

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**ปรากฏการณ์ควบแน่นในระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน**

**CONDENSATION PHENOMENON IN RADIANT-CEILING COOLING SYSTEM**



**นายทวีชัย อนันต์เจริญกิจ  
นายปฏิภาณ สุทธิวนิช**

ฉพ.  
ท. 1932  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... **72173**  
วัน,เดือน,ปี..... **11 ส.ย. 2550**

b. **117๒4338**  
i.....

**ปริญญาโท** เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะศึกษาศาสตร์บัณฑิต  
**ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล**  
**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ปีการศึกษา 2549**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ควบแน่นในระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน

CONDENSATION PHENOMENON IN RADIANT-CEILING COOLING SYSTEM

โดย

นายทวีชัย อนันต์เจริญกิจ

นายปฏิภาณ อุตธีวัฒน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สยาม ศวงรัมย์ย์

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CONDENSATION PHENOMENON IN RADIANT-CEILING COOLING SYSTEM**



**THAWEECHAI ANANCHAROENKIT**

**PATIPHAN SUTWANICH**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF**

**BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ปราบฏการณ์ควบแน่นในระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน

Condensation Phenomenon in Radiant-Ceiling Cooling System

ผู้จัดทำ

1. นายทวีชัย อนันต์เจริญกิจ รหัสประจำตัว 46010256
2. นายปฏิภาณ สุทธิวนิช รหัสประจำตัว 46010401



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สยาม สงวนรัมย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบการทำความเย็นแบบแฉิ่งสีจากเพดาน

นายทวีชัย อนันต์เจริญกิจ 46010256

นายปฏิภาณ สุทธิวนิช 46010401

อ.สยาม สงวนรัมย์

ปีการศึกษาที่ 2549

### บทคัดย่อ

เมื่อพิจารณาถึงระบบการทำความเย็นแบบแฉิ่งสีจากเพดานพบว่าสมรรถนะการทำความเย็นจะดีขึ้นเมื่อน้ำเย็นเลี้ยงฝ้าเพดานมีอุณหภูมิต่ำ อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิของน้ำต่ำเกินไป และในห้องทำความเย็นมีความชื้นสัมพัทธ์สูงก็อาจทำให้เกิดการควบแน่นเกิดขึ้นที่ฝ้าเพดาน จากการศึกษาพบว่าในกรณีความชื้นสัมพัทธ์คงที่ การเกิดการควบแน่นมีลักษณะเป็นฝ้าบาง เมื่ออุณหภูมิห้องลดต่ำลงการเกิดการควบแน่นจะลดลงตาม กรณีอุณหภูมิห้องคงที่ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นการควบแน่นจะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อระบบรับภาระจากแสงไฟ การควบแน่นจะเปลี่ยนจากฝ้าบางเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ และมีบางส่วนระเหยไป ระดับของภาระจากแสงไฟ 240 วัตต์ ส่งผลให้ฝ้าบางจางหายเร็วกว่าที่ระดับของภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ เมื่อเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ให้กับระบบ ระยะเวลาในการเปลี่ยนจากฝ้าบางเป็นหยดน้ำจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Control strategy of radiant cooling system

Thaweechai Anancharoenkit 46010256

Patiphan Sutwanich 46010401

Sayam Saganrum

### Abstract

According to the theory about heat transfer of a cooling ceiling, if the temperature of water distributed to the ceiling is low, the heat transfer efficiency will be higher than the high temperature one. However, the cooling water distribution could create a condensation problem at the ceiling, when the room has high relative humidity. This research concerns to the correlation of the ceiling temperature, room temperature, relative humidity, and lighting load in order to find the conditions that cause condensation at the ceiling. When the humidity is constant, the experiment shows that the form of condensation appears as the thin film. After the room is decreased temperature, the condensation is lessen. Finally, lighting load is applied. The forms of condensation change from thin films to tiny water drops, and some is vaporized immediately. Both lighting load and relative humidity affect a duration that thin films turn into water drops. High concentration of lighting load take time less than the cases applied low concentration of lighting load. When relative humidity is increased, it takes more time for turning thin films into water drops.

### กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาอาจารย์สยาม สงวนรัมย์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะในการแก้ปัญหา ตลอดจนผู้ให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณกรรมการสอบหัวข้อ และโครงร่างปริญญานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชัย นาคพิพัฒน์ ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมด้านการทำความเข้าใจ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบทำความเข้าใจแบบแฟรงก์ลี

ขอขอบคุณวิศวกรรุ่นพี่นายทิพากร จันทร์ดำรง ที่คอยให้คำแนะนำ และให้ความรู้ความเข้าใจ และการแก้ปัญหาเกี่ยวกับระบบการทำความเข้าใจแบบแฟรงก์ลี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของโครงการ	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การควมแน่นและไซโครเมตริกซ์	6
2.2 วิชาไซโครเมตริกซ์	7
2.3 ตัวแปรเสริมที่เกี่ยวข้องทางไซโครเมตริกซ์	7
2.3.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	7
2.3.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง	8
2.3.3 อุณหภูมิกระเปาะเปียก	10
2.3.4 ปริมาตรจำเพาะ	10
2.3.5 ความชื้นสัมพัทธ์	10
2.3.6 ความชื้นจำเพาะและความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ	10
2.3.7 เอนทัลปี	11
2.4 หลักการใช้แผนภาพไซโครเมตริกซ์	/ 11
2.4.1 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก	11
2.4.2 เส้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และความชื้นจำเพาะ	12
2.4.3 เส้นความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นจำเพาะ	12
2.4.4 เส้นเอนทัลปี	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบ	
3.1 อุปกรณ์การทดสอบที่ใช้ในห้องทดสอบ	13
3.1.1 ห้องทดสอบ	13
3.1.2 แผ่นพาดานทำความเย็นที่ใช้ทดสอบการควบแน่น	13
3.1.3 หลอดไฟ	14
3.1.4 กล้องดิจิทัล	14
3.1.5 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ	15
3.1.6 เครื่องเพิ่มความชื้นให้ระบบ	15
3.2 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	15
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	17
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

## สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
รูป 2.1 แสดงการเย็นตัวของอากาศชื้นที่สภาวะความดันคงที่ และอุณหภูมิจุดน้ำค้างบน แผนภาพ $T-s$ ของน้ำ	8
รูป 2.2 แสดงกระบวนการอิมิตัวแบบอะเดียแบติก	8
รูป 2.3 แสดงแผนภาพ $T-s$	9
รูป 2.4 แสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก	10
รูป 2.5 แสดงสไลซ์โครมิเตอร์	10
รูป 2.6 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง	11
รูป 2.7 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก	11
รูป 2.8 เส้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง	11
รูป 2.9 เส้นปริมาตรจำเพาะ	11
รูปที่ 2.10 เส้นความชื้นสัมพัทธ์	12
รูปที่ 2.11 เส้นความชื้นจำเพาะ	12
รูปที่ 2.11 เส้นเอนทัลปี	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง	
รูป 3.1 แสดงลักษณะของระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน	13
รูป 3.2 แสดงขนาดแผ่นจำลองเพดานทำความเย็นที่ใช้ทดสอบการควบแน่น	14
รูป 3.3 แสดงหลอดไฟที่ใช้ในห้องทดลอง	14
รูป 3.4 แสดงกล้องที่ใช้ในการเก็บภาพ	14
รูป 3.5 แสดงเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิตนพื้นผิวทดสอบ	15
รูป 3.6 แสดงเครื่องเพิ่มความชื้น	15
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
รูป 4.1 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65	17
รูป 4.2 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	17
รูป 4.3 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70	18
รูป 4.4 แสดงการเริ่มเกิดการควบแน่นเล็กน้อยบนพื้นผิวทดสอบ	18
รูป 4.5 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75	19
รูป 4.6 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	19

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 4.7 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80	20
รูป 4.8 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	20
รูป 4.9 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65	22
รูป 4.10 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	22
รูป 4.11 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70	23
รูป 4.12 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	23
รูป 4.13 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75	24
รูป 4.14 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	24
รูป 4.15 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80	25
รูป 4.16 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	25
รูป 4.17 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65	27
รูป 4.18 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	27
รูป 4.19 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70	28
รูป 4.20 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	28
รูป 4.21 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75	29
รูป 4.22 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	29
รูป 4.23 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80	30
รูป 4.24 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	30
รูป 4.25 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70	32
รูป 4.26 แสดงลักษณะการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	32
รูป 4.27 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70	33
รูป 4.28 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	33
รูป 4.29 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75	34
รูป 4.30 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	34
รูป 4.31 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75	35
รูป 4.32 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	35
รูป 4.33 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80	36

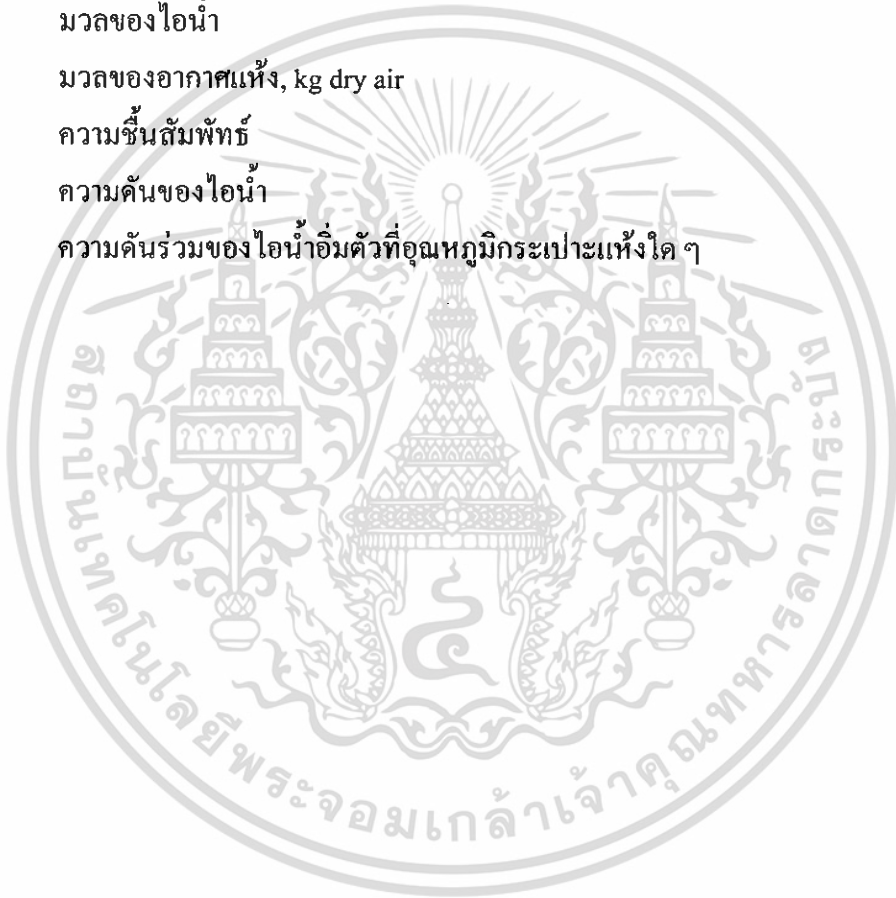
## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 4.34 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	36
รูป 4.35 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80	37
รูป 4.36 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ	37



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$T_{dp}$	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง	$^{\circ}C$
$T_{sat@P_v}$	อุณหภูมิอากาศอิ่มตัวที่ความดันคง	$^{\circ}C$
$T_{db}$	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	$^{\circ}C$
$T_{wb}$	อุณหภูมิกระเปาะเปียก	$^{\circ}C$
$w$	ความชื้นจำเพาะ	-
$m_v$	มวลของไอน้ำ	kg
$m_a$	มวลของอากาศแห้ง, kg dry air	kg
$\phi$	ความชื้นสัมพัทธ์	-
$P_v$	ความดันของไอน้ำ	Pa
$P_t$	ความดันรวมของ ไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งใดๆ	Pa



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบปรับอากาศก็เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อมนุษย์เพราะจะทำให้มนุษย์รู้สึกสบาย เพราะเมื่อมนุษย์เราอาศัยอยู่ในสภาวะแวดล้อมหนึ่ง ๆ เช่น ภายในอาคารสำนักงานหรือภายในห้อง ร่างกายจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของร่างกายกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทออกจากร่างกายนั้นเกิดได้ทั้งจากการหายใจ การพา และการแผ่รังสีความร้อน

ปัจจุบันมีการนำเอาระบบการทำความเย็นแบบแฉ่งสี มาใช้กับห้องทำความเย็นที่เป็นอาคารซึ่งมีหลังคาโปร่งแสง ในประเทศไทยทำอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นแห่งแรกที่มีการนำระบบการทำความเย็นแบบแฉ่งสีจากพื้นมาใช้ ก่อนหน้านั้นประเทศไทยยังไม่มีมีการนำระบบการทำความเย็นแบบแฉ่งสีจากเพดาน เมืองแรกที่นำระบบการแฉ่งสีจากเพดานมาใช้คือ เมืองซูริก ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ [8]

ระบบการทำความเย็นแบบแฉ่งสีใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการใช้น้ำเย็นที่ผลิตจากเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ไหลภายในท่อทองแดงแล้วติดไว้กับแผ่นอลูมิเนียมบนเพดาน ซึ่งการทำงานจะเป็นการทำงานในรูปแบบผสมร่วมกับคอยล์เย็นด้วย เพราะเพียงแค่ระบบการทำความเย็นแบบแฉ่งสีอย่างเดียวยังไม่สามารถลดความชื้นภายในอากาศได้ และเนื่องจากระบบทำความเย็นระบบนี้เป็นระบบปิด คือไม่มีการถ่ายเทของน้ำซึ่งเป็นสารทำความเย็นออกจากระบบ ทำให้ลดค่าจ่ายในการทำงานของเครื่อง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย

อย่างไรก็ตามระบบการทำความเย็นแบบแฉ่งสีมีข้อกััดอยู่คือ การควบแน่นของไอน้ำในอากาศอาจเกิดขึ้นบนพื้นผิวเพดานทำความเย็น ดังนั้นเราต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของพื้นผิวเพดานทำความเย็นไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิควบแน่นของอากาศภายในห้อง เพื่อป้องกันการเกิดการควบแน่นและยังต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของการแฉ่งสี ซึ่งมีผลต่อความรู้สึกสบายของคนเราด้วย การติดตั้งระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็นในอาคารสำนักงานต่าง ๆ นอกจากต้องคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรม เป็นผลให้ระบบปรับอากาศแบบแฉ่งสีได้ถูกคิดค้นขึ้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของระบบปรับอากาศที่น่าสนใจ

### 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อการทำความเย็น โดยการแฉ่งสีความเย็นจากเพดาน ในต่างประเทศ เจียง ศึกษาผลของแหล่งความร้อนแฉ่งสี และฝ้าเพดานความเย็นที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิ และการกระจายของสารปนเปื้อน ในห้องทำงานที่มีการติดตั้งหัวจ่ายลมด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทดลอง

- ใช้ค่าของภาระความร้อนแฝงสี่เป็นร้อยละ 20
- ใช้ค่าของภาระความร้อนแฝงสี่เป็นร้อยละ 80
- เปลี่ยนปริมาณการระบายอากาศ 2.1 air change เป็น 4.2 air change
- เดินระบบฝ้าเพดานทำความเย็น และไม่เดินระบบฝ้าเพดานทำความเย็น

### ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการใช้ฝ้าเพดานทำความเย็น นอกจากจะช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิในแนวตั้งได้แล้วยังช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศด้วย ด้วยปริมาณภาระความร้อนรวมที่เท่ากัน การเพิ่มส่วนของภาระความร้อนแฝงสี่จะช่วยเพิ่มการไหลของกระแสอากาศและการกระจายของสารปนเปื้อนได้และอุณหภูมิของอากาศบริเวณกลางห้องยังต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้ใช้ฝ้าเพดานทำความเย็นด้วย

เคล ทำการติดตั้งระบบผนังพื้นทำความร้อนแบบแผ่รังสี และระบบทำความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับในบ้านทดสอบเพื่อเก็บข้อมูล จากการที่ได้ชี้ให้เห็นว่าระบบทั้งสองไม่มีข้อแตกต่างในด้านประสิทธิภาพของพลังงานมากนัก โดยพลังงานรวมที่ใช้ในแต่ละระบบแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 5 แต่พบว่า ในการใช้ผนังทำความร้อนแบบแผ่รังสีจะมีอุณหภูมิโดยรวมสูง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่สูงกว่า นอกจากนั้นยังพบว่า การกระจายของอุณหภูมิจากพื้นถึงเพดานมีรูปแบบที่แตกต่างกัน และที่ระดับพื้นและที่ระดับเพดาน ระบบผนังทำความร้อนแบบแผ่รังสี สามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงกว่าระบบทำความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ [10]

ชิมมอนส์ ทำการติดตั้งระบบผนังทำความเย็น ในงานวิจัยของเขาที่ทำในอาคารสำนักงานในประเทศจีน พื้นผิวทำความเย็นถูกต่อเข้ากับวงจรน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิน้ำเข้า 13 เซลเซียส และน้ำกลับ 17 เซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวทำความเย็นคือ 15 เซลเซียส อุณหภูมิของอากาศในห้องสามารถแปรเปลี่ยนระหว่าง 20 เซลเซียส - 25 เซลเซียส ดังนั้นที่ความสามารถสูงสุด พื้นผิวทำความเย็นสามารถดึงความร้อนจากอากาศได้ [11]

โคเซนคอฟเฟอร์ ได้ทำการทดสอบหาค่าปริมาณความร้อนที่เทได้โดยผนังทำความเย็น โดยห้องทดสอบที่ถูกปิดล้อมจะถูกใช้ในการทดสอบปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ทำได้ ความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยผนังทำความเย็น [12]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อการทำความเย็น โดยการแผ่รังสีความเย็นจากเพดานในประเทศไทย  
 อายุช วัฒนาวาณิชชกร ได้ทำการศึกษาสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำ  
 ความเย็น โดยในการทดลองจะมีตัวแปรที่พิจารณาคือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำ  
 ความเย็น [13]

การทดลอง

การทดลองทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 35 กรณีของการทดลองซึ่งมีตัวแปรที่ใช้ในการ  
 วิเคราะห์ที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี การทดลอง คือ จะเริ่มทดลอง โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่าย  
 ให้กับเพดานทำความเย็นไว้ที่ 6.3 เซลเซียส ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในช่วงตัดต่อของเครื่อง  
 ควบคุมอุณหภูมิ โดยที่จะใช้อุณหภูมิน้ำเย็นค่าหนึ่งๆจะทำการทดลอง 7 กรณี ดังนี้

1. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 0.5 ลิตรต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระความ  
 ร้อน
2. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.0 ลิตรต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระความ  
 ร้อน
3. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระความ  
 ร้อน
4. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อน  
 เป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ จำนวน 1 ดวง
5. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อน  
 เป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ จำนวน 2 ดวง
6. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อน  
 เป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ จำนวน 3 ดวง
7. ทำการทดลองที่อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำเย็น 1.5 ลิตรต่อนาที โดยใส่ภาระความร้อน  
 เป็นหลอดไฟโคมขนาด 40 วัตต์ จำนวน 4 ดวง

เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวมาครบในทุกกรณีแล้ว จะเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเย็น  
 ที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นเป็น 8.5 เซลเซียสแล้วทำการทดลองในกรณีที่ 1-7 จากนั้นเปลี่ยน  
 อุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นเป็น 11.1 เซลเซียส 14.4 เซลเซียส และ 16.3  
 เซลเซียส ในแต่ละค่าของอุณหภูมิน้ำเย็นจะทำการทดลองในกรณีที่ 1-7 ตามลำดับ จนครบทุกกรณี  
 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ทุกกรณีมาวิเคราะห์แบ่งตามเงื่อนไขการทดลองดังนี้

1. ผลของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น
2. ผลของอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น
3. ผลของปริมาณภาระความร้อน
4. ผลของอัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็น จะมีผลต่ออุณหภูมิของพื้นผิวเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของห้องที่สภาวะคงตัว โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้ายเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของห้องที่สภาวะคงตัวอยู่ในระดับต่ำกว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็นที่อุณหภูมิสูงในกรณีที่ภาระความร้อนเดียวกัน

2. อัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็นจะไม่มีผลต่อระดับอุณหภูมิของพื้นผิวของฝ้ายเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิของห้องที่สภาวะคงตัวอย่างเด่นชัด แต่จะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวของอุณหภูมิพื้นผิวของฝ้ายเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของห้อง โดยที่การจ่ายน้ำเย็นให้กับของฝ้ายเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหลสูง จะทำให้อุณหภูมิพื้นผิวของฝ้ายเพดานทำความเย็น และอุณหภูมิของห้องเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าการจ่ายน้ำเย็นให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็นที่อัตราการไหลต่ำ

3. ปริมาณความร้อนจะมีผลต่อระดับของอุณหภูมิของพื้นผิวของฝ้ายเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิของห้องที่สภาวะคงตัว คือ เมื่อมีภาระความร้อนสูงขึ้นอุณหภูมิของพื้นผิวของฝ้ายเพดานทำความเย็นและอุณหภูมิของห้องที่สภาวะคงตัวจะสมดุลที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

4. อัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้ายเพดานทำความเย็น จะขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็น โดยที่จ่ายน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ฝ้ายเพดานทำความเย็นมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง ในทางตรงกันข้ามอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็นจะไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของฝ้ายเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัวอย่างเด่นชัด นั่นคือการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้ายเพดานทำความเย็นที่สภาวะคงตัว แต่จะมีผลต่อระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อไม่มีภาระความร้อนภายในห้องจำลอง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาและทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์และการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานทำความเย็น
- เพื่อศึกษาและทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิห้องและการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานทำความเย็น
- เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างภาระแสงไฟและการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานทำความเย็น

#### 1.4 ขอบเขตของโครงการ

- หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิกระเปาะเปียก เพื่อหาสภาวะเริ่มต้นของการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน
- หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน และอุณหภูมิกระเปาะเปียกในขณะที่ยังค่าอุณหภูมิห้องต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน
- ทดลองหาลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้นเมื่อเพดานทำความเย็นมีภาระแสงไฟมากระทำ

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้รับความรู้ข้อดี และข้อเสียของระบบทำความเย็นแบบฝ้าเพดานทำความเย็น
- เป็นการนำเสนอระบบทำความเย็นแบบแฟรงสิ ซึ่งแตกต่างออกไปจากที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน และผลักดันให้มีการศึกษาหรือพัฒนาต่อไปในอนาคต
- ทราบถึงหลักการของอุณหพลศาสตร์ และนำความรู้ที่ได้เรียนมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย
- ฝึกทักษะการเขียนเอกสารเชิงวิชาการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การควบแน่นและไซโครเมตริกซ์

การควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของไอลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวของมัน การควบแน่นในอุปกรณ์ หรือพื้นผิวต่างๆในระบบทำความเย็นนั้น มักเป็นผลมาจากการที่ไอสัมผัสกับพื้นผิวที่เย็นกว่า ซึ่งในกรณีนี้ความร้อนแฝงจะถูกถ่ายออกจากไอ และส่งถ่ายไปยังพื้นผิว ทำให้ไอควบแน่นเป็นของเหลววิธีอื่น ๆ ในการควบแน่นได้แก่ การควบแน่นแบบเนื้อเดียว (Homogeneous condensation) ซึ่งไอจะควบแน่นเป็นหยดน้ำลอยอยู่ทำให้เกิดก๊าซลักษณะคล้ายหมอก อีกวิธีการหนึ่งได้แก่การควบแน่นแบบสัมผัสโดยตรง (direct contact condensation) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการนำไอไปสัมผัสกับของเหลวที่เย็นกว่าโดยตรง

การพิจารณาพบว่าการควบแน่นนั้นสามารถเป็นไปได้ 2 แบบซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพที่พื้นผิวแบบแรกได้แก่การควบแน่นเป็นชั้นขอลเหลวครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดการควบแน่นลักษณะนี้เรียกว่าการควบแน่นแบบแผ่นบาง (Film condensation) ซึ่งมักเกิดขึ้นบนพื้นผิวสะอาดที่วางอยู่ในแนวตั้ง แต่ถ้าพื้นผิวเคลือบด้วยวัสดุที่ป้องกันไม่ให้พื้นผิวเปียก การควบแน่นจะเป็นแบบหยด (drop wise condensation) ซึ่งการควบแน่นในลักษณะนี้ก็จะมิได้หลายขนาดตั้งแต่เป็น ไมโครเมตร จนถึงขนาดที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และโดยทั่วไปจะครอบคลุมพื้นที่ได้ถึงร้อยละ 90 ของพื้นผิว ไม่ว่าการควบแน่นจะเป็นแบบหนึ่งแบบใดก็ตาม การเกิดขึ้นของเหลวหรือหยดของเหลวบนพื้นผิวจะทำให้เกิดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอและพื้นผิว ความต้านทานดังกล่าวจะเพิ่มมากขึ้น และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นในทิศทางไหล การควบแน่นแบบหนา จะให้อัตราการควบแน่นและการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการควบแน่นแบบแผ่นบาง ทั้งนี้เพราะหยดของเหลวส่วนใหญ่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากคือประมาณ 10 ไมโครเมตร จึงอาจทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าในแบบแผ่นบางถึง 10 เท่า ดังนั้นพื้นผิวที่ใช้ในการควบแน่น โดยทั่วไปจะเคลือบด้วยวัสดุกันเปียก เพื่อให้การควบแน่นเป็นแบบหยด อย่างไรก็ตามเมื่อพื้นผิวมีอายุการใช้งานสูงขึ้น วัสดุที่ใช้เคลือบก็จะมีสมบัติเปลี่ยนไป และในที่สุดจะเกิดการควบแน่นแบบแผ่นบางแทน เนื่องจากระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น (Radiant floor cooling system) ทำความเย็นโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับพื้น (ซึ่งมีที่อน้ำเย็นฝังอยู่) การเกิดการควบแน่นบนพื้นจึงลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับพื้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นลดลง ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมเกิดการควบแน่นบนพื้นในระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประโยชน์ในการควบคุมไม่ให้เกิดสภาวะดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วิชาไซโครเมตริกซ์ (Psychrometrics chart)

เป็นวิชาที่ว่าด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของส่วนผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซในอากาศ จะประกอบไปด้วย อากาศแห้ง (Dry air) และความชื้นหรือน้ำ (Moisture) เป็นองค์ประกอบ อากาศแห้ง 1 โมล จะมีก๊าซไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 79 รองลงมาคือ ออกซิเจนร้อยละ 20 และก๊าซอื่นๆ ดังนั้นอากาศแห้ง 1 โมล จะมีมวล 29 กรัม

การศึกษาไซโครเมตริกซ์จะช่วยให้เราเข้าใจถึงสมบัติต่าง ๆ ของอากาศ ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้ออกแบบระบบทำความเย็น และใช้ทำนายสถานะของพื้นที่ปรับอากาศเมื่อทราบตัวแปรต่างๆง่ายขึ้น

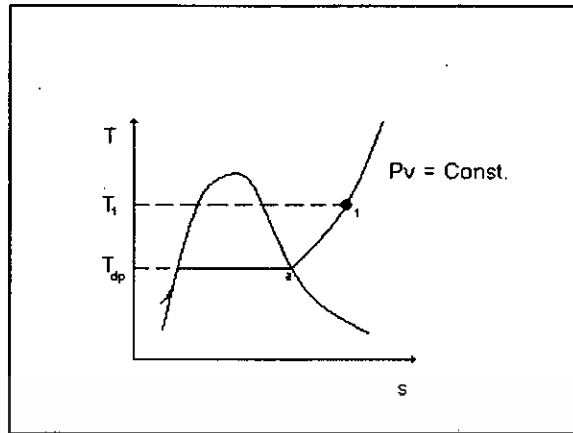
## 2.3 ตัวแปรเสริมที่เกี่ยวข้องทางไซโครเมตริกซ์

2.3.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature) คืออุณหภูมิของห้องที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์โดยตรง

2.3.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point Temperature) คืออุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศเมื่อเริ่มควบแน่นขณะที่อากาศถูกทำให้เย็นลงในอัตราส่วนความชื้นและความดันคงที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ถ้า  $T_{dp}$  คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดันไอของน้ำนั่นเอง

$$T_{dp} = T_{sat @ P_v}$$

ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กล่าวคือ ขณะที่อากาศถูกทำให้เย็นตัวลงที่ความดันคงที่ ความดันไอ  $P_v$  ก็ยังคงมีค่าคงที่ ดังนั้น ไอน้ำในอากาศ (สถานะที่ 1) จะมีอุณหภูมิลดลงตามแนวเส้นของความดันคงที่จนกระทั่งตัดกับเส้นโค้งของไออิ่มตัว (สถานะที่ 2) อุณหภูมิที่จุดนี้คือ  $T_{dp}$  และถ้าอุณหภูมิลดต่ำกว่านี้ ไอน้ำบางส่วนก็จะเกิดการควบแน่น ผลที่ตามมาคือ ปริมาณของไอน้ำในอากาศจะลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้  $P_v$  ลดลง อากาศยังคงอิ่มตัวในระหว่างกระบวนการควบแน่น ดังนั้น กระบวนการจะดำเนินไปตามแนวเส้นของความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 (เส้นโค้งของไออิ่มตัว) อุณหภูมิอิ่มตัวและอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศอิ่มตัว คือ จุดเดียวกัน

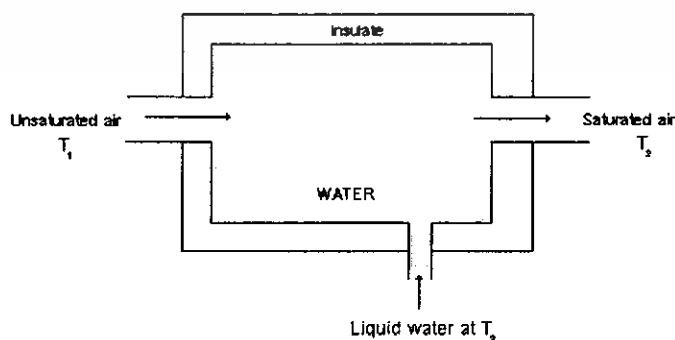


รูป 2.1 การเอนต์วอลงของอากาศชั้นที่สภาวะความดันคงที่  
และอุณหภูมิจุดน้ำค้างบนแผนภาพ  $T-s$  ของน้ำ

### 2.3.3 อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet Bulb Temperature) มี 2 แบบ คือ

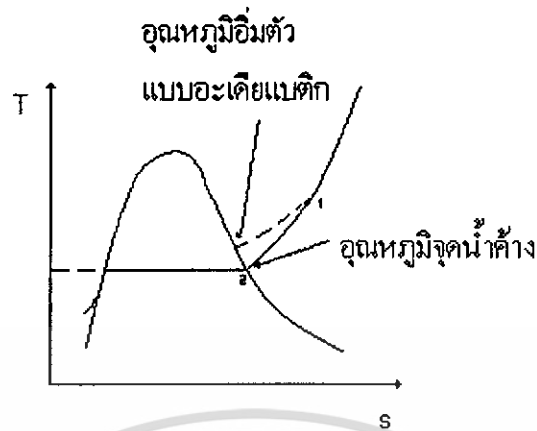
- อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Wet Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเทอร์โมไดนามิกส์ หรือ กระบวนการอิมตัวแบบอะเดียแบติก (Adiabatic saturation process) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ระบบจะประกอบไปด้วยท่อยาวที่มีฉนวนหุ้ม และมีน้ำบรรจุอยู่ภายใน กระแสอากาศที่ไม่อิมตัวซึ่งมีค่าที่อุณหภูมิ  $T_1$  มีความชื้น  $h_1$  และมีความชื้นสัมพัทธ์  $RH_1$  ไหลผ่านท่อเนื้ออย่างคงตัว ขณะที่อากาศไหลผ่านเหนือน้ำ น้ำบางส่วนจะระเหยและผสมเข้ากับกระแสของอากาศนี้ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศจะเพิ่มระหว่างในกระบวนการ และอุณหภูมิของอากาศจะลดลงเพราะความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยของไอน้ำได้มาจากอากาศนั่นเอง ถ้าท่อมีความยาวเพียงพอ กระแสของอากาศที่ไหลออกที่อุณหภูมิ  $T_2$  จะเป็นอากาศอิมตัว ( $RH = 100$  เปอร์เซ็นต์) ซึ่งเราจะเรียกอุณหภูมิ  $T_2$  นี้ว่า อุณหภูมิอิมตัวแบบอะเดียแบติก (Adiabatic saturation temperature)



รูป 2.2 แสดงกระบวนการอิมตัวแบบอะเดียแบติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

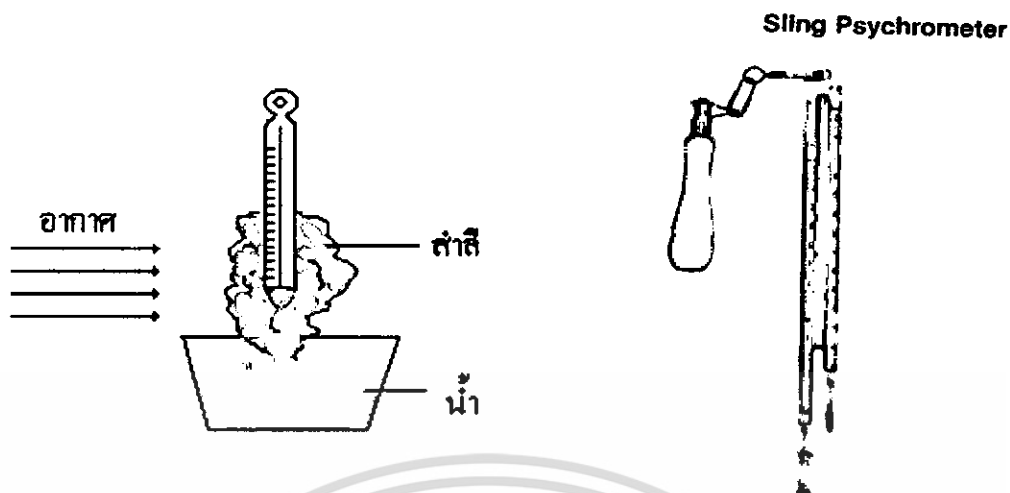


รูป 2.3 แสดงแผนภาพ  $T-s$

- อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางไซโครเมตริกซ์ (Psychometrics Wet Bulb Temperature)

ได้มาจากกรรมนำเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทหุ้มด้วยสำลีหรือผ้าเปียกตลอดเวลา แล้วปล่อยให้สัมผัสกับอากาศที่ไหลด้วยในความเร็วสูง (อย่างน้อย 4.6 เมตรต่อวินาที) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 อุณหภูมิที่วัดด้วยวิธีนี้เรียกว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb Temperature  $T_w$ ) หลักการพื้นฐานจะเหมือนกับหลักการของกระบวนการอิมิตัวแอดีเยเบติก กล่าวคือเมื่ออากาศที่ไม่อิมิตัวไหลผ่านสำลีที่เปียก น้ำบางส่วนในสำลีนี้จะเกิดการระเหย ผลที่ตามมาคืออุณหภูมิของน้ำจะลดลงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอากาศและน้ำขึ้น (ซึ่งจะเป็นแรงขับเคลื่อนทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อน) หลังจากนั้นสักครู่หนึ่ง ความร้อนที่สูญเสียออกจากน้ำเนื่องจากการระเหยจะเท่ากับความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศ อุณหภูมิของกระเปาะจะคงที่ ค่าของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์อ่านได้ที่จุดนี้คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก

นอกจากนี้อุณหภูมิกระเปาะเปียกยังสามารถวัดได้โดยการใส่เทอร์โมมิเตอร์ที่มีสำลีหุ้มที่ปลายนั้นเข้าไปในอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับใส่ และมีที่จับเพื่อใช้ในการเหวี่ยง หลังจากนั้นจะทำการเหวี่ยงอุปกรณ์นี้อย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีการนี้จะใช้การเคลื่อนที่ของเทอร์โมมิเตอร์แทนการไหลของอากาศ อุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการนี้ถูกเรียกว่าสลิงไซโครมิเตอร์ (Sling psychrometer) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งก็มักถูกใส่ไว้ในอุปกรณ์นี้เช่นกัน เพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกและอุณหภูมิกระเปาะแห้งได้พร้อม ๆ กัน



รูป 2.4 แสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก

รูป 2.5 แสดงสติงไซโครมิเตอร์

2.3.4 ปริมาตรจำเพาะ (*Specific Volume, Humid Volume*) คือปริมาตรของอากาศชื้น ต่อ หนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ขณะเดียวกันค่าความหนาแน่นจำเพาะนั้นเป็นส่วนกลับกับค่าปริมาตรจำเพาะ

2.3.5 ความชื้นสัมพัทธ์ (*Relative Humidity, %RH*) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้น ต่อ ปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อากาศนั้นสามารถรับไว้ได้ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน นอกจากนี้ยังหมายถึง ความดันของอากาศ ต่อ ความดันอิ่ม ในขณะที่อุณหภูมิหนึ่งๆค่าความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 หรือรายงานในรูปร้อยละตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 ก็ได้

$$\phi = \frac{P_v}{P_g}$$

2.3.6 ความชื้นจำเพาะและความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (*Specific Humidity, Relative Humidity Ratio, Absolute Humidity, Ratio also Moisture Content*) ความชื้นจำเพาะหรือความชื้นสัมบูรณ์ (หรือเรียกว่า อัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio)) คือมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยของอากาศแห้ง กำหนดด้วยสัญลักษณ์  $w$

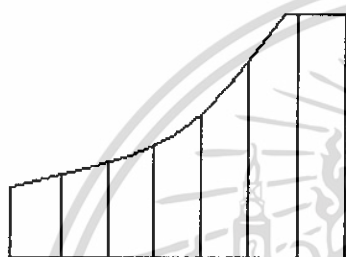
$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg water vapor/kg dry air})$$

2.3.7 เอนทัลปี (*Enthalpy*) คือค่าพลังงานความร้อนที่มีในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง เมื่อเทียบกับค่าความร้อนที่อุณหภูมิอ้างอิง (นิยมใช้ 0 เซลเซียส ในระบบเมตริกซ์)

## 2.4 หลักการใช้แผนภาพไซโครเมตริกซ์

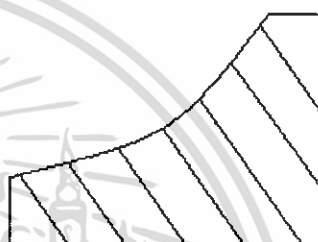
ตัวแปรเสริมหรือคุณสมบัติต่างๆของอากาศที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันสามารถคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ แผนภาพไซโครเมตริกซ์ที่ระดับความดันหนึ่งๆสามารถนำมาใช้คำนวณหรือบอกพิกัดต่างๆได้ เพียงแค่ทราบค่าคุณสมบัติที่อิสระต่อกัน 2 ค่าก็สามารถหาคุณสมบัติอื่นๆทางไซโครเมตริกซ์ได้ทั้งหมด

### 2.4.1 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก



— เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง

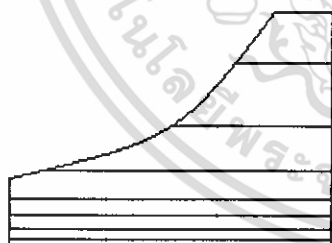
รูป 2.6 เส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง



— เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก

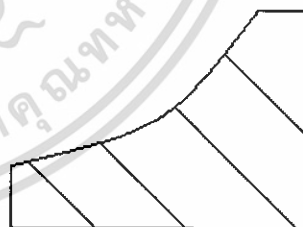
รูป 2.7 เส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก

### 2.4.2 เส้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และความชื้นจำเพาะ



— เส้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

รูป 2.8 เส้นอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

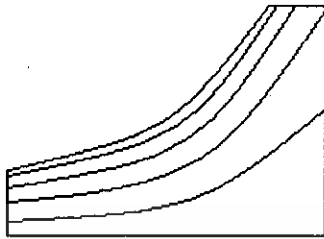


— เส้นปริมาณจําเพาะ

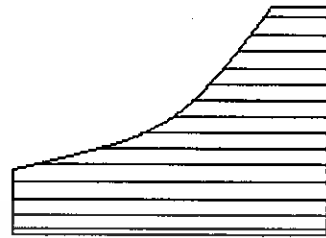
รูป 2.9 เส้นปริมาณจําเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 เส้นความชันสัมพัทธ์ และความชันจำเพาะ



— เส้นความชันสัมพัทธ์

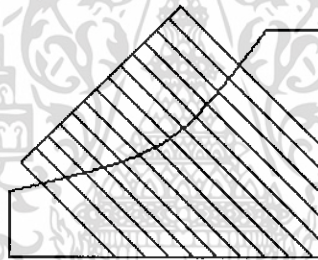


— เส้นปริมาณความชัน

รูป 2.10 เส้นความชันสัมพัทธ์

รูป 2.11 เส้นความชันจำเพาะ

2.4.4 เส้นเอนทัลปี



— เส้นเอนทัลปี

รูป 2.11 เส้นเอนทัลปี

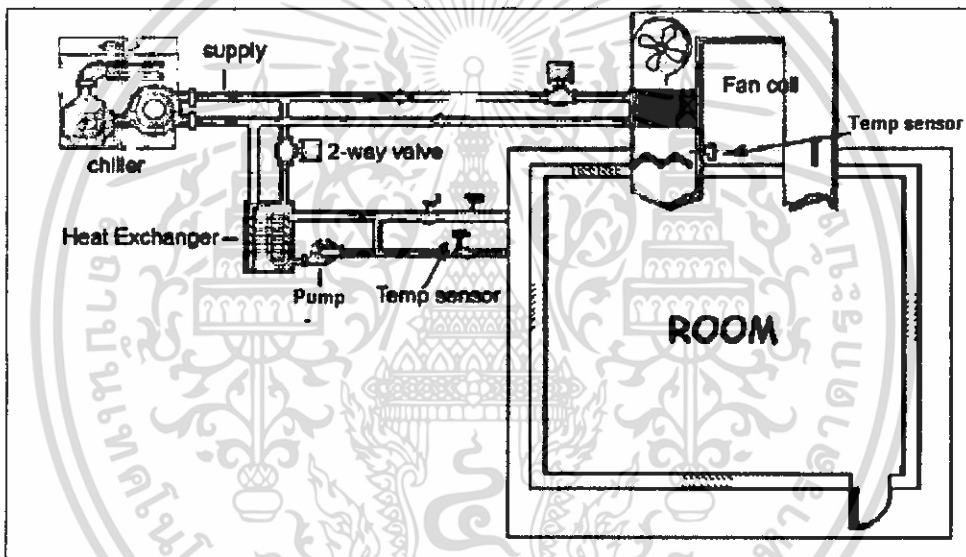
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลอง

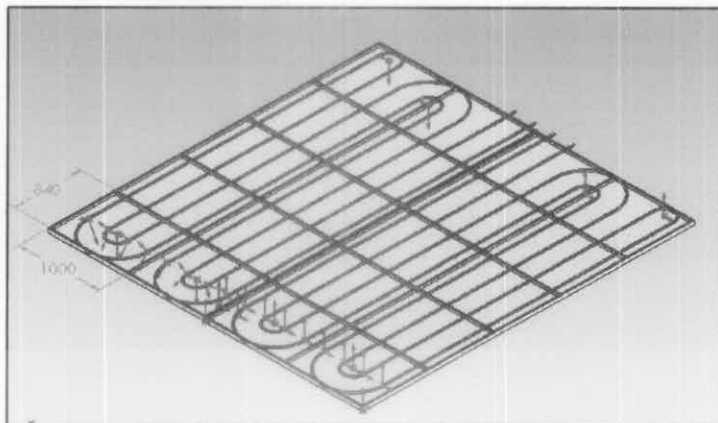
##### 3.1 อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในห้องทดลอง

3.1.1 ห้องทดลอง ขนาดกว้าง 4.5 เมตร ยาว 4.3 เมตร และความสูงจากพื้นถึงเพดาน 2.7 เมตร เพดานมีพื้นที่ในการทำความเย็น ประมาณ 19 ตารางเมตร ประกอบด้วยแผ่นเพดานทำความเย็นที่ต่อขนานกัน 4 ชุด ทางด้านบน โดยแต่ละชุดเป็นการต่ออนุกรมกัน 2 แผ่นเพดานทำความเย็น โดยมีอยู่ 2 ชุด และชุดคอยล์เย็น โดยเป็นการจำลองระบบทำความเย็นภายในอาคารขนาดเล็ก



รูป 3.1 แสดงลักษณะของระบบการทำความเย็นแบบแฉิ่งสีจากเพดาน

3.1.2 แผ่นเพดานทำความเย็นที่ใช้ทดสอบการควบคุม เป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร พับขึ้นรูปมีขนาดกว้าง 84 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และมีท่อทองแดงสำหรับน้ำเย็นไหลผ่านขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 17 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 19 มิลลิเมตร ยึดติดทางด้านหลังแล้วปิดทับด้วยฉนวนยางทำหน้าที่เป็นพื้นผิวทำความเย็น



รูป 3.2 แสดงขนาดแผ่นจำลองเพดานทำความเย็นที่ใช้ทดสอบการควมแน่น

### 3.1.3 หลอดไฟ หลอดไฟขนาด 60 วัตต์ จำนวน 4 หลอด ใช้ทดสอบภาระจากแสงไฟต่อแผ่นเพดานทำความเย็น



รูป 3.3 แสดงหลอดไฟที่ใช้ในห้องทดลอง

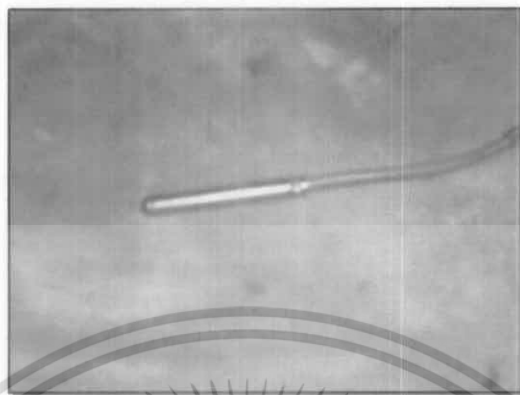
### 3.1.4 กล้องดิจิตอล ใช้เก็บภาพขั้นตอนการเกิด และหายควมแน่นบนแผ่นเพดานทำความเย็น



รูป 3.4 แสดงกล้องที่ใช้ในการเก็บภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ



รูป 3.5 แสดงเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ

### 3.1.6 เครื่องเพิ่มความชื้นให้ระบบ (Humidifier) ใช้ในการเพิ่มความชื้นให้กับระบบในกรณีที่ต้องการความชื้นสัมพัทธ์สูง



รูป 3.6 แสดงเครื่องเพิ่มความชื้น

## 3.2 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

- ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการควบแน่น และการควบคุมห้องทดสอบให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ
- ติดตั้งหลอดไฟและอุปกรณ์ให้ความชื้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดานอุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่จะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 24 เซลเซียส ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 23 เซลเซียส ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 หลังจากเกิดนั้น ประมาณ 30 นาที เพิ่มภาระแสงไฟ 120 วัตต์ ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการทดลองที่ภาระแสงไฟ 240 วัตต์ ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 5. แต่ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 75
- ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 5. แต่ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 80



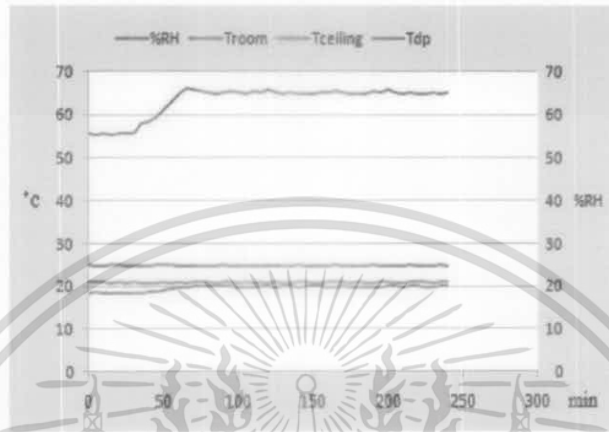
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65



รูป 4.1 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65

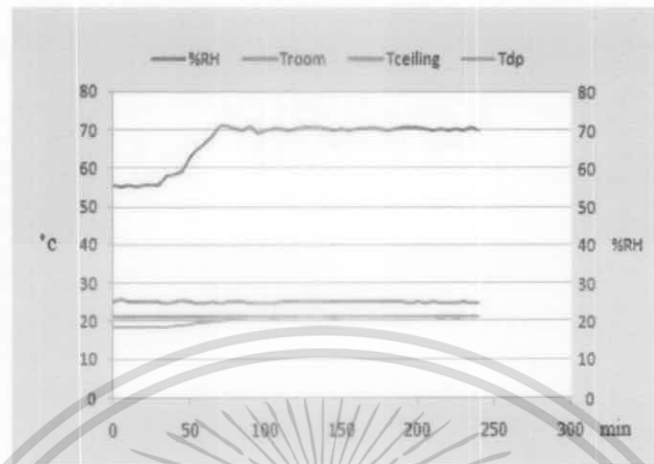


รูป 4.2 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

72173

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70



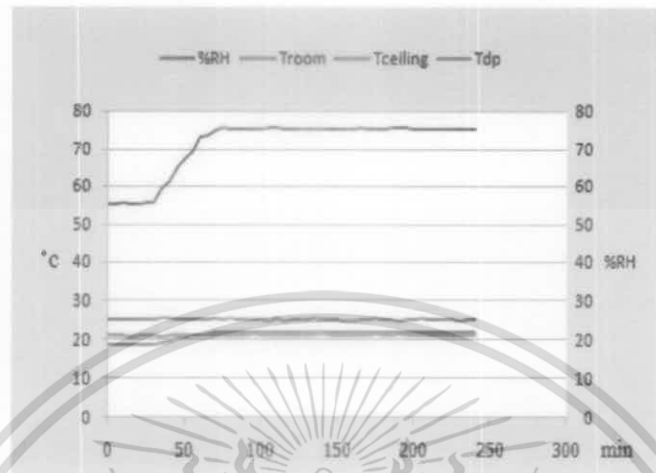
รูป 4.3 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70



รูป 4.4 แสดงการเริ่มเกิดการควบแน่นเล็กน้อยบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75



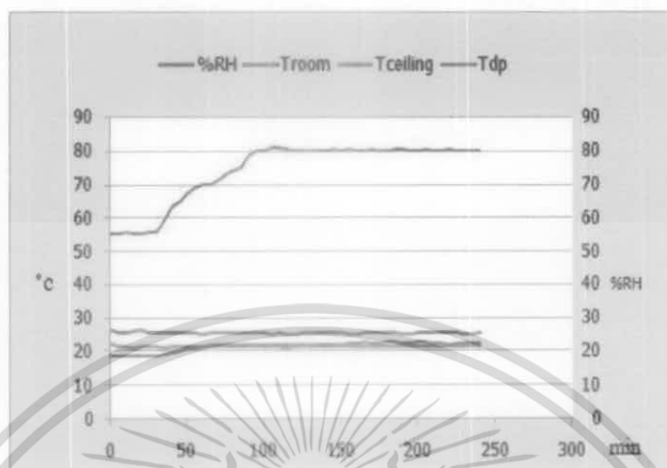
รูป 4.5 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75



รูป 4.6 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.7 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.8 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

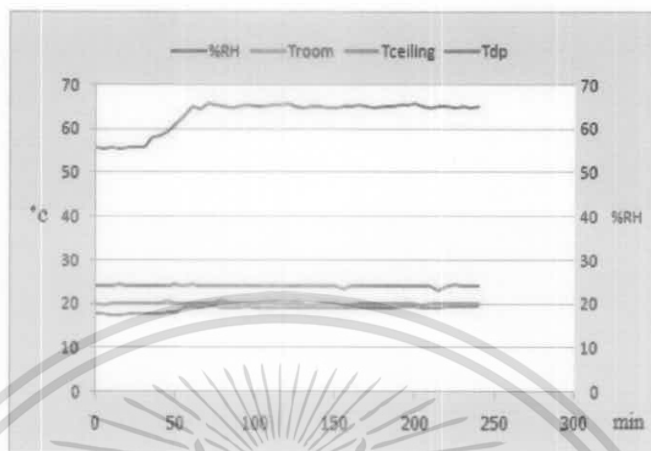
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิห้องเป็น 25 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็น ร้อยละ 65 , 70 , 75 และ 80 อุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็น 20.1 เซลเซียส, 20.9 เซลเซียส, 21.7 เซลเซียส และ 22.5 เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานจะอยู่ที่ประมาณ 21 เซลเซียส ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.8 จะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 0.9 เซลเซียส, 0.1 เซลเซียส, 0.7 เซลเซียส และ 1.5 เซลเซียส ตามลำดับ

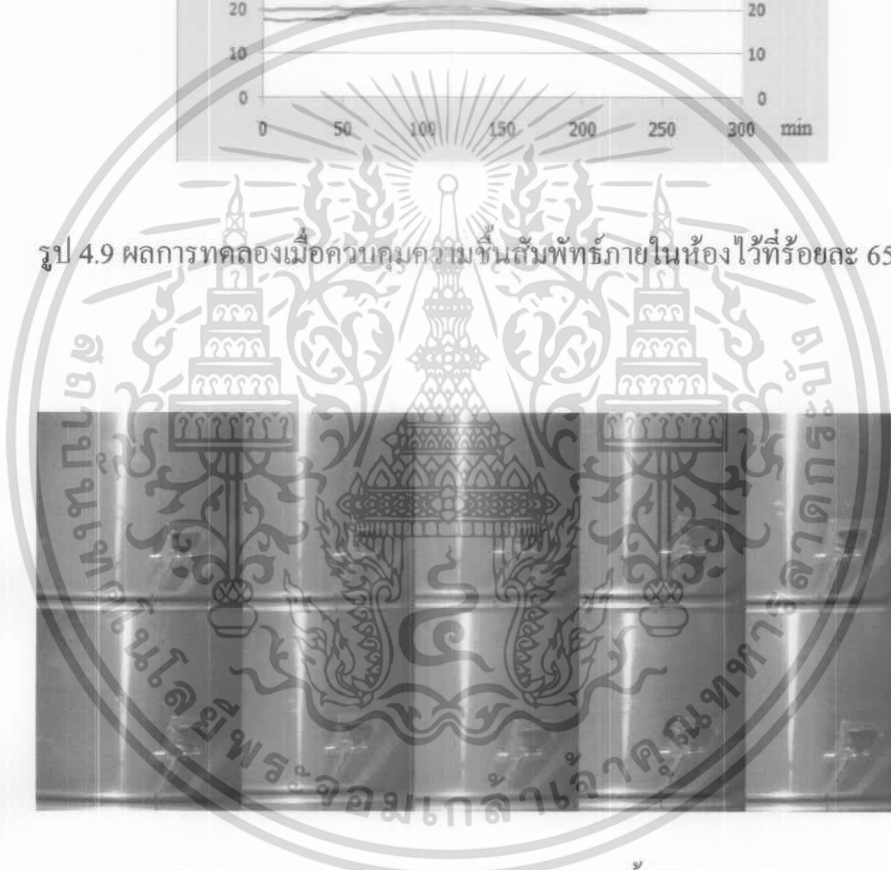
หลังจากการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 70 หลังจากนั้นประมาณ 15 วินาที เริ่มเกิดฝ้าที่พื้นผิวเพดานเล็กน้อย และค่อนข้างคงที่ตลอด 2 ชั่วโมง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 75 และ 80 ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นน้อยมาก หลังจากนั้นจะมีลักษณะเป็นฝ้ากระจายทั่วพื้นผิว



อุณหภูมิห้อง 24 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65



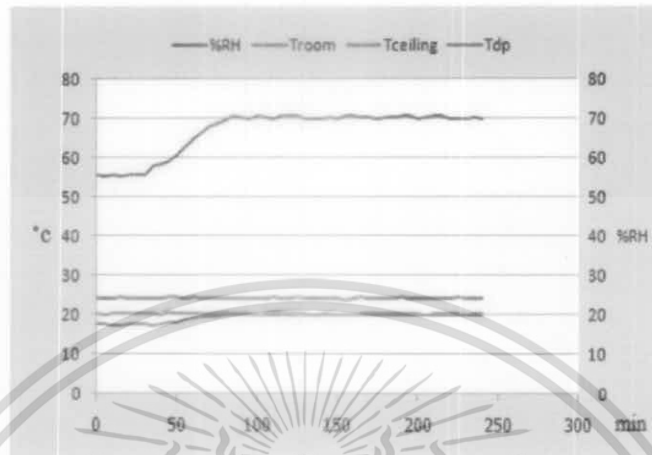
รูป 4.9 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65



รูป 4.10 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 24 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70



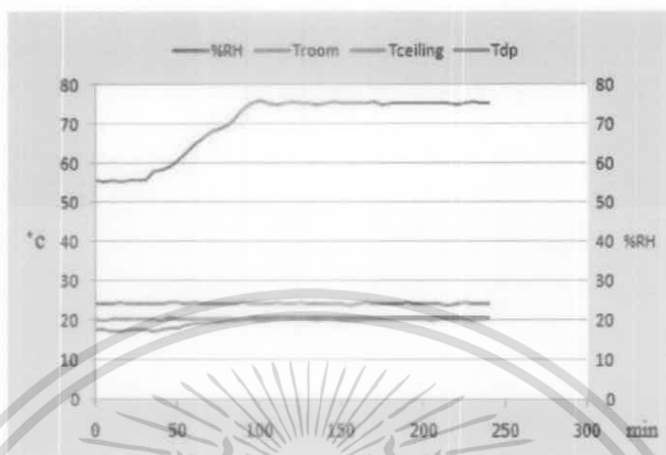
รูป 4.11 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70



รูป 4.12 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 24 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75



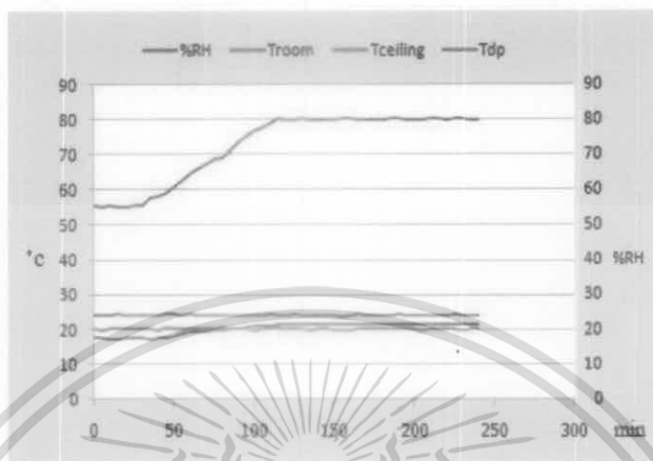
รูป 4.13 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75



รูป 4.14 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 24 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.15 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.16 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

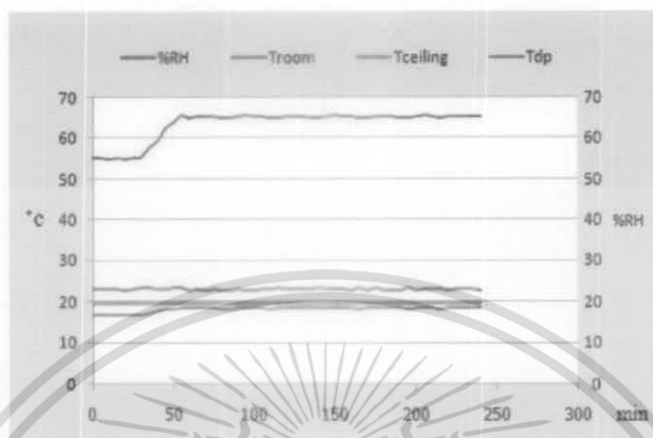
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิห้องเป็น 24 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 , 70, 75 และ 80 อุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็น 19.4 เซลเซียส, 19.8 เซลเซียส, 20.6 เซลเซียส และ 21.3 เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานจะอยู่ที่ประมาณ 20.3 เซลเซียส ดังรูป 4.9 ถึง 4.16 จะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 0.9 เซลเซียส, 0.5 เซลเซียส, 0.3 เซลเซียส และ 1.0 เซลเซียส ตามลำดับ

หลังจากการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 และ 70 ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 75 การควบแน่นมีลักษณะเป็นฝ้ากระจาย ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นประมาณ 15 วินาที เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 การควบแน่นมีลักษณะเป็นฝ้ากระจายมากขึ้น ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นน้อยมาก



อุณหภูมิห้อง 23 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65



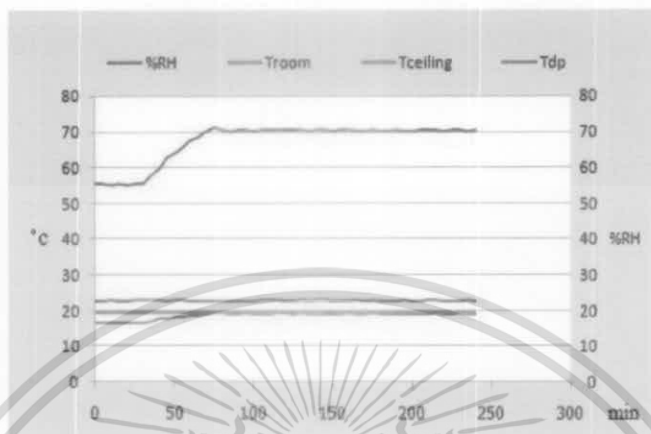
รูป 4.17 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 65



รูป 4.18 แสดงการไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 23 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70



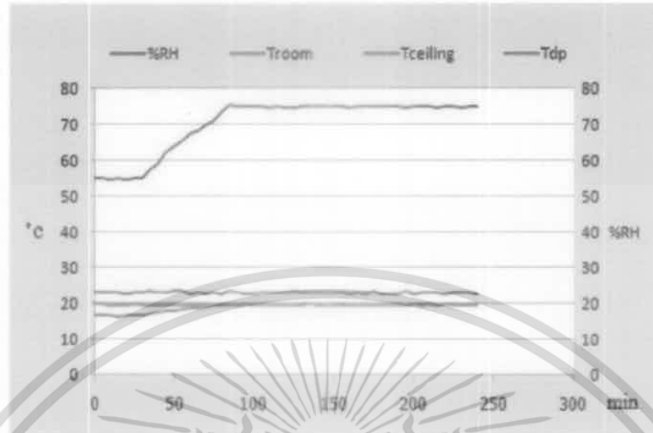
รูป 4.19 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70



รูป 4.20 แสดงการ ไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 23 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75



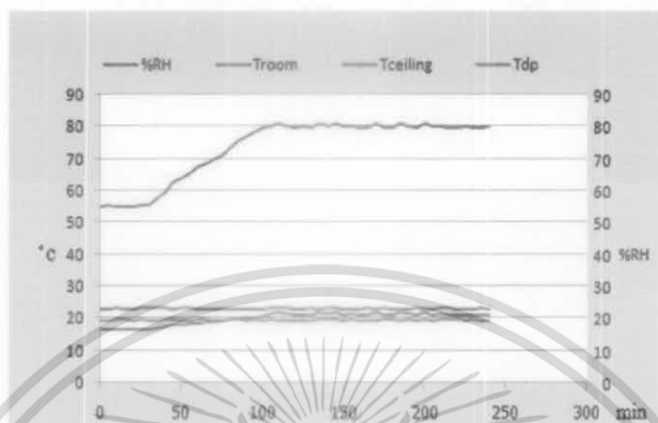
รูป 4.21 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75



รูป 4.22 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง 23 เซลเซียส ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.23 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.24 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

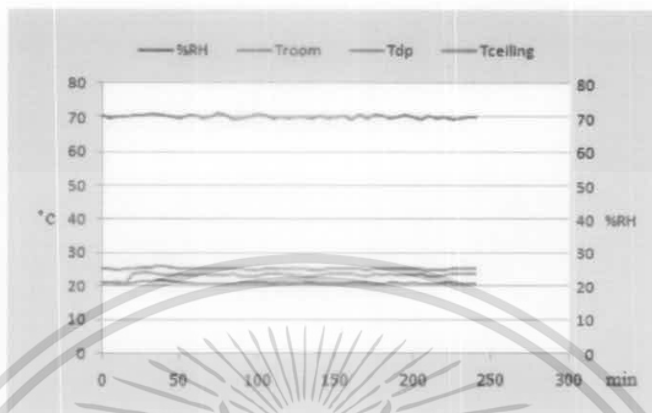
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิห้องเป็น 23 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 อุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็น 18.3 เซลเซียส, 19 เซลเซียส, 19.7 เซลเซียส และ 20.2 เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานจะอยู่ที่ประมาณ 19.6 เซลเซียส ดังรูป 4.17 ถึง 4.24 จะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 1.3 เซลเซียส, 0.6 เซลเซียส, 0.1 เซลเซียส และ 0.6 เซลเซียส ตามลำดับ

หลังจากการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 และ 70 ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 75 ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นประมาณ 30 วินาที เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 80 ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นประมาณ 20 วินาที มีลักษณะเป็นฝ้ากระจายน้อยกว่ากรณีอุณหภูมิห้องเป็น 24 เซลเซียส และ 25 เซลเซียส



ภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ กรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ร้อยละ 70 อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส



รูป 4.25 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70

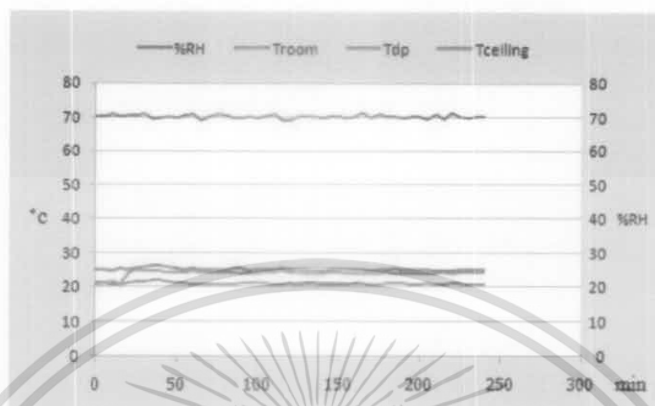


รูป 4.26 แสดงลักษณะการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

จากผลการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 ภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ ส่งผลให้ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.97 เซลเซียส เป็น 23.42 เซลเซียส ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้เวลาประมาณ 8 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระจากแสงไฟ 240 วัตต์ กรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ร้อยละ 70 อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส



รูป 4.27 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 70

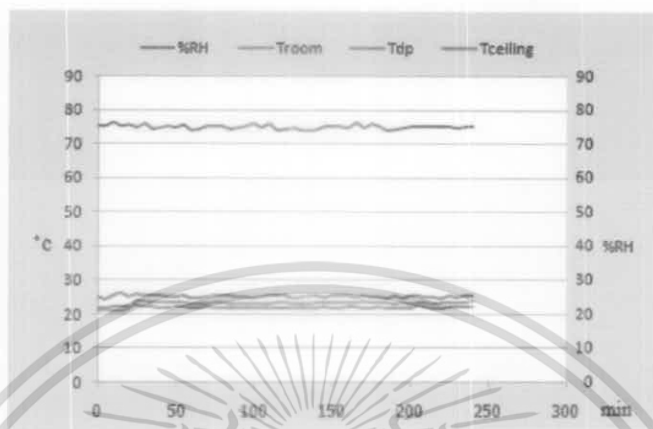


รูป 4.28 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

จากผลการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 ภาระจากแสงไฟ 240 วัตต์ ส่งผลให้ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.96 เซลเซียส เป็น 23.98 เซลเซียส ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ กรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ร้อยละ 75 อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส



รูป 4.29 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75

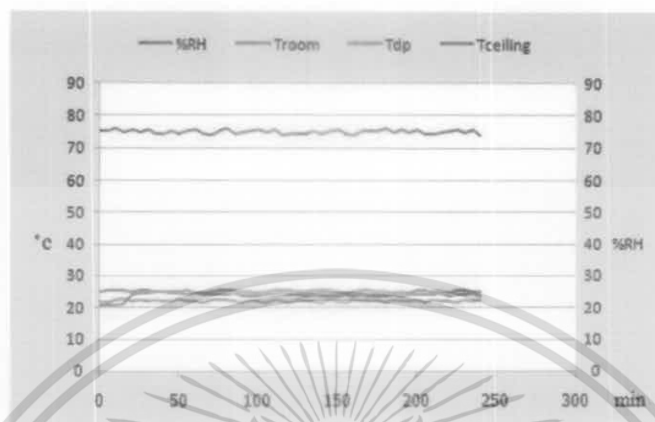


รูป 4.30 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

จากผลการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 ภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ ส่งผลให้ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.91 เซลเซียส เป็น 23.14 เซลเซียส อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แล้วกลับสู่ระดับเดิม ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้ระยะเวลาประมาณ 19 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระจากแสงไฟ 240 วัตต์ กรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ร้อยละ 75 อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส



รูป 4.31 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 75

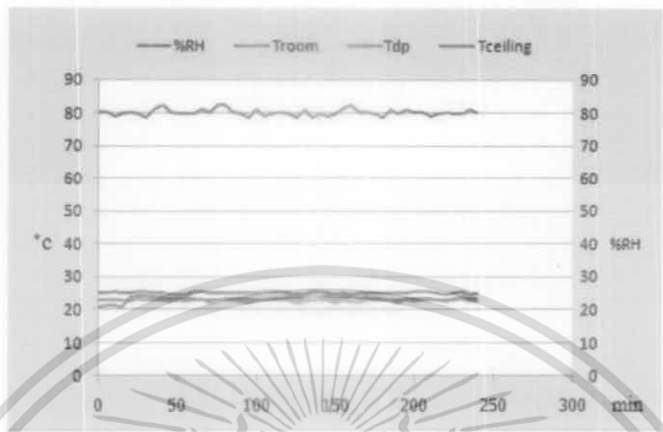


รูป 4.32 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

จากผลการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 ภาระจากแสงไฟเป็น 240 วัตต์ ส่งผลให้ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.94 เซลเซียส เป็น 23.96 เซลเซียส ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้เวลาประมาณ 11 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ กรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ร้อยละ 80 อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส



รูป 4.33 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80

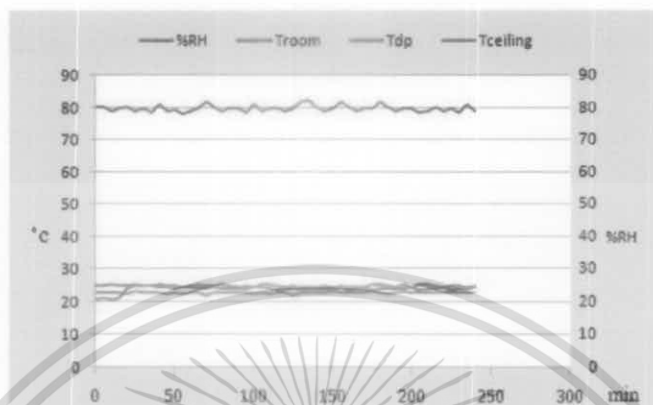


รูป 4.34 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

จากผลการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 ภาระจากแสงไฟ 120 วัตต์ ส่งผลให้ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 21.08 เซลเซียส เป็น 23.20 เซลเซียส อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แล้วกลับสู่ระดับเดิม ฝ้าจะจางลงอย่างช้า ๆ เกิดหยดน้ำขนาดเล็กปะปนกับฝ้าเล็กน้อย ใช้ระยะเวลา ประมาณ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาระจากแสงไฟ 240 วัตต์ กรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ร้อยละ 80 อุณหภูมิห้อง 25 เซลเซียส



รูป 4.35 ผลการทดลองเมื่อควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไว้ที่ร้อยละ 80



รูป 4.36 แสดงการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

จากผลการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 ภาระจากแสงไฟเป็น 240 วัตต์ ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.92 เซลเซียส เป็น 24.05 เซลเซียส ฝ้าจะจางลงอย่างช้า ๆ เกิดเป็นหยดน้ำขนาดเล็กปะปนกับฝ้า และค่อย ๆ จางหายไป ใช้ระยะเวลาประมาณ 21 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- จากการทดลองทำให้ทราบว่า การควบแน่นจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวเพดานมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง การควบแน่นเกิดขึ้นเร็วมาก เนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นพื้นผิวเพดานมีความเรียบ และมีค่าการนำความร้อนสูง (เมื่อเทียบกับพื้นผิววัสดุอื่น เช่น กระเบื้องเซรามิก) ทำให้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ ไม่สามารถบันทึกช่วงเวลาระหว่างที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวเพดานเริ่มต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างจนเกิดการควบแน่น
- ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น จากการทดลองพบว่าในกรณีที่ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ หากความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นระยะเวลาเริ่มควบแน่นจะน้อยลง และหากควบคุมความชื้นสัมพัทธ์คงที่ หากอุณหภูมิห้องลดต่ำลงระยะเวลาเริ่มควบแน่นจะมากขึ้น
- ปริมาณการควบแน่นเป็นฝ้า จากการทดลองพบว่าในกรณีที่ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ หากความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นการควบแน่นจะเกิดมากขึ้น และกรณีควบคุมความชื้นสัมพัทธ์คงที่ หากอุณหภูมิห้องลดต่ำลงการควบแน่นจะเกิดน้อยลง

#### กรณีที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 25 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน 21 เซลเซียส พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน เพราะอุณหภูมิพื้นผิวเพดานยังสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่า 20.1 เซลเซียส จะไม่ทำให้เกิดการควบแน่น
- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70, 75 และ 80 อุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.1, 0.7 และ 1.5 เซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 20.9, 21.7 และ 22.5 เซลเซียส ตามลำดับ

#### กรณีที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 24 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 และ 70 อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน 20.3 เซลเซียส พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่า 20.3 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และ 80 อุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.3 และ 1.0 เซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 20.6 และ 21.3 เซลเซียส ตามลำดับ

#### กรณีที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 23 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 และ 70 อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน 19.6 เซลเซียส พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่า 19.6 เซลเซียส
- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และ 80 อุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.1 และ 0.6 เซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 20.9 และ 22.5 เซลเซียส ตามลำดับ

#### กรณีมีภาระจากแสงไฟกระทำต่อพื้นผิวเพดานทำความเย็น

- เมื่อควบคุมให้ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องคงที่ ภาระจากแสงไฟยิ่งมากยิ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการระเหยของฝ้าบนพื้นผิวเพดานน้อยลง
- เมื่อควบคุมให้ภาระจากแสงไฟและอุณหภูมิห้องคงที่ ยิ่งความชื้นสัมพัทธ์สูงยิ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการระเหยของฝ้าบนพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้น
- หากการระเหยของฝ้าบนพื้นผิวเพดานทำความเย็นเป็นไปอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดการกลั่นตัวของฝ้ากลายเป็นหยดน้ำขนาดเล็กได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- เพื่อควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานทำความเย็นได้ ควรมีการติดตั้งวาล์วปรับอุณหภูมิน้ำเข้าเพดานทำความเย็น
- การพัฒนาต่อไปควรออกแบบเพดานทำความเย็นให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นจะได้ผลการทดลองที่ถูกต้องยิ่งขึ้น
- อุปกรณ์วัดอุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านการถอดเปลี่ยนตำแหน่งบ่อยครั้งอาจทำให้การวัดค่าเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ควรมีการเปลี่ยนใหม่

## บรรณานุกรม

- [1] Yunus A.Cengel and Michel A.Boles, "Thermodynamics: An Engineering Approach," 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, 2002
- [2] Sonntag, Borgnakke and Van Wylen, "Fundamentals of Thermodynamics," 6<sup>th</sup> edition, Wiley & Sons, 2003
- [3] พงษ์เจต พรหมวงศ์, "การถ่ายเทความร้อน," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [4] อัครเดช สิ้นธุภัก, "การปรับอากาศ," พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [5] อัครเดช สิ้นธุภัก, "การทำความเย็น," พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [6] ธนากร ว่องวิญญู, นพดล ศรียะประเสริฐพร, จินดา เจริญพรพาณิชย์ "ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [7] ทวีศักดิ์ หมาขนวง, ทิพากร จันทร์คำรงค์, จินดา เจริญพรพาณิชย์ "การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [8] เกียรติยศ ศิริรอด, อรุพงษ์ ลัทธิสถงเนิน, จิตราภรณ์ วงสางาม, จินดา เจริญพรพาณิชย์, "พฤติกรรม การควบแน่นในระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
- [9] Jiang Z, Chen Q, Moser A, "Experimental investigation of the velocity field and airflow pattern generated by cooling ceiling beams," Building and Environment, Volume 36, Issue 7, Pages 891-899, 1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] J.D. Dale, M.Y. Ackerman, "The thermal performance of a radiant panel floor-heating system," ASHRAE Transactions, Volume 99, Page 23-34, 1993
- [11] Simmonds P. "Practical applications of radiant heating and cooling to maintain comfort conditions," ASHRAE Transactions, Pages 659-666, 1996
- [12] Christoph Kochendorfer, "Standardized Testing of Cooling Pannels and Their Use in System Planning," ASHRAE Transactions, 1996
- [13] Aryut Wattanawanichakorn, Chirdpun Vitooraporn "A study of the performance of cooling ceiling panel," Mechanical Engineering Chulalongkorn University, 2001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ตารางค่าคุณสมบัติต่างๆ

ตาราง ก-1 แสดงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดต่างๆ

Normal Temperature vs Resistance for Nickel, Platinum (and Platinum Equivalent), and Thermistor Sensors

Temperature		Resistance (Ohms)		
$^{\circ}F$	$^{\circ}C$	Nickel	Platinum	Thermistor
-50	-46	674	821	109872
-40	-40	699	843	75466
-30	-34	725	865	52571
-20	-29	751	887	37116
-10	-23	777	908	263535
0	-18	803	930	19208
10	12	830	954	14062
20	-7	858	974	10408
30	-1	885	996	7784
40	4	914	1017	5880
50	10	942	1039	4484
60	16	971	1061	3450
70	21	1000	1082	2678
80	27	1030	1104	2095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 แสดงคุณสมบัติค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ

ชนิดของวัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ ( $W / m \cdot K$ )
เหล็กกล้าคาร์บอน Carbon steel (AISI 1020)	52
ทองแดง Copper	390
อลูมิเนียม Aluminum	237
ทองเหลืองที่ผสมสังกะสี 15 % Red brass (85 Cu-15 Zn)	159
เหล็กกล้าไร้สนิม Stainless Steel (AISI 202)	163
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ Low density polyethylene	0.31
โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง High density polyethylene	0.42
ครอสลิงค์โพลีเอทิลีน Cross linked polyethylene	0.38
เท็กซ์ไทล์ รีอินฟอร์ซด์เบอร์รี่ทราสเฟอร์โฮส Textile reinforced rubber heat transfer hose	0.29
โพลีโพรไพลีนบล็อกโคพอลิเมอร์ Polypropylene block copolymer	0.23
โพลีโพรไพลีนแรนดอมโคพอลิเมอร์ Polypropylene random copolymer	0.24
โพลีบิวทิลีน Polybutylene	0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 แสดงค่าตัวอย่างของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $W/m^2 \cdot C$ 

ชนิดของการไหล	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 \cdot C$ )
<p>การพาแบบอิสระที่ <math>\Delta T = 25 \text{ } ^\circ C</math></p> <p>แผ่นเรียบแนวตั้งที่ 0.25 เมตร ใน :</p> <p>-อากาศบรรยากาศ 5</p> <p>-น้ำมันเครื่องยนต์ (น้ำ) 37 (440)</p> <p>ทรงกระบอกแนวนอน เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 0.02 เมตร ใน :</p> <p>-อากาศบรรยากาศ 8</p> <p>-น้ำมันเครื่องยนต์ (น้ำ) 62 (741)</p> <p>ทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 เมตร ใน :</p> <p>-อากาศบรรยากาศ 9</p> <p>-น้ำมันเครื่องยนต์ (น้ำ) 60 (606)</p>	
<p>การพาความร้อนแบบบังคับ</p> <p>อากาศบรรยากาศ <math>25 \text{ } ^\circ C</math>, <math>U_\infty = 10 \text{ m/s}</math> ผ่านแผ่นเรียบ :</p> <p>-L = 0.1 m 39</p> <p>-L = 0.5 m 17</p> <p>การไหลที่ 5 เมตรต่อวินาที ผ่านทรงกระบอกเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 0.01 เมตร :</p> <p>85</p>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-อากาศบรรยากาศ	1800
-น้ำมันเครื่องยนต์	10500
-น้ำที่ 1 กิโลกรัมต่อวินาที ภายในท่อ 0.025 เมตร	
<b>การเค็ลคของน้ำที่ 1 ความดันบรรยากาศ</b>	
-การเค็ลคในภาชนะ	3000
-การเค็ลคที่ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด	35000
-การเค็ลคเป็นฟิล์ม	300
<b>การกลั่นตัวของไอน้ำที่ 1 ความดันบรรยากาศ</b>	
-การกลั่นตัวเป็นแผ่นบาง ๆ บนท่อแนวนอน	9000-25000
-การกลั่นตัวเป็นแผ่นบาง ๆ บนท่อแนวตั้ง	4000-11000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-4 แสดงค่าตัวอย่างของสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุต่าง ๆ

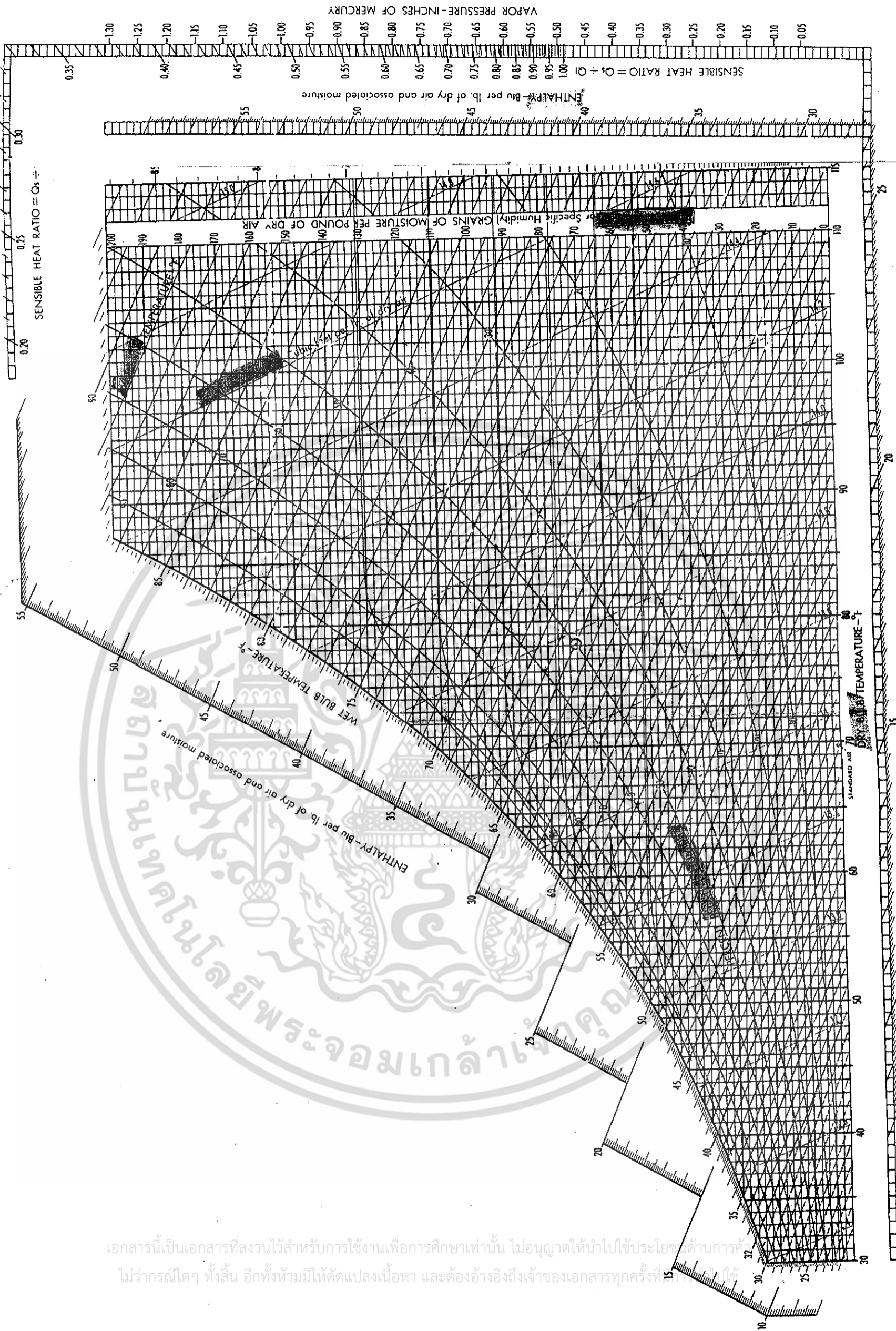
ชนิดของวัตถุ	อุณหภูมิ (K)	สภาพการเปล่งรังสี
แอสเบสทอส	300	0.96
อิฐ	300	0.8
คอนกรีต	300	0.88-0.94
แก้ว	300	0.90-0.95
ยางอ่อน	300	0.86
ยางแข็ง	300	0.93
กระดาษสีขาว	300	0.90
ผิวหนังมนุษย์	300	0.95
ผนังทาสีดำลงเล็กเกอร์	300	0.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TRANE**

**PSYCHROMETRIC CHART**

© 1960 THE TRANE COMPANY, LA CROSSE, WISCONSIN  
Barometric Pressure 29.921 inches of Mercury



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

**FIGURE 22-25 Psychrometric chart. (Courtesy of the Trane Co.)**



# ปรากฏการณ์ควบแน่นในระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน (Condensation phenomenon in radiant ceiling cooling system)

ทวิชัย อนันต์เจริญกิจ<sup>1</sup>, ปฏิภาณ สุทธิวนิช<sup>1</sup>

สยาม สงวนรัมย์<sup>2</sup>

## บทคัดย่อ

พิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็น หากระดับอุณหภูมิของน้ำเย็นที่จ่ายให้กับฝ้าเพดานทำความเย็นต่ำ สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของฝ้าเพดานทำความเย็นจะสูงเมื่อเทียบกับการจ่ายน้ำเย็นในอุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นจึงควรจ่ายน้ำเย็นอุณหภูมิต่ำ ๆ ให้กับฝ้าเพดานทำความเย็น ในทางเดียวกันการจ่ายน้ำเย็นอุณหภูมิต่ำ หากภายในห้องทดสอบมีความชื้นสัมพัทธ์สูง อาจเกิดปัญหาควบแน่นที่พื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็นได้ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิห้องทดสอบ ความชื้นสัมพัทธ์ และภาระจากแสงไฟ เพื่อหาแนวโน้มและเงื่อนไขเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวฝ้าเพดานทำความเย็น จากการทดลองพบว่าการเกิดการควบแน่นมีลักษณะเป็นฝ้าบาง ในกรณีความชื้นสัมพัทธ์คงที่เมื่ออุณหภูมิห้องลดต่ำลงการเกิดการควบแน่นจะลดลงตาม เมื่อมีภาระจากแสงไฟลักษณะการควบแน่นที่เกิดจะมีลักษณะเป็นฝ้าบาง เปลี่ยนเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ และมีบางส่วนระเหยไป ระดับของภาระจากแสงไฟ และความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อระยะเวลาในการเปลี่ยนจากฝ้าบางเป็นหยดน้ำ

## Abstract

According to the theory about heat transfer of a cooling ceiling, if the temperature of water distributed to the ceiling is low, the heat transfer efficiency will be higher than the high temperature one. However, the cooling water distribution could create a condensation problem at the ceiling, when the room has high relative humidity. This research concerns to the co-relation of the ceiling temperature, room temperature, relative humidity, and lighting load in order to find the conditions that cause the condensation at the ceiling. When the humidity is constant, the experiment shows that the form of condensation appears as the thin film. After the room is decreased its temperature, the condensation is lessen. Finally lighting load is applied. The forms of condensation change from the thin films to the tiny water drops and some is vaporized. Both the level of lighting load and relative humidity affect a duration that the thin films turn into the water drops.

**Keywords:** Ceiling radiant cooling (CRC), ASHRAE, control systems

## 1. บทนำ

ระบบปรับอากาศก็เป็นสิ่งจำเป็นต่อมนุษย์เพราะจะทำให้มนุษย์รู้สึกสบาย เพราะเมื่อมนุษย์เราอาศัยอยู่ในสภาวะแวดล้อมหนึ่ง ๆ เช่น ภายในอาคารสำนักงานหรือภายในห้อง ร่างกายจะเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของร่างกายกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทออกจากร่างกายนั้นเกิดได้ทั้งจากการหายใจ การพาและการแผ่รังสีความร้อน

ปัจจุบันมีการนำเอาระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสี มาใช้กับห้องทำความเย็นที่เป็นอาคารซึ่งมีหลังคาโปร่งแสง ทำอากาศภายในสุวรรณหภูมิต่ำเป็นแห่งแรกที่มีการใช้ระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นอย่างจริงจัง อย่างไรก็ตามประเทศไทยยังไม่มีมีการนำระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดานมาใช้ ประเทศแรกที่นำเอาระบบการแผ่รังสีจากเพดานมาใช้คือ เมืองซูริค ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ [6]

<sup>1</sup> นักศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 4G รหัส 46010256 และ 46010401 ตามลำดับ

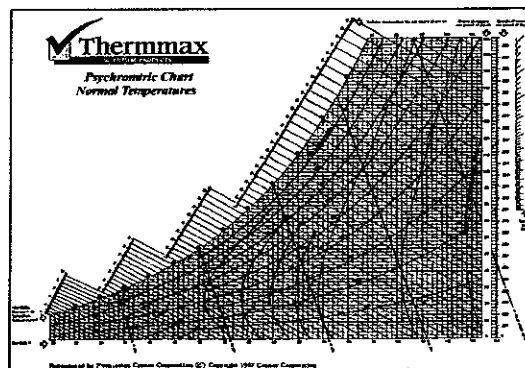
<sup>2</sup> อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล., โทร. 0 2326 4197, อีเมล [kssayam@kmitl.ac.th](mailto:kssayam@kmitl.ac.th)

## สัญลักษณ์

$T_{op}$	อุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (°C) Operative temperature	$T_{dp}$	อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (°C) Dew point temperature
$h_r$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน Radiant coefficient	$T_{sat@P_v}$	อุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำ (°C) Saturate temperature
$h_c$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน Convection coefficient	$\phi$	ความชื้นสัมพัทธ์ (%) Relative humidity
$T_{MRT}$	อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (°C) Mean radiant temperature	$m_a$	ปริมาณอากาศแห้ง (kg) Mass of dry air
$T_{air}$	อุณหภูมิอากาศ (°C) Air temperature	$m_v$	ปริมาณไอน้ำในอากาศ (kg) Mass of water vapor
$T_{db}$	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°C) Dry bulb temperature	$P_v$	ความดันไอของไอน้ำในอากาศ (kPa) Partial pressure of the vapor (kPa)
$\omega$	อัตราส่วนความชื้น (kg / kg - dry air) Humidity ratio	$P_g$	ความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัว Saturation pressure of the vapor

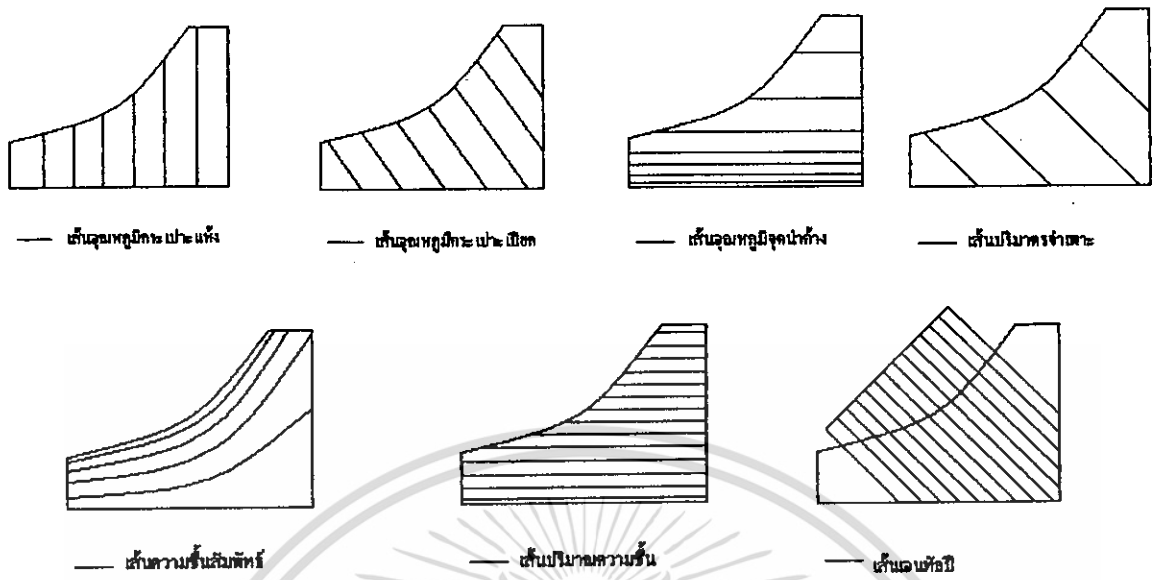
ระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสี ใช้เป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการใช้ไอน้ำเย็นที่ผลิตจากเครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) ไหลภายในท่อทองแดงแล้วติดไว้กับแผ่นอลูมิเนียมบนเพดาน ซึ่งการทำงานจะเป็นการทำงานในรูปแบบผสมร่วมกับคอยล์เย็นด้วย เพราะเพียงแต่ระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีอย่างเดียวยังไม่สามารถลดความชื้นภายในอากาศได้ และเนื่องจากระบบทำความเย็นระบบนี้เป็นระบบปิด คือไม่มีการถ่ายเทของน้ำซึ่งเป็นสารทำความเย็นออกจากระบบ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่อง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย

อย่างไรก็ตามระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีมีข้อกัคือ การควบแน่นของไอน้ำในอากาศอาจเกิดขึ้นบนพื้นผิวเพดานทำความเย็น ดังนั้นเราต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของพื้นผิวเพดานทำความเย็นไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิควบแน่นของอากาศภายในห้อง เพื่อป้องกันการเกิดการควบแน่น และยังคงคำนึงถึงอุณหภูมิของการแผ่รังสี ซึ่งมีผลต่อความรู้สึกสบายของคนเราด้วย การติดตั้งระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็นในอาคารสำนักงานต่าง ๆ นอกจากต้องคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความสวยงามทางด้านสถาปัตยกรรมเป็นผลให้ระบบปรับอากาศแบบแผ่รังสีได้ถูกคิดค้นขึ้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของระบบปรับอากาศที่น่าสนใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดรูป 1 แผ่นภาพไซโครเมตริกชาร์ตนี้ไปใช้

รูป 2 คุณสมบัติต่าง ๆ ในไซโครเมตริกซ์ชาร์ต



1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาและทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์และการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานทำความเย็น
- เพื่อศึกษาและทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิห้องและการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานทำความเย็น
- เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างภาระแสงไฟและการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานทำความเย็น

1.2 ขอบเขตของโครงการ

- หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิกระเปาะเปียก เพื่อหาสถานะเริ่มต้นของการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน
- หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน และอุณหภูมิกระเปาะเปียกในขณะที่ยังค่าอุณหภูมิห้องต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน
- ทดลองหาลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้นเมื่อเพดานทำความเย็นมีภาระแสงไฟมากระทำ

2. ทฤษฎี

2.1 หลักความสบาย

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกสบายของร่างกายมนุษย์ คือ เสื้อผ้าที่มนุษย์สวมใส่ ระดับการทำกิจกรรม อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ และการเคลื่อนที่ของอากาศ (ความเร็วอากาศ) โดยอุณหภูมิที่รู้สึกสบายของมนุษย์อยู่ในช่วง 22 - 27 เซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 40 - 60 และความเร็วของอากาศประมาณ 0.1-0.3 เมตรต่อวินาที [7]

2.2 อุณหภูมิโอเพอเรทีฟ

อุณหภูมิโอเพอเรทีฟ คือ อุณหภูมิที่ผู้อยู่อาศัยสามารถรู้สึกหรือสัมผัสได้จริง ๆ เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีกับสิ่งแวดล้อม สามารถวัดได้ 2 วิธี

- ใช้เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิโอเพอเรทีฟโดยตรง
- ใช้สมการคำนวณหาอุณหภูมิโอเพอเรทีฟ เขียนได้ดังนี้

$$T_{op} = \frac{h_r T_{MRT} + h_c T_{air}}{h_r + h_c} \quad \text{--- (1)}$$

ถ้าความเร็วลมมีค่าน้อยกว่า 0.4 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 50 องศาเซลเซียส สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนประมาณว่ามีค่าเท่ากัน ดังนั้นในสมการ (1) อาจเขียนได้เป็น

$$T_{op} = \frac{T_{MRT} + T_{air}}{2} \quad \text{--- (2)}$$

2.3 ไซโครเมตริกซ์ (Psychrometrics)

เป็นวิชาที่ว่าด้วยการศึกษาความสัมพันธ์ทางอุณหพลศาสตร์ของส่วนผสมระหว่างไอน้ำและก๊าซในอากาศ ประกอบไปด้วย อากาศแห้ง (Dry air) และความชื้น (Moisture) เป็นองค์ประกอบ อากาศแห้ง 1 โมล จะมีก๊าซไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 79 รองลงมาคือออกซิเจนร้อยละ 20 และก๊าซอื่นๆ มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.3.1 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature,  $T_{db}$ )

เป็นอุณหภูมิที่วัดได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature, $T_{dp}$ )

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง คืออุณหภูมิที่เริ่มมีการควบแน่นขึ้นเมื่ออากาศถูกทำให้เย็นลงที่ความดันคงที่ หรือคืออุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดันไอของน้ำ

$$T_{dp} = T_{sat}@P_v \quad \text{--- (3)}$$

### 2.3.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH)

ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นการวัดระดับของการอิ่มตัวของอากาศที่อุณหภูมิกระเพาะแห่งใด ๆ ซึ่งแสดงเป็นร้อยละของการอิ่มตัว โดยที่ร้อยละ 100 ของความชื้นสัมพัทธ์แสดงถึงอากาศอิ่มตัว และร้อยละ 0 ของความชื้นสัมพัทธ์แสดงถึงอากาศแห้งสมบูรณ์ ส่วนค่าความชื้นจำเพาะเป็นค่าของอัตราส่วนความดันของไอน้ำที่เกิดขึ้นจริงต่อความดันรวมของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเพาะแห่งใด ๆ ดังสมการ (4)

$$\phi = \frac{P_v}{P_g} \quad \text{--- (4)}$$

### 2.3.4 เอนทัลปี (Enthalpy)

เอนทัลปี คือค่าพลังงานความร้อนที่มีในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง เมื่อเทียบกับค่าความร้อนที่อุณหภูมิอ้างอิง (นิยมใช้ 0 เซลเซียส ในระบบเมตริกซ์)

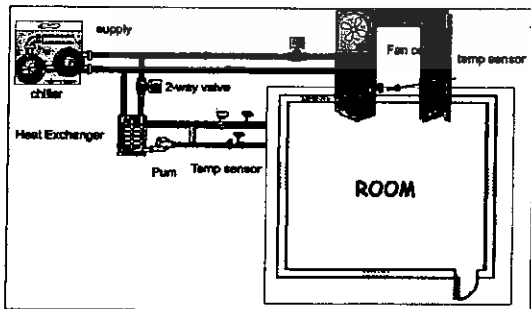
### 2.3.5 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio)

อัตราส่วนความชื้น คือมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง ขณะเดียวกันอาจเรียกว่าความชื้นสัมบูรณ์หรือความชื้นจำเพาะ

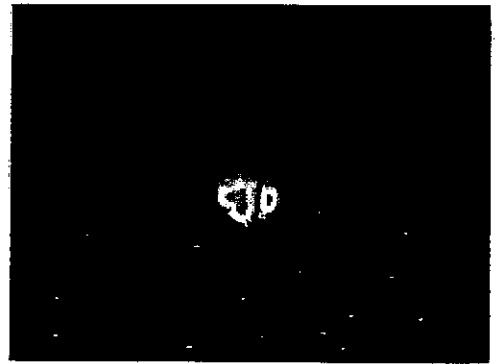
$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{--- (5)}$$

## 3. อุปกรณ์การทดลอง

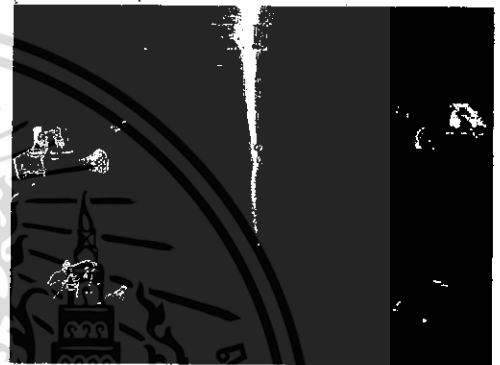
- ห้องทดลองขนาดกว้าง 4.5 เมตร ยาว 4.3 เมตร สูง 2.7 เมตร
- หลอดไฟขนาด 60 วัตต์ จำนวน 4 หลอด
- กล้องถ่ายรูป
- เครื่องเพิ่มความชื้นให้ระบบ



รูป 3 จำลองห้องทำความเย็น



รูป 4 เครื่องเพิ่มความชื้น



รูป 5 แสดงหลอดไฟที่ใช้ในห้องทดลอง

## 4. ขั้นตอนในการดำเนินงาน

- ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการควบแน่น และการควบคุมห้องทดสอบให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ
- ติดตั้งหลอดไฟและอุปกรณ์ให้ความชื้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 24 เซลเซียส ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 23 เซลเซียส ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 หลังจากเกิดนั้นประมาณ 30 นาที เพิ่มภาระแสงไฟ 120 วัตต์ ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น แล้วจึงทำการทดลองที่ภาระแสงไฟ 240 วัตต์ ศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวเพดาน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง และลักษณะการควบแน่นที่เกิดขึ้น
- ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 5. แต่ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 75
- ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 5. แต่ปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ

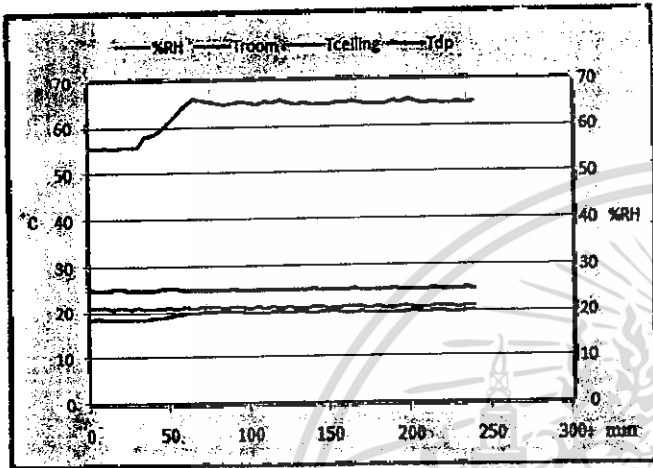
อุณหภูมิห้อง (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)
25	65, 70, 75, 80
24	65, 70, 75, 80
23	65, 70, 75, 80

ตาราง 1 แสดงกรณีทดลอง

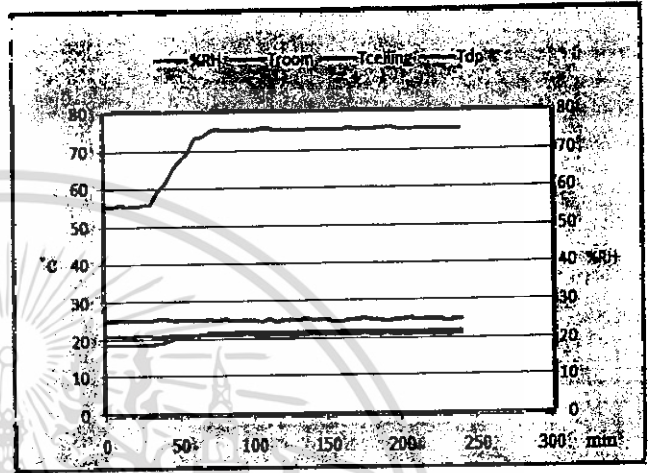
อุณหภูมิห้อง (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	ไฟ (วัตต์)
25	70	120, 240
25	75	120, 240
25	80	120, 240

ตาราง 2 แสดงกรณีทดลองเมื่อมีภาระจากแสงไฟ

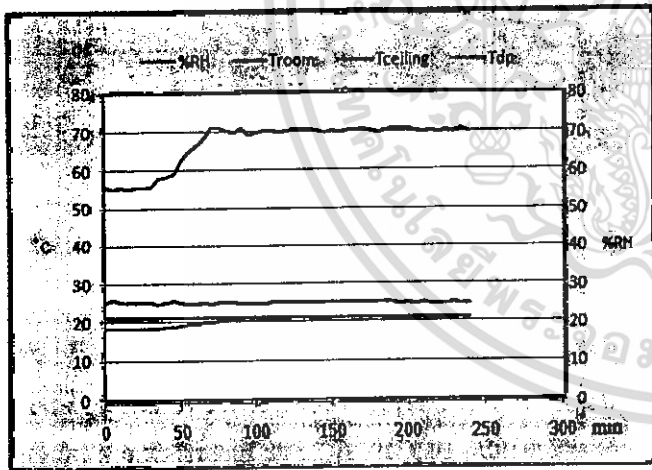
5. ผลการทดลอง



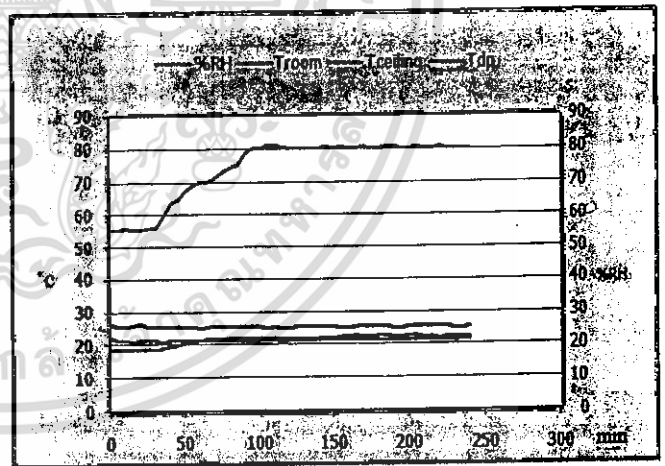
รูป 6 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 65 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส



รูป 8 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 75 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส



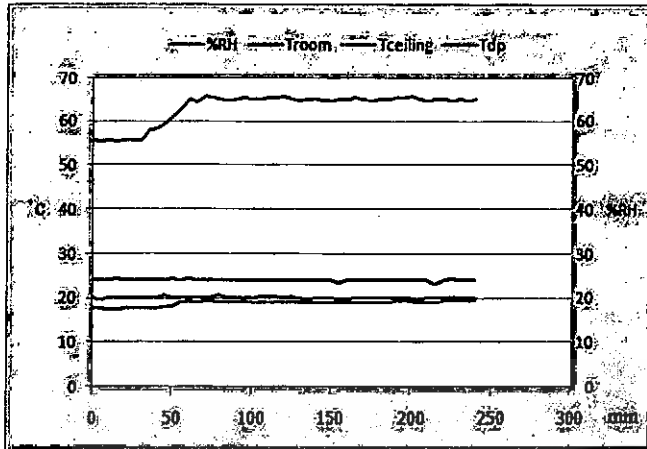
รูป 7 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 70 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส



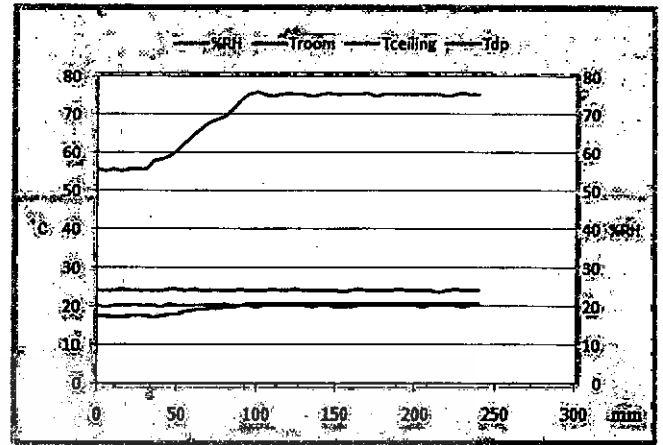
รูป 9 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 80 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส

จากรูป 6 ถึง 9 พบว่าเมื่อเข้าสู่สมดุลอุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็น 20.1, 20.9, 21.7 และ 22.5 เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานจะมีค่าประมาณ 21 เซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวเพดานเป็น 0.9, 0.1, 0.7 และ 1.5 เซลเซียส ตามลำดับ หลังจากการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด เมื่อทำการทดลองที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 ใช้เวลาประมาณ 15 วินาที เริ่มเกิดฝ้าที่พื้นผิวเพดานเล็กน้อยและค่อนข้าง

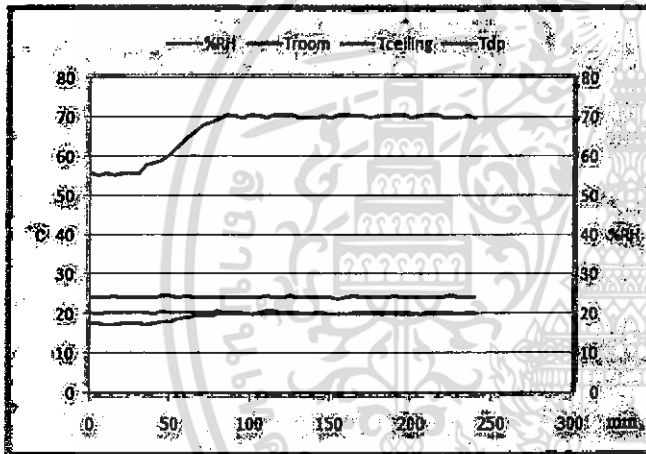
ข้างครั้งที่ตลอด 2 ชั่วโมง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 75 และ 80 ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นน้อยมาก หลังจากนั้นจะมีลักษณะเป็นฝ้ากระจายทั่วพื้นผิว



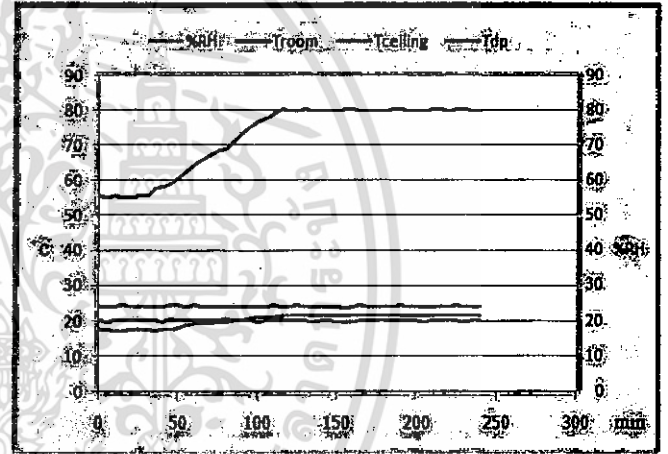
รูป 10 แสดงความสัมพันธ์ภายในห้องร้อยละ 65  
อุณหภูมิห้องคงที่ 24 เซลเซียส



รูป 12 แสดงความสัมพันธ์ภายในห้องร้อยละ 75  
อุณหภูมิห้องคงที่ 24 เซลเซียส



รูป 11 แสดงความสัมพันธ์ภายในห้องร้อยละ 70  
อุณหภูมิห้องคงที่ 24 เซลเซียส



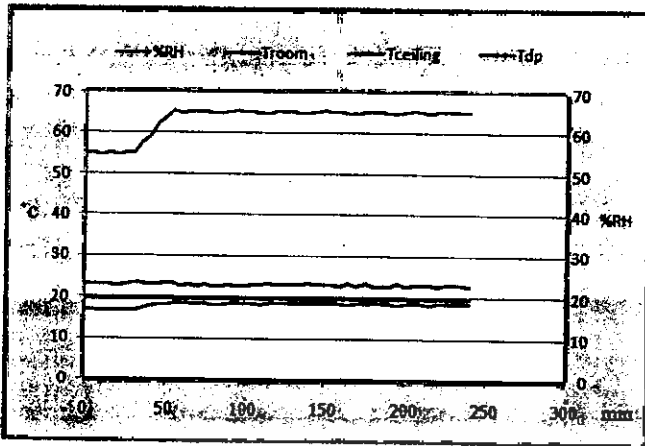
รูป 13 แสดงความสัมพันธ์ภายในห้องร้อยละ 80  
อุณหภูมิห้องคงที่ 24 เซลเซียส

จากรูป 10 ถึง 13 พบว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิห้องเป็น 24 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75, และ 80 อุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็น 19.4, 19.8, 20.6 และ 21.3 เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานจะอยู่ที่ประมาณ 20.3 เซลเซียส ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 0.9, 0.5, 0.3 และ 1.0 เซลเซียส ตามลำดับ หลังจากปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 และ 70 ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด เมื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 75 การควบแน่นมีลักษณะเป็นฝ้ากระจายใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นประมาณ 15 วินาที เมื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 80 การควบแน่นมีลักษณะเป็นฝ้ากระจายมากขึ้น ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นน้อยมาก

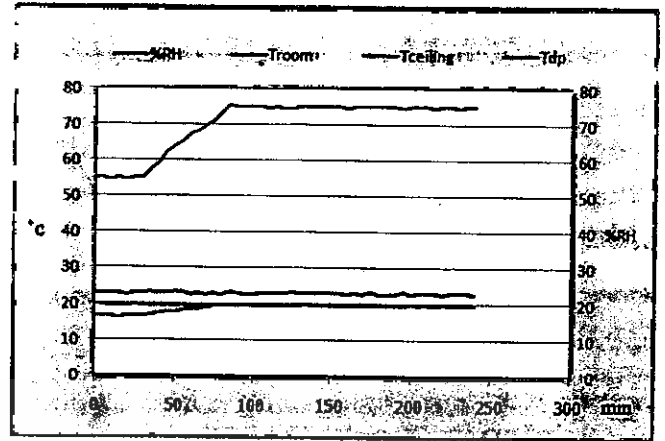
จากรูป 14 ถึง 17 พบว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิห้องเป็น 23 เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65, 70, 75 และ 80 พบว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็น 18.3, 19, 19.7 และ 20.2 เซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานจะอยู่ที่ประมาณ 19.6 เซลเซียส ดังรูปที่ 22 ถึง 29 จะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 1.3, 0.6, 0.1 และ 0.6 เซลเซียส ตามลำดับ หลังจากการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 65 และ 70 ไม่สังเกตเห็นการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 75 ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นประมาณ 30 วินาที เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 80 ใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นประมาณ 20 วินาที มีลักษณะเป็นฝ้ากระจายน้อยกว่ากรณีอุณหภูมิห้องเป็น 24 และ 25 เซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรตีพิมพ์หรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

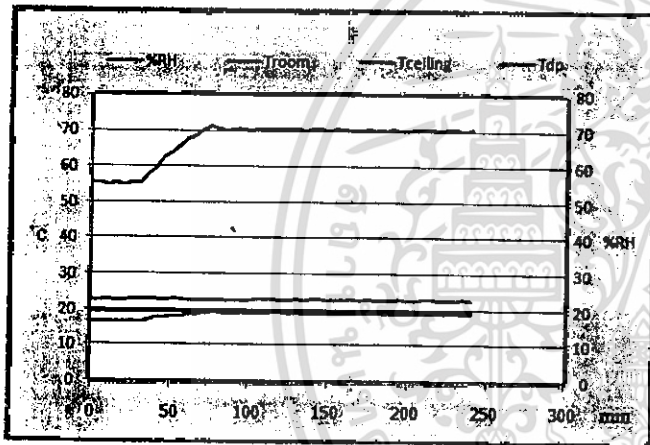
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



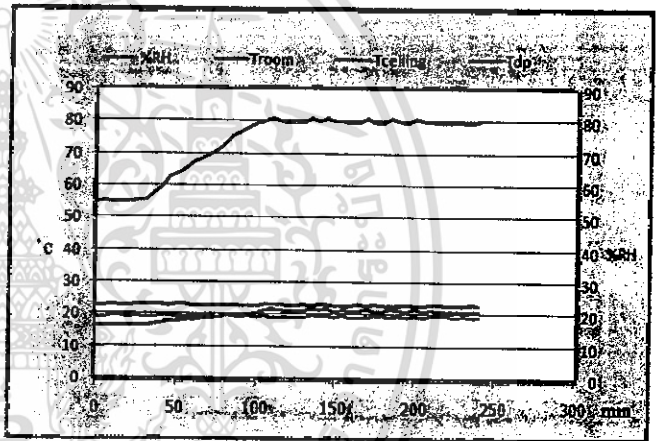
รูป 14 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 65 อุณหภูมิห้องคงที่ 23 เซลเซียส



รูป 16 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 75 อุณหภูมิห้องคงที่ 23 เซลเซียส

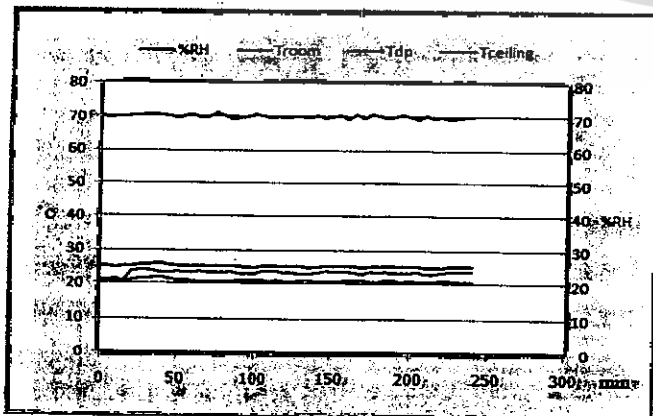


รูป 15 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 70 อุณหภูมิห้องคงที่ 23 เซลเซียส

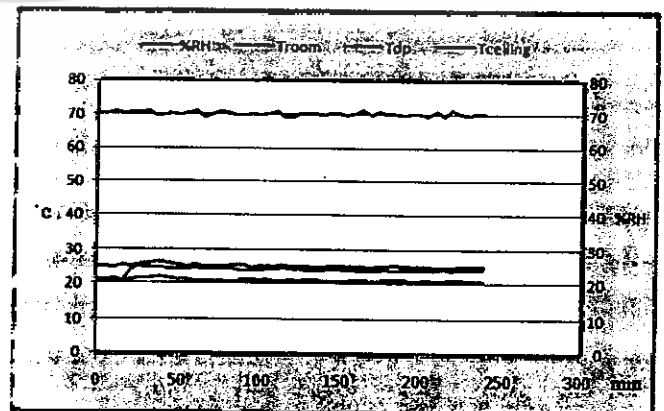


รูป 17 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 80 อุณหภูมิห้องคงที่ 23 เซลเซียส

- ผลการทดลองกรณีมีการจากแสงไฟ

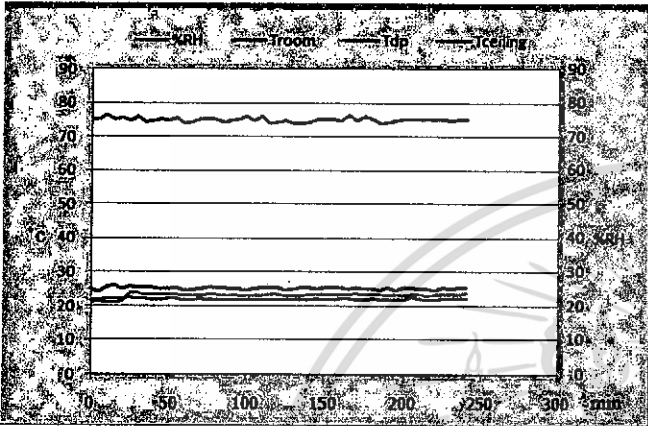


รูป 18 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 70 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส การะแสงไฟ 120 วัตต์



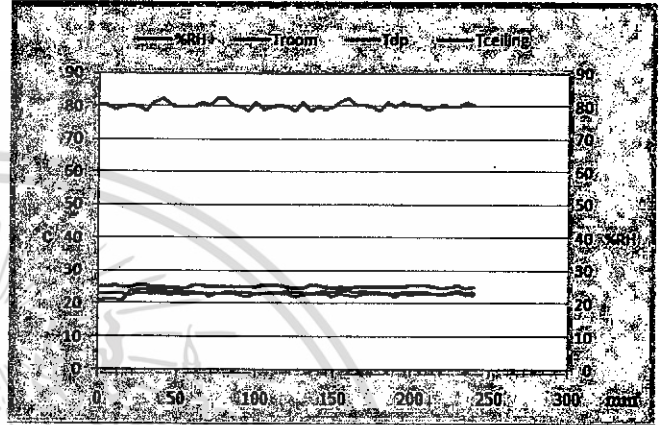
รูป 19 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 70 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส การะแสงไฟ 240 วัตต์

จากรูป 18 ถึง 19 พบว่าเมื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 70 ภาวะจากแสงไฟ 120 วัตต์ ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.9 เซลเซียส เป็น 23.4 เซลเซียส ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้เวลาประมาณ 8 นาที ที่ภาวะจากแสงไฟเป็น 240 วัตต์ ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.9 เซลเซียส เป็น 24.1 เซลเซียส ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

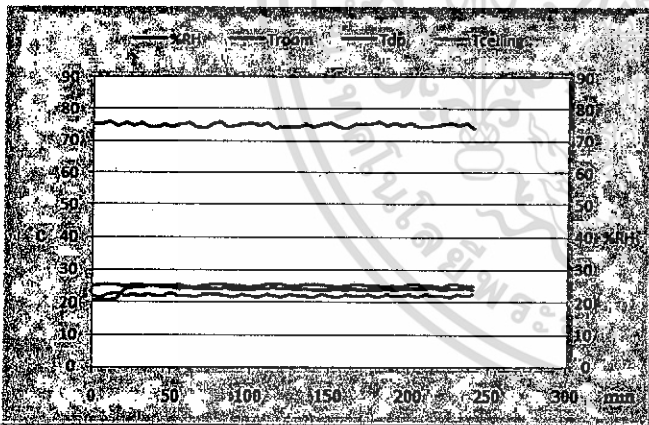


รูป 20 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 75 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ภาวะแสงไฟ 120 วัตต์

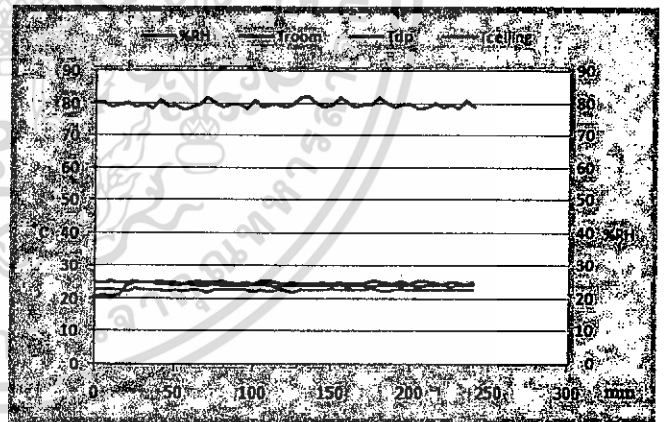
จากรูป 22 ถึง 23 พบว่าเมื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็นร้อยละ 80 ภาวะแสงไฟ 120 วัตต์ ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 21.1 เซลเซียส เป็น 23.2 เซลเซียส ฝ้าจางลงอย่างช้า ๆ และเกิดหยดน้ำขนาดเล็กปะปนกับฝ้า ใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาที ที่ภาวะจากแสงไฟเป็น 240 วัตต์ ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.9 เซลเซียส เป็น 24.1 เซลเซียส ฝ้าจะจางลงอย่างช้า ๆ เกิดเป็นหยดน้ำขนาดเล็ก และค่อย ๆ จางหายไป ใช้ระยะเวลาประมาณ 21 นาที



รูป 22 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 80 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ภาวะแสงไฟ 120 วัตต์



รูป 21 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 75 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ภาวะแสงไฟ 240 วัตต์



รูป 23 แสดงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องร้อยละ 80 อุณหภูมิห้องคงที่ 25 เซลเซียส ภาวะแสงไฟ 240 วัตต์

จากรูป 20 ถึง 21 พบว่าเมื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 ภาวะแสงไฟ 120 วัตต์ ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.9 เซลเซียส เป็น 23.1 เซลเซียส อุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วกลับสู่ระดับเดิม ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้ระยะเวลาประมาณ 19 นาที ที่ภาวะแสงไฟเป็น 240 วัตต์ อุณหภูมิพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้นจาก 20.9 เซลเซียส เป็น 23.8 เซลเซียส ฝ้าที่เกิดจะค่อย ๆ จางหายไป ใช้เวลาประมาณ 11 นาที

6. สรุปผลการทดลอง

- จากการทดลองทำให้ทราบว่า การควบแน่นเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง การควบแน่นเกิดขึ้นเร็วมากเนื่องจากวัสดุที่ใช้เป็นพื้นผิวเพดานมีความเรียบ และมีค่าการนำความร้อนสูง (เมื่อเทียบกับพื้นผิววัสดุอื่น เช่น กระเบื้องเซรามิก) ทำให้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ ไม่สามารถ

บันทึกช่วงเวลาระหว่างที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวเพดานเริ่มต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างจนเกิดการควบแน่น

- ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น จากการทดลองพบว่าในกรณีที่ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ ยิ่งความชื้นสัมพัทธ์สูงชันการควบแน่นจะเกิดเร็วขึ้นตาม และหากควบคุมความชื้นสัมพัทธ์คงที่ ยิ่งอุณหภูมิห้องลดต่ำลงการควบแน่นจะเกิดช้าลงตาม
- ปริมาณการควบแน่นเป็นฝ้า จากการทดลองพบว่าในกรณีที่ควบคุมอุณหภูมิห้องคงที่ ยิ่งความชื้นสัมพัทธ์สูงชันการควบแน่นจะเกิดมากขึ้น และหากควบคุมความชื้นสัมพัทธ์คงที่ อุณหภูมิห้องลดต่ำลงการควบแน่นจะเกิดน้อยลง

กรณีที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 25 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน 21 เซลเซียส พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน เพราะอุณหภูมิพื้นผิวเพดานยังสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่า 20.1 เซลเซียส จะไม่ทำให้เกิดการควบแน่น
- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70, 75 และ 80 อุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.1, 0.7 และ 1.5 เซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 20.9, 21.7 และ 22.5 เซลเซียส ตามลำดับ

กรณีที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 24 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 และ 70 อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน 20.3 เซลเซียส พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวเพดาน ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่า 20.3 เซลเซียส
- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และ 80 อุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.3 และ 1.0 เซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 20.6 และ 21.3 เซลเซียส ตามลำดับ

กรณีที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 23 เซลเซียส

- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 และ 70 อุณหภูมิพื้นผิวเพดาน 19.6 เซลเซียส พบว่าไม่เกิดการควบแน่นที่พื้นผิวเพดานแต่อย่างใด ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำกว่า 19.6 เซลเซียส
- ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 และ 80 อุณหภูมิพื้นผิวเพดานต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.1 และ 0.6 เซลเซียส ทำให้เกิดการควบแน่น ดังนั้นจึงควรควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานไม่ให้ต่ำ

- กว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างคือ 20.9 และ 22.5 เซลเซียส ตามลำดับ

กรณีมีการะจากแสงไฟกระทำต่อพื้นผิวเพดานทำความเย็น

- เมื่อควบคุมให้ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิห้องคงที่ ภาวะจากแสงไฟยิ่งมากยิ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการระเหยของฝ้าบนพื้นผิวเพดานน้อยลง
  - เมื่อควบคุมให้ภาวะจากแสงไฟและอุณหภูมิห้องคงที่ ยิ่งความชื้นสัมพัทธ์สูงยิ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการระเหยของฝ้าบนพื้นผิวเพดานเพิ่มขึ้น
- หากการระเหยของฝ้าบนพื้นผิวเพดานทำความเย็นเป็นไปอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดการกลั่นตัวของฝ้ากลายเป็นหยดน้ำขนาดเล็กได้

## 7. ข้อเสนอแนะ

- เพื่อควบคุมอุณหภูมิพื้นผิวเพดานทำความเย็น ควรมีการติดตั้งวาล์วปรับอุณหภูมิน้ำเข้าเพดานทำความเย็น
- ควรออกแบบเพดานทำความเย็นให้มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น
- อุปกรณ์วัดอุณหภูมิต่าง ๆ ผ่านการถอดเปลี่ยนตำแหน่งบ่อยครั้งอาจทำให้การวัดค่าเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ควรมีการเปลี่ยนใหม่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yunus A.Cengel and Michel A.Boles, "Thermodynamics: An Engineering Approach," 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, 2002
- [2] Sonntag, Borgnakke and Van Wylen, "Fundamentals of Thermodynamics," 6<sup>th</sup> edition, Wiley & Sons, 2003
- [3] พงษ์เจต พรหมวงศ์, "การถ่ายเทความร้อน," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [4] อัครเดช สินธุภัก, "การปรับอากาศ," พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [5] อัครเดช สินธุภัก, "การทำทำความเย็น," พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [6] ธนากร ว่องวิญญู, นพดล ตริยะประเสริฐพร, จินดา เจริญพรพาณิชย์ "ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากเพดาน," ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [7] หวิศักดิ์ ฆมานายวง, ทิพากร จันทร์ดำรง, จินดา เจริญพรพาณิชย์ "การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี," ภาควิชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้