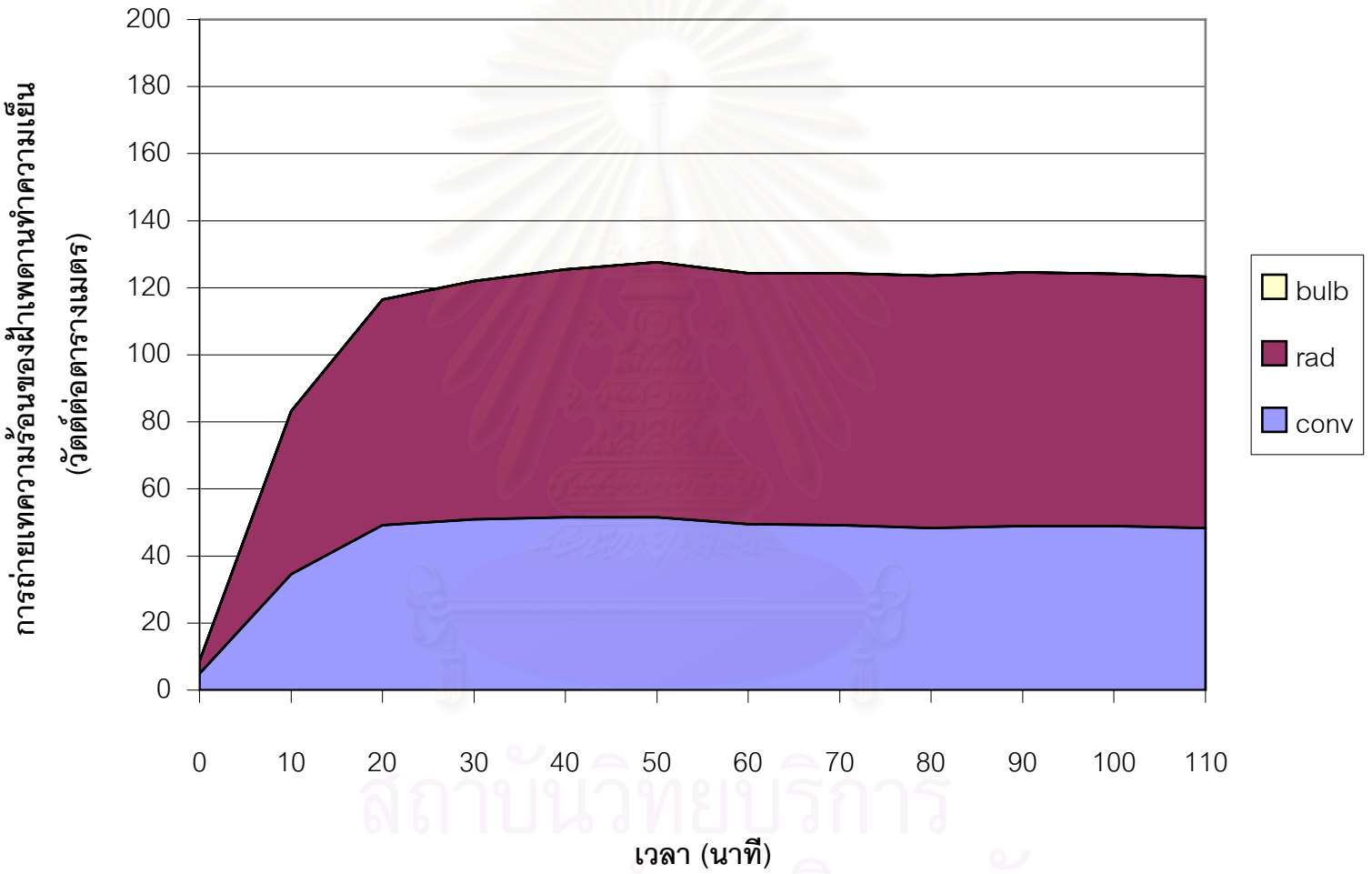

รูปที่ ก.32 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ,3 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส



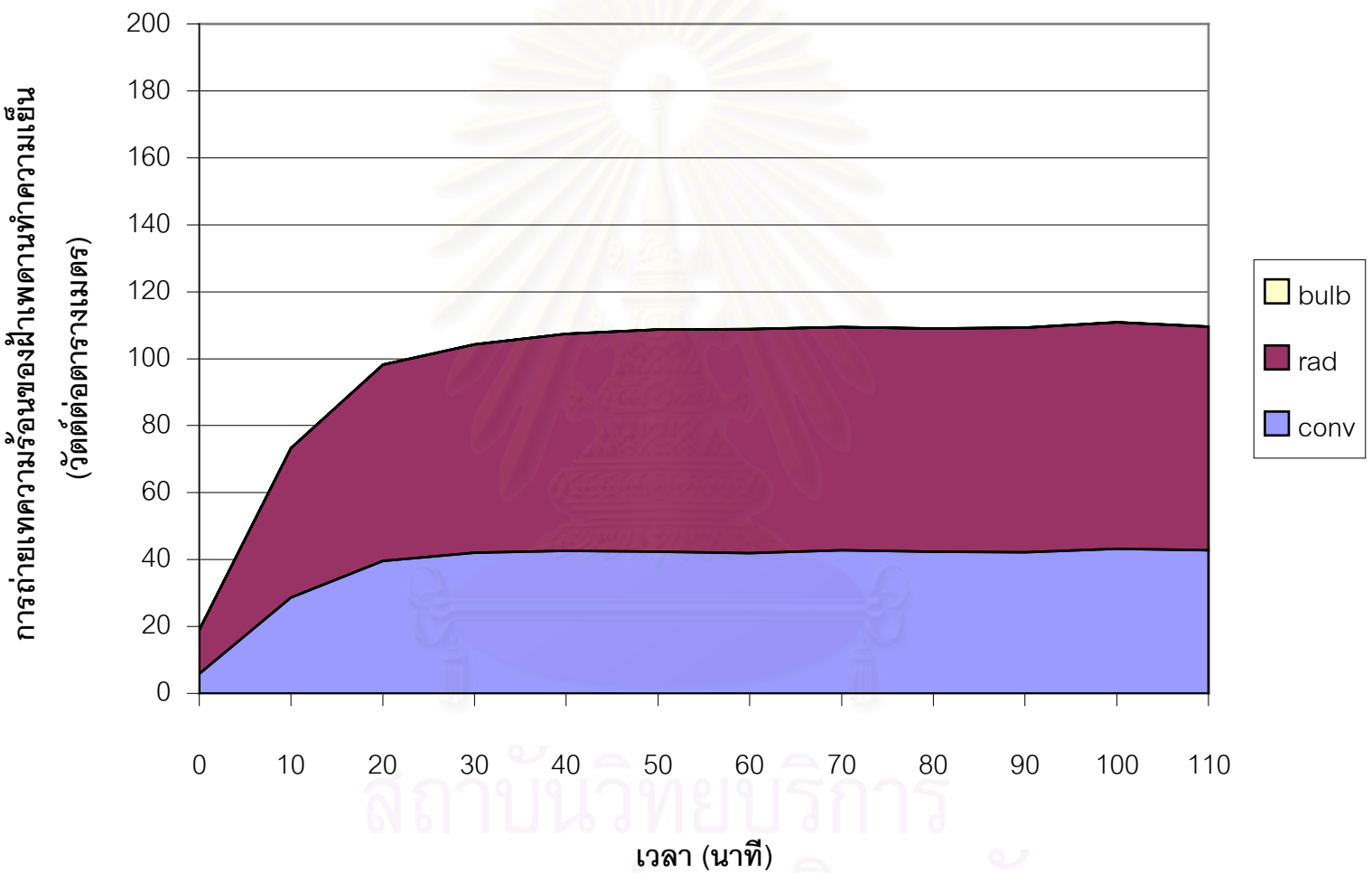

รูปที่ ก.33 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับ**ฝ า**เพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส




รูปที่ ก.34 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องในกรณีที่มีการใส่ภาระความร้อนเป็นหลอดไฟขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ,2 ,ดวง และไม่ใส่ภาระความร้อน ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้ า เพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส

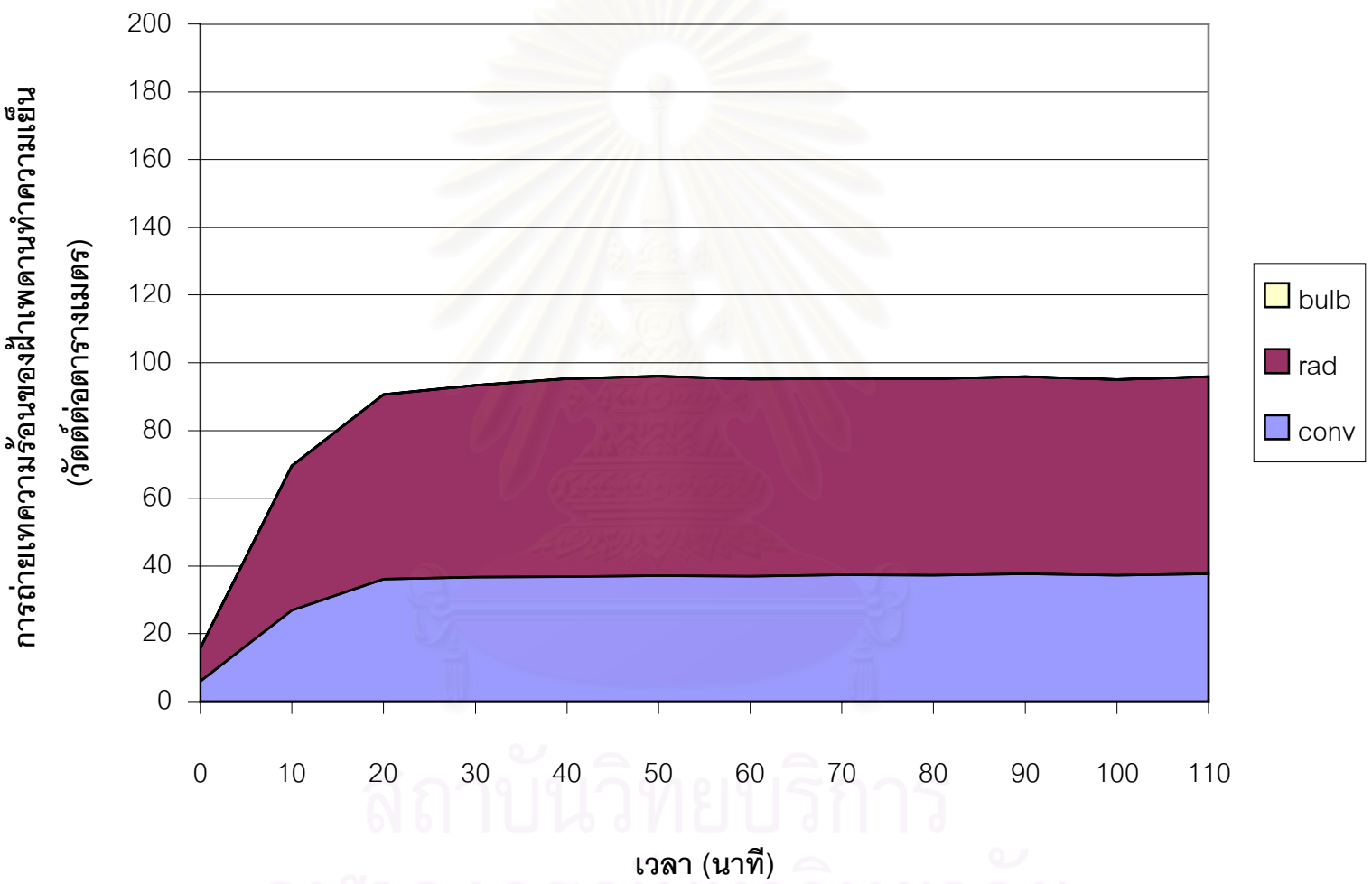



รูปที่ ก.35 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

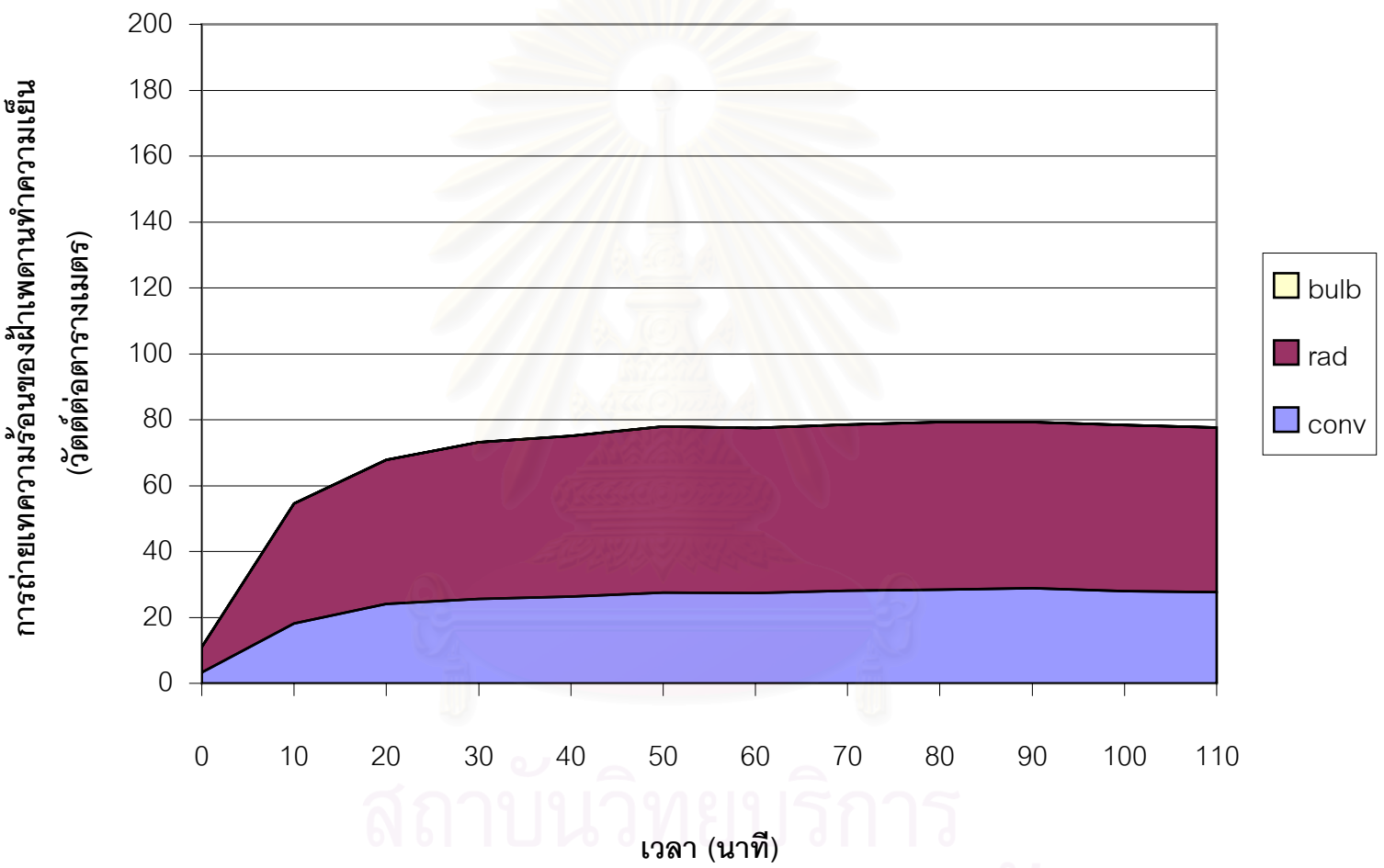



รูปที่ ก.36 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

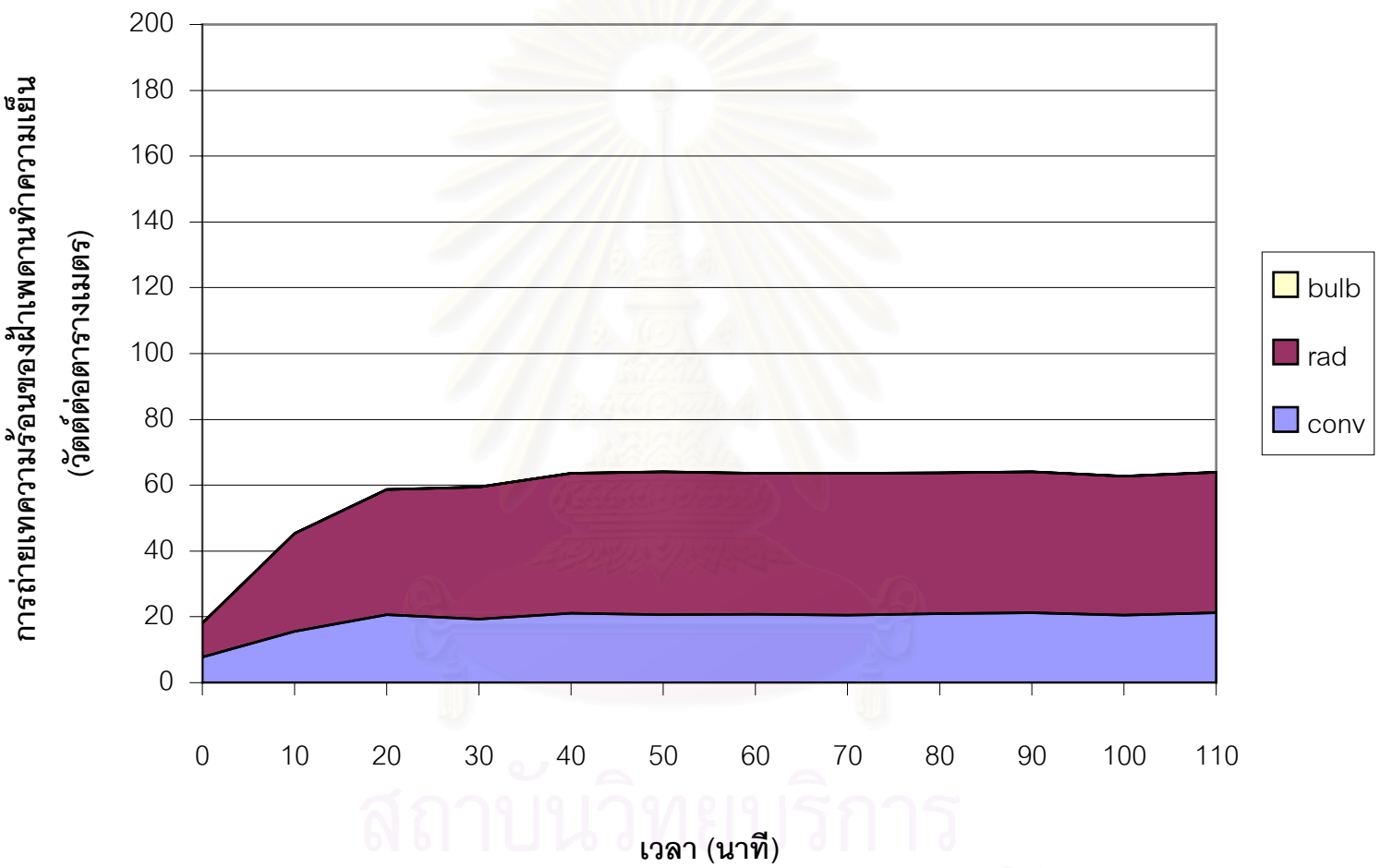
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



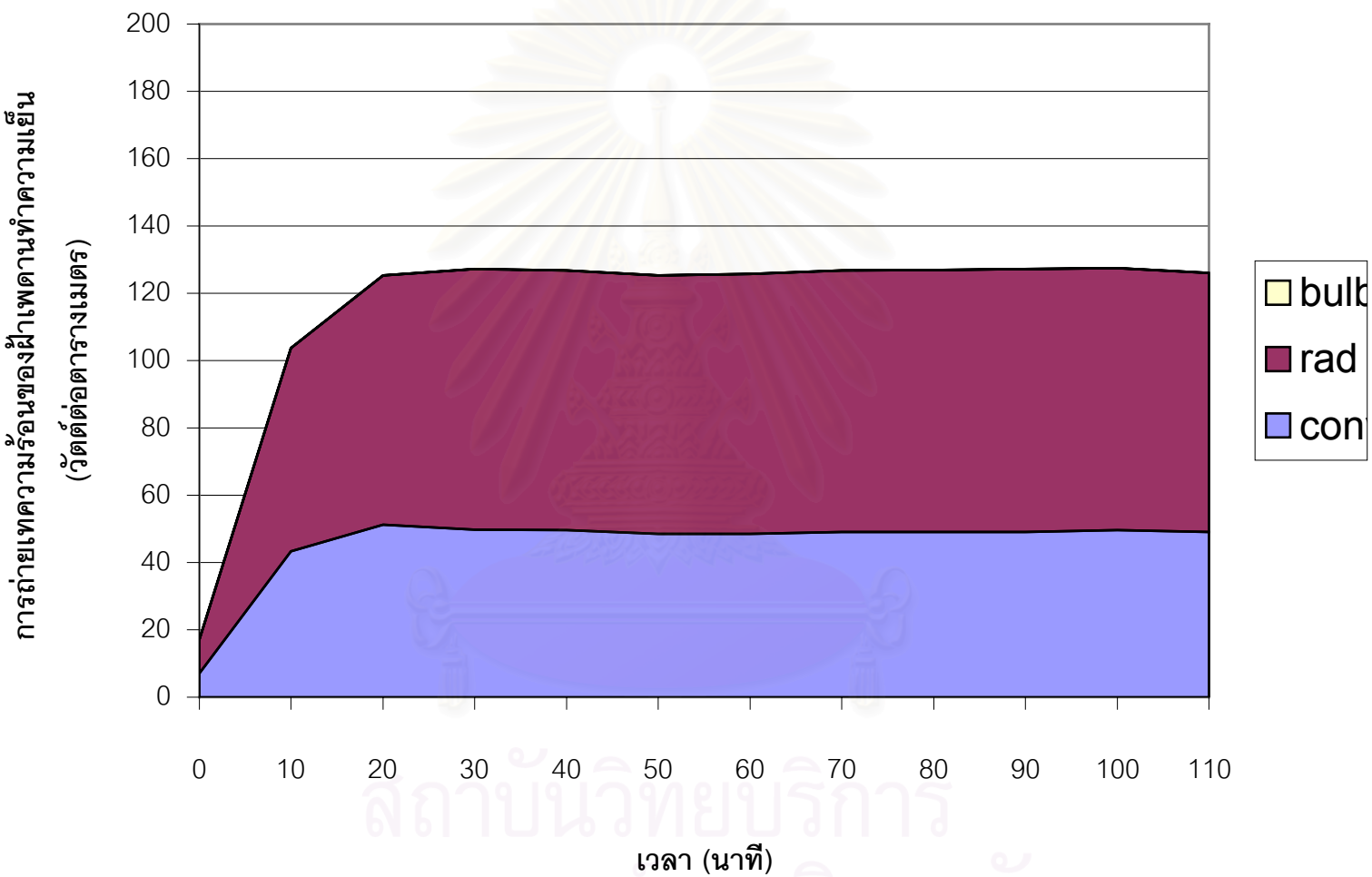

รูปที่ ก.37 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



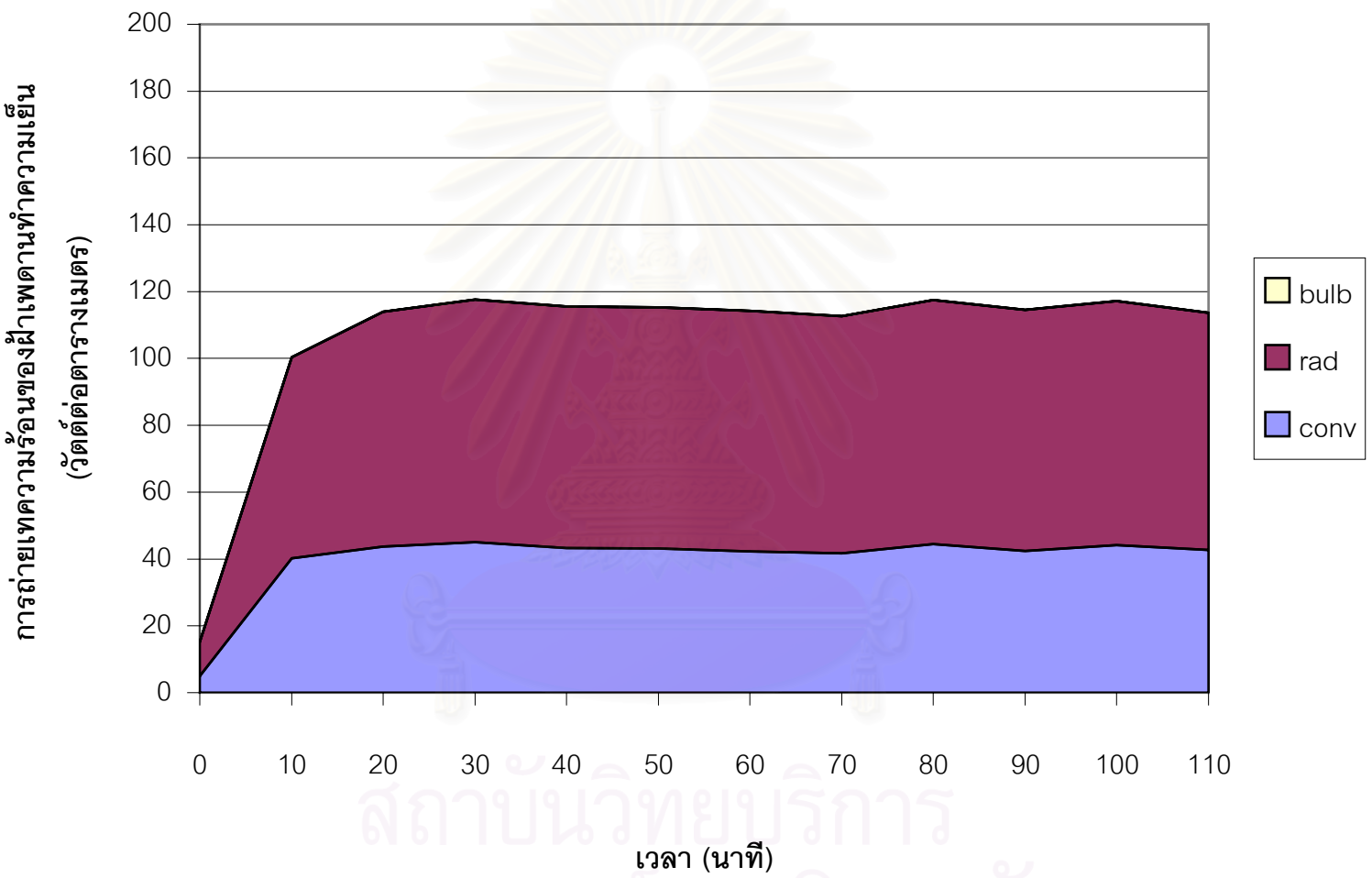

รูปที่ ก.38 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



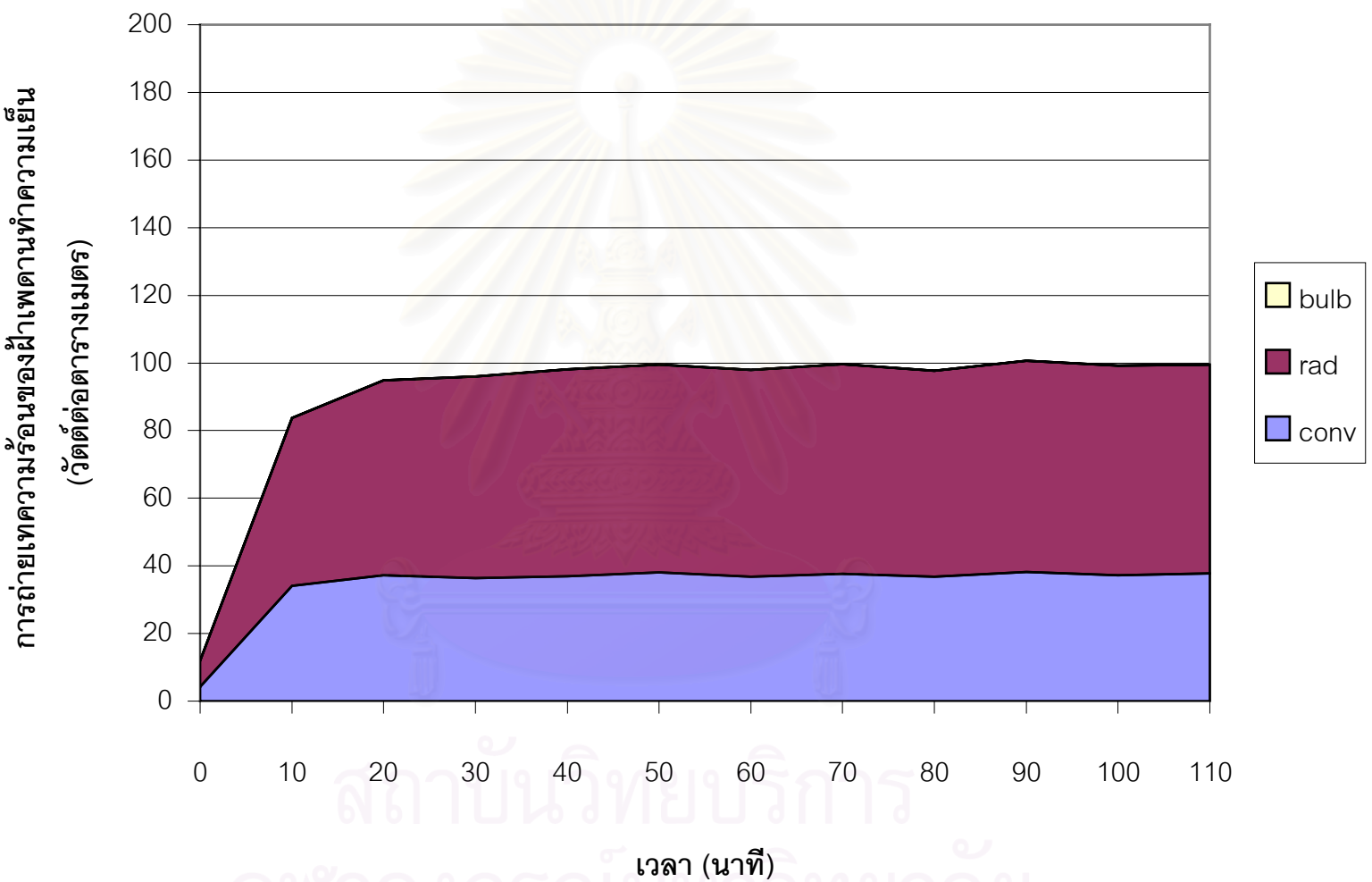

รูปที่ ก.39 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



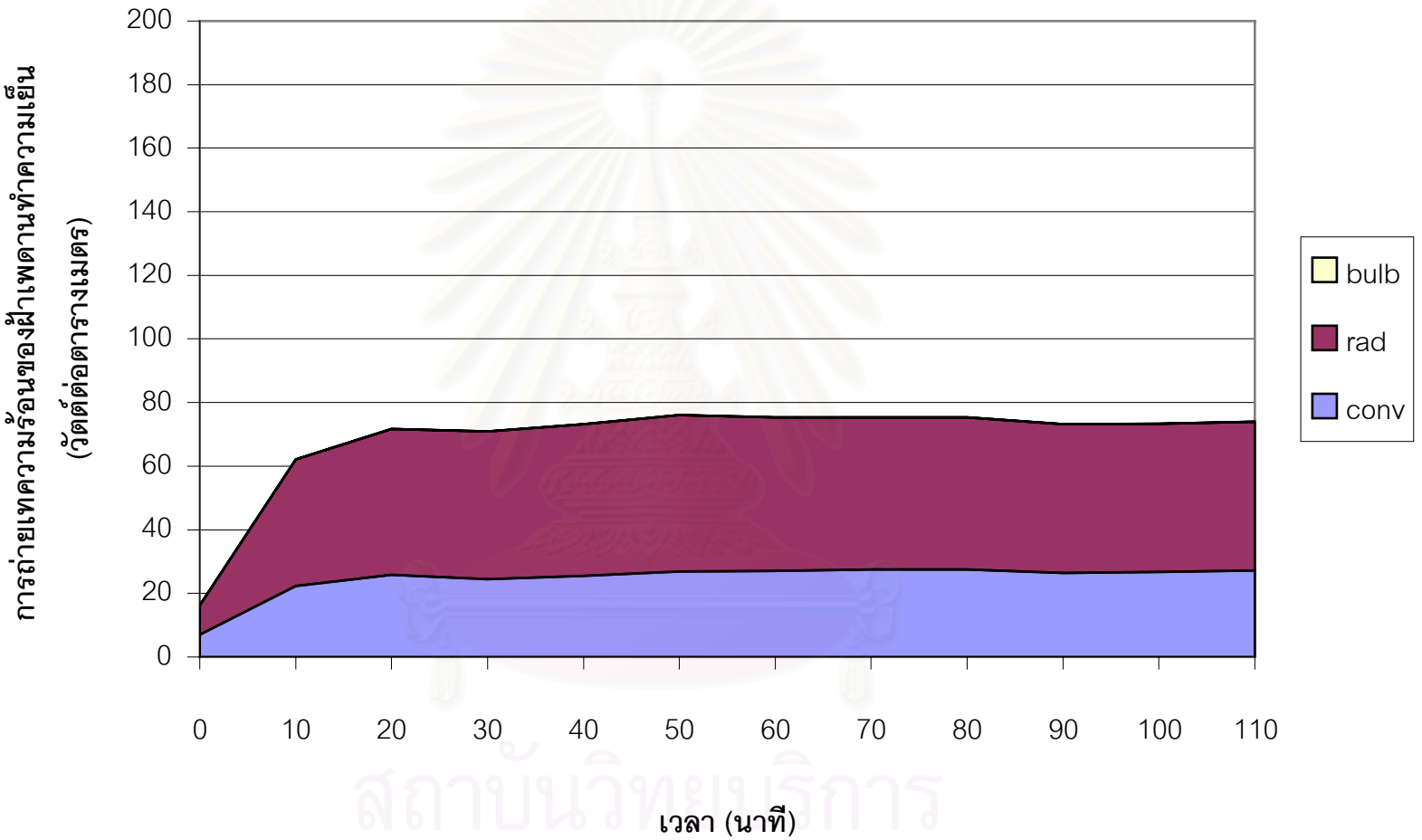

รูปที่ ก.40 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



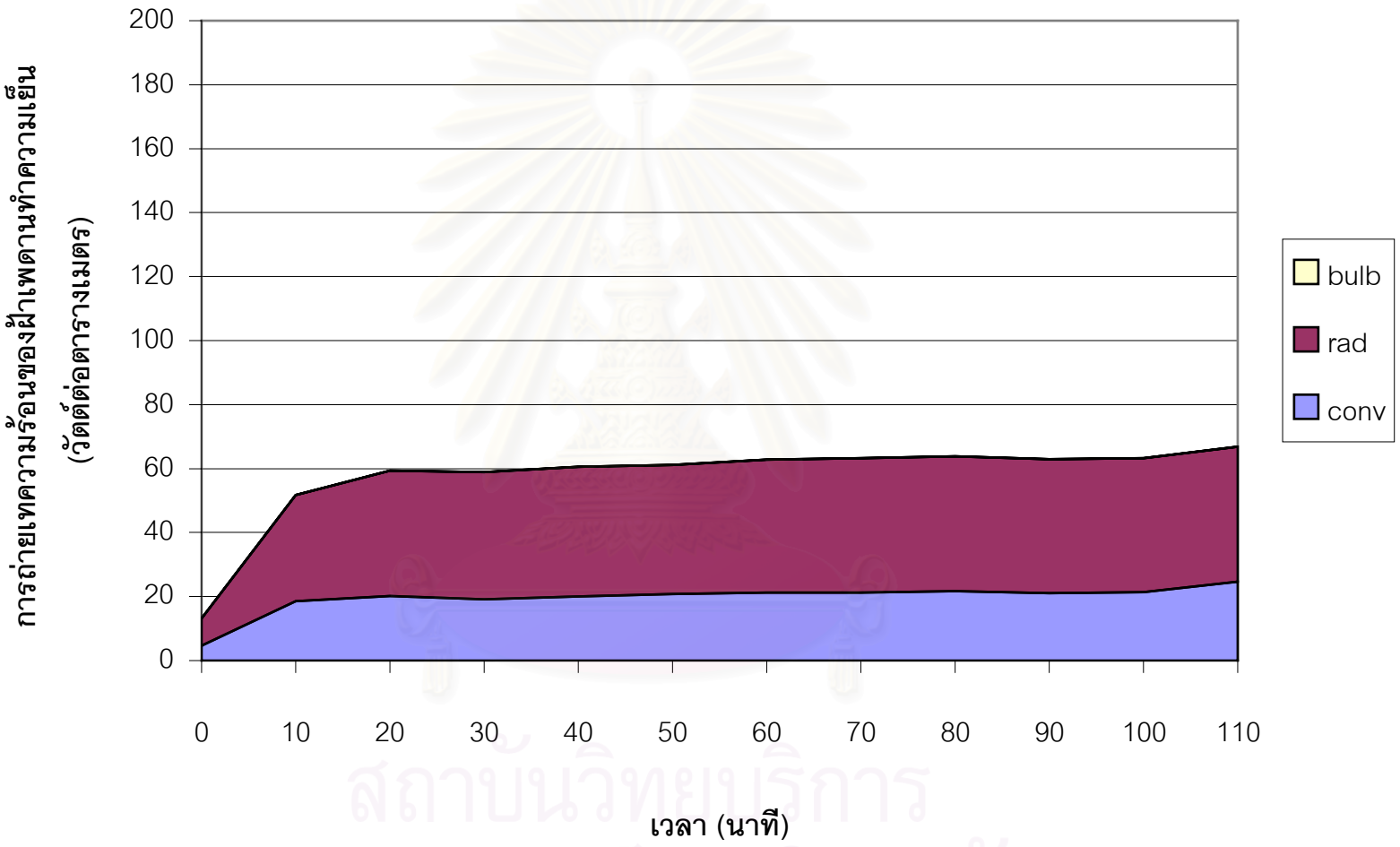

รูปที่ ก.41 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



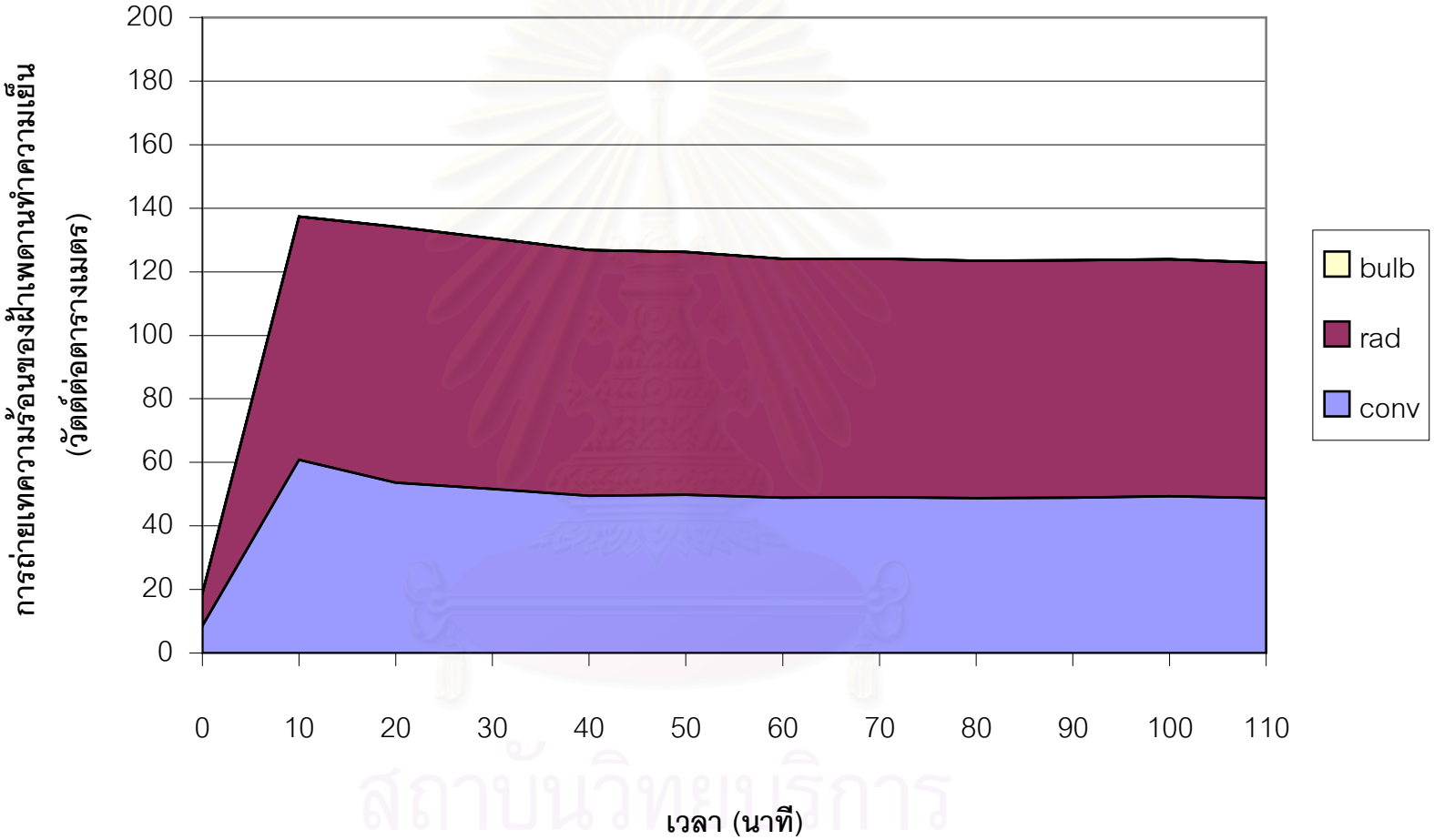

รูปที่ ก.42 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



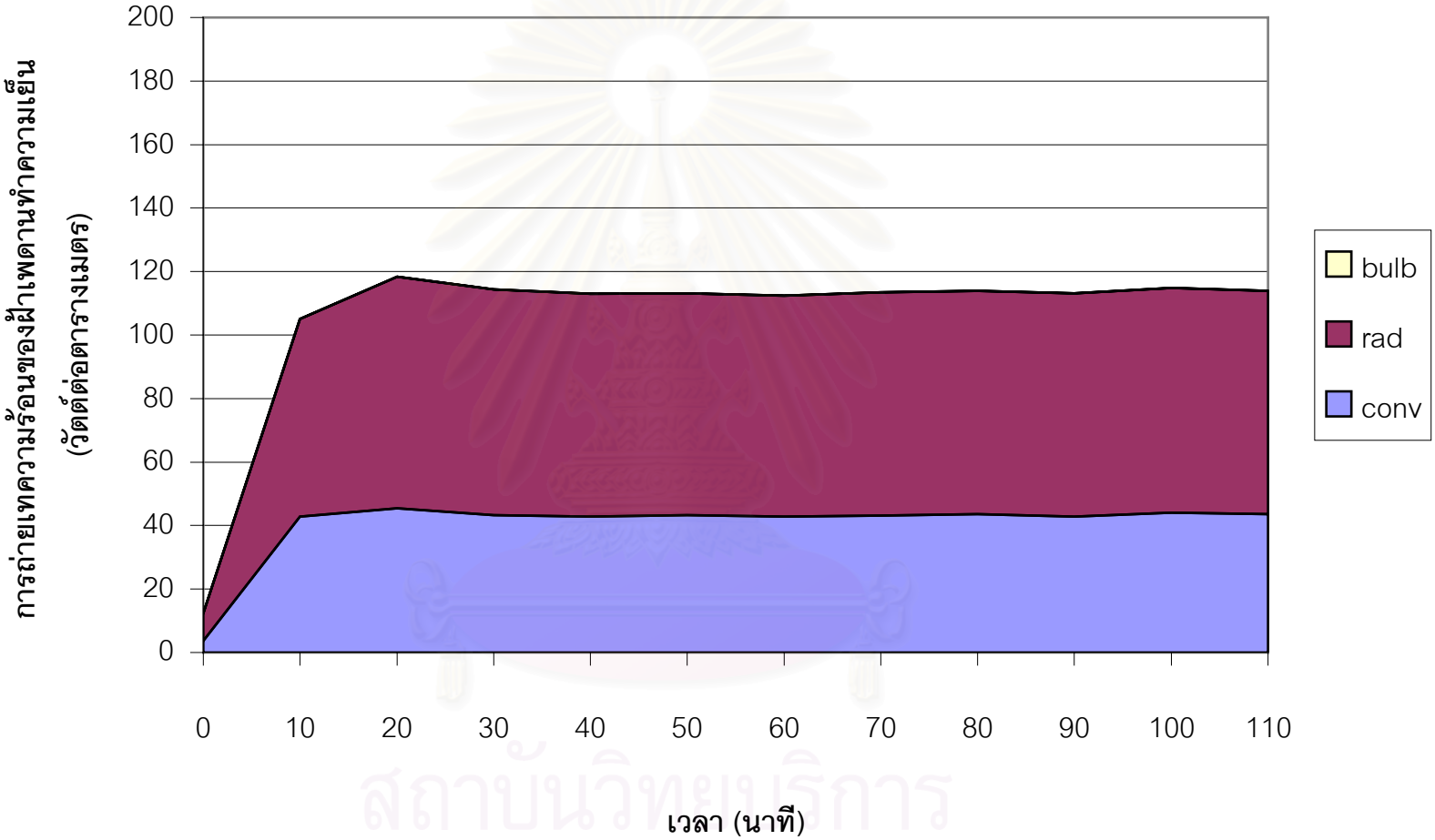

รูปที่ ก.43 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



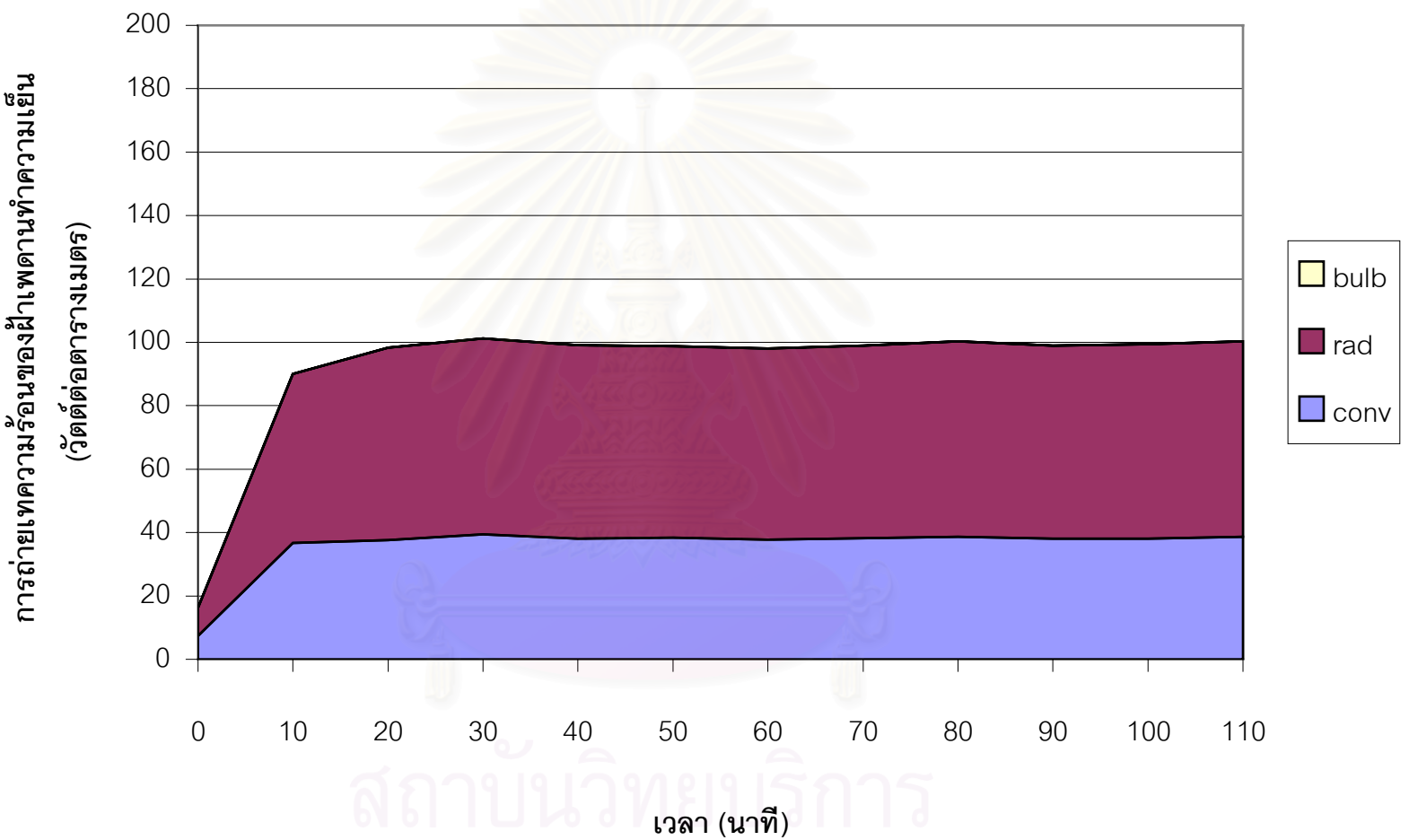

รูปที่ ก.44 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง




รูปที่ ก.45 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

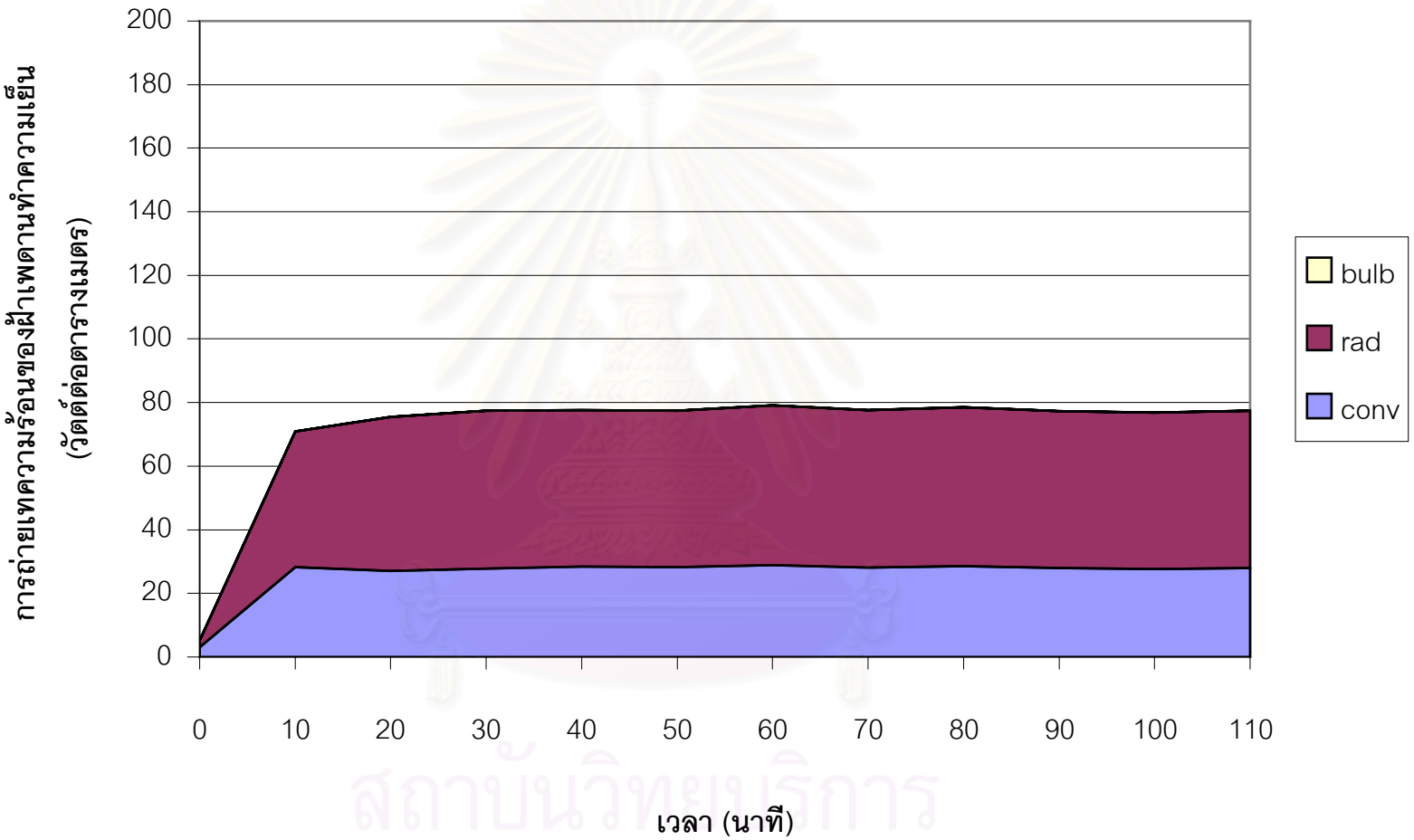



รูปที่ ก.46 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

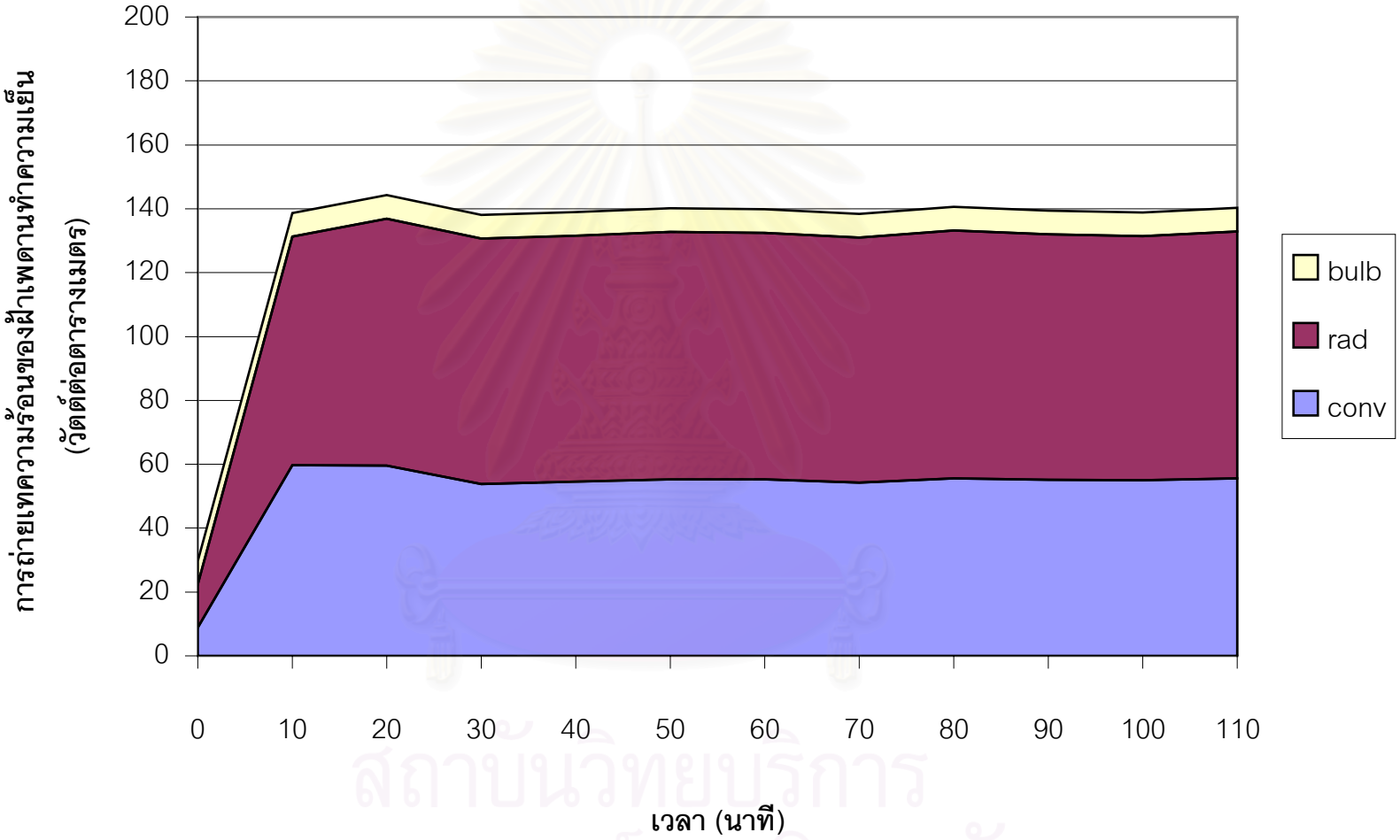



รูปที่ ก.47 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

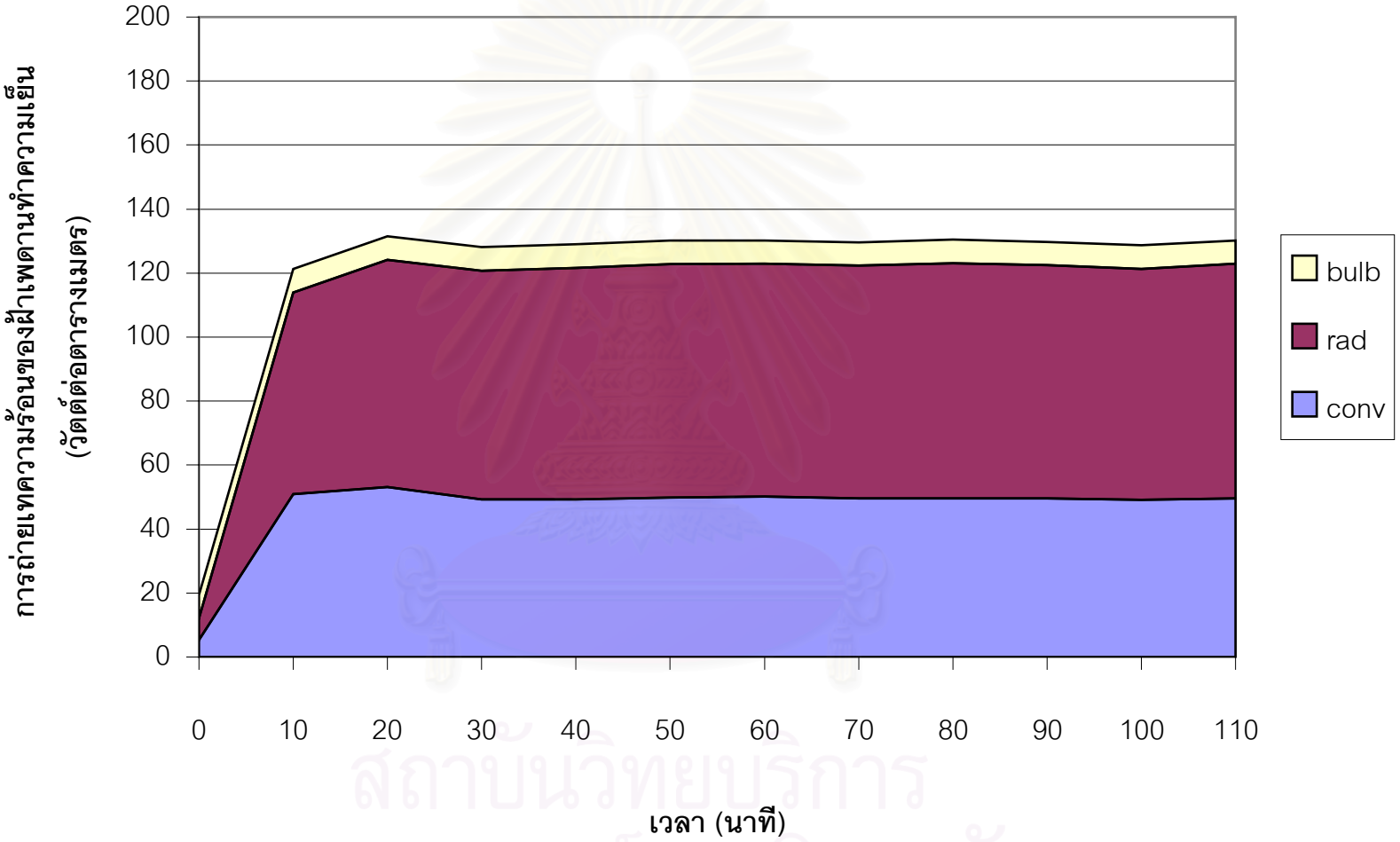



รูปที่ ก.48 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

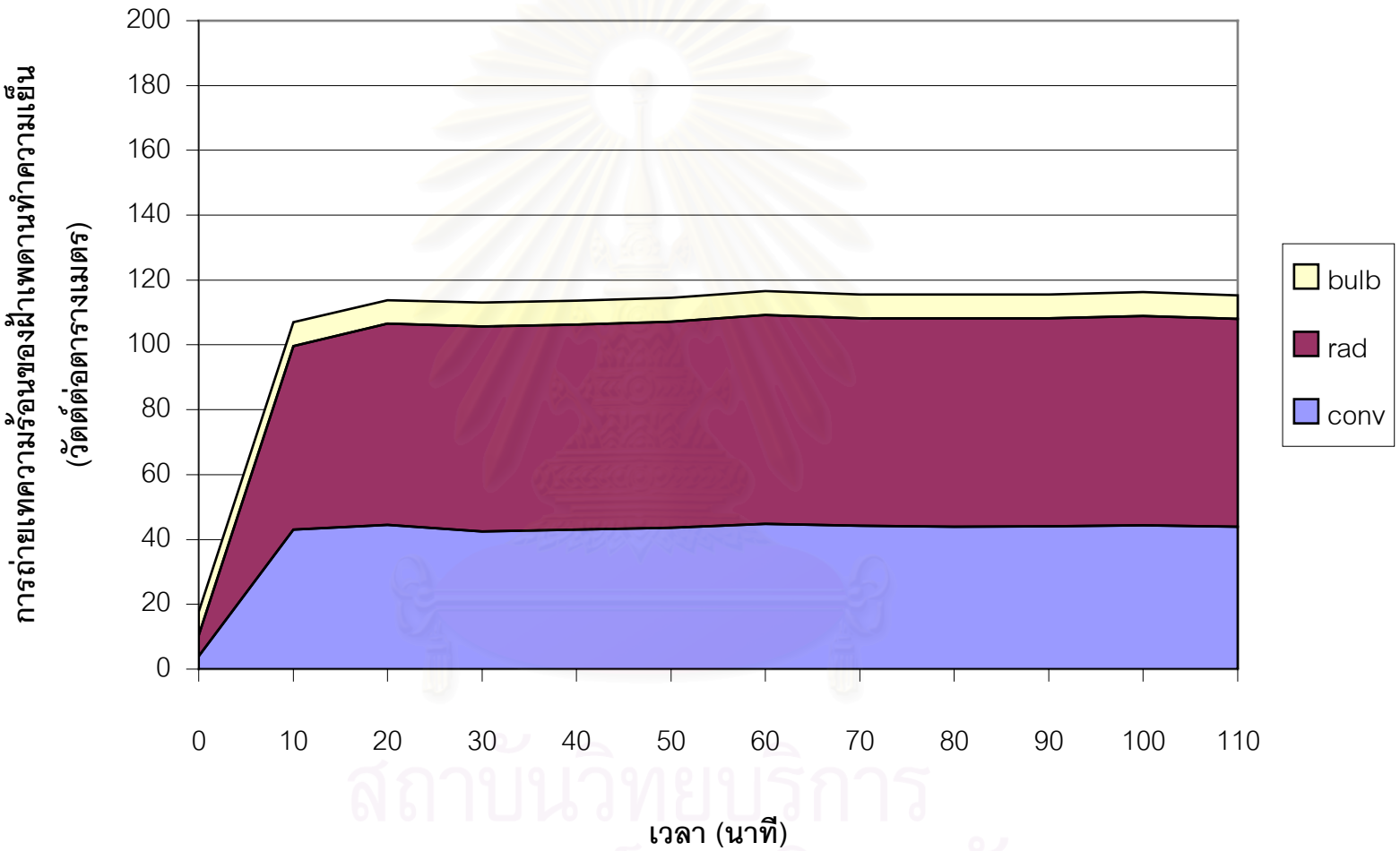



รูปที่ ก.49 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง

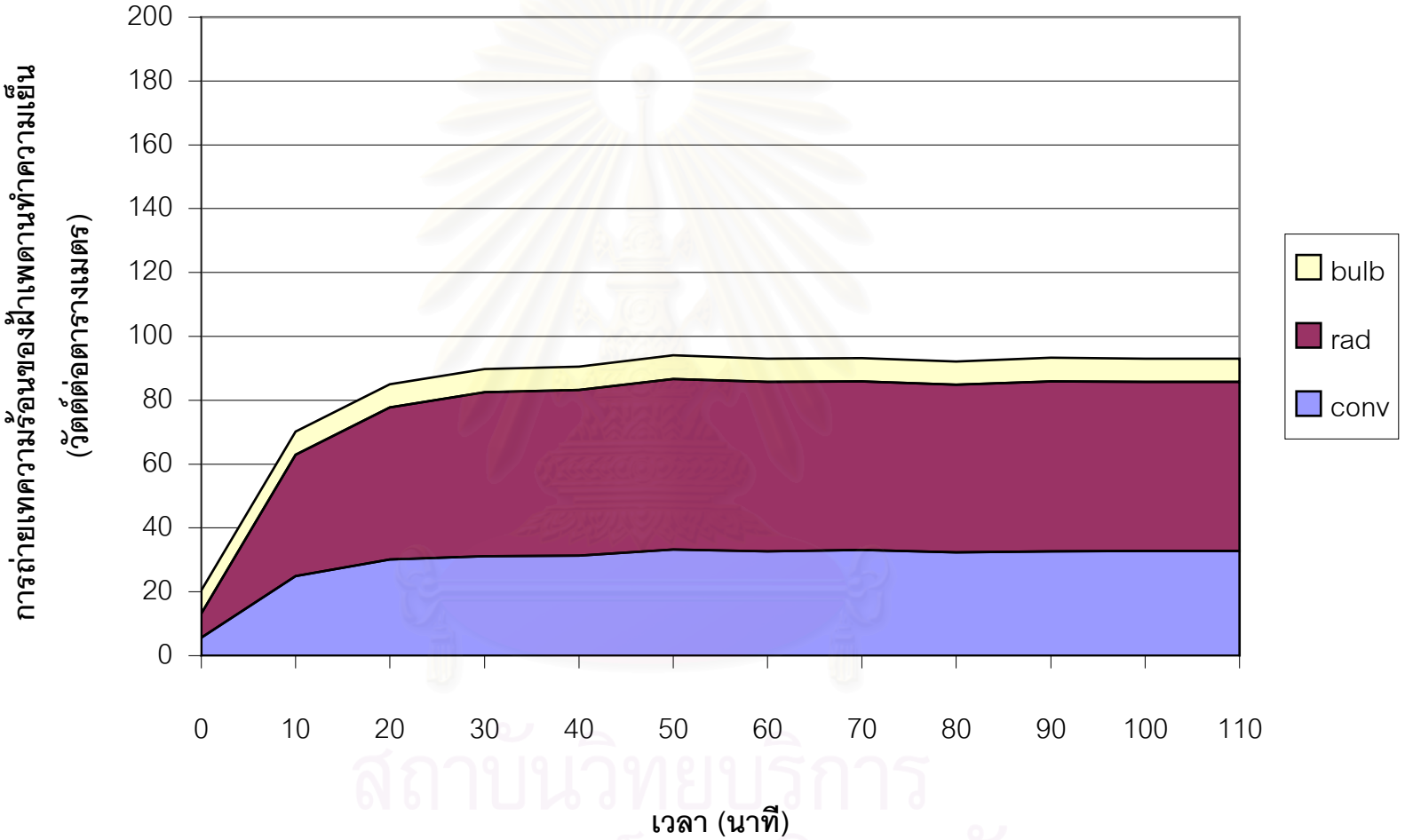
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



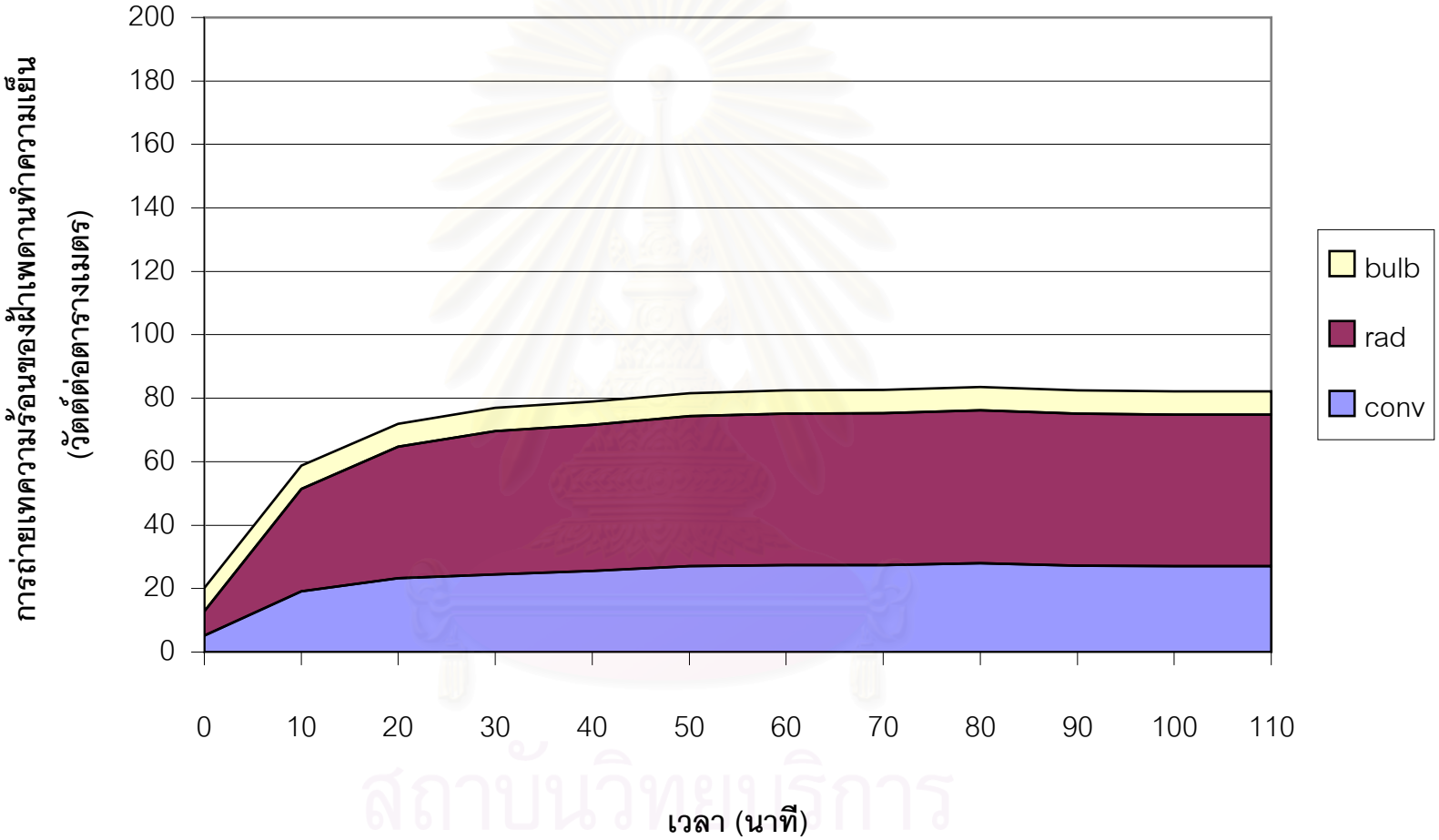

รูปที่ ก.50 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง




รูปที่ ก.51 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง

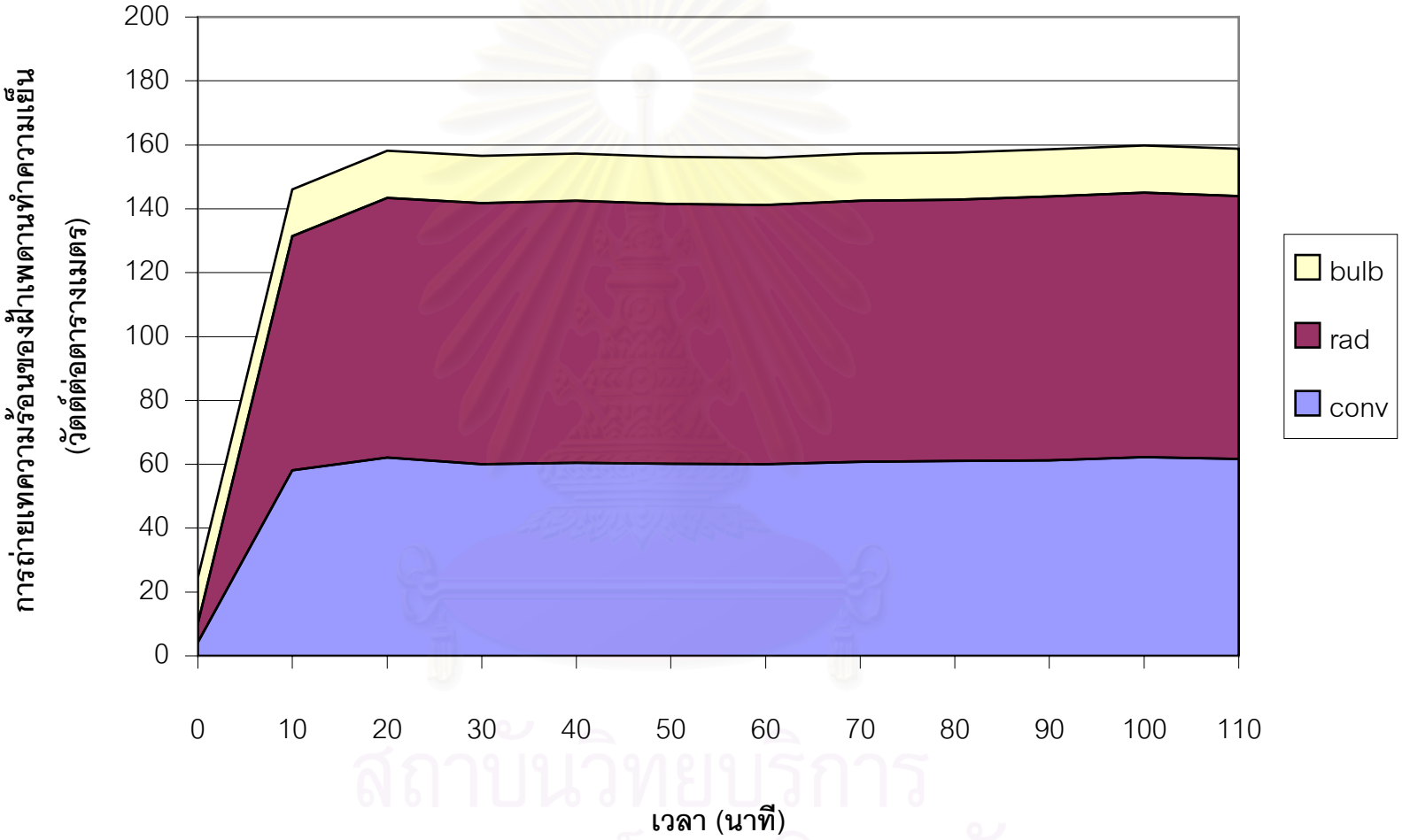



รูปที่ ก.52 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง



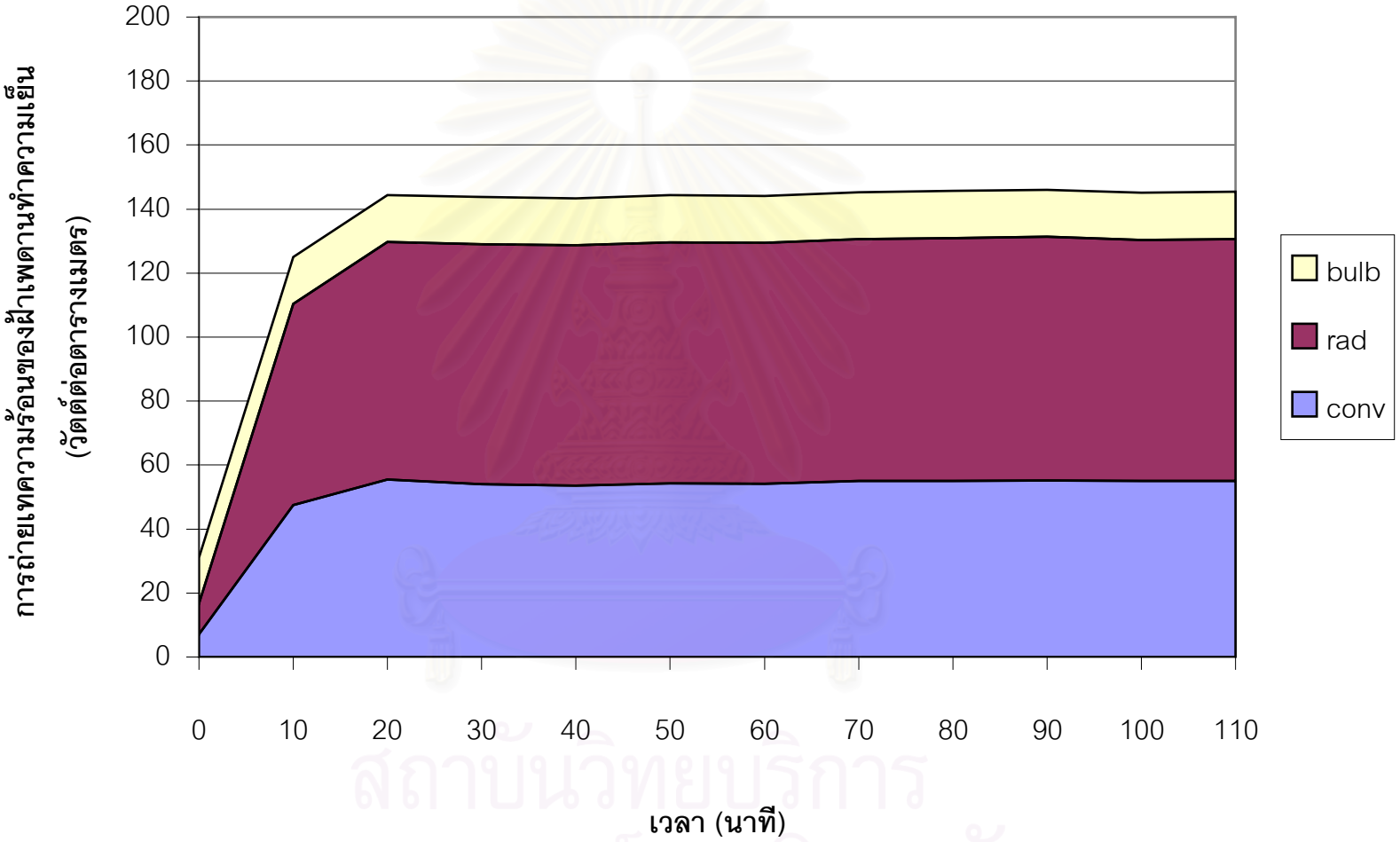

รูปที่ ก.53 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

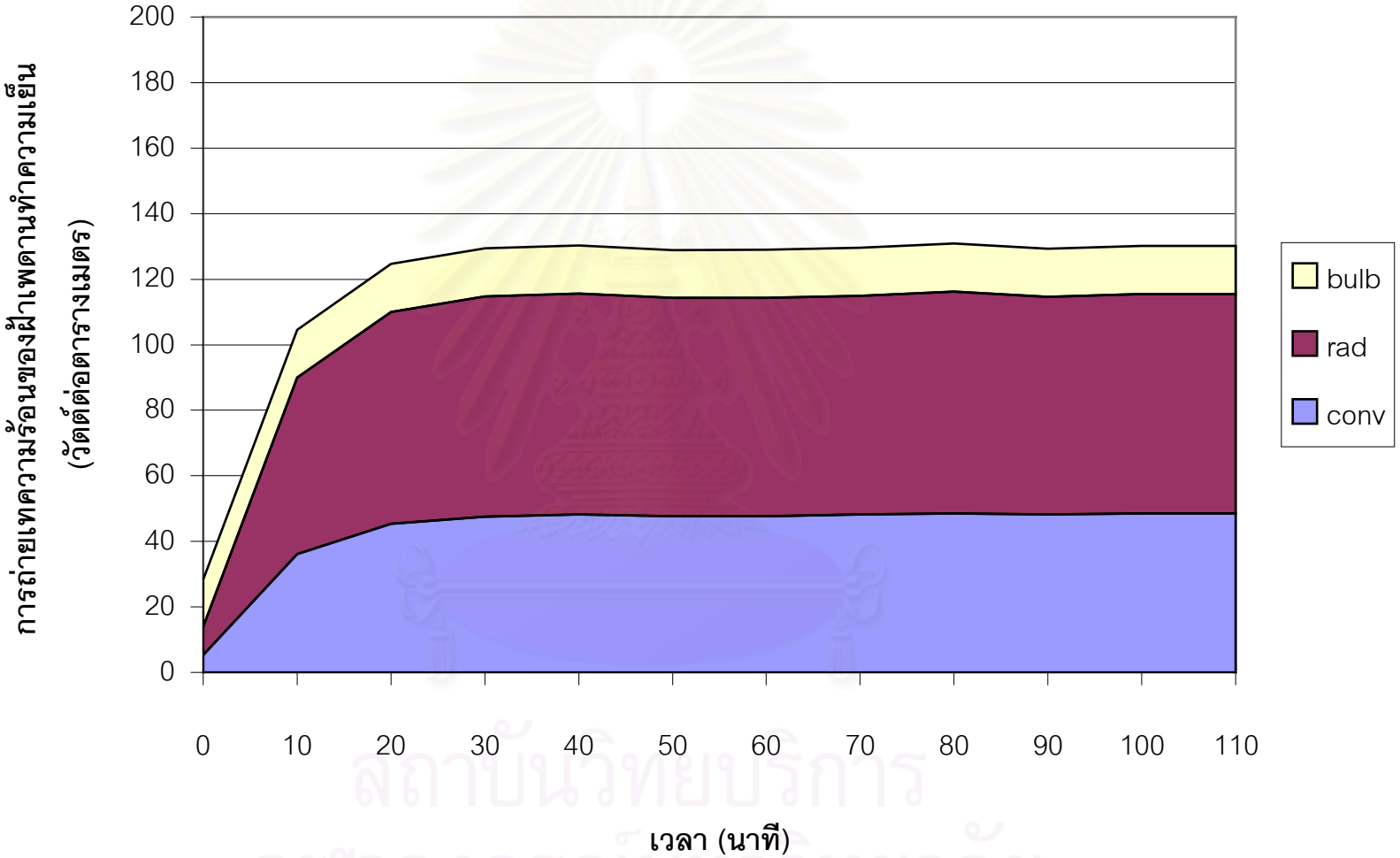



รูปที่ ก.54 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง

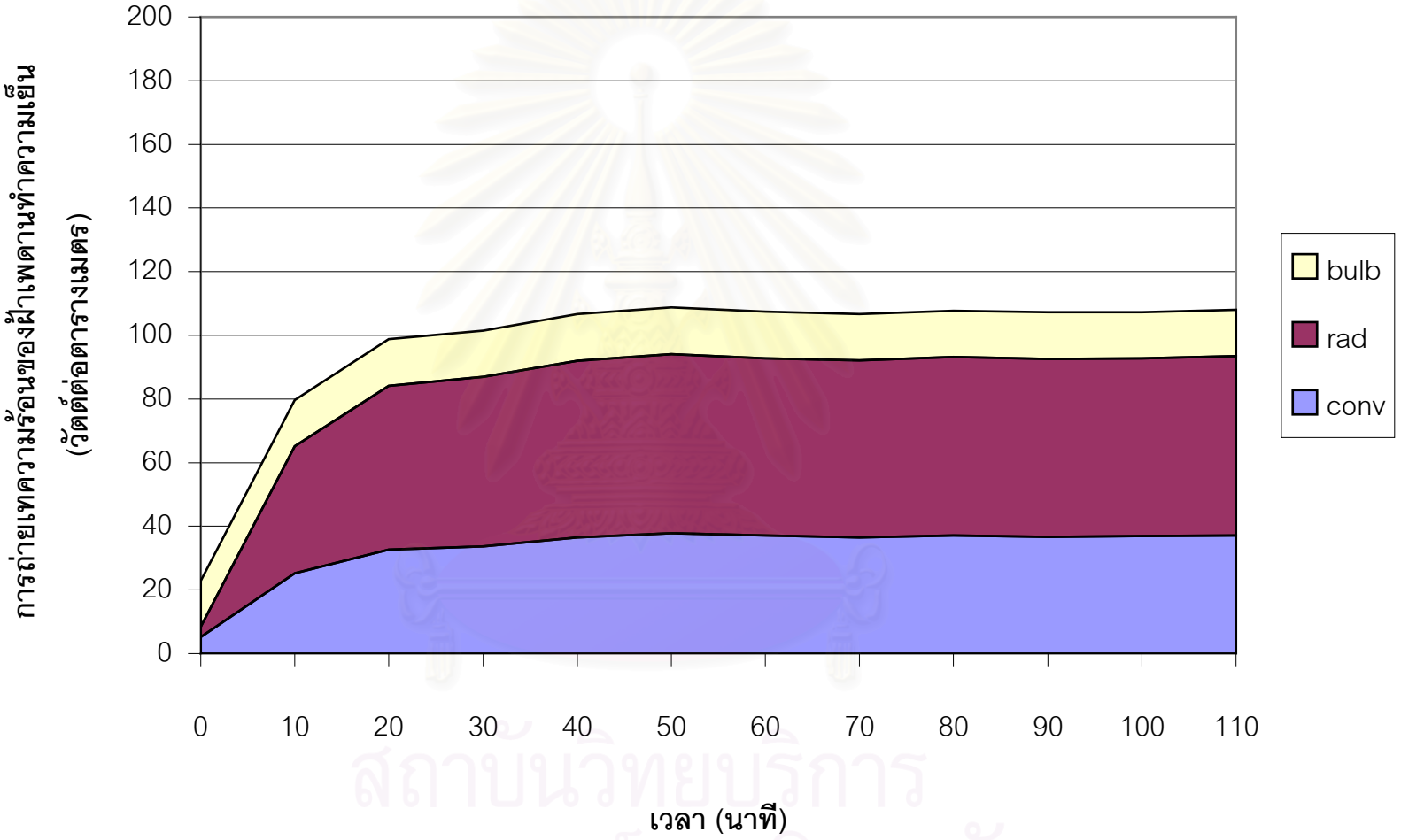
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



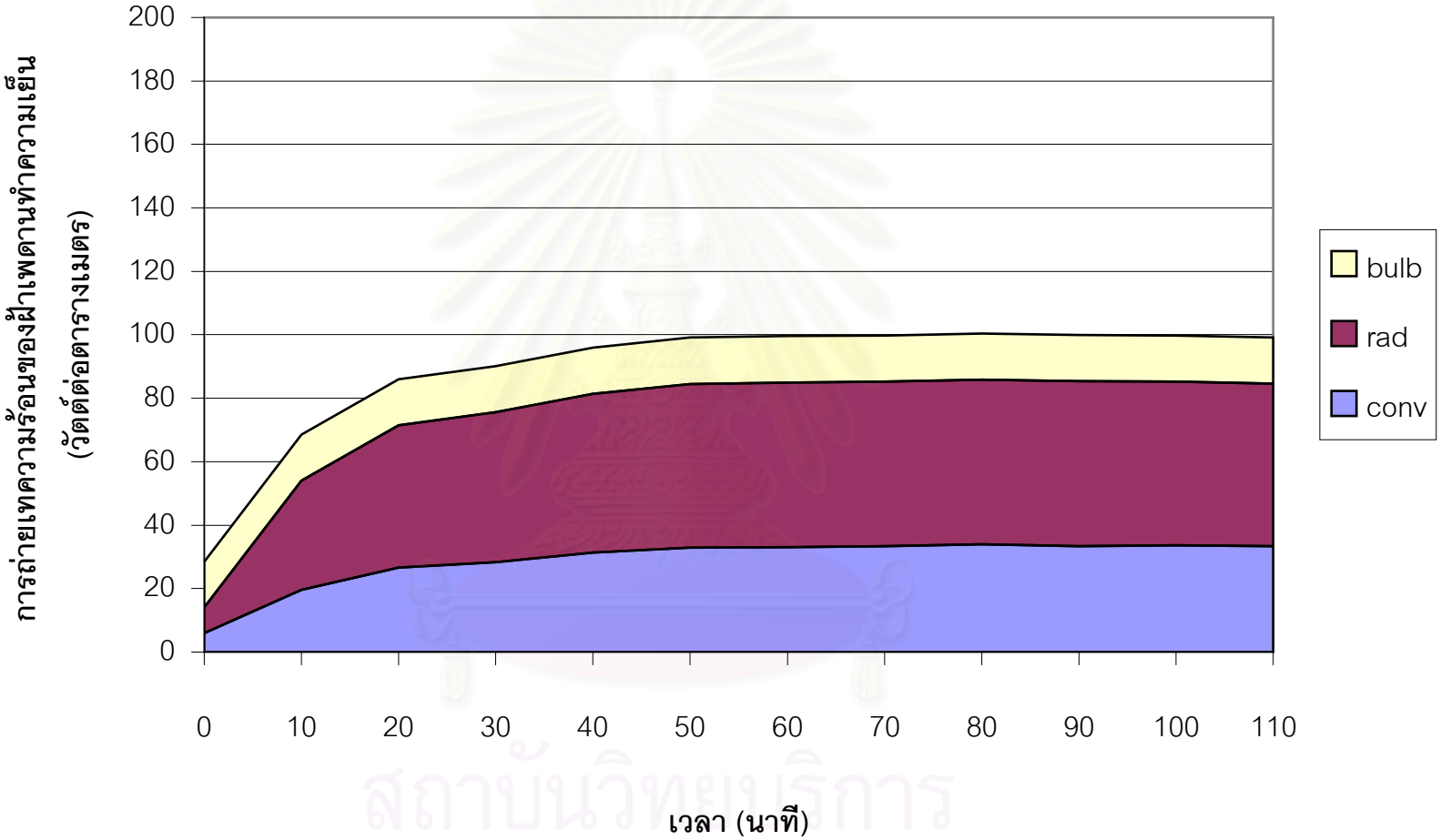

รูปที่ ก.55 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง




รูปที่ ก.56 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง

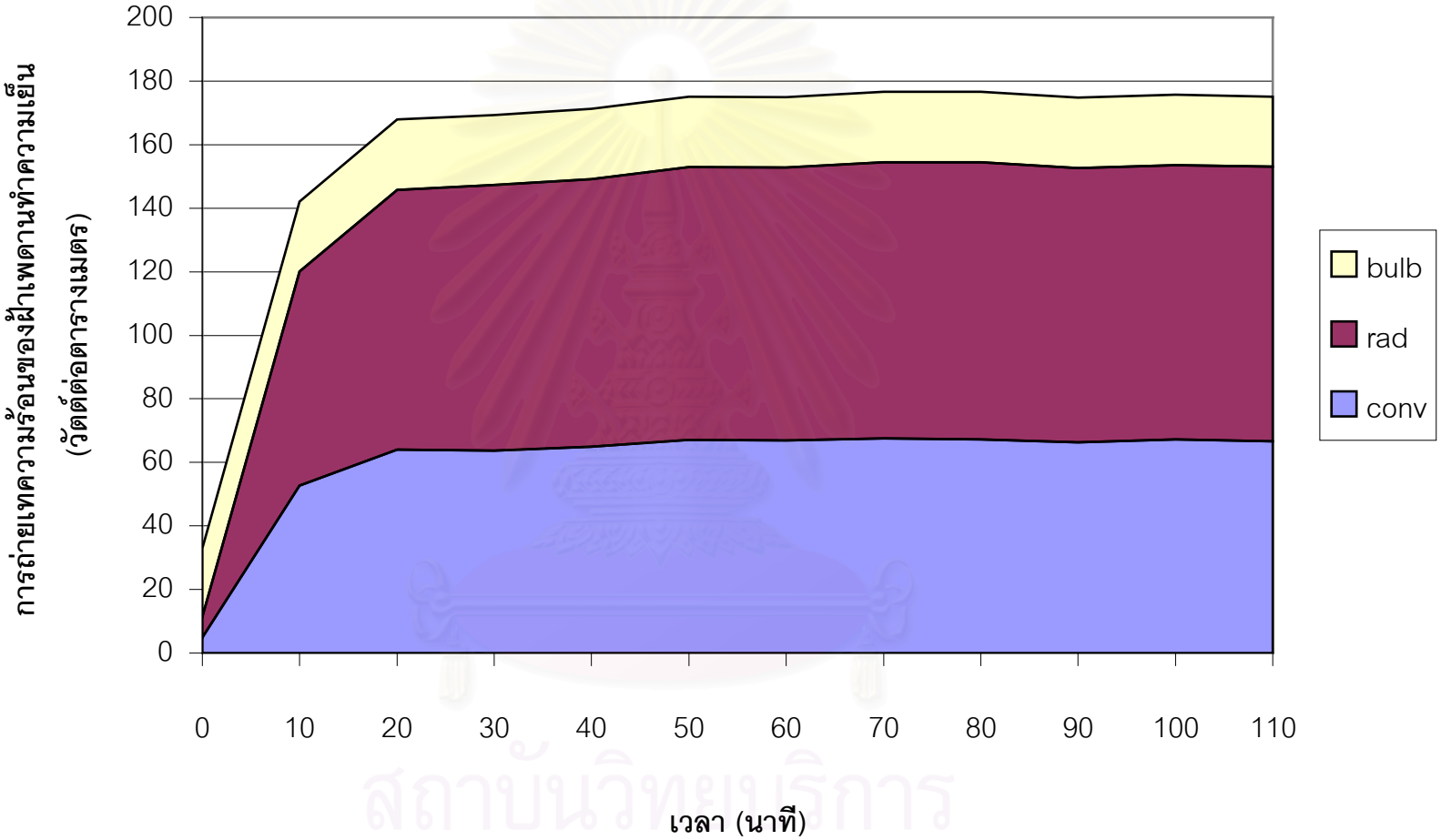



รูปที่ ก.57 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง



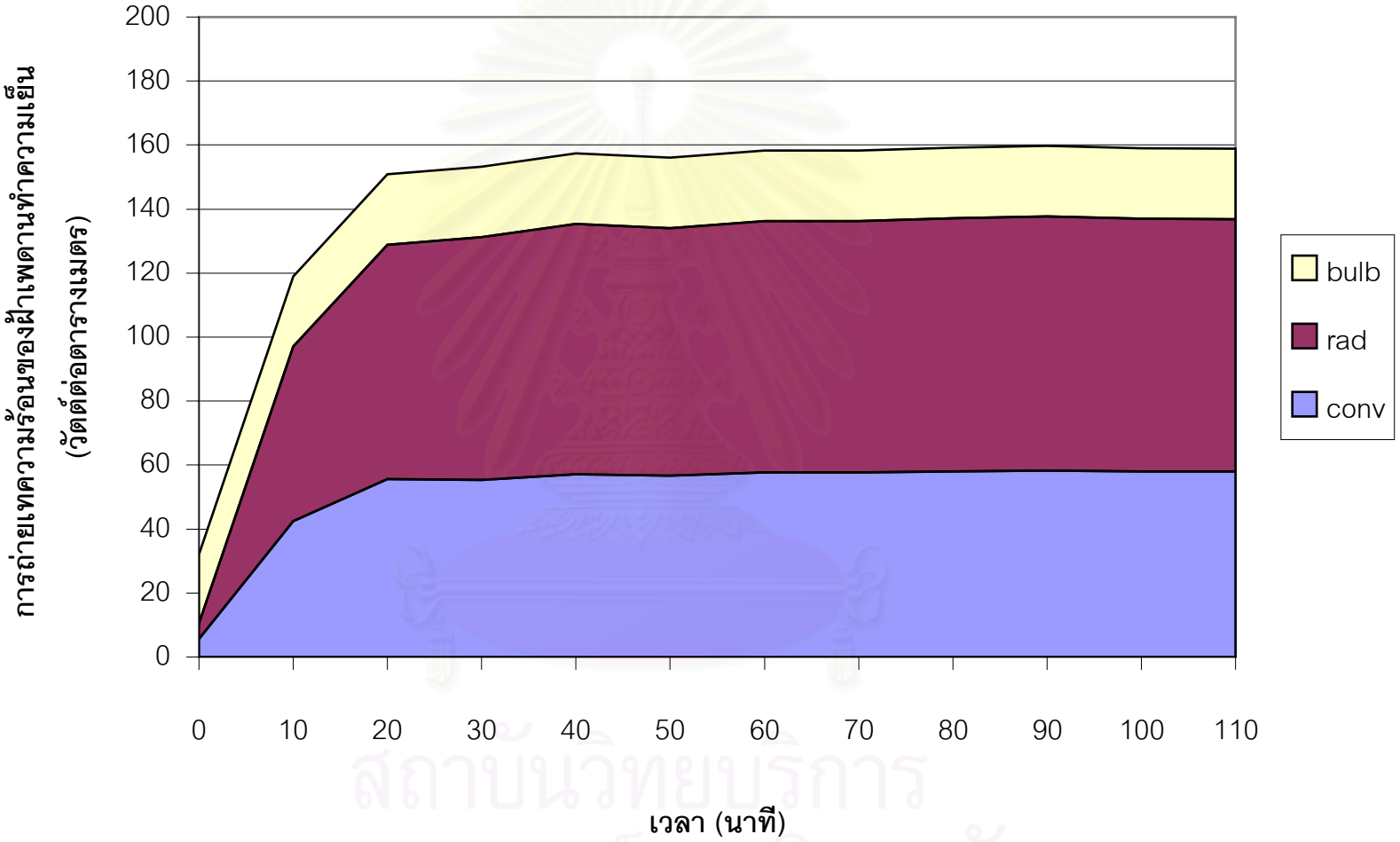

รูปที่ ก.58 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

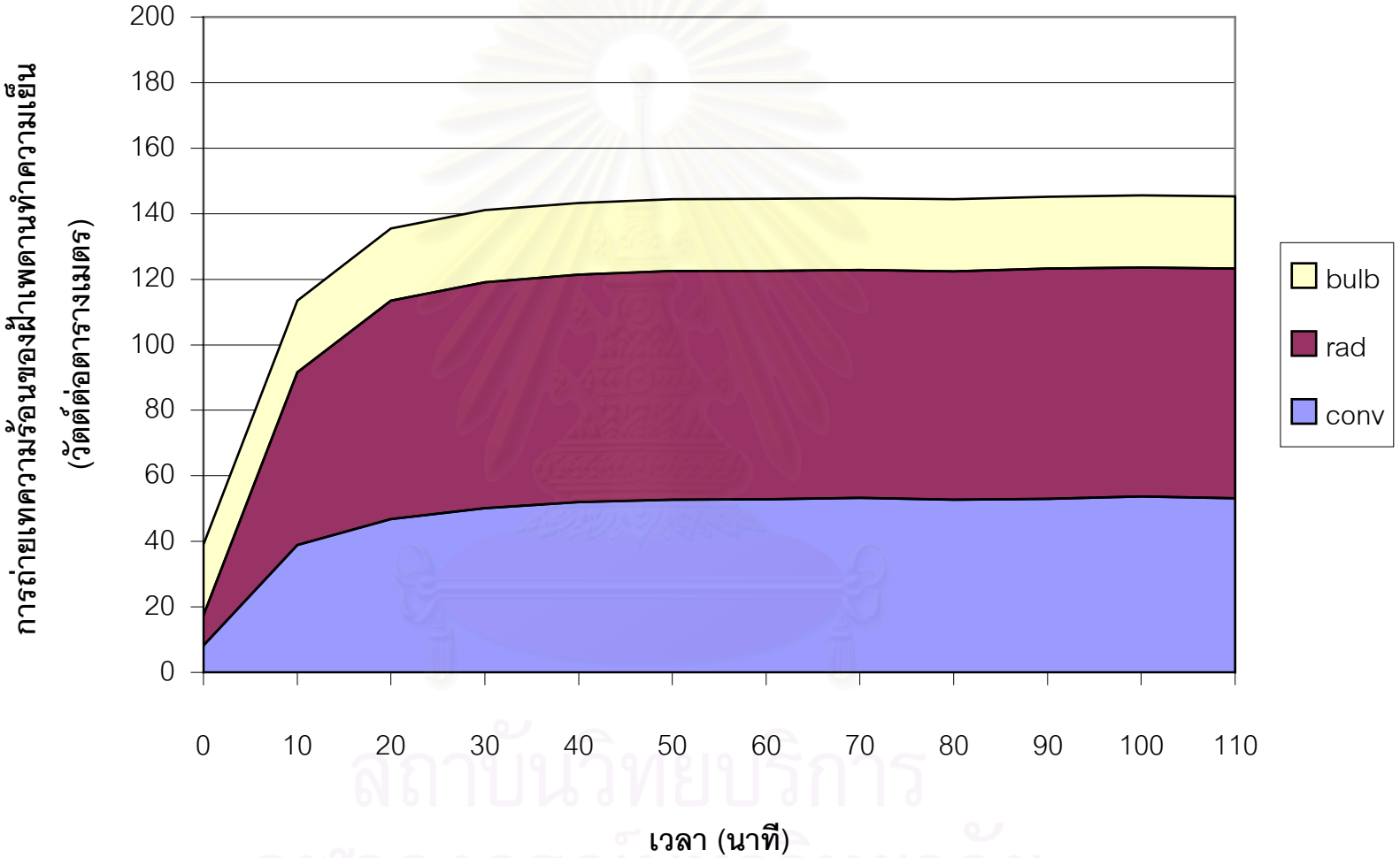



รูปที่ ก.59 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง

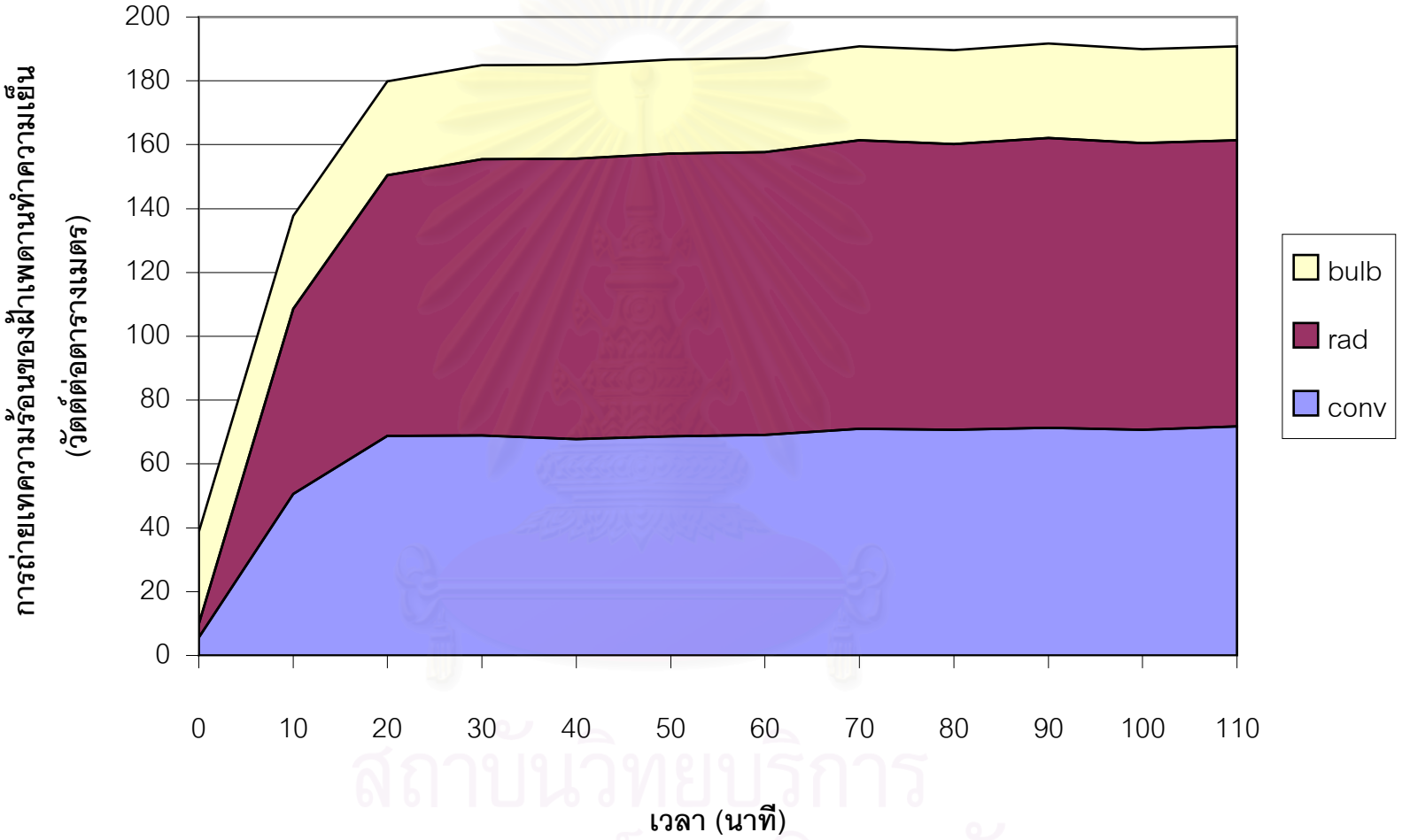
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



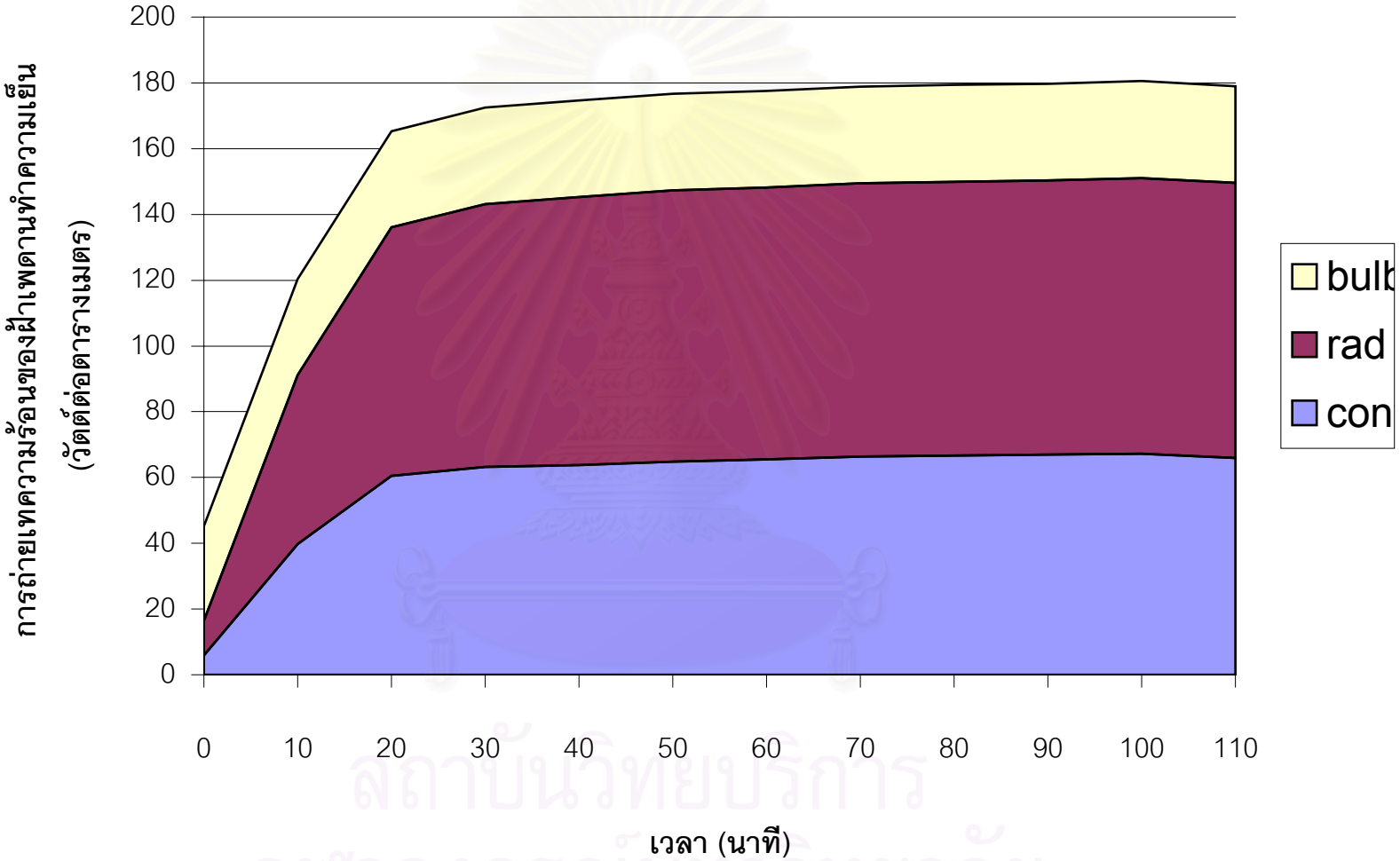

รูปที่ ก.60 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง




รูปที่ ก.61 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง

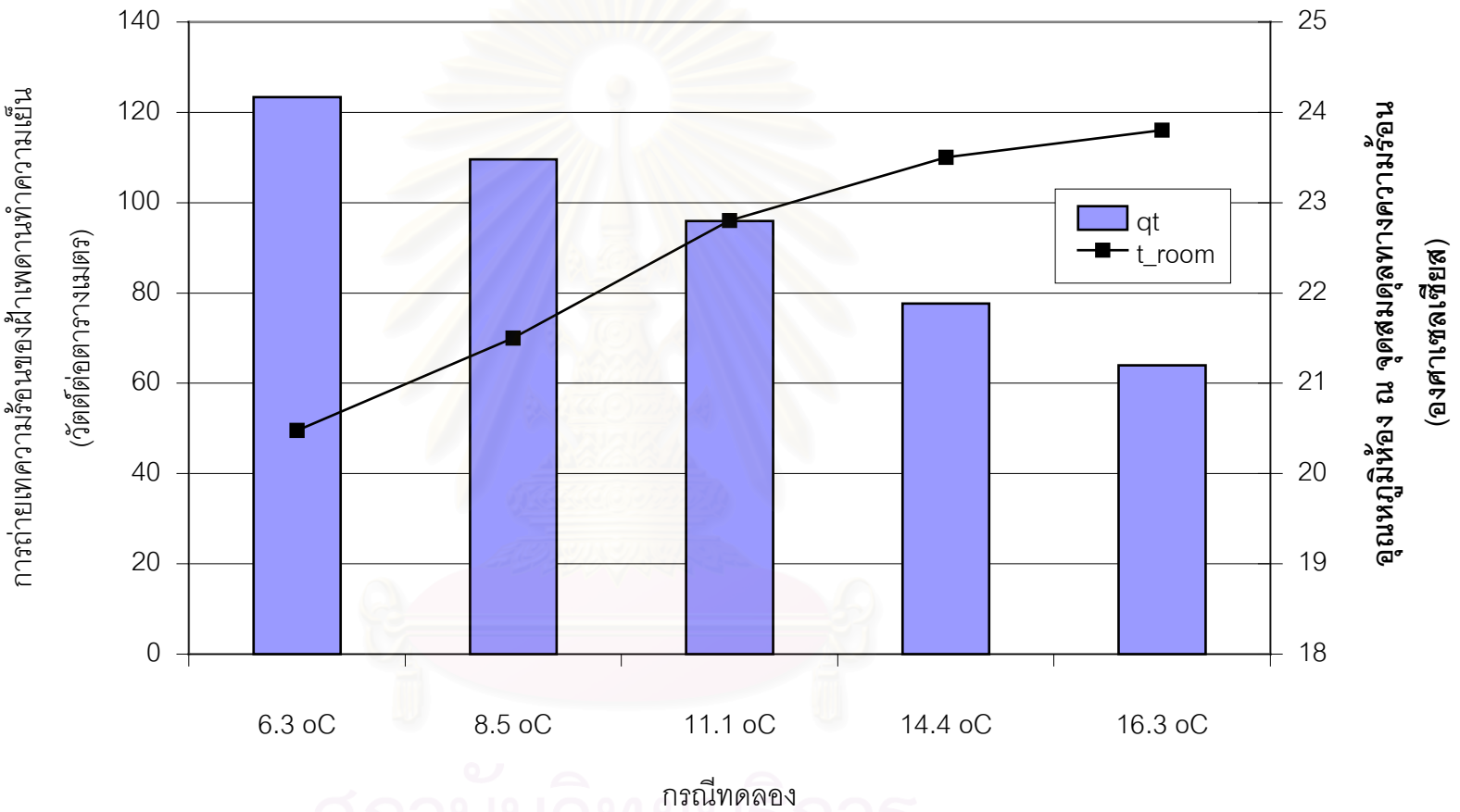



รูปที่ ก.62 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง

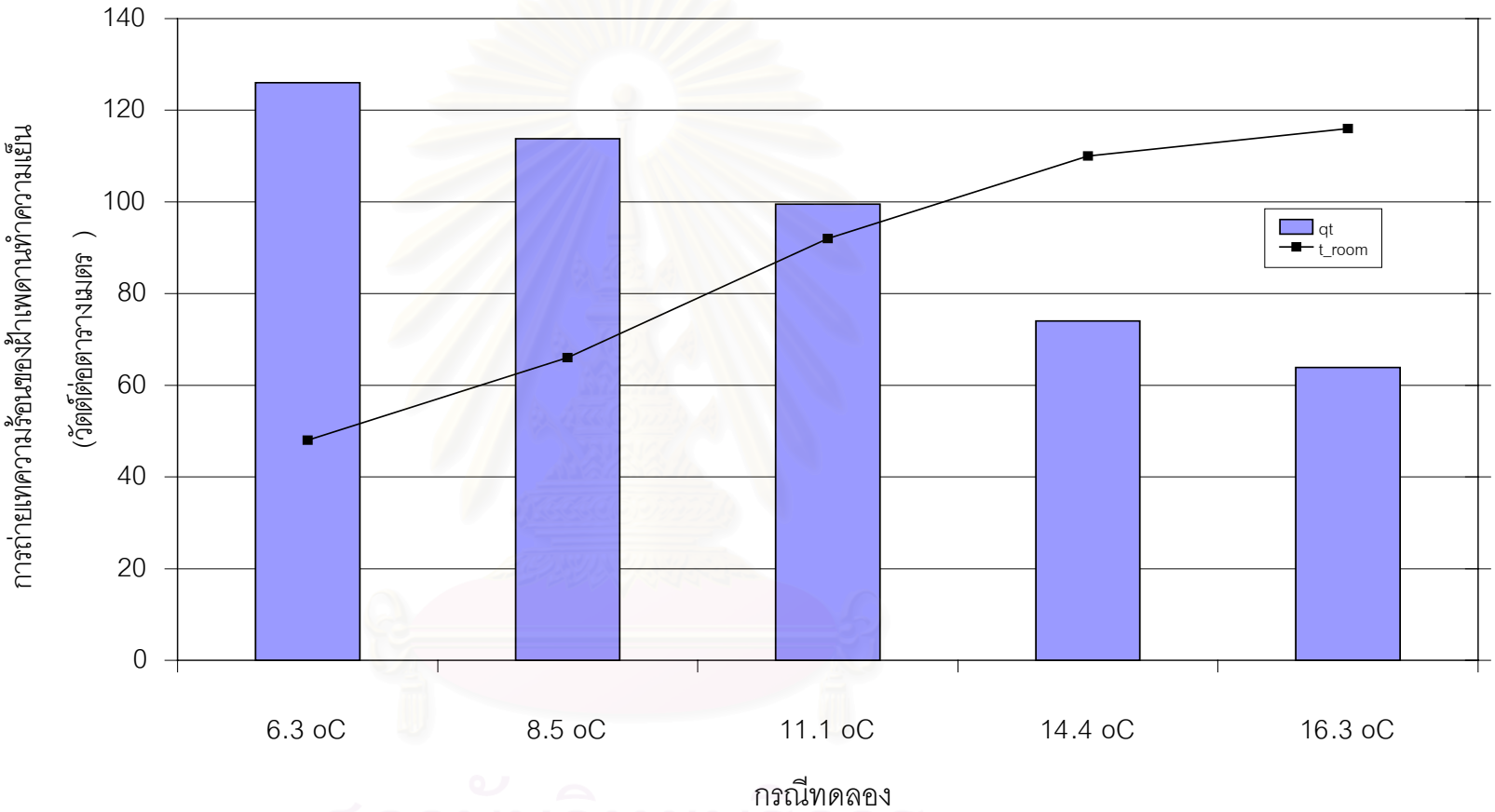



รูปที่ ก.63 : กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลา ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง

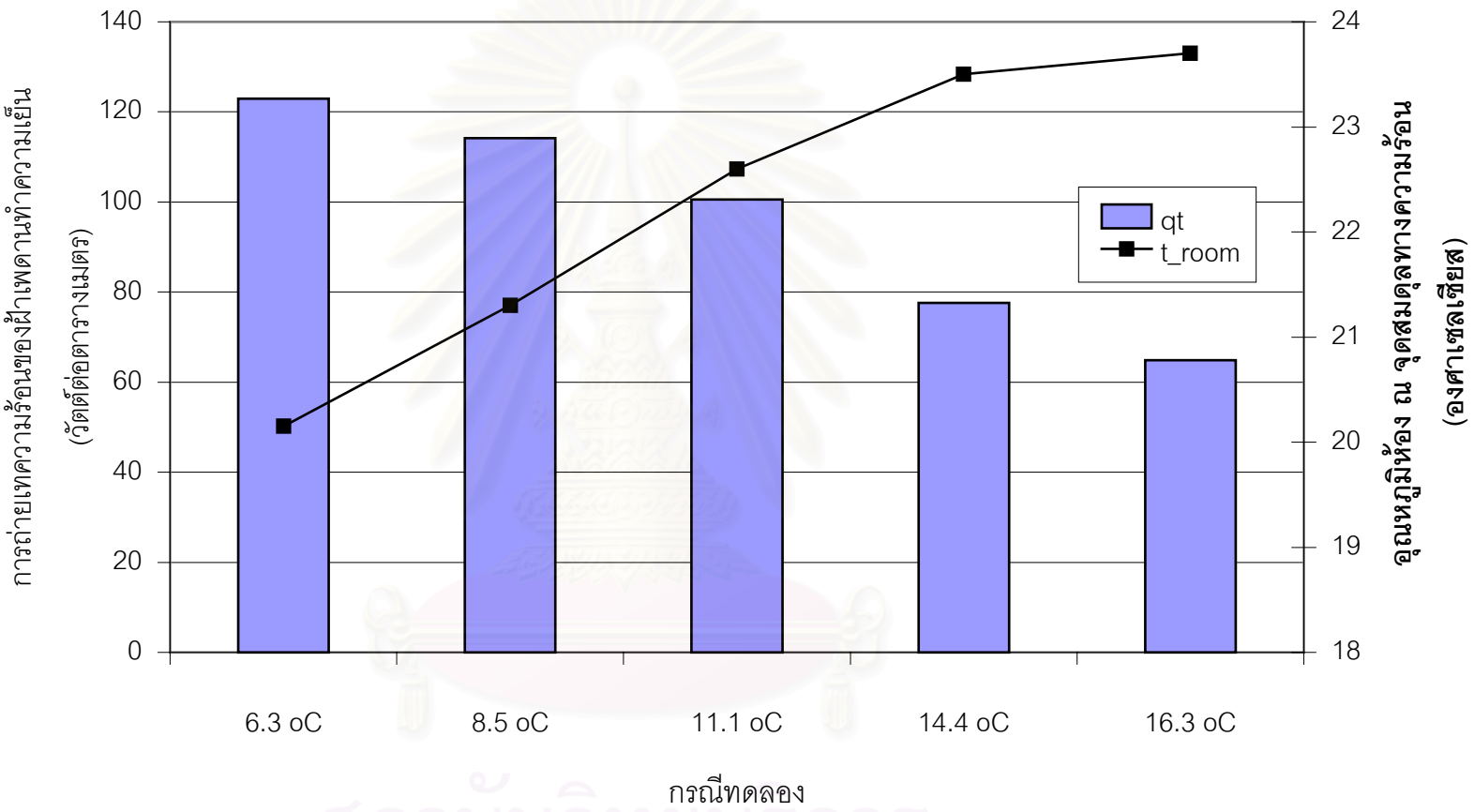
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



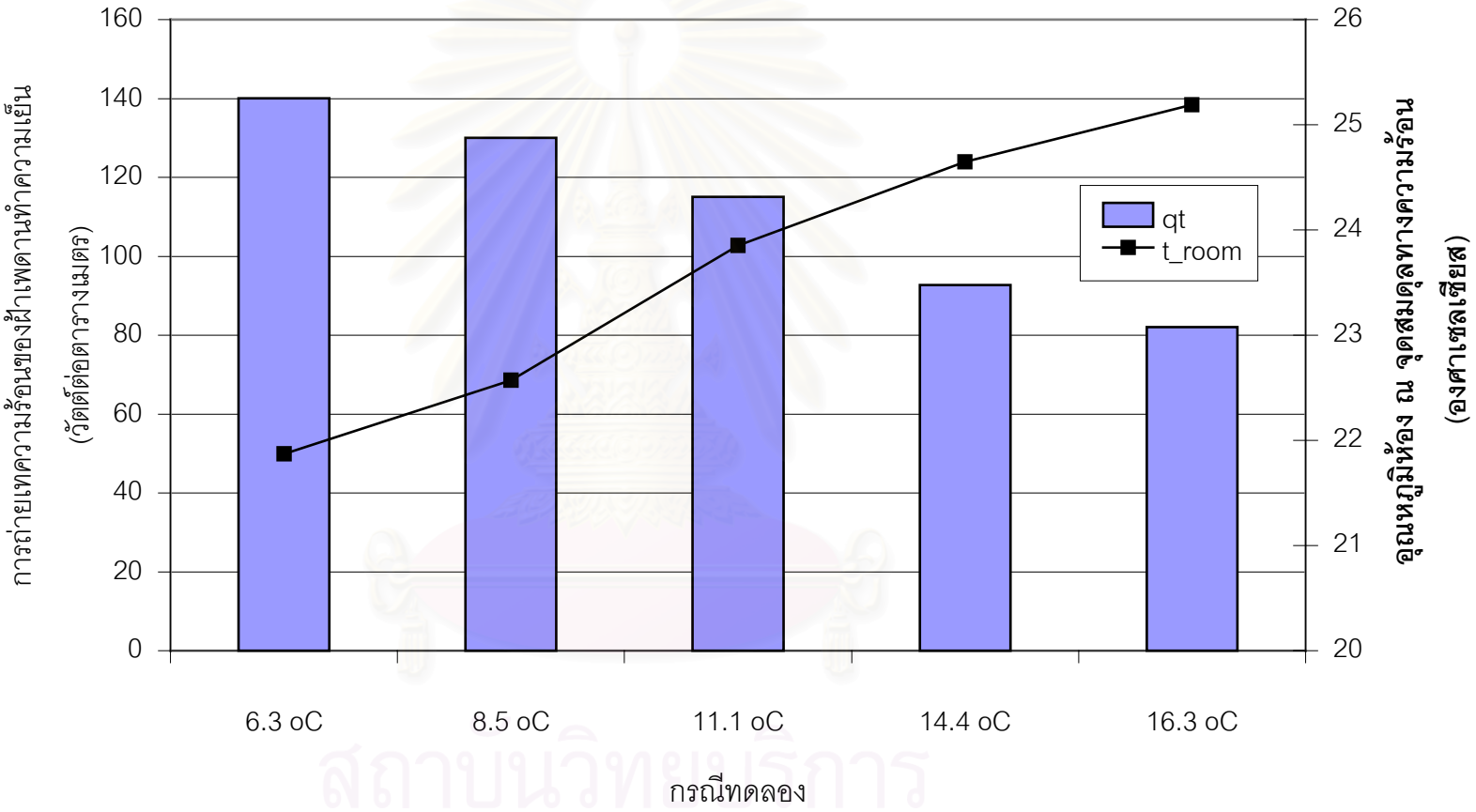

รูปที่ ก.64 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง



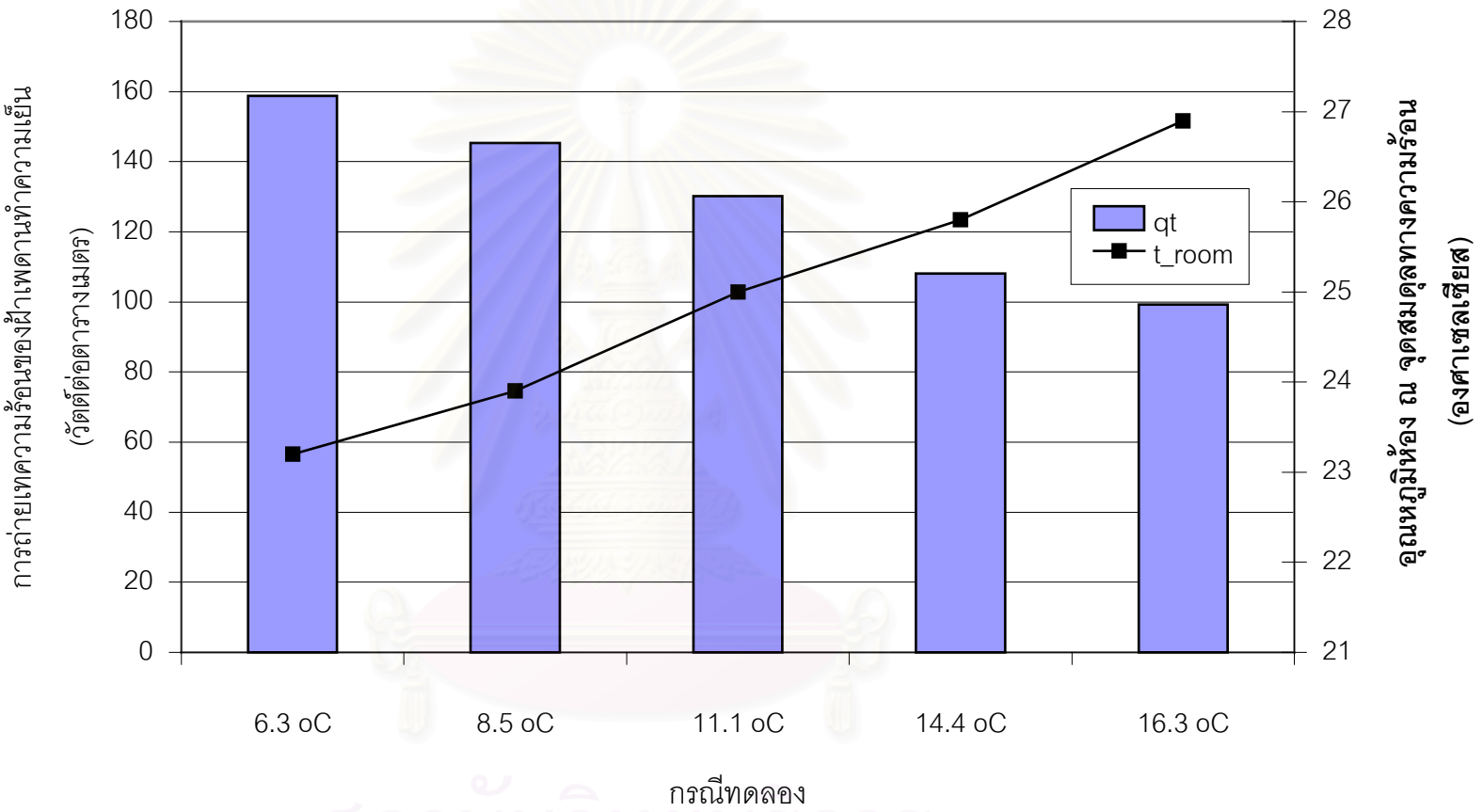

รูปที่ ก.65 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง



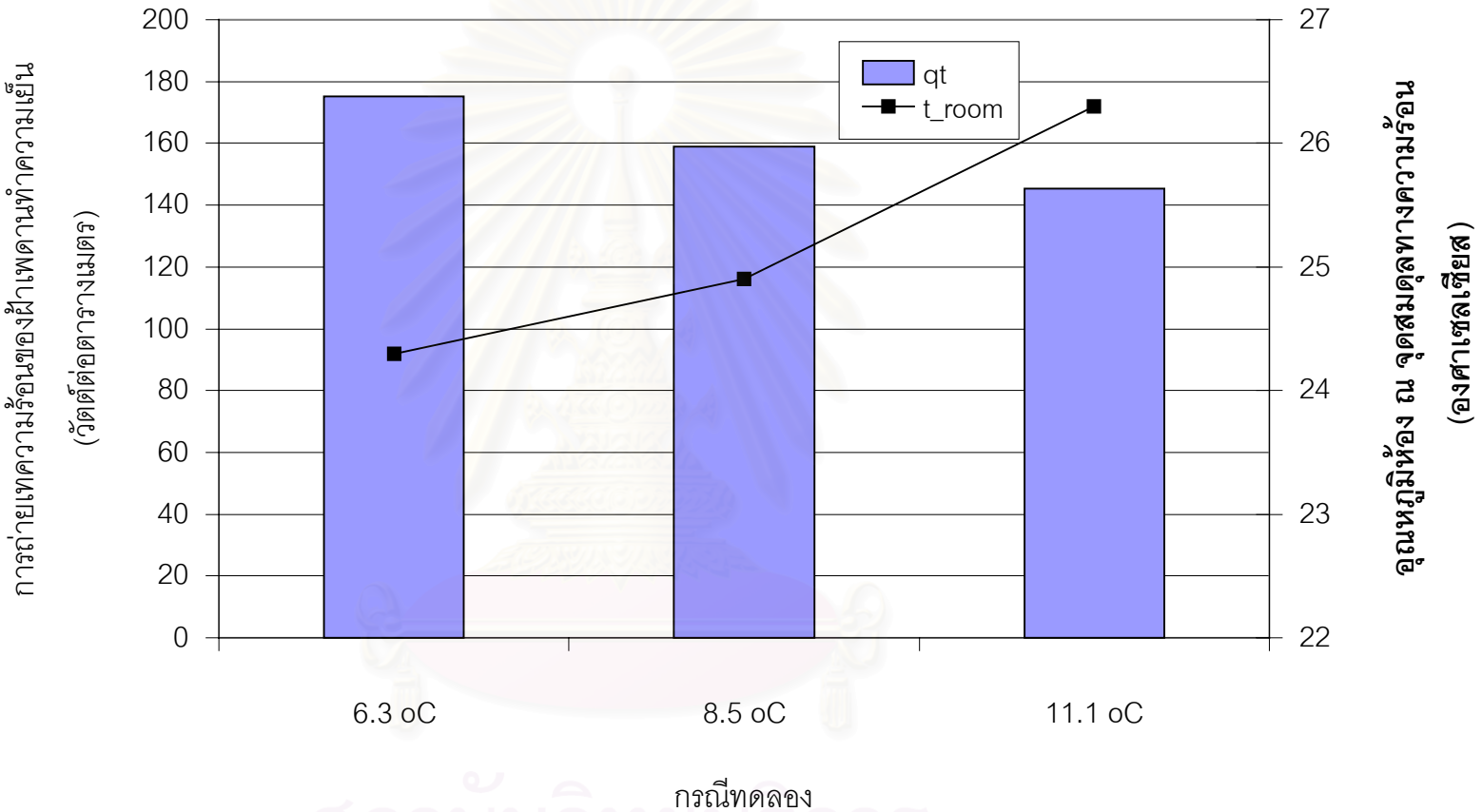

รูปที่ ก.66 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีภาระความร้อนภายในห้อง



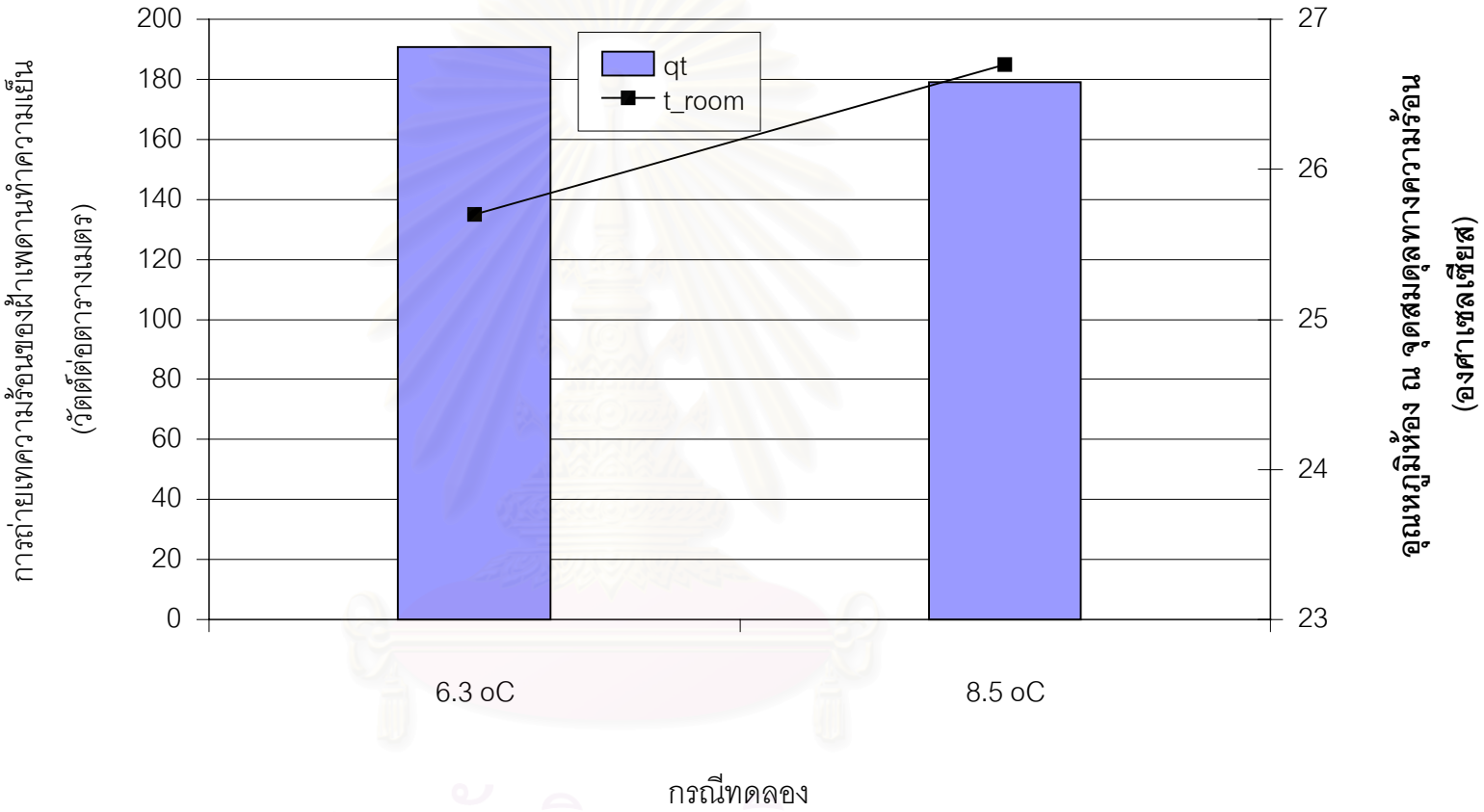

รูปที่ ก.67 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1ดวง



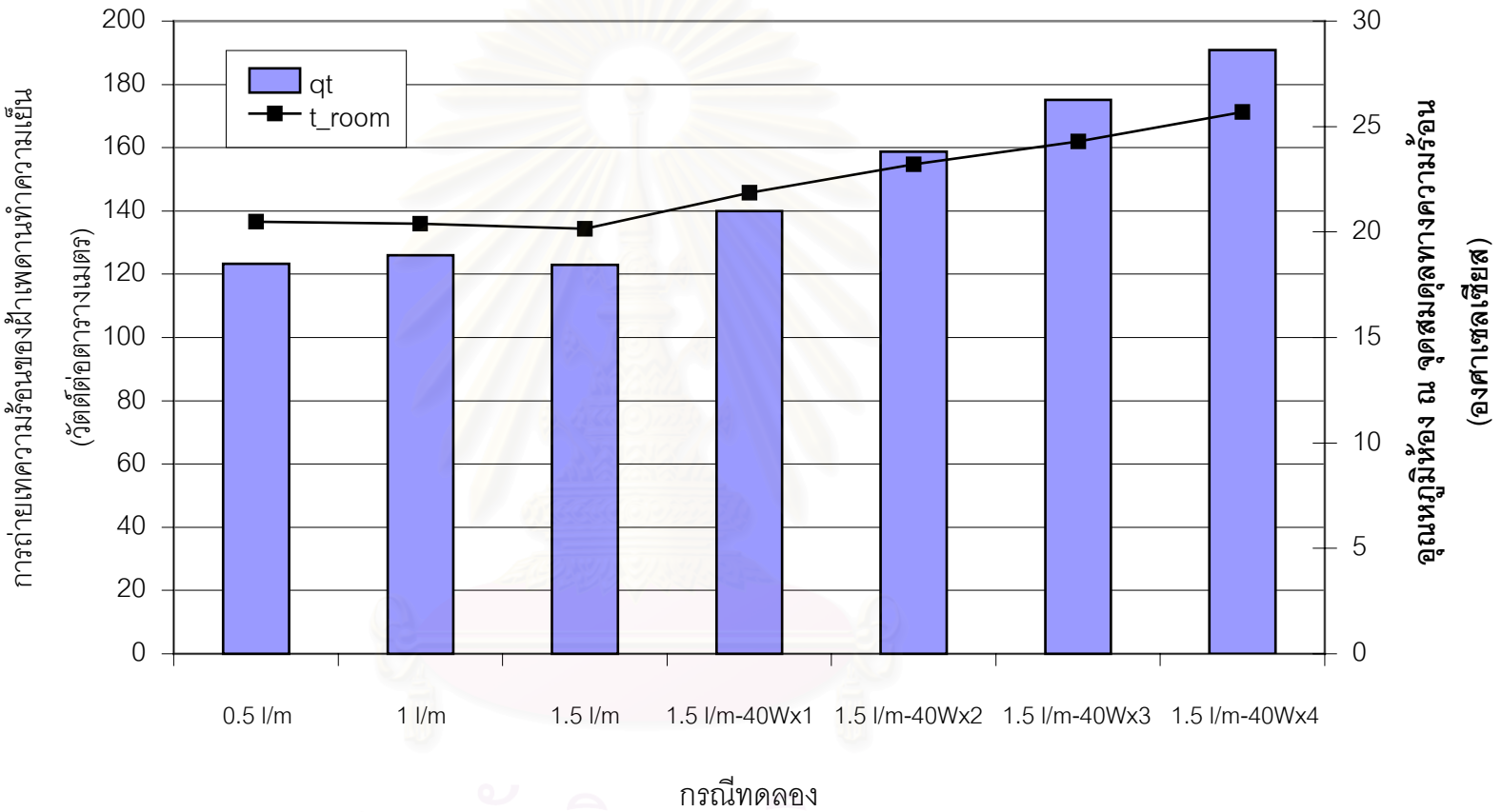

รูปที่ ก.68 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 , 16.3 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2ดวง



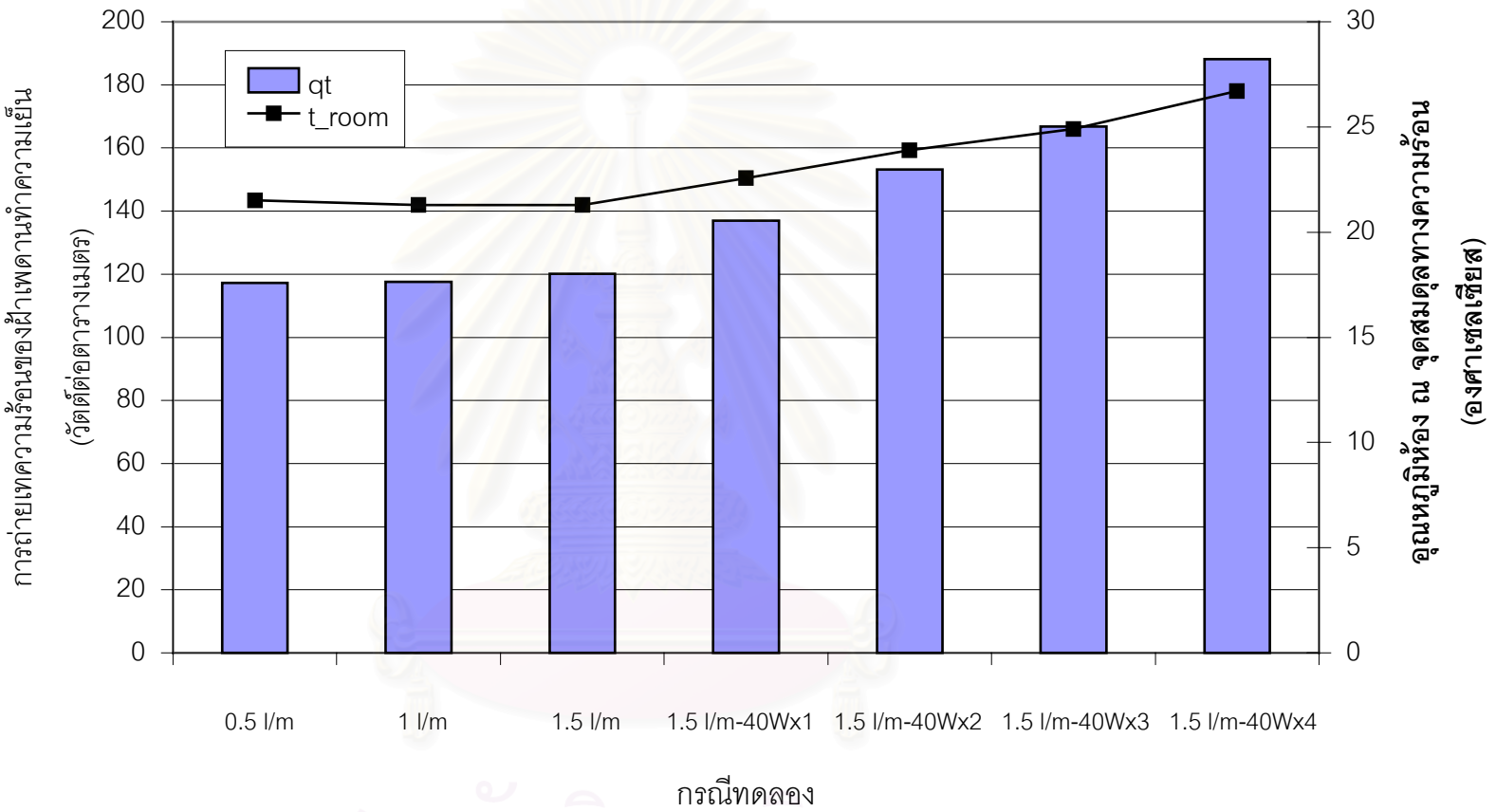

รูปที่ ก.69 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3ดวง



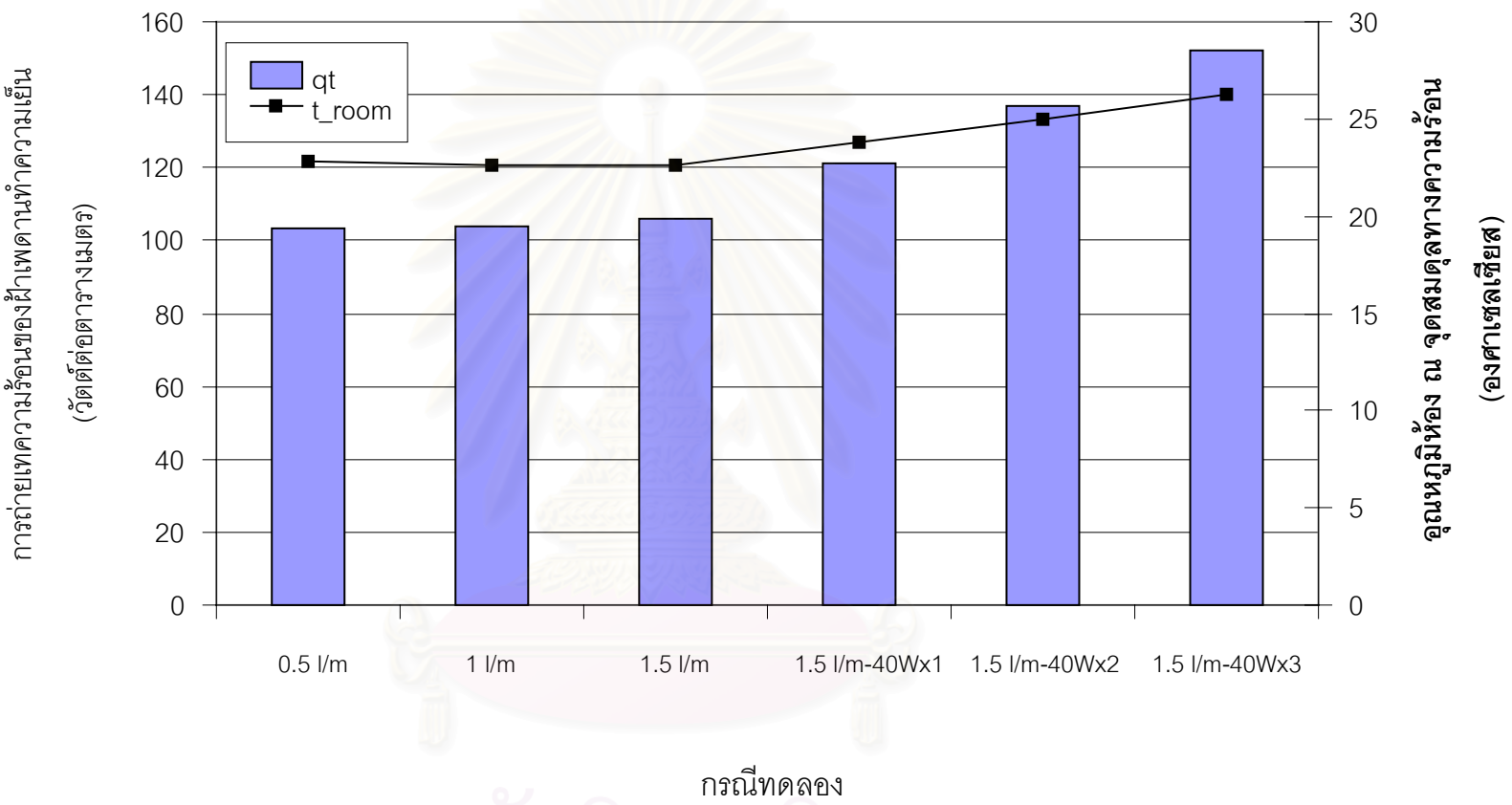

รูปที่ ก.70 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที ในกรณีที่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4ดวง



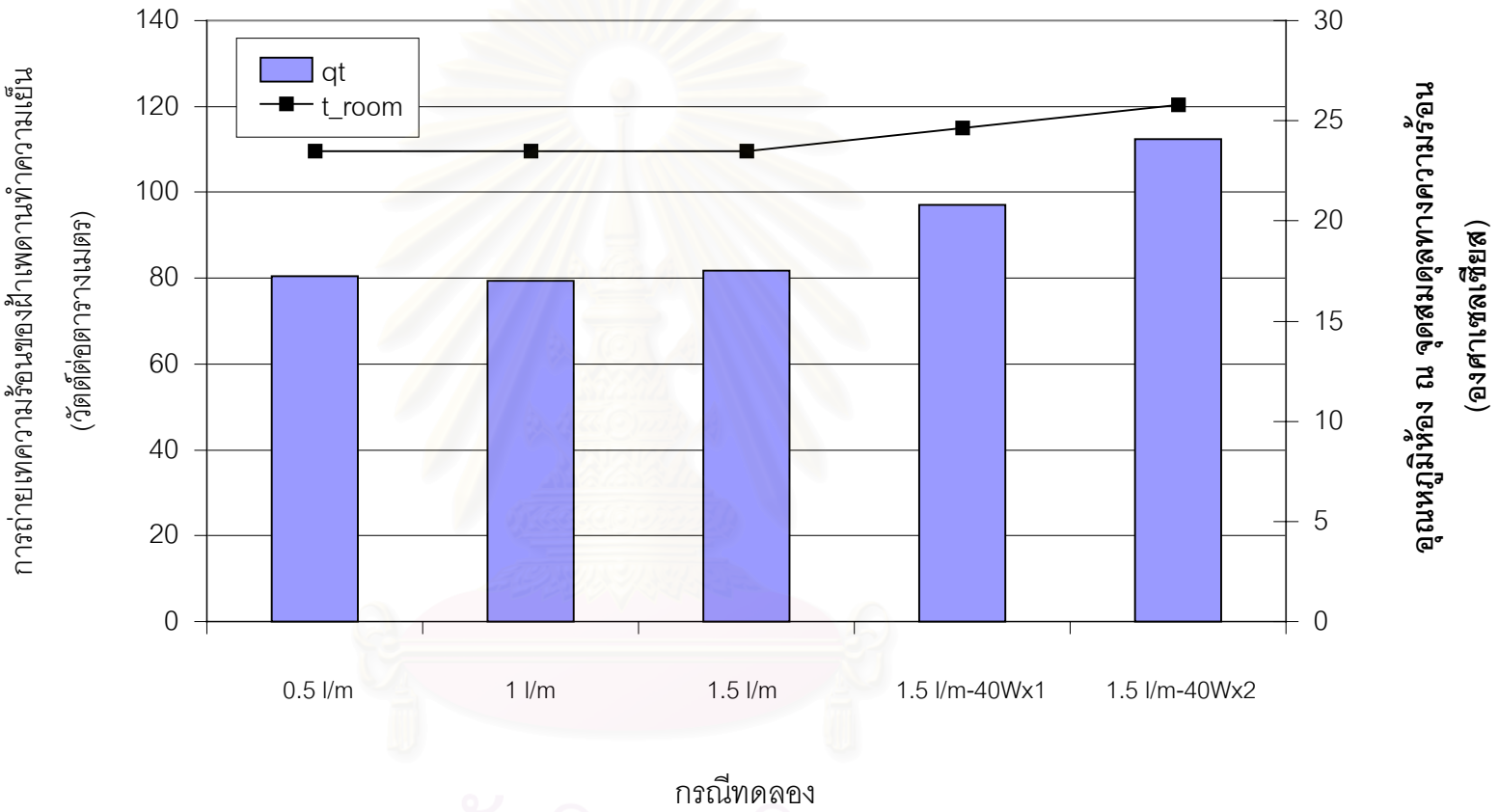

รูปที่ ก.71 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส



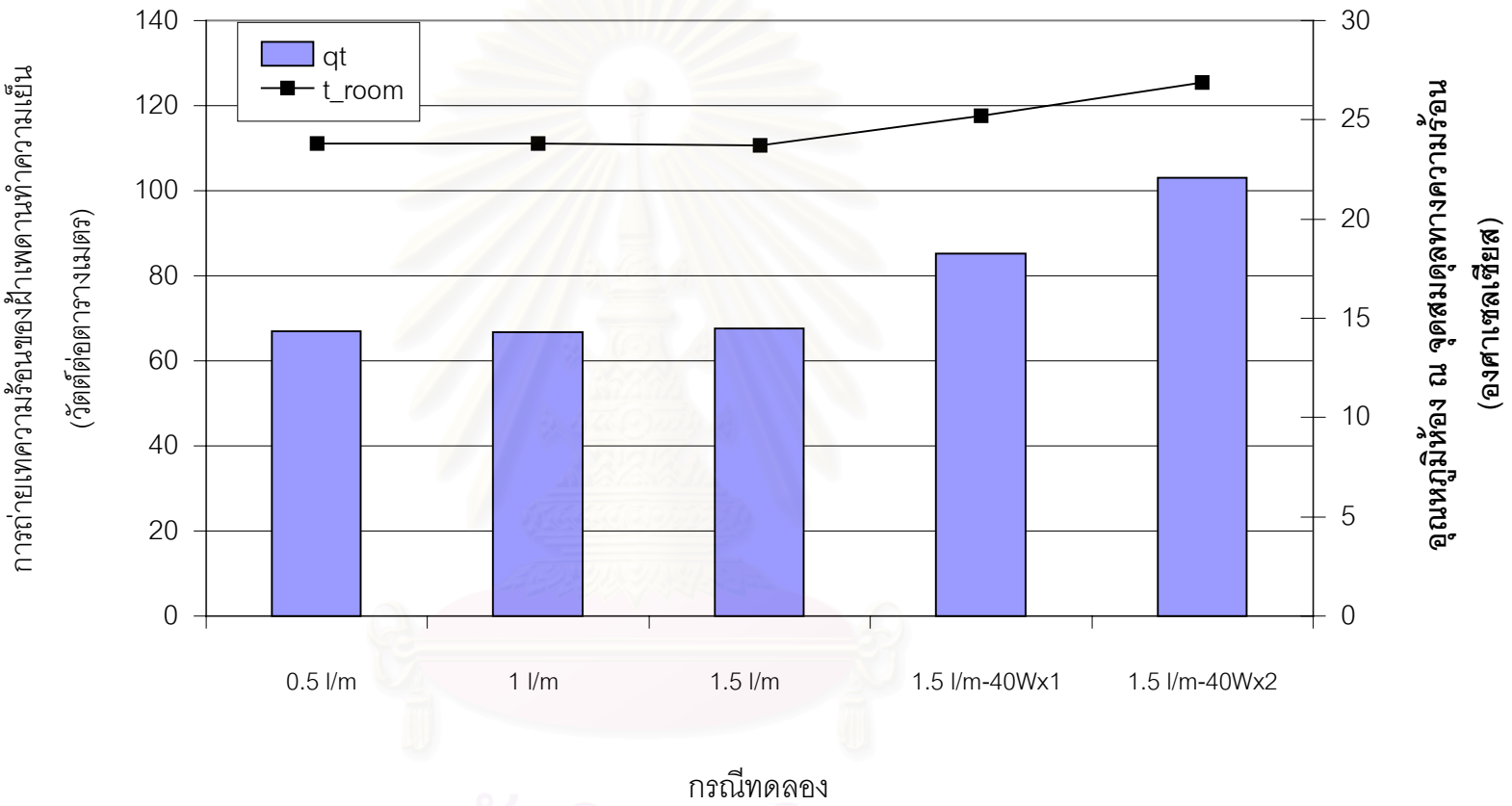

รูปที่ ก.72 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส



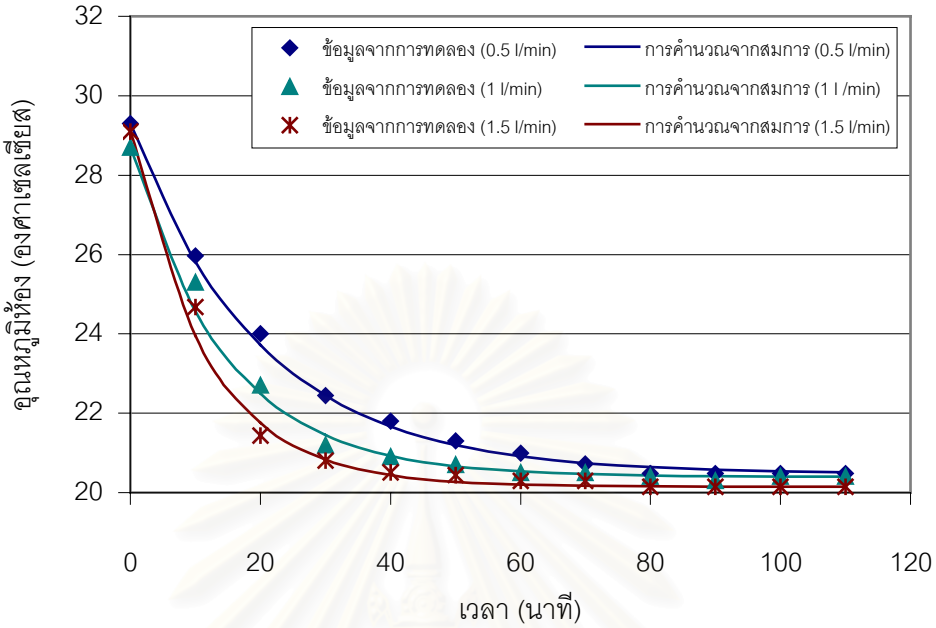

รูปที่ ก.73 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส



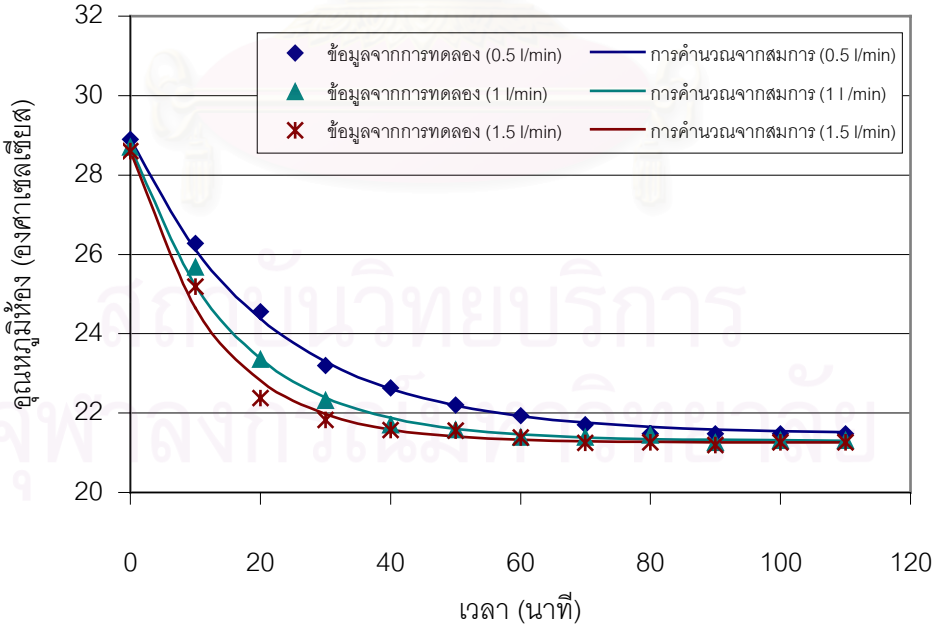

รูปที่ ก.74 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส



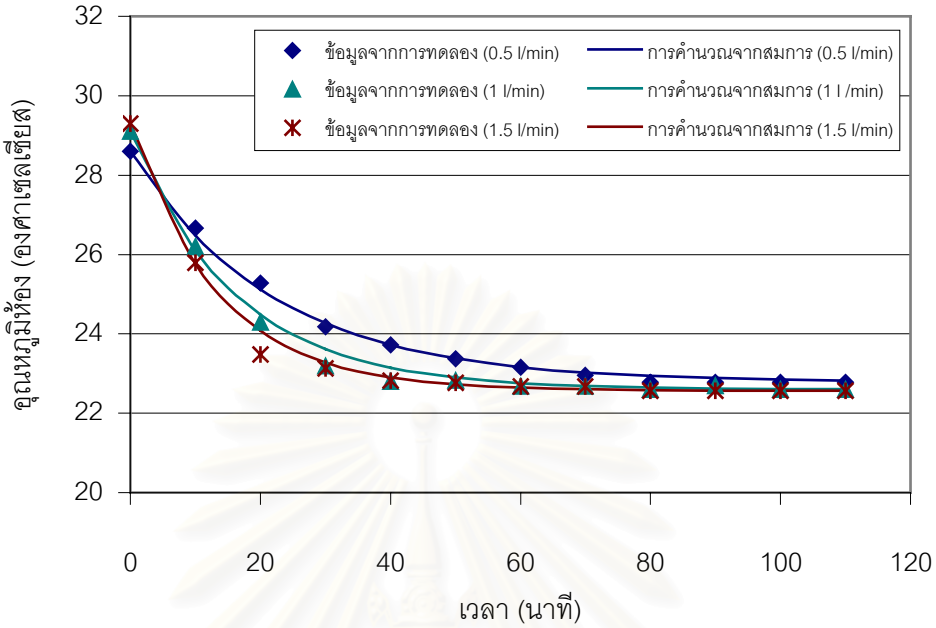

รูปที่ ก.75 : กราฟแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิห้อง ณ จุดสมดุลทางความร้อน ที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ เมื่อมีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส



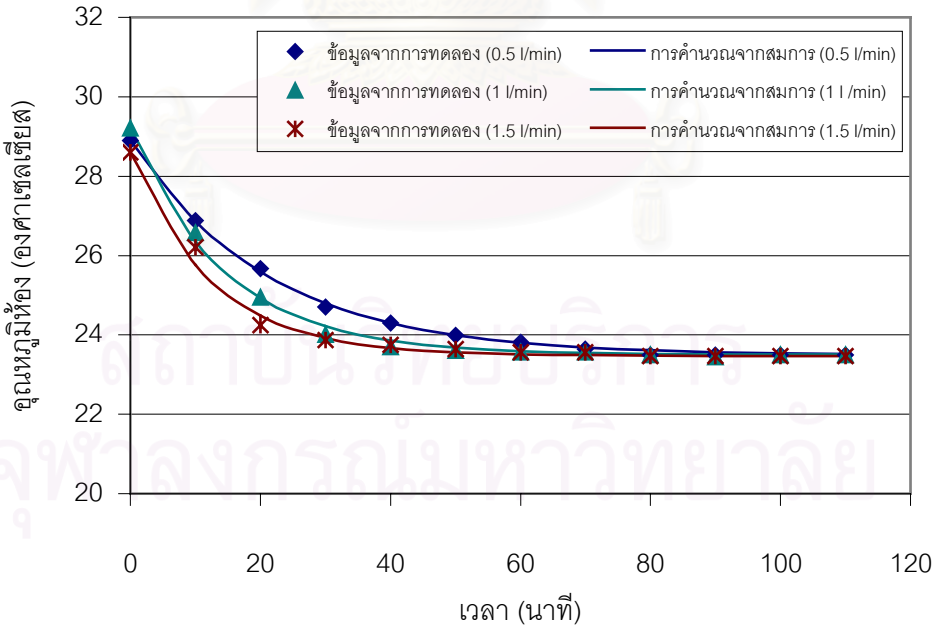

รูปที่ ก.76 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



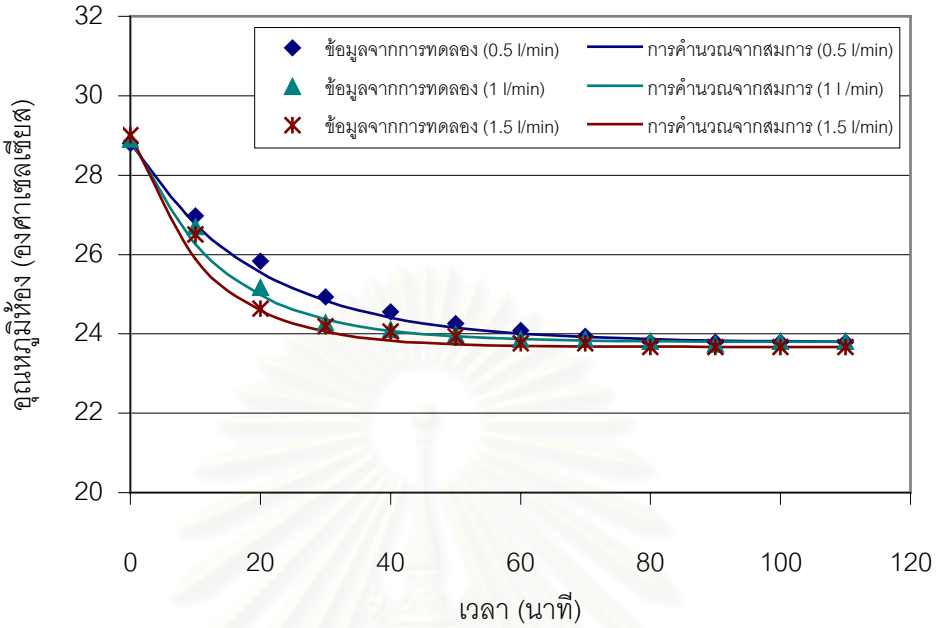

รูปที่ ก.77 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



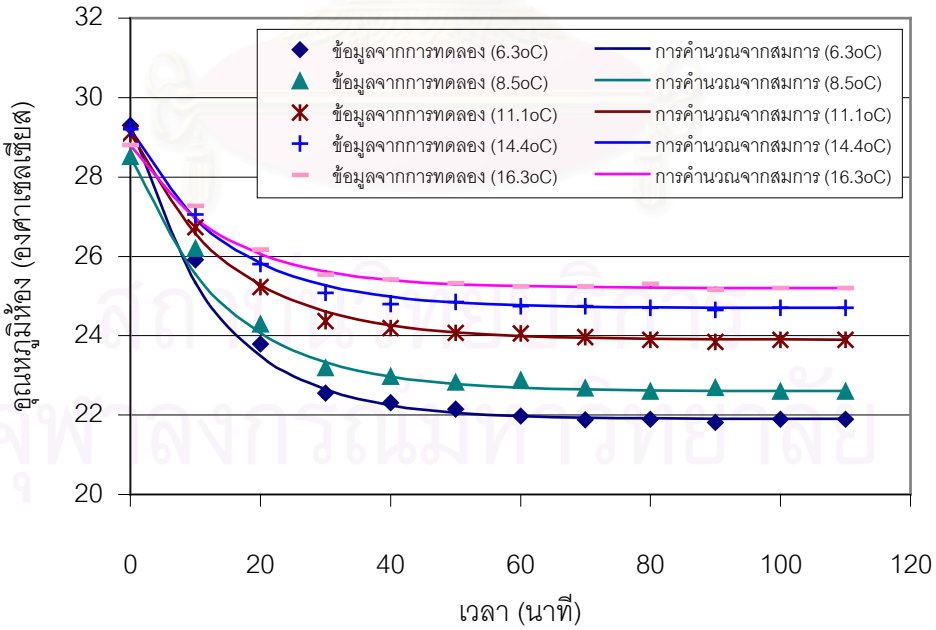

รูปที่ ก.78 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



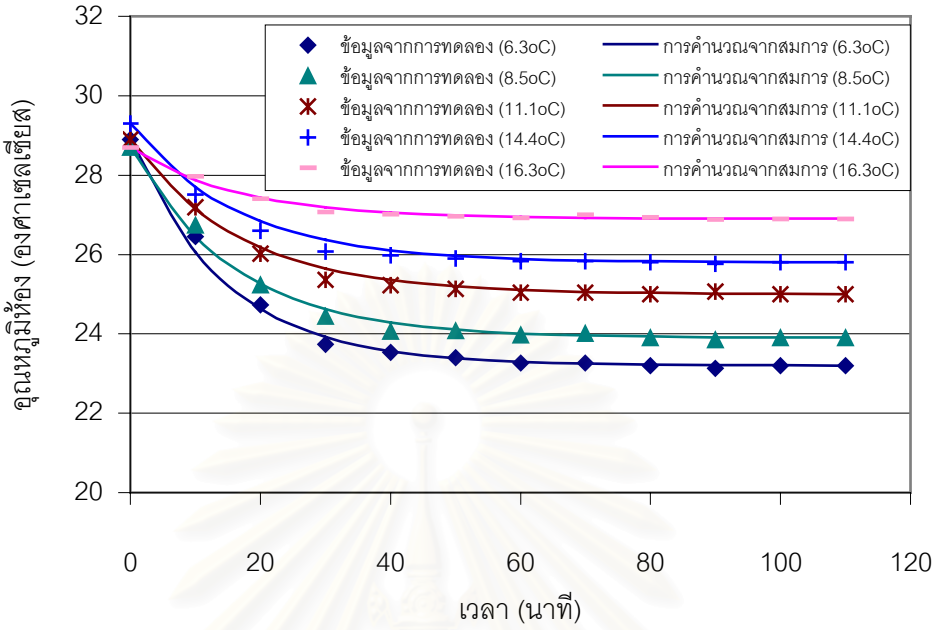

รูปที่ ก.79 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



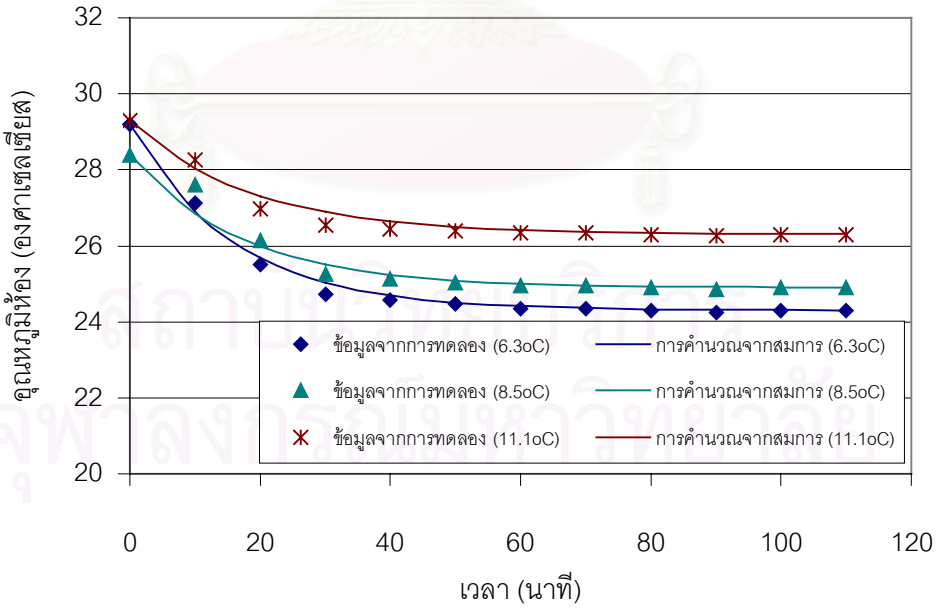

รูปที่ ก.80 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



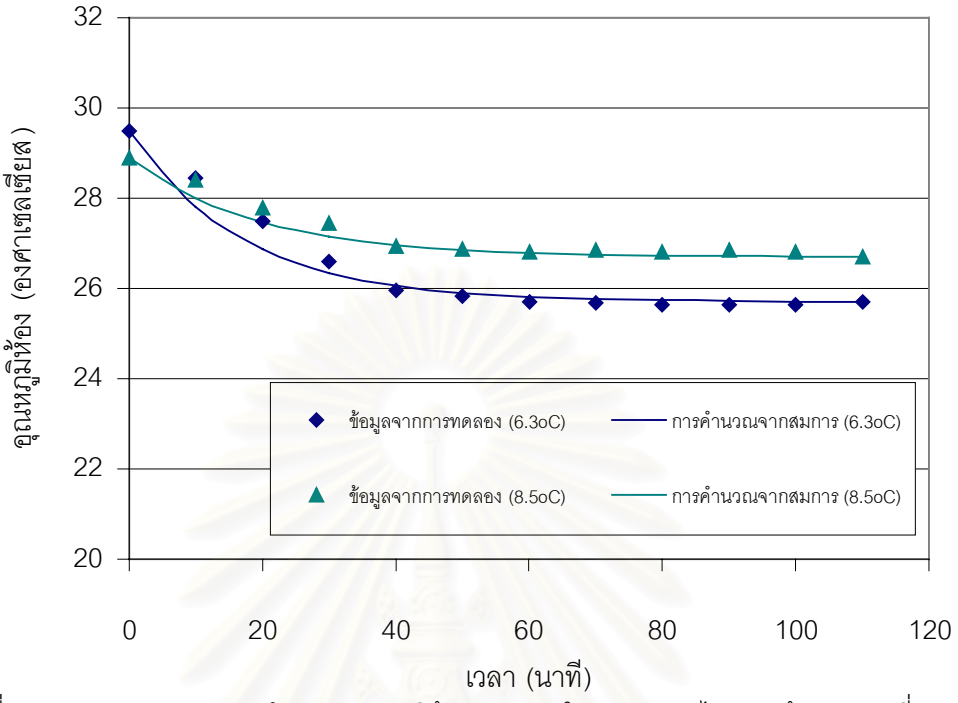

รูปที่ ก.81 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง



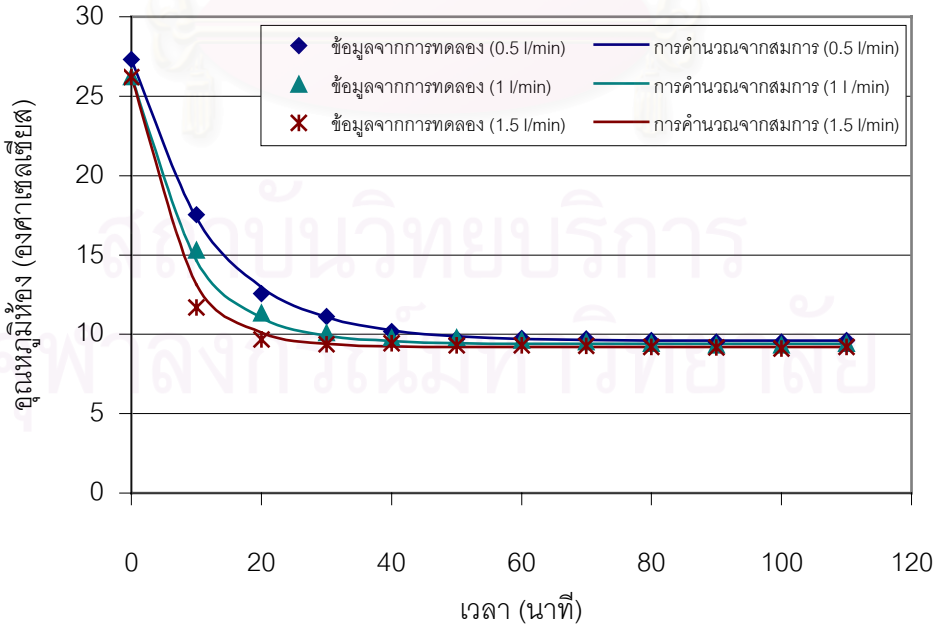

รูปที่ ก.82: กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง



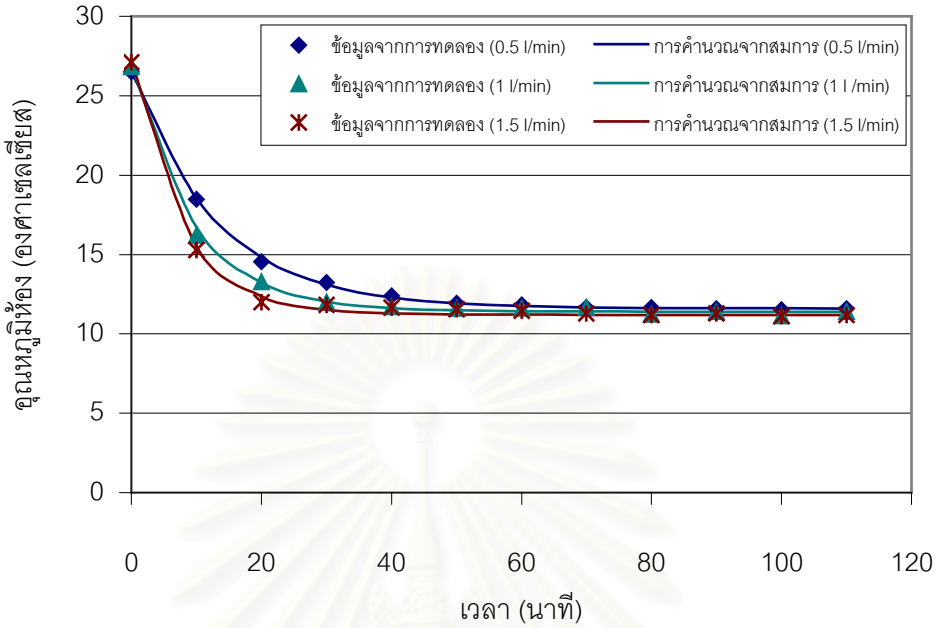

รูปที่ ก.83 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , และ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง



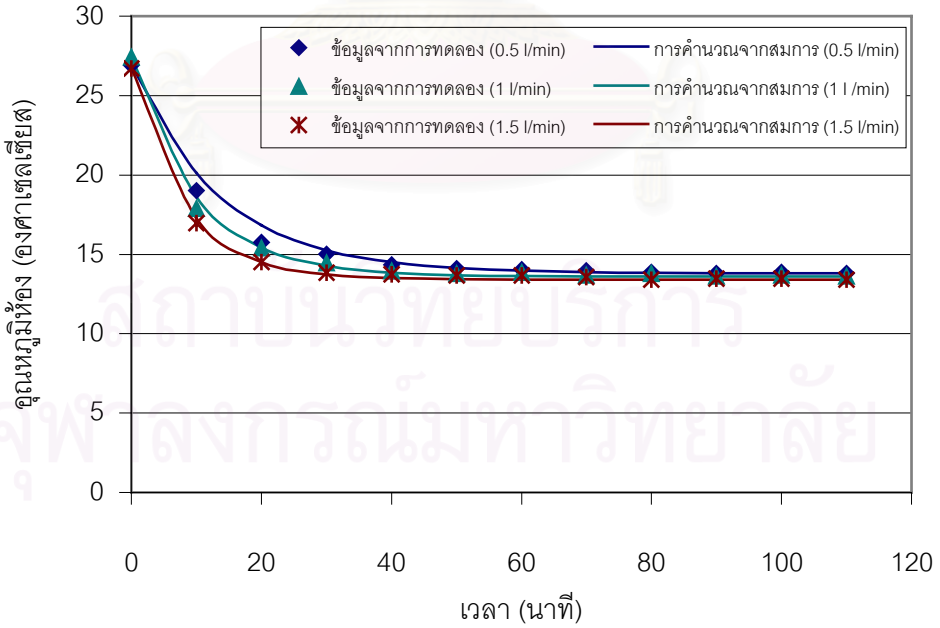

รูปที่ ก.84 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิห้องตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.16 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 และ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง



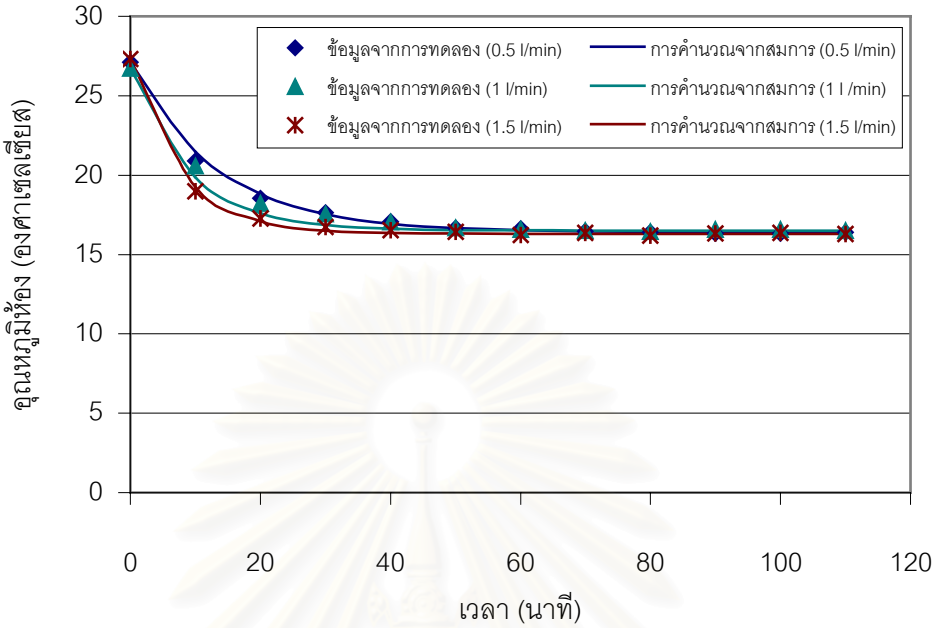

รูปที่ ก.85 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



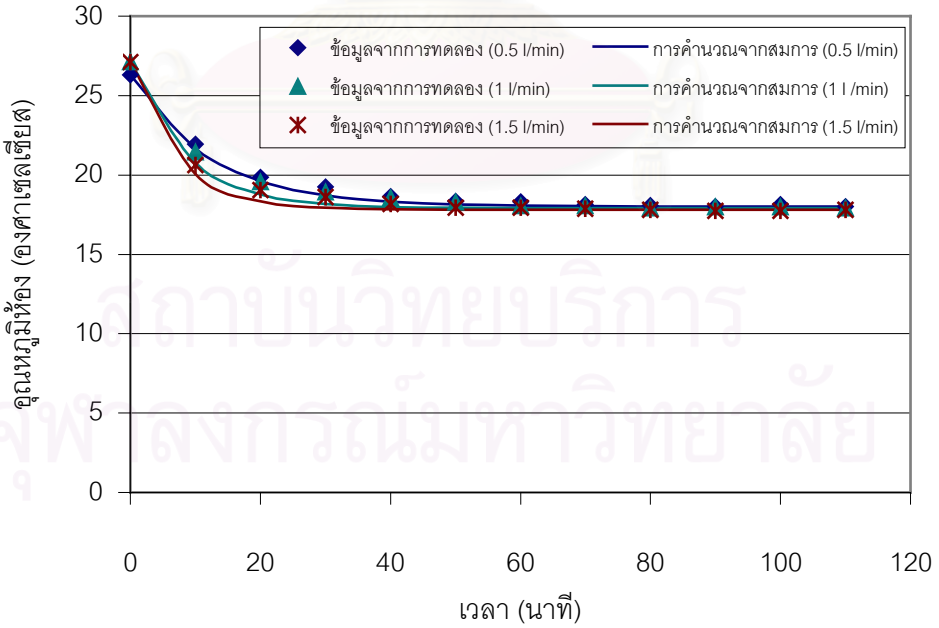

รูปที่ ก.86 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



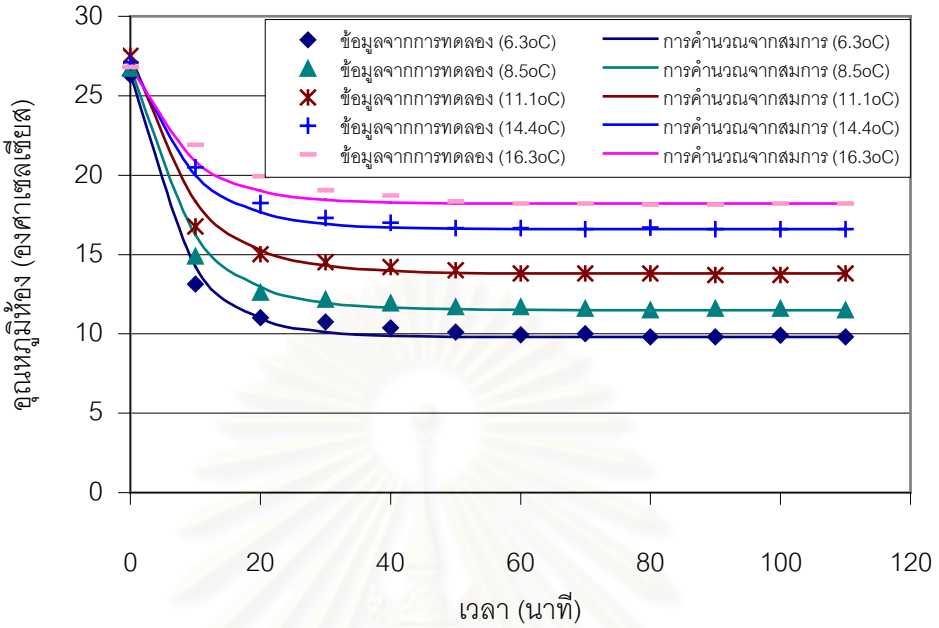

รูปที่ ก.87 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 11.1 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



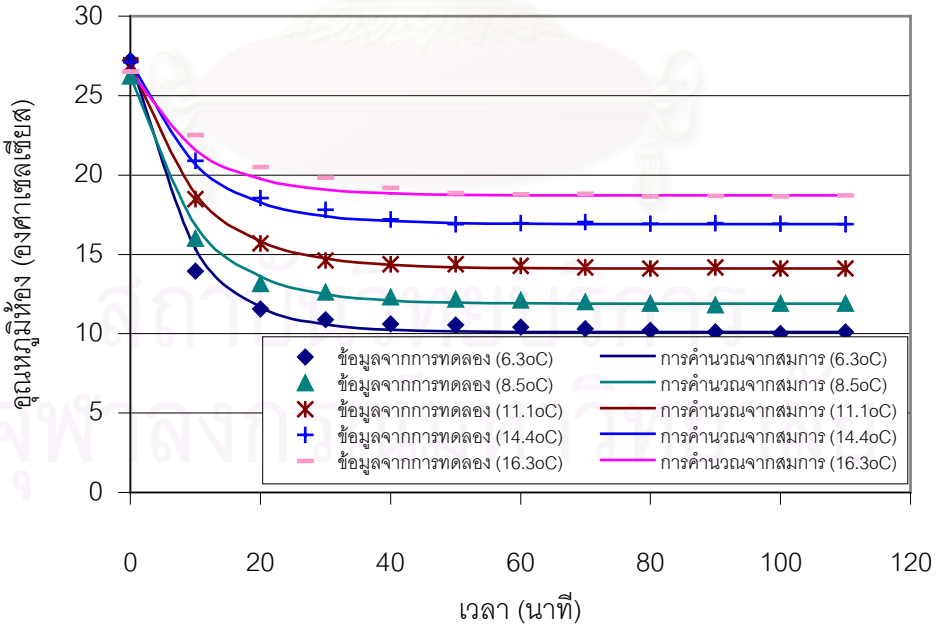

รูปที่ ก.88 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 14.4 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



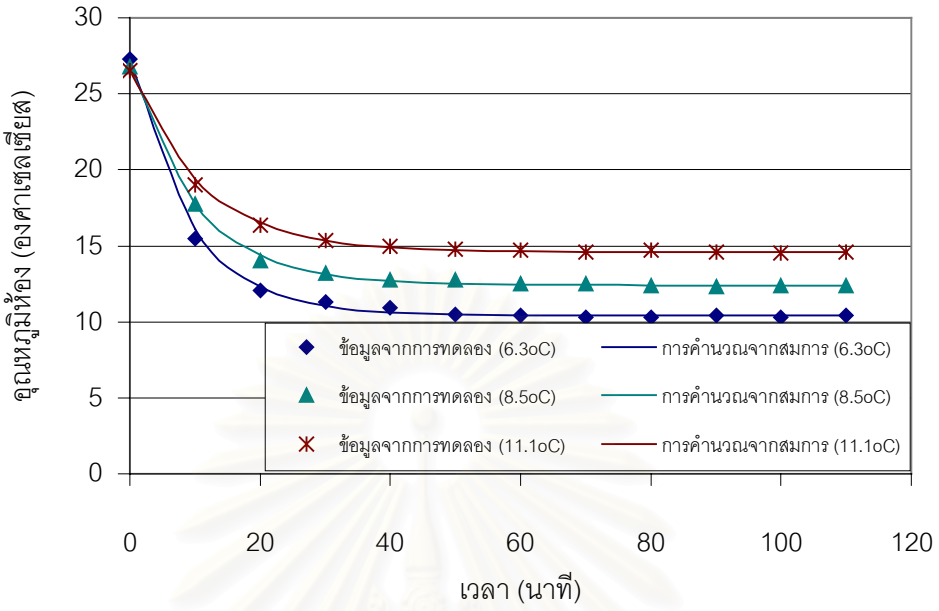

รูปที่ ก.89 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 0.5 ,1 และ 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 16.3 องศาเซลเซียส โดยไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง



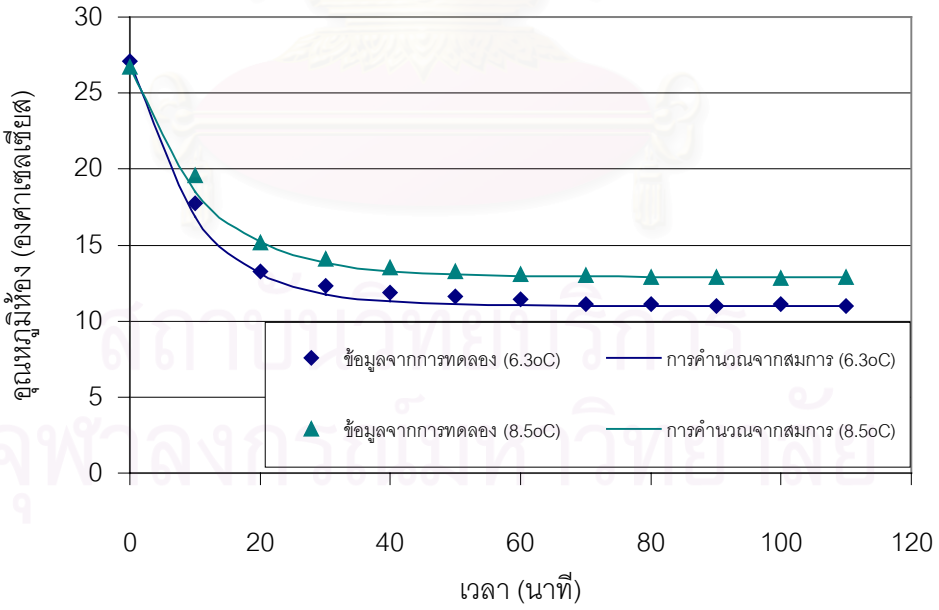

รูปที่ ก.90 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมี ภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 1 ดวง




รูปที่ ก.91 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 , 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส โดยมี ภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 2 ดวง




รูปที่ ก.92 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 , 8.5 และ 11.1 องศาเซลเซียส โดยมี ภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 3 ดวง




รูปที่ ก.93 : กราฟแสดงผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นตามเวลาในช่วงสภาวะไม่คงตัวด้วยสมการที่ 5.17 เทียบกับผลการทดลองในกรณีทดลองที่อัตราการไหล 1.5 ลิตรต่อนาที เมื่อจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 6.3 และ 8.5 องศาเซลเซียส โดยมี ภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ 4 ดวง

| กรณีทดลอง | | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายใน หลอดไฟโคมขนาด 40 W (ดวง) | | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | | อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น | | | | |
| 0.5 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 27.3 | 26.5 | 26.9 | 27.1 | 26.3 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 9.6 | 11.6 | 13.8 | 16.4 | 18.0 |
| 1 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 26.2 | 26.8 | 27.4 | 26.7 | 27.1 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 9.4 | 11.4 | 13.6 | 16.5 | 17.9 |
| 1.5 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 26.2 | 27.1 | 26.7 | 27.3 | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 9.2 | 11.2 | 13.4 | 16.3 | - |
| 1.5 | 1 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 26.3 | 26.7 | 27.5 | 27.1 | 26.8 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 9.8 | 11.5 | 13.8 | 16.6 | 18.2 |
| 1.5 | 2 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 27.2 | 26.2 | 26.9 | 27.1 | 26.5 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 10.1 | 11.9 | 14.1 | 16.9 | 18.7 |
| 1.5 | 3 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 27.3 | 26.8 | 26.5 | - | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 10.4 | 12.4 | 14.6 | - | - |
| 1.5 | 4 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 27.1 | 26.7 | - | - | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 11.0 | 12.9 | - | - | - |

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นเมื่อเริ่มการทดลอง และอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ

| กรณีทดลอง | | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายในหลอดไฟโคมขนาด 40 W (ดวง) | | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | | อุณหภูมิอากาศภายในห้อง | | | | |
| 0.5 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 29.3 | 28.9 | 28.6 | 28.9 | 28.8 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 20.5 | 21.5 | 22.8 | 23.5 | 23.8 |
| 1 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.7 | 28.7 | 29.1 | 29.2 | 28.9 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 20.4 | 21.3 | 22.6 | 23.5 | 23.8 |
| 1.5 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 29.1 | 28.6 | 29.3 | 28.6 | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 20.2 | 21.3 | 22.6 | 23.5 | - |
| 1.5 | 1 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 29.3 | 28.5 | 29.1 | 29.2 | 28.8 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 21.9 | 22.6 | 23.9 | 24.7 | 25.2 |
| 1.5 | 2 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.9 | 28.7 | 28.9 | 29.3 | 28.7 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 23.2 | 23.9 | 25.0 | 25.8 | 26.9 |
| 1.5 | 3 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 29.2 | 28.4 | 29.3 | - | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 24.3 | 24.9 | 26.3 | - | - |
| 1.5 | 4 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 29.5 | 28.9 | - | - | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 25.7 | 26.7 | - | - | - |

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองเมื่อเริ่มการทดลอง และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัวในกรณีทดลองต่างๆ

| กรณีทดลอง | | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายใน หลอดไฟโคมขนาด 40 W (ดวง) | | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | | อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น | | | | |
| 0.5 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.0 | 28.9 | 28.7 | 28.5 | 28.2 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 24.9 | 25.1 | 25.4 | 26.2 | 26.3 |
| 1 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.1 | 28.7 | 28.8 | 28.4 | 28.7 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 25.1 | 25.7 | 25.9 | 25.7 | 26.1 |
| 1.5 | 0 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.1 | 28.7 | 28.3 | 27.7 | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 24.4 | 25.4 | 25.7 | 26.0 | - |
| 1.5 | 1 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.8 | 28.0 | 28.7 | 28.5 | 28.2 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 25.5 | 26.2 | 26.5 | 26.9 | 27.4 |
| 1.5 | 2 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.3 | 28.0 | 28.5 | 27.7 | 28.0 |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 26.7 | 27.0 | 27.3 | 27.8 | 28.5 |
| 1.5 | 3 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 28.5 | 27.7 | 28.2 | - | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 27.7 | 28.0 | 28.3 | - | - |
| 1.5 | 4 | อุณหภูมิเริ่มต้น (oC) | 27.9 | 28.6 | - | - | - |
| | | อุณหภูมิที่สภาวะคงตัว (oC) | 28.8 | 29.3 | - | - | - |

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็นเมื่อเริ่มการทดลอง และอุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| กรณีทดลอง | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายใน หลอดไฟโคมขนาด 40 W (ดวง) | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | อุณหภูมิน้ำเย็นขาออก | | | | |
| 0.5 | 0 | 8.2 | 10.3 | 12.7 | 15.7 | 17.3 |
| 1 | 0 | 7.3 | 9.4 | 11.9 | 15.0 | 16.8 |
| 1.5 | 0 | 6.9 | 9.1 | 11.6 | 14.8 | - |
| 1.5 | 1 | 7.0 | 9.2 | 11.7 | 14.9 | 16.7 |
| 1.5 | 2 | 7.1 | 9.3 | 11.8 | 15.0 | 16.8 |
| 1.5 | 3 | 7.3 | 9.4 | 11.9 | - | - |
| 1.5 | 4 | 7.4 | 9.5 | - | - | - |

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาออกของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| กรณีทดลอง | | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายใน หลอดไฟโคมขนาด 40 W (ดวง) | | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | | ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องจำลอง | | | | |
| 0.5 | 0 | %RH เริ่มต้น | 65.2 | 64.3 | 62.8 | 65.9 | 64.3 |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 56.1 | 56.5 | 59.3 | 64.2 | 67.3 |
| 1 | 0 | %RH เริ่มต้น | 67.1 | 63.7 | 65.3 | 62.8 | 65.1 |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 54.9 | 55.2 | 58.3 | 63.5 | 66.9 |
| 1.5 | 0 | %RH เริ่มต้น | 66.2 | 67.2 | 68.1 | 66.1 | - |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 53.0 | 54.1 | 60.6 | 61.9 | - |
| 1.5 | 1 | %RH เริ่มต้น | 63.7 | 71.3 | 62.1 | 62.1 | 66.1 |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 51.8 | 52.4 | 58.5 | 63.2 | 65.7 |
| 1.5 | 2 | %RH เริ่มต้น | 61.5 | 65.1 | 60.9 | 65.2 | 64.2 |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 46.7 | 50.8 | 58.1 | 61.7 | 63.5 |
| 1.5 | 3 | %RH เริ่มต้น | 60.9 | 62.4 | 64.8 | - | - |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 47.5 | 51.3 | 56.9 | - | - |
| 1.5 | 4 | %RH เริ่มต้น | 65.4 | 65.9 | - | - | - |
| | | %RH ที่สภาวะคงตัว | 45.7 | 49.7 | - | - | - |

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องจำลองเมื่อเริ่มการทดลอง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ

| กรณีทดลอง | | | อุณหภูมิน้ำเย็น | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| อัตราการไหล (ลิตร/นาที) | ภาระความร้อนภายใน หลอดไฟโคมขนาด 40 W (ดวง) | | 6.3 °C | 8.5 °C | 11.1 °C | 14.4 °C | 16.3 °C |
| | | | ค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในห้องจำลอง | | | | |
| 0.5 | 0 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01684 | 0.01621 | 0.01554 | 0.01662 | 0.01611 |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00845 | 0.00906 | 0.01032 | 0.01168 | 0.01248 |
| 1 | 0 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01673 | 0.01586 | 0.01666 | 0.01610 | 0.01642 |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00822 | 0.00874 | 0.01002 | 0.01155 | 0.01240 |
| 1.5 | 0 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01690 | 0.01666 | 0.01761 | 0.01638 | - |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00783 | 0.00857 | 0.01042 | 0.01125 | - |
| 1.5 | 1 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01644 | 0.01656 | 0.01583 | 0.01592 | 0.01658 |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00851 | 0.00899 | 0.01089 | 0.01237 | 0.01327 |
| 1.5 | 2 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01548 | 0.01622 | 0.01533 | 0.01684 | 0.01599 |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00830 | 0.00943 | 0.01156 | 0.01290 | 0.01420 |
| 1.5 | 3 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01561 | 0.01526 | 0.01673 | - | - |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00903 | 0.01012 | 0.01224 | - | - |
| 1.5 | 4 | W เริ่มต้น (kg w / kg da) | 0.01709 | 0.01662 | - | - | - |
| | | W ที่สภาวะคงตัว (kg w / kg da) | 0.00945 | 0.01093 | - | - | - |

ตารางที่ ก.6 แสดงค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ภายในห้องจำลองเมื่อเริ่มการทดลอง และค่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ภายในห้องจำลองที่สภาวะคงตัว ในกรณีทดลองต่างๆ

# ภาคผนวก ข

# การคำนวณ

## ตัวอย่างการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น

ในการทดลองมีภาระความร้อนที่เกิดจากผนังที่ไม่ได้ทำความเย็น การพาความร้อนของอากาศภายในห้องจำลอง และหลอดไฟโคม ซึ่งการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากภาระความร้อนแต่ละส่วนมีค่าดังนี้

**การถ่ายเทความร้อนจากผนังที่ไม่ได้ทำความเย็นมีค่าตามสมการที่ 2.14 คือ**

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

เมื่อ

$t_p$ = อุณหภูมิของพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^{o}$C)

AUST = อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น ($^{o}$C)

**การถ่ายเทความร้อนจากอากาศภายในห้องโดยการพาความร้อนมีค่าตามสมการที่ 2.16 คือ**

$$q_c = 2.12(t_r - t_p)^{1.31}$$

**เ มื่ อ**

$q_c$ = ฟลักซ์ของการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (W/m$^2$)

$t_p$ = อุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น ($^{o}$C)

$t_r$ = อุณหภูมิของอากาศในห้อง ($^{o}$C)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากภาระความร้อนของหลอดไฟโคมมีค่าตามสมการที่ 2.17 คือ**

$$q_r = nA_{b-p}\varepsilon_b\sigma(T_b^4 - T_p^4)$$

**เมื่อ**

$q_r$ = การแผ่รังสีของหลอดไฟไปสู่ฝ้าเพดานทำความเย็น (W)

$T_b$ = อุณหภูมิของผิวแก้วของหลอดไฟ (K)

$T_p$ = อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้าเพดานทำความเย็น (K)

$A_{b-p}$ = พื้นที่ผิวของหลอดไฟที่หันเข้าสู่ฝ้าเพดาน (พื้นที่ผิวครึ่งทรงกลมส่วนบน) ($m^2$)

$\varepsilon_b$ = สภาพเปล่งรังสีของผิวแก้วของหลอดไฟ มีค่าประมาณ 0.92

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

n = จำนวนหลอดไฟต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ดวง/$m^2$)

โดยที่

$$A_{b-p} = \pi D_b^2/2$$

เมื่อ $D_b$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดไฟโคมที่ใช้ในการทดลองมีค่า 51 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ค่า

$$A_{b-p} = 4.086 \times 10^{-3}\ m^2$$

พิจารณาตัวอย่างของการคำนวณในกรณีทดลอง ที่มีการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิ 8.5 $^{o}$C ที่อัตราการไหลของน้ำเย็น 1.5 ลิตร/นาที โดยมีภาระความร้อนภายในห้องจำลองเป็นหลอดไฟโคม 40 วัตต์ จำนวน 3 หลอด เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วได้ข้อมูลจากการทดลองดังนี้

อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็น = 12.4 $^{o}$C

อุณหภูมิเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักพื้นที่ของพื้นผิวที่ไม่ทำความเย็น = 28.0 $^{o}$C

อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง = 24.9 $^{o}$C

อุณหภูมิที่ผิวของหลอดไฟโคม = 251.3 $^{o}$C

แทนค่าจากผลการทดลองลงในสมการ

**การถ่ายเทความร้อนจากผนังที่ไม่ได้ทำความเย็นมีค่าเป็น**

$q_r = 5x10^{-8} [(28.0+273.15)^4-(12.4+273.15)^4]$

$= 78.82 \text{ W/m}^2$

**การถ่ายเทความร้อนจากอากาศภายในห้องโดยการพาความร้อนมีค่าเป็น**

$q_c = 2.12 ( 24.9 – 12.4 )^{1.31}$

$= 57.98 \text{ W/m}^2$

**การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากภาระความร้อนของหลอดไฟโคมมีค่าเป็น**

$q_b = (1.5) (4.086x10^{-3})(0.92)(5.669x10^{-8})[(251.3 +273.15)^4 – (11.5+273.15)^4]$

$= 22.07 \text{ W/m}^2$

การถ่ายเทความร้อนรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นมีค่าเป็น

$q_t = 78.82+57.98+22.07 = 158.86 \text{ W/m}^2$

**การคำนวณค่าความต้านทานรวมของฝ้าเพดานทำความเย็น**

ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านฝ้าเพดานทำความเย็น และผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว กับอุณหภูมิน้ำเย็นเฉลี่ยอยู่ในรูปแบบ

$$q_t = k\Delta t_m$$

เมื่อพิจารณาค่า k ด้วยวิธีสมการถดถอย จะได้

$$k = \frac{\sum_{i=1}^{m} \Delta t_{mi} q_{ti}}{\sum_{i=1}^{m} \Delta t^{2}_{mi}}$$

เมื่อ i คือการทดลองในแต่ละกรณี และ m คือกรณีทดลองทั้งหมดที่นำมาพิจารณา เมื่อแทนค่าจากผลการทดลองในทุกกรณีจะได้ว่า

$$k = 47.46943 \text{ W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{C}^{*}$$

ดังนั้นค่าความต้านทานรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นคือ

$$R_u = 1/47.46943 \quad \text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C/ W}$$
$$= 0.02107 \quad \text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C/ W}$$

**การคำนวณค่าความต้านทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็นและฝ้าเพดานทำความเย็น**

จากสมการที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3 จะได้ค่าความต้านทานรวมของฝ้าเพดานทำความเย็นอยู่ในรูป

$$R_u = M [ \ln(D_o/D_i)/2\pi k_t ] + (k_p/x_p) + Mr_s$$

เมื่อทราบค่าความต้านรวม คุณสมบัติของวัสดุ และมิติของฝ้าเพดานทำความเย็นคือ

$R_u$ = 0.02107 $\text{m}^2\text{-}^{\circ}\text{C/ W}$

$D_o$ = 19 mm

$D_i$ = 17 mm

$k_t$ = 390 $\text{W/m-}^{\circ}\text{C}$

$k_p$ = 237 $\text{W/m-}^{\circ}\text{C}$

$x_p$ = 2 mm

---

* ค่า k ที่ได้ไม่รวมผลของกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็น หลอดไฟ 40 วัตต์ 4 ดวง และกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็น

หลอดไฟ 40 วัตต์ 3 ดวง

M = 100 mm

แทนค่าลงในสมการ เพื่อคำนวณค่าความต้านทานระหว่างท่อน้ำเย็น และแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็น

$$0.02107 = 0.1\,[\ln(0.019/0.017)/2\pi(390)] + (0.002/237) + 0.1r_s$$

ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างท่อน้ำเย็น และแผ่นฝ้าเพดานทำความเย็นต่อหนึ่งหน่วยระยะห่างของท่อน้ำเย็นเป็น

$$r_s = 0.2106\ \text{m-}^{\circ}\text{C/ W}$$

**การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแสดงสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น**

ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านฝ้าเพดานทำความเย็น และผลต่างของอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของฝ้าเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว คือ

$$q_t = A(t_r - t_p)^B$$

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ A และ B ด้วยวิธีสมการถดถอยจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์

$$B = a$$
$$A = e^{b/B}$$

เมื่อ

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{m}(\ln \Delta t_i)(\ln q_{ti}) - \sum_{i=1}^{m}(\ln \Delta t_i)\sum_{i=1}^{m}(\ln q_{ti})/m}{\sum_{i=1}^{m}(\ln \Delta t_i)^2 - (\sum_{i=1}^{m}\ln \Delta t_i)^2/m}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{m}(\ln q_{ti}) - a\sum_{i=1}^{m}(\ln \Delta t_i)}{m}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ i คือการทดลองในแต่ละกรณี m คือกรณีการทดลองทั้งหมดที่นำมาพิจารณา และแทนค่า $(t_r - t_p)$ ด้วย $\Delta t$

เมื่อแทนค่าจากทุกกรณีของการทดลองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์

$$A = 7.9194^{*}$$

$$B = 1.1675^{**}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

---

*, ** ค่า A และ B ที่ได้ไม่รวมผลของกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 11.1 , 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 4 ดวง และกรณีทดลองที่อุณหภูมิน้ำเย็นจ่าย 14.4 และ 16.3 องศาเซลเซียส เมื่อมีภาระความร้อนภายในเป็นหลอดไฟ 40 วัตต์ 3 ดวง

# ภาคผนวก ค

## ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุ

| ชนิดของวัตถุ | อุณหภูมิ (K) | สภาพเปล่งรังสี |
|---|---|---|
| อโลหะ | | |
| แอสเบสทอส | 300 | 0.96 |
| อิฐก่อสร้างทั่วไป | 300 | 0.8 |
| คอนกรีต | 300 | 0.88 - 0.94 |
| แก้ว | 300 | 0.90 – 0.95 |
| ยางชนิดอ่อน | 300 | 0.86 |
| ยางชนิดแข็ง | 300 | 0.93 |
| กระดาษสีขาว | 300 | 0.90 |
| ผิวหนังมนุษย์ | 300 | 0.95 |
| ผนังทาสีดำลงแล็กเกอร์ | 300 | 0.88 |
| ผนังทาสีน้ำมัน | 300 | 0.92 – 0.96 |

ตารางที่ ค.1 แสดงค่าสภาพเปล่งรังสีความร้อนเฉลี่ยของผิววัตถุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| Material | Thermal Conductivity (W/m-K) |
|---|---|
| Carbon Steel (AISI 1020) | 52 |
| Copper (drawn) | 390 |
| Aluminum | 237 |
| Red brass (85 Cu-15Zn) | 159 |
| Stainless steel (AISI 202) | 163 |
| Low-density polyethylene (LDPE) | 0.31 |
| High-density polyethylene (HDPE) | 0.42 |
| Cross-linked polyethylene (VPE or PEX) | 0.38 |
| Textile-reinforced rubber heat transfer hose (HTRH) | 0.29 |
| Polypropylene block copolymer (PP-C) | 0.23 |
| Polyporpylene random copolymer (PP-RC) | 0.24 |
| Polybutylene (PB) | 0.23 |

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

***ชื่อ*** นายอายุส วัฒนวาณิชกร

***เกิดวันที่*** 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2521

***ประวัติการศึกษา***

- สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา
- สำเร็จการศึกษาในระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541
- เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิศวกรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย