

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี
Control Strategy of Radiant Cooling System

นายทวีศักดิ์ หมานขวง
นายทิพากร จันทรดำรง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....62555
วัน,เดือน,ปี.....19 ส.ค. 2549

.b.....11686136
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี
Control Strategy of Radiant Cooling System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2458

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

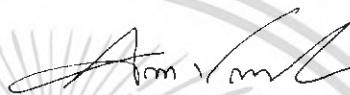
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสี

Control Strategy of Radiant Cooling System

ผู้จัดทำ

1. นายทวีศักดิ์ หมานขวง รหัสประจำตัว 45010296
2. นายทิพากร จันทร์ดำรง รหัสประจำตัว 45010306



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น

นายทวิศักดิ์ หมานขวง 45010296

นายทิพากร จันทร์ดำรง 45010306

ศศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์

ปีการศึกษาที่ 2548

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการนำเสนอการควบคุมระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น (Radiant Floor Cooling, RFC) โดยเราได้จำลองห้องทดสอบให้มีลักษณะคล้ายกับอาคารขนาดใหญ่ และเราสามารถควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นเข้าห้องทดสอบเพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องได้ และหาวิธีการออกแบบการควบคุมการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด โดยหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาพื้นอุณหภูมิต่ำเกินไปจนเกิดความรู้สึกไม่สบาย และเกิดการควบแน่นที่พื้นผิวห้องทดสอบ โดยที่ขอบเขตของโครงการจะหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่กับอัตราการไหลของน้ำเย็นที่เข้าห้องทดสอบ และอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature) ขณะที่พื้นได้รับการระความร้อนจากแสงอาทิตย์ รวมถึงถึงลักษณะการกระจายของอุณหภูมิภายในห้อง นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นเมื่อใช้วัสดุปูพื้นห้องชนิดต่าง ๆ

จากการทดลองพบว่าสามารถหาอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 7 ลิตร/นาทึ สามารถควบคุมอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดทั้งวันเมื่อเราให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบ ส่วนการกระจายอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิโอเปอเรทีฟพบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณห้องเมื่อให้ภาระแสงในระดับต่าง ๆ โดยบริเวณหลังห้องมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณหน้าห้องเพียง 0.2 องศาเซลเซียสเท่านั้น และที่ความสูง 110 เซนติเมตร มีอุณหภูมิสูงกว่าที่ระยะ 60 เซนติเมตรอยู่ 1.5 องศาเซลเซียส และลักษณะของอุณหภูมิห้องเมื่อใช้วัสดุปูพื้นชนิดต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงของหลักความสบาย อุณหภูมิห้องไม่สูงแม้จะมีวัสดุมาปูบนพื้นห้องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Control Strategy of Radiant Floor Cooling System

Taweesak Manyang

Tipakorn Chandamrong

Assist. Prof. Chinda Charoenphonphanich Advisor

ABSTRACT

This project concerns about Radiant Floor Cooling, RFC. The test room was simulated from the big buildings. The water flow rate has adjusted to control the thermal comfort in the room. The control strategy for this system has designed to obtain the maximum efficiency and thermal comfort for the occupants without problem of condensation. The scope of project is to study the relation of operative temperature, floor surface temperature and inner floor temperature with various cooling water flow rate. The distribution of operative temperature when the floor receives direct sunshine was also examined. Otherwise, the effect of material type of floor covering on floor surface temperature and room temperature was observed.

The experimental results show that the suitable flow rate for this case is 7 liters/minute. The floor surface and room temperature was controlled under property level in all day using this flow rate. The distribution of room temperature and operative temperature are almost homogeneous around the test room with various level of solar load. The different of air temperature is about 0.2 Celsius in horizontal plane and 1.5 Celsius in vertical plane between 110 and 60 cm height. The room temperature was maintained within thermal comfort level when using several type of floor covering material.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจาก หลากฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบไม่ได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายทวิศักดิ์ همانขวง

นายทิพากร จันทร์คำรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2 พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์	
2.1.1 ความร้อน (Heat)	4
2.1.2 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)	5
2.1.3 ความร้อนแฝง (Latent Heat)	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอิทธิพลของแสงอาทิตย์ที่มีต่อการทำความร้อน โดยการแผ่รังสีจากพื้น	5
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการเกิด Condensation บนวัสดุปกคลุมพื้น	9
บทที่ 3 ทฤษฎีและการคำนวณ	
3.1 การปรับอากาศ	10
3.2 ลักษณะพื้นฐานของการปรับอากาศ	10
3.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	17
3.4 หลักความสบาย (Human Comfort)	18
3.5 การออกแบบและคำนวณ	24
3.5.1 การออกแบบ	26
3.5.2 การคำนวณ	27
บทที่ 4 การทดสอบ	
4.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน	31
4.2 อุปกรณ์การทดสอบ	31
4.3 วิธีการทดสอบ	33
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	73
6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป	74
บรรณานุกรม	75



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2 พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
รูปที่ 2-1 แผนผังการควบคุมระบบของพื้นและแฟนคอยล์	6
รูปที่ 2-2 แผนผังการทำงานของคอยล์เย็นเพื่อควบคุมความชื้น	7
รูปที่ 2-3 แผนผังการทำงานของขดลวดทำความร้อน	7
รูปที่ 2-4 แสดงวงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นบนแผ่นทดสอบ	9
บทที่ 3 ทฤษฎีและการคำนวณ	
รูปที่ 3-1 แสดงเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในงานปรับอากาศ	11
รูปที่ 3-2 แสดงอุณหภูมิของสภาพารนไฮต์และองศาเซลเซียส	12
รูปที่ 3-3 แสดงทฤษฎีพลังงานจลน์ของโมเลกุลแก๊ส	14
รูปที่ 3-4 แสดงเส้นกราฟในตัวอย่างของการกระจายอุณหภูมิของ Maxwell	15
รูปที่ 3-5 แสดงช่วงเวลาพื้นที่ได้รับภาระรังสีความร้อนและไม่ได้รับภาระรังสีความร้อน	24
รูปที่ 3-6 แผนภูมิแสดงภาระรังสีความร้อนตลอดวัน	26
รูปที่ 3-7 แสดงตำแหน่งการวางท่อน้ำ	26
รูปที่ 3-8 แบบทรงกระบอกอุณหภูมิคงที่ยาว L วางในแนวนอน ฝังในตัวกลางกึ่งอนันต์	27
รูปที่ 3-9 ชิ้นส่วนพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ	28
บทที่ 4 การทดสอบ	
รูปที่ 4-1 แสดงลักษณะการวางท่อน้ำไว้ภายใต้พื้นห้องทดสอบ	32
รูปที่ 4-2 แผนผังแสดงตำแหน่งของเซ็นเซอร์และ โคมไฟ ของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น	32
รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะการวาง โอเปอเรทีฟเซนเซอร์	33
รูปที่ 4-4 แสดงตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ใช้วัดการกระจายอุณหภูมิภายในห้อง	34
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	
รูปที่ 5-1 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 0 วัตต์/ตารางเมตร	35
รูปที่ 5-2 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 10 วัตต์/ตารางเมตร	35
รูปที่ 5-3 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 20 วัตต์/ตารางเมตร	36
รูปที่ 5-4 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 30 วัตต์/ตารางเมตร	36
รูปที่ 5-5 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 40 วัตต์/ตารางเมตร	36
รูปที่ 5-6 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 50 วัตต์/ตารางเมตร	37
รูปที่ 5-7 กราฟอุณหภูมิโอเปอเรทีฟเปรียบเทียบค่าระหว่าง จากการทดลองและจากการคำนวณ	38
รูปที่ 5-8 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2 ลิตร/นาทึ	39
รูปที่ 5-9 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 4 ลิตร/นาทึ	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5-10 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 6 ลิตร/นาที่	40
รูปที่ 5-11 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 8 ลิตร/นาที่	40
รูปที่ 5-12 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 10 ลิตร/นาที่	40
รูปที่ 5-13 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 12 ลิตร/นาที่	41
รูปที่ 5-14 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 14 ลิตร/นาที่	41
รูปที่ 5-15 กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำคงที่ที่ 13 องศาเซลเซียส	42
รูปที่ 5-16 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน	43
รูปที่ 5-17 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.032 ลิตร/นาที่	43
รูปที่ 5-18 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน	44
รูปที่ 5-19 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.139 ลิตร/นาที่	45
รูปที่ 5-20 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2 ลิตร/นาที่	45
รูปที่ 5-21 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 4 ลิตร/นาที่	46
รูปที่ 5-22 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 6 ลิตร/นาที่	46
รูปที่ 5-23 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 8 ลิตร/นาที่	46
รูปที่ 5-24 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 10 ลิตร/นาที่	47
รูปที่ 5-25 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 12 ลิตร/นาที่	47
รูปที่ 5-26 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 14 ลิตร/นาที่	47
รูปที่ 5-27 กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำคงที่ที่ 14 องศาเซลเซียส	48
รูปที่ 5-28 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน	49
รูปที่ 5-29 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.789 ลิตร/นาที่	50
รูปที่ 5-30 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน	51
รูปที่ 5-31 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.89 ลิตร/นาที่	51
รูปที่ 5-32 จุดที่ 1 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-33 จุดที่ 1 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-34 จุดที่ 1 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-35 จุดที่ 1 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-36 จุดที่ 1 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-37 จุดที่ 1 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-38 จุดที่ 3 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-39 จุดที่ 3 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร	54
รูปที่ 5-40 จุดที่ 3 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร	55
รูปที่ 5-41 จุดที่ 3 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5-42 จุดที่ 3 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร	55
รูปที่ 5-43 จุดที่ 3 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร	55
รูปที่ 5-44 จุดที่ 1 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร	55
รูปที่ 5-45 จุดที่ 1 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร	55
รูปที่ 5-46 จุดที่ 1 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-47 จุดที่ 1 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-48 จุดที่ 1 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-49 จุดที่ 1 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-50 จุดที่ 3 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-51 จุดที่ 3 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-52 จุดที่ 3 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-53 จุดที่ 3 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร	56
รูปที่ 5-54 จุดที่ 3 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร	57
รูปที่ 5-55 จุดที่ 3 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร	57
รูปที่ 5-56 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 0 วัตต์/ตารางเมตร	58
รูปที่ 5-57 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 10 วัตต์/ตารางเมตร	58
รูปที่ 5-58 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 20 วัตต์/ตารางเมตร	58
รูปที่ 5-59 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 30 วัตต์/ตารางเมตร	59
รูปที่ 5-60 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 40 วัตต์/ตารางเมตร	59
รูปที่ 5-61 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 50 วัตต์/ตารางเมตร	59
รูปที่ 5-62 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 0 วัตต์/ตารางเมตร	60
รูปที่ 5-63 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 10 วัตต์/ตารางเมตร	61
รูปที่ 5-64 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 20 วัตต์/ตารางเมตร	61
รูปที่ 5-65 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 30 วัตต์/ตารางเมตร	61
รูปที่ 5-66 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 40 วัตต์/ตารางเมตร	62
รูปที่ 5-67 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ภาระแสง 50 วัตต์/ตารางเมตร	62
รูปที่ 5-68 กราฟแสดงผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ตำแหน่งความสูง 110 เซนติเมตร	63
รูปที่ 5-69 กราฟแสดงผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร	63
รูปที่ 5-70 กราฟความสามารถของพื้นเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำข้างที่ที่ 13 องศาเซลเซียส	65
รูปที่ 5-71 กราฟความสามารถของพื้นเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำข้างที่ที่ 14 องศาเซลเซียส	66
รูปที่ 5-72 กระเบื้องปูพื้นสีเขียวที่ใช้ทดสอบ	67
รูปที่ 5-73 กระเบื้องปูพื้นสีดำที่ใช้ทดสอบ	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5-74 หินแกรนิตปูพื้นที่ใช้ทดสอบ	67
รูปที่ 5-75 หินอ่อนปูพื้นที่ใช้ทดสอบ	67
รูปที่ 5-76 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นกระเบื้องสีเขียว เมื่อให้การระแสงตลอดทั้งวัน	68
รูปที่ 5-77 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นกระเบื้องสีดำ เมื่อให้การระแสงตลอดทั้งวัน	68
รูปที่ 5-78 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิหินแกรนิตปูพื้น เมื่อให้การระแสงตลอดทั้งวัน	69
รูปที่ 5-79 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิหินอ่อนปูพื้น เมื่อให้การระแสงตลอดทั้งวัน	69
รูปที่ 5-80 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิโอเปอเรทีฟกับอัตราการไหลในระดับต่าง ๆ	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
บทที่ 3 ทฤษฎีและการคำนวณ	
ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงค่าอัตราเมคคาโบริซึมที่ระดับกิจกรรมต่าง ๆ	21
ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงอัตราการสวมใส่เสื้อผ้าในลักษณะต่าง ๆ	22
ตารางที่ 3-3 แสดงค่าการรังสีความร้อนแสงอาทิตย์	25
บทที่ 5 ผลการทดสอบ	
ตารางที่ 5-1 แสดงผลการทดลองหาอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟจากเซนเซอร์ที่ใช้ทำการวัดค่า	37
ตารางที่ 5-2 แสดงอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ได้จากการคำนวณ	38
ตารางที่ 5-3 อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่อุณหภูมิน้ำเข้าครั้งที่ 13 องศาเซลเซียส	41
ตารางที่ 5-4 อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่อุณหภูมิน้ำเข้าครั้งที่ 14 องศาเซลเซียส	48
ตารางที่ 5-5 แสดงอุณหภูมิของห้องทดสอบที่อุณหภูมิน้ำเข้าห้องครั้งที่ 13 องศาเซลเซียส	52
ตารางที่ 5-6 แสดงอุณหภูมิของห้องทดสอบที่อุณหภูมิน้ำเข้าห้องครั้งที่ 14 องศาเซลเซียส	53
ตารางที่ 5-7 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ตำแหน่งความสูง 110 เซนติเมตร	57
ตารางที่ 5-8 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร	60
ตารางที่ 5-9 ผลการทดลองหาความสามารถของพื้นเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 13 องศาเซลเซียส	64
ตารางที่ 5-10 ผลการทดลองหาความสามารถของพื้นเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 14 องศาเซลเซียส	65
ตารางที่ 5-11 แสดงค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของวัสดุที่นำมาปูพื้นห้องทดสอบ	70
ตารางที่ 5-12 แสดงค่าอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่อัตราการไหลต่าง ๆ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันสภาพอากาศของโลกที่กำลังร้อนขึ้นร้อนขึ้นทำให้ความต้องการใช้ระบบทำความเย็นเพื่อช่วยบรรเทาความร้อนมีมากยิ่งขึ้น ในขณะที่เดียวกันการนำพลังงานความร้อนและแสงสว่างจากดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ก็เป็นสิ่งที่มนุษย์คำนึงถึงมากขึ้นเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบโครงสร้างอาคารในส่วนหลังคา ให้มีลักษณะโปร่งแสง เพื่อใช้ประโยชน์จากแสงสว่างของดวงอาทิตย์ แทนการใช้หลอดไฟฟ้าในการส่องสว่าง แต่สิ่งที่มาพร้อมกับแสงสว่างก็คือความร้อน

ความร้อนที่มากับแสงสว่างของดวงอาทิตย์ มีผลให้ต้องเพิ่มพลังงานในการขับอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อให้สามารถทำความเย็นได้มากขึ้น หากมีการออกแบบไม่ดี ค่าประหยัดที่ได้จากการลดการใช้งานของหลอดไฟลงนั้นอาจเทียบไม่ได้กับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งานระบบทำความเย็น

แต่ในปัจจุบันมีการนำระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น มาใช้กับห้องทำความเย็นที่เป็นอาคารซึ่งมีหลังคาโปร่งแสงในประเทศไทย ท่าอากาศยานนานาชาติสุวรรณภูมิเป็นแห่งแรกที่มีการนำระบบทำความเย็นดังกล่าวมาใช้ คำถามที่เกิดขึ้นต่อไปก็คือ ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นที่ว่านี้มีข้อแตกต่างจากระบบแบบเก่าที่เป็นแบบท่อลมเย็น (air duct) อย่างไร ทำไมจึงเลือกใช้ระบบทำความเย็นลักษณะนี้กับอาคารที่มีหลังคาโปร่งแสง

ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น เป็นระบบทำความเย็นที่ใช้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับพื้น (มีระบบท่อน้ำเย็นฝังไว้ใต้พื้น) โดยน้ำเย็นที่ใช้ ผลิตจากเครื่องทำน้ำเย็น (chiller) ข้อดีของระบบนี้ก็คือ ความสามารถในการดูดซับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยอาศัยพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้การที่พื้นมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศ ให้เกิดการแบ่งชั้นของอากาศ ส่งผลให้สามารถควบคุมขอบเขตการทำความร้อน ให้อยู่แก่ระดับความสูงของผู้อยู่อาศัยเท่านั้น ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่งนอกเหนือจากการใช้อุปกรณ์ในระบบให้มีขนาดเล็กลง และเนื่องจากระบบทำความเย็นระบบนี้เป็นระบบปิด คือ ไม่มีการรั่วไหลของน้ำซึ่งเป็นสารทำความเย็นออกจากระบบ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่อง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย

แต่ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นยังมีข้อจำกัด ตรงที่สามารถจัดการกับภาระความร้อนได้เฉพาะความร้อนสัมผัส (sensible heat) แต่กับภาระความร้อนแบบความร้อนแฝง (latent heat) ไม่สามารถจัดการได้ รวมทั้งไม่สามารถควบคุมความชื้นในพื้นที่ทำความเย็นได้ จึงต้องนำระบบทำความเย็นแบบลมเย็นมาช่วยในการจัดการกับความร้อนแฝงและควบคุมความชื้นในพื้นที่ทำความเย็นให้อยู่ในค่าที่ต้องการ กล่าวคือเมื่อความชื้นสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ ระบบลมเย็นจะทำงานเพื่อลดความชื้นออกจากระบบ การรวมทั้งสองระบบเข้าด้วยกันเรียกว่าระบบผสม (hybrid system)

การออกแบบระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็น ที่มีประสิทธิภาพจ่ายต่อการใช้งาน และที่สำคัญที่สุดคือการคำนึงถึงสวัสดิภาพที่ดีของผู้นำไปใช้งาน จึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรที่จะศึกษาและพัฒนาให้สิ่งอำนวยความสะดวกที่เรียกว่าระบบปรับอากาศ และระบบทำความเย็นนี้ ให้มีคุณสมบัติดังกล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างต้น และผู้จัดทำได้เลือกระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นระบบที่มีแนวโน้มนำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคตอันใกล้ จึงเป็นการดีหากมีการศึกษาเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับอนาคต โดยการทดลองจะต้องทราบทฤษฎี และจะทำการทดลองอย่างไรนั้นจะกล่าวต่อไปในเนื้อหาการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและวิธีการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น
2. ศึกษาและหาวิธีควบคุมระบบทำความเย็นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและอยู่ในหลักความสบาย
3. ศึกษาการลักษณะและกระจายของอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature) ภายในห้องเมื่อมีภาระของแสงในระดับต่าง ๆ กัน
4. ศึกษาความสามารถการทำความเย็นสูงสุดที่พื้นสามารถทำได้
5. ศึกษาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิห้องเมื่อใช้วัสดุพื้นในลักษณะต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ในการทดลองจะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรังสีความร้อน (จำลองรังสีความร้อนจากแสงแดด) มาตกกระทบที่พื้นผิวของห้องทดสอบ ผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบจะสนใจเฉพาะผลกระทบที่มีต่อความรู้สึกสบายของร่างกายมนุษย์ คือ อุณหภูมิพื้นผิว, อุณหภูมิห้อง, อุณหภูมิโอเปอเรทีฟ, ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) และอุณหภูมิน้ำเข้า จากนั้นจะนำเอาผลการทดลองมาวิเคราะห์กับปัจจัยความรู้สึกสบายของมนุษย์ เพื่อทำการทดลองควบคุมการทำความเย็นเพื่อทำความเย็นให้กับพื้นที่ในช่วงที่เหมาะสม ในการควบคุมให้อุณหภูมิพื้นผิวไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิการควบแน่นเป็นหยดน้ำ (Condensation) อุณหภูมิห้องและค่าความชื้นที่ไม่สูงหรือต่ำจนรู้สึกไม่สบาย ดังนี้

1. การจำลองภาระรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิภายในพื้น
3. หาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature) ระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองที่ใช้เซนเซอร์วัด (sensor)
4. หาความสัมพันธ์ของการกระจายอุณหภูมิห้อง (Room Temperature) และอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature) ภายในห้อง
5. หาความสัมพันธ์ของวัสดุพื้นชนิดต่าง ๆ กับค่าอุณหภูมิพื้น (Floor Temperature) และอุณหภูมิห้อง (Room Temperature)
6. หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature) กับอัตราการไหลของน้ำที่เข้าห้องทดสอบ

บทที่ 2

พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คนเรายังคงต้องการความรู้สึกที่สบาย กล่าวคือ เรามักจะต้องการที่จะอาศัยอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่ร้อนหรือเย็นเกินไป และไม่ชื้นหรือแห้งเกินไปด้วย แต่ความรู้สึกสบายนี้มักไม่มาโดยง่าย เนื่องจากความต้องการของมนุษย์นี้บ่อยครั้งที่จะไม่สอดคล้องกับสภาวะอากาศที่อยู่รอบ ๆ ดังนั้นความรู้สึกสบายจะได้มาก็จะสู้กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นสาเหตุของความรู้สึกไม่สบาย เช่น การที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป และมีความชื้นสูงหรือต่ำเกินไป

ร่างกายของคนเราสามารถถูกมองได้เหมือนกับกลจักรความร้อน (heat engine) ที่มีการป้อนพลังงานเข้าซึ่งพลังงานที่วานี้ก็คือ อาหาร และในทำนองเดียวกันกับกลจักรความร้อน ร่างกายของคนเราก็ต้องมีการปล่อยความร้อนที่เปล่าประโยชน์สู่สิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกัน ไม่ใช่อุณหภูมิของร่างกาย อุณหภูมิของร่างกายของคนเราที่มีสุขภาพดี จะถูกรักษาให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส ร่างกายของคนเราจะรู้สึกสบายในสภาวะแวดล้อมที่สามารถปล่อยความร้อนที่เปล่าประโยชน์ได้อย่างสะดวก

การถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ในสภาวะแวดล้อมที่ร้อนเราจะพบปัญหาที่ตรงกันข้าม เราดูเหมือนว่าไม่สามารถปล่อยความร้อนออกจากร่างกายได้เพียงพอ และเราจะรู้สึกรู้ว่าตัวของเรากำลังจะระเบิด เรามักจะสวมใส่เสื้อผ้าที่เบาบางเพื่อให้ความร้อนระบายออกจากร่างกายได้ง่าย และเรามักจะลดระดับของกิจกรรมให้น้อยลงเพื่อลดอัตราการเกิดความร้อนขึ้นภายในร่างกาย นอกจากนี้มักชอบเปิดพัดลมอย่างต่อเนื่องเพื่อทดแทนชั้นอากาศที่อบอุ่นกว่าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ร่างกาย เนื่องจากความร้อนภายในอากาศด้วยอากาศส่วนอื่น ๆ ภายในห้องที่เย็นกว่า ถ้าเราทำงานเบา ๆ หรือเดินช้า ๆ ครั้งหนึ่งของความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากร่างกายจะถูกปล่อยออกโดยการหายใจในรูปของความร้อนแฝง ขณะอีกครั้งหนึ่งจะถูกปล่อยออกโดยกลไกการพาและการแผ่รังสีในรูปของความร้อนสัมผัส ถ้าเราพักผ่อนหรือทำงานในสำนักงาน ความร้อนส่วนใหญ่ (ประมาณ 70%) จะถูกปล่อยออกมาในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible) แต่ถ้าเราทำงานหนัก ความร้อนส่วนใหญ่ (ประมาณ 60%) จะถูกปล่อยออกมาในความร้อนแฝง (latent heat) ร่างกายจะช่วยกำจัดความร้อนโดยจะมีเหงื่อออกมา ขณะที่เหงื่อเกิดการระเหย เหงื่อจะดูดซับความร้อนแฝงจากร่างกายและทำให้ร่างกายเย็นลง แต่การระบายความร้อนด้วยเหงื่อจะไม่ช่วยอะไรได้มากนัก ถ้าความชื้นของสภาพแวดล้อมมีใกล้เคียง 100%

อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกสบายของคนเราก็คือการถ่ายโอนความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างร่างกายกับพื้นที่ผิวที่อยู่รอบ ๆ เช่น ผืนดินและหน้าต่าง รังสีจากดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ผ่านห้วงอากาศโดยการแผ่รังสี เราจะรู้สึกอบอุ่นเมื่อเรายืนอยู่หน้าไฟ แม้ว่าอากาศระหว่างเราและไฟจะค่อนข้างเย็นก็ตาม ในทำนองเดียวกัน เราจะรู้สึกเย็นแม้ว่าเราจะอยู่ในห้องที่อบอุ่น ถ้าเพดานหรือพื้นผิวของกำแพงมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเกิดการถ่ายโอนความร้อนโดยตรงระหว่างร่างกายของเราและพื้นที่ผิวที่อยู่รอบ ๆ โดยการแผ่รังสีเครื่องทำความร้อนแบบแผ่รังสีมักจะถูกใช้สำหรับบริเวณที่ยากในการทำความร้อน เช่น ตู้ซ่อมรถยนต์

ความรู้สึกสบายของร่างกายมนุษย์มักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักที่สำคัญอยู่ 3 ประการคือ อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์และการเคลื่อนไหวของอากาศ อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมจะเป็นดัชนีหลักที่สำคัญที่สุดของความ รู้สึกสบาย คนส่วนใหญ่จะรู้สึกสบายถ้าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมอยู่ระหว่าง 22-27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ก็จะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกสบาย เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์นี้จะมีผลต่อปริมาณความร้อนของร่างกายที่จะสามารถระเหยออกได้โดยการระบาย ความชื้นสัมพัทธ์เป็นดัชนีที่ใช้ในการวัดความสามารถของอากาศในการดูดซับความชื้น กล่าวคือถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ที่สูง ก็จะมีผลทำให้การคายความร้อนออกจากร่างกายของคนเราโดยการระบายเกิดขึ้นช้าลง แต่ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ก็จะมีผลในทางตรงกันข้ามคือ ทำให้การคายความร้อนเกิดเร็วขึ้น คนส่วนใหญ่จะชอบอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 40-60% การเคลื่อนไหวของอากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อความรู้สึกสบายของคนเราเช่นกัน เพราะการเคลื่อนไหวของอากาศจะกำจัดเอาอากาศอุ่นและมีความชื้นที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ร่างกายออกและแทนที่ด้วยอากาศใหม่ที่บริสุทธิ์กว่า ดังนั้นการเคลื่อนไหวจึงเป็นการเพิ่มการคายความร้อนออกโดยกลไกทั้งการพาและการระเหย การเคลื่อนไหวของอากาศควรจะแรงพอที่จะกำจัดความร้อนและความชื้นออกจากบริเวณร่างกาย แต่ก็ไม่ควรจะรุนแรงมากเกินไป คนส่วนใหญ่จะรู้สึกสบายถ้าความเร็วของอากาศมีค่าประมาณ 0.25 เมตร/วินาที การเคลื่อนไหวของอากาศที่ความเร็วสูงมากเกินไป มักจะทำให้ร่างกายรู้สึกไม่สบายมากกว่าที่จะรู้สึกสบาย เช่น สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งมีลมพัดด้วยอัตราเร็ว 48 กิโลเมตร/ชั่วโมง มักจะทำให้ร่างกายรู้สึกหนาวเย็นราวกับอยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิ -7 องศาเซลเซียส พร้อมกับมีลมพัดด้วยอัตราเร็ว 3 กิโลเมตร/ชั่วโมง ของการเคลื่อนไหวของอากาศที่ทำให้ร่างกายรู้สึกเย็น (เราเรียกว่า wind-chill factor)

นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อความรู้สึกสบายของคน คือ ความสะอาด กลิ่น เสียง ผลของการแผ่รังสี และอุณหภูมิพื้น โดยที่อุณหภูมิของพื้นไม่ควรสูงหรือต่ำเกินไป โดยตามมาตรฐานสากล (ASHRAE1992;ISO 1994) ควรอยู่ในช่วง 18-19 องศาเซลเซียส ซึ่งจะถือเป็นข้อจำกัดของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น

เนื่องจากความสบาย เป็นสิ่งที่จำเป็นดังนั้นระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นจึงได้ให้ความสำคัญต่อสิ่งนี้เป็นอย่างมากโดยที่ภายในระบบจะทำการควบคุมให้สถานะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง 24 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิพื้น 19 องศาเซลเซียส, ความชื้นสัมพัทธ์ 55%RH และความเร็วของอากาศระหว่าง 0.1-0.3 เมตร/วินาที ซึ่งจะทำให้รู้สึกสบายที่สุด

2.1 พื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์

2.1.1 ความร้อน (heat)

ความร้อน (heat) เป็นพลังงานชนิดหนึ่งซึ่งสามารถทำงานได้ และสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่น ๆ หรือพลังงานรูปอื่น ๆ สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ พลังงานความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน กล่าวคือ ความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า และจะหยุดการถ่ายเทเมื่อวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน

ความร้อนสามารถแบ่งได้สองประเภท คือ ความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat)

2.1.2 ความร้อนสัมผัส (sensible heat)

เป็นปริมาณความร้อนที่ทำให้สสารมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปแต่สถานะคงเดิมอยู่ เช่น น้ำซึ่งมีสถานะเป็นของเหลว เมื่อถูกเพิ่มปริมาณความร้อนเข้าไปน้ำนั้นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึง 100 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศซึ่งเรียกว่า จุดเดือดของน้ำ ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดเดื่อนี้จัดว่าเป็นความร้อนสัมผัส

2.1.3 ความร้อนแฝง (latent heat)

เป็นความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสสารโดยมีอุณหภูมิกงที่อยู่ ซึ่งความร้อนแฝงนี้ยังแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- ก. ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว เช่น น้ำแข็งที่ 0 องศาเซลเซียส ถ้าถูกเพิ่มปริมาณความร้อนจะหลอมละลายกลายเป็นน้ำหมดที่ 0 องศาเซลเซียส
- ข. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ เช่น น้ำเดือดที่ 100 องศาเซลเซียส ถ้าถูกเพิ่มปริมาณความร้อนจะกลายเป็นไหมดที่ 100 องศาเซลเซียส

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้ออิทธิพลของแสงอาทิตย์ที่มีต่อการทำความเย็นโดยการแผ่รังสีจากพื้น

ศึกษาอิทธิพลของแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อการควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็น และข้อจำกัดของระบบทำความเย็นโดยการแผ่รังสีจากพื้นเมื่อระบบต้องรับแสงอาทิตย์โดยตรง และต้องคำนึงถึงหลักความสบาย

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกสบายของร่างกายมนุษย์คือ เสื้อผ้าที่สวมใส่ ระดับของกิจกรรม อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ และการเคลื่อนที่ของอากาศ อุณหภูมิอากาศภายในห้องจะเป็นเครื่องบ่งชี้ที่สำคัญที่สุดของความรู้สึกสบาย คนส่วนใหญ่จะรู้สึกสบายถ้าอุณหภูมิอากาศอยู่ระหว่าง 22 – 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30 – 70 %RH การเคลื่อนที่ของอากาศก็มีความสำคัญต่อความรู้สึกสบาย ดังนั้น เพื่อความรู้สึกสบาย ความเร็วอากาศควรมีค่าประมาณ 0.1 – 0.3 m/s

การคำนวณ

ความสามารถในการทำความเย็นของระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวพื้นและอากาศภายในห้อง ซึ่งจากผลการทดลองของ Michel and Isoardi พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างผิวพื้นและห้องของระบบทำความเย็นที่พื้นซึ่งวัดค่าได้ประมาณ $7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ซึ่งแบ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีประมาณ $5.5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และเป็นค่าสัมประสิทธิ์โดยการพาความร้อนประมาณ $1.5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ดังนั้นในการคำนวณจะสามารถหาความสามารถในการทำความเย็นของพื้นได้จากสมการ

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{solar} + h(T_{space} - T_{surface}) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

\dot{Q} คือความสามารถในการทำความเย็น

\dot{Q}_{solar} คือความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์, W/m^2

h คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

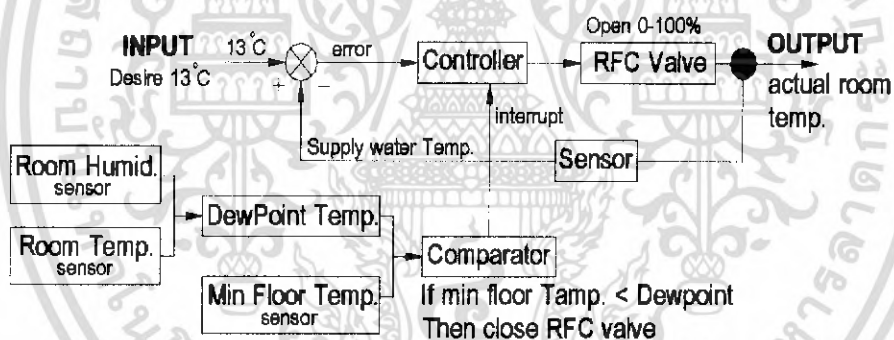
T_{space} คืออุณหภูมิห้อง, $^\circ C$

$T_{surface}$ คืออุณหภูมิพื้น, $^\circ C$

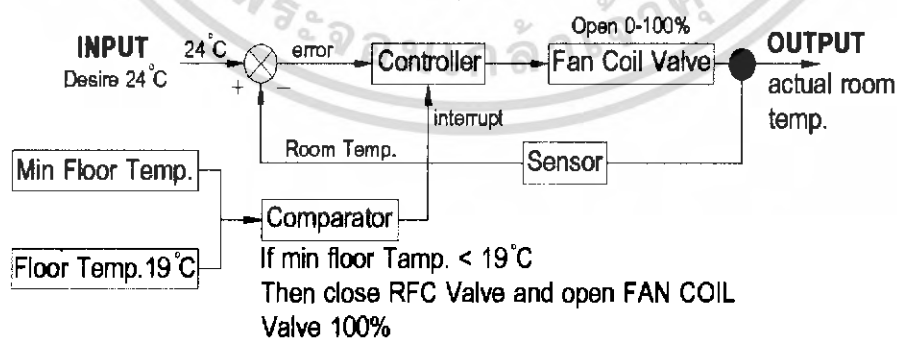
การทดลอง

1. ศึกษาวิธีการควบคุมที่เหมาะสม

ระบบควบคุมจะแบ่งออกเป็นสองจุด จุดที่หนึ่งสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่เข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอีกจุดสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่จะเข้าที่ชุดคอยล์เย็น ลักษณะการควบคุมเป็นแบบ Proportional Control โดยจะมีการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งสำหรับในขั้นตอนนี้ใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ป้อนเข้าระบบทำความเย็นโดยการแผ่รังสีที่พื้น เป็นตัวกำหนดการ เปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่ป้อนพื้น (RFC Valve) และใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของห้องเป็นตัวกำหนดการ เปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่คอยล์เย็น (Fan Coil Valve)



(ก) แผนผังแสดงการควบคุมระบบของพื้น

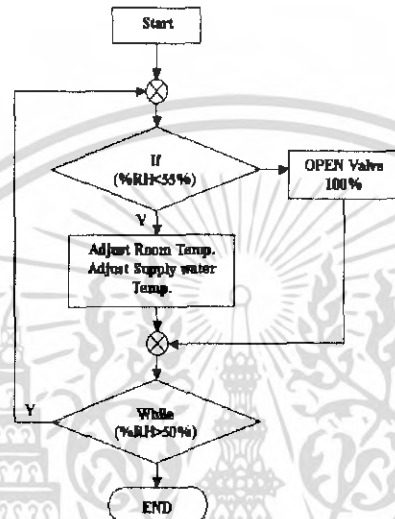


(ข) แผนผังแสดงการควบคุมระบบของคอยล์เย็น

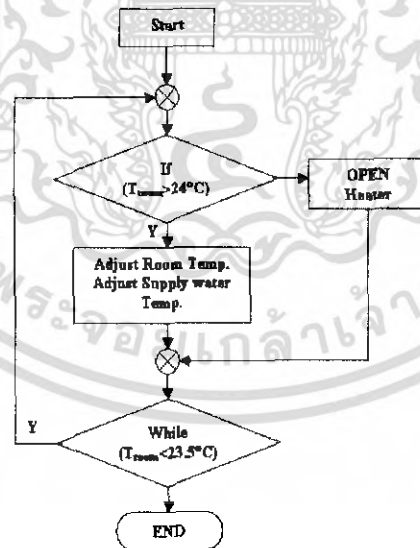
รูปที่ 2-1 แผนผังการควบคุมระบบของพื้นและแฟนคอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากในการควบคุมมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง คือ การควบคุมเป็นหยดน้ำ และค่าอุณหภูมิตามที่ออกแบบไว้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะต้องไม่ให้อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นต่ำกว่าอุณหภูมิการควบแน่นเป็นหยดน้ำ (อุณหภูมิจุดน้ำค้างหรือ Dew Point Temperature) หากเงื่อนไขที่ใกล้เคียงนี้เกิดขึ้นจะให้ปิดวาล์วที่พื้นทันที และรอจนกว่าอุณหภูมิพื้นจะสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.5 องศาเซลเซียส จึงเริ่มให้วาล์วเปิดทำงานอีกครั้ง และหากพื้นมีอุณหภูมิเย็นลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ออกแบบที่ 19 องศาเซลเซียส จะทำการปิดวาล์วที่พื้น และจะให้เปิดวาล์วที่ป้อนเข้าคอยล์เย็นเต็มที่ เพื่อรักษาอุณหภูมิที่พื้นไม่ให้ต่ำเกินไป และดึงเอาความชื้นออกจากระบบ



รูปที่ 2-2 แผนผังการทำงานของคอยล์เย็นเพื่อควบคุมความชื้น



รูปที่ 2-3 แผนผังการทำงานของขดลวดทำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2-2 และ 2-3 แสดงการควบคุมความชื้น โดยใช้คอยล์เย็น ซึ่งแฟนคอยล์ว่าลั่วจะเปิดเต็มที่เมื่อความชื้นเกินค่าที่กำหนดเพื่อลดความชื้นออกจากระบบ ในขณะที่ฮีทเตอร์ซึ่งติดไว้ที่หัวจ่ายจะถูกเปิดให้ทำงานเพื่อควบคุมไม่ให้อุณหภูมิต่ำเกินไป

การทดลองทำที่สภาวะเหมือนจริงของสภาพการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ตลอด 24 ชั่วโมง โดยเปิดไฟให้รังสีความร้อนลงที่พื้นให้คล้ายกับการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ตลอดวัน

การศึกษาเพื่อหาวิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การทำงานของระบบเป็นไปอย่างราบเรียบยิ่งขึ้นจึงต้องทำการทดลองควบคุมแบบต่าง ๆ ที่สนใจ สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการควบคุมเป็น 4 กรณี ดังนี้

1. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่
2. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามอุณหภูมิพื้น
3. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก
4. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก

2. การศึกษาผลกระทบของแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบ

ในอากาศประมาณ 55 %RH และกรณีที่สองเพื่อหาความสามารถในการทำความเย็นสูงสุดของการทดลองในขั้นต้นจะมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการคือ เพื่อหาผลกระทบของแสงอาทิตย์ที่มีต่อระบบ ซึ่งจะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องรวมทั้งค่าความสามารถในการทำความเย็นของระบบ และประการที่สองคือหาความสามารถในการทำความเย็นสูงสุดของระบบ โดยในการทดลองจะแบ่งเป็นสองกรณีดังนี้ กรณีแรกจะทำการทดลองโดยใช้การจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ด้วยแสงเทียมในปริมาณต่าง ๆ กันเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นภายในห้องทดลอง ทั้งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น และคำนวณหาความสามารถในการทำความเย็นของระบบ โดยกำหนดเงื่อนไขภายในห้องให้มีสภาวะตามหลักความสบาย กล่าวคือกำหนดให้อากาศภายในห้องมีอุณหภูมิประมาณ 24 องศาเซลเซียส อุณหภูมิพื้นต้องไม่ต่ำกว่า 19 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศอยู่ในช่วง 0.1 – 0.3 m/s และความชื้นสัมพัทธ์ระบบ โดยให้พื้นห้องได้รับภาระจากแสงในปริมาณต่าง ๆ กันจนกระทั่งอุณหภูมิพื้นเท่ากันกับอุณหภูมิห้องที่ 24 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้จะแสดงถึงความสามารถในการทำความเย็นสูงสุดของพื้น หรือภาระสูงสุดที่ระบบจะรับได้

สรุป

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่จะมีปัญหาในเวลา กลางคืนซึ่งจะมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิที่ผิวพื้นเย็นเกินไป วิธีที่จะควบคุมให้ได้ผลคือ คุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามอุณหภูมิพื้นหรือคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออก และสำหรับวิธีสุดท้ายคือควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าและออกตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าออกจะทำให้การแกว่งของอุณหภูมิน้ำเข้ามากขึ้น

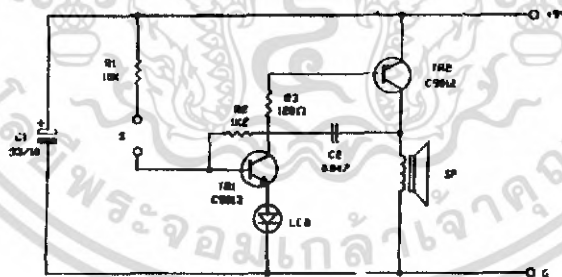
ระบบทำความเย็นโดยการแผ่รังสีจากพื้นสามารถทำความเย็นประมาณ 43 W/m^2 และในกรณีที่พื้นห้องได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงระบบจะมีความสามารถในการทำความเย็นสูงชันมาก ดังนั้นระบบนี้จึงเหมาะสำหรับอาคารขนาดใหญ่ที่ต้องการปรับอากาศตลอดเวลา ซึ่งการปรับอากาศโดยระบบ RFC ทำงานด้วยประสิทธิภาพสูงและประหยัดการใช้พลังงานมากที่สุด

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการเกิด Condensation บนวัสดุปกคลุมพื้น

ศึกษาหาข้อจำกัดของระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น ในการทำความเย็นโดยไม่เกิดปัญหาการควบแน่นเป็นหยดน้ำที่พื้นเมื่อพื้นมีอุณหภูมิต่ำ และศึกษาพฤติกรรมเกิดการควบแน่นระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น ขนาดของหยดน้ำ ณ เวลาต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นและวิธีป้องกันการเกิดการควบแน่นที่พื้น

ขอบเขตของงานวิจัย

ข้อจำกัดของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นในเรื่องการควบแน่นเป็นหยดน้ำบริเวณพื้นผิวของวัสดุปูพื้น โดยครอบคลุมลักษณะทางกายภาพของการเกิด ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างหยดน้ำที่เปลี่ยนไปกับเวลา รวมถึงการนำผลการทดลองที่ได้มาประยุกต์ใช้ ซึ่งการตรวจสอบการเกิดการควบแน่นนั้น เราจะใช้เซนเซอร์ 2 ชนิดด้วยกัน คือเซนเซอร์ตัวแรกที่ใช้จะใช้หลักการทางไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพื้นผิววัสดุทดสอบเกิดการเปียกชื้นแล้ว เซนเซอร์ตัวนี้จะส่งสัญญาณออกมาเป็นความถี่ของเสียงและแสง ซึ่งถ้าบนพื้นผิวมีความเปียกชื้นมาก ความถี่ของเสียงที่ส่งออกมาจะถี่มาก ส่วนเซนเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่ได้ใช้คือ จะเป็นแผ่นวัสดุใสบาง ๆ ซึ่งจะนำมาติดกับแผ่นวัสดุที่ใช้ทดสอบ เพื่อใช้ตรวจสอบดูการเริ่มเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว



รูปที่ 2-4 แสดงวงจรเซ็นเซอร์ตรวจสอบความชื้นบนแผ่นทดสอบ

โดยงานวิจัยนี้จะใช้หน่วยการวัดขนาดของหยดน้ำเป็น หน่วยมิลลิเมตร ซึ่งอาจไม่สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อสังเกตเห็นหยดน้ำ ณ จุดนั้นจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเริ่มเกิดการควบแน่นอย่างแท้จริง เนื่องจากเมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นขนาดของหยดน้ำเล็กมากซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการสังเกตหยดน้ำเมื่อเริ่มเกิดการควบแน่น

บทที่ 3

ทฤษฎีและการคำนวณ

3.1 การปรับอากาศ

การปรับอากาศเป็นการใช้งานอย่างหนึ่งของการทำความเย็น ในสมัยก่อนการปรับอากาศใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมและการเก็บวัสดุมากกว่าการปรับอากาศให้สบายสำหรับคน จากเหตุผลอันนี้อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องปรับอากาศก็ไม่ได้เพิ่มขึ้น ต่อมาจากรีวิวพบว่า การปรับอากาศให้สบายสำหรับคนงาน จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มมากขึ้นมากกว่าค่าใช้จ่ายในการคิดเครื่องปรับอากาศ ด้วยเหตุผลนี้อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องปรับอากาศก็เจริญเพิ่มมากขึ้น และการปรับอากาศก็นิยมแพร่หลายในบ้านอยู่อาศัยด้วย การปรับอากาศอาจแบ่งออกได้เป็น การปรับอากาศในอุตสาหกรรม และการปรับอากาศให้สบาย

3.2 ลักษณะพื้นฐานของการปรับอากาศ

อุณหภูมิสูงสุดที่มนุษย์สามารถทนได้ทั้งร้อนและหนาว ขึ้นอยู่กับที่ตั้งของแต่ละประเทศ อุณหภูมิในฤดูหนาวในบางที่ต่ำกว่า 0 องศาฟาเรนไฮต์ ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิในฤดูร้อน อาจมากกว่า 105 องศาฟาเรนไฮต์ ในบางพื้นที่อาจมากถึง 120 องศาฟาเรนไฮต์ หรือมากกว่านั้น

ช่วงอุณหภูมิที่มนุษย์รู้สึกสบายขึ้นอยู่กับการสวมใส่อาภรณ์ จำนวนความชื้นในบรรยากาศ แต่สำหรับคนที่อยู่ในที่ร่มแล้ว การทำกิจกรรมจะไม่หนักมากนัก โดยทั่วไปแล้วช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นตัวบอกถึงช่วงอุณหภูมิที่มนุษย์รู้สึกสบาย

โดยความจริงแล้วที่ช่วงอุณหภูมินี้จะแตกต่างในฤดูร้อนและฤดูหนาวอันเนื่องมาจากส่วนหนึ่งในการสวมใส่เสื้อผ้าที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่แล้ว ในบางแห่งอาจจะมีการใช้เครื่องทำความร้อน เป็นส่วนใหญ่ทั้งนี้ก็เพราะอุณหภูมิโดยส่วนใหญ่ที่นั่นค่อนข้างต่ำ แต่ในบางพื้นที่ที่มีช่วงอุณหภูมิและความชื้นสูงความจำเป็นในการใช้เครื่องปรับอากาศก็เข้ามาแทนที่

การปรับอากาศไม่ใช่เพียงแต่การควบคุมอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว แต่จะครอบคลุมไปถึงลักษณะของอากาศที่มีผลต่อความรู้สึกของมนุษย์ ด้วย ดังนี้

1. อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Temperature of Surrounding) หรืออุณหภูมิอากาศปกติ (Ambient Air)
2. ความชื้นอากาศ (Humidity of Air)
3. ปริมาณอากาศบริสุทธิ์ (Air purity)
4. การเคลื่อนที่ของอากาศ (Air movement)

โดยการปรับอากาศที่แท้จริงนั้น ได้รวมความหมายตาม 4 ลักษณะข้างต้นไว้ด้วยกัน

กระบวนการปรับอากาศ

อุณหภูมิ (Temperature)

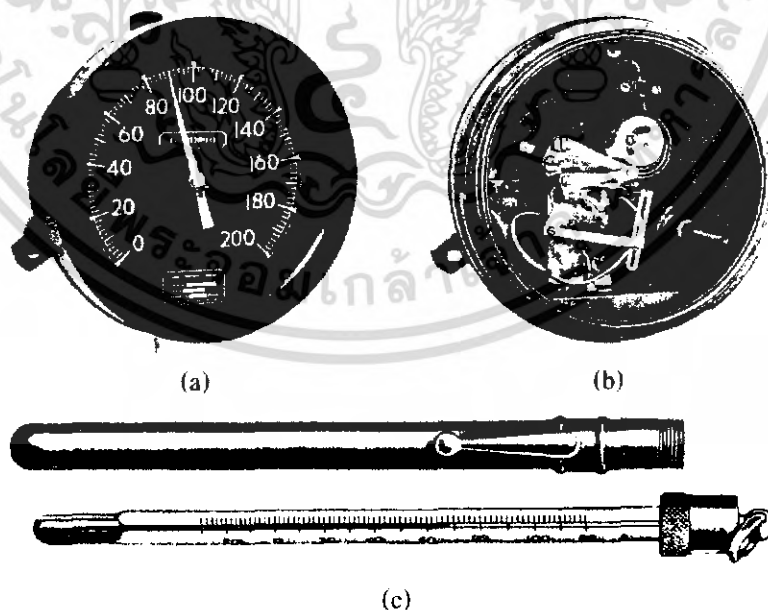
ในอดีตความคิดเกี่ยวกับอุณหภูมิเป็นเพียงแง่ของสิ่งที่บอกถึงความร้อน ซึ่งนับว่าเป็นเวลาหลายร้อยปีที่มนุษย์ใช้ไปตามความคิดของตัวเอง โดยการสัมผัสและรู้สึกที่จะบอกว่าวัตถุร้อน อย่างไรก็ตาม ความรู้สึกของมนุษย์เป็นตัววัดที่ไม่น่าเชื่อถือเลย ซึ่งในปัจจุบันได้มีเครื่องมือวัดเรียกว่า “เทอร์โมมิเตอร์” ใช้ในการวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่วัดได้เป็นองศาฟาเรนไฮต์

ประมาณปี 1715 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ ฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit) ได้คิดค้นหาหน่วยวัดอุณหภูมิที่ใช้ชื่อเขาในอุตสาหกรรมการปรับอากาศ ในเมืองที่เขาอาศัยอยู่ ลักษณะของเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้หน่วยวัดเป็นฟาเรนไฮต์มีลักษณะได้หลายรูปแบบ ดังรูป 3-1

อุณหภูมิจองศาฟาเรนไฮต์ (รูป 3-2) มีจุด 2 จุดที่ใช้เป็นมาตรฐานโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศเป็นสารที่ทำกรวัด จุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 212 องศาฟาเรนไฮต์ และจุดเยือกแข็งอยู่ที่ 32 องศาฟาเรนไฮต์ โดยมีอุณหภูมิ 180 องศาฟาเรนไฮต์ ที่อยู่ระหว่าง 2 จุดอุณหภูมิสามารถที่จะขยายให้มากกว่าจุดเดือดและต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้เพื่อทำการวัดอุณหภูมิในกรณีพิเศษ

เทอร์โมมิเตอร์แบบมือถือที่ใช้ในงานด้านปรับอากาศ โดยปกติแล้วจะใช้แอลกอฮอล์หรือปรอทบรรจุอยู่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศเป็นสาเหตุทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวของของเหลวภายในกระเปาะซึ่งมีผลให้ระดับของของเหลวเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายในเทอร์โมมิเตอร์ การอ่านค่าอุณหภูมิสามารถที่จะอ่านได้เมื่อสังเกตระดับที่ของเหลวอยู่สูงสุดเทอร์โมมิเตอร์แบบเข็มหมุน ท่อและกระเปาะบรรจุแก๊สไว้ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นผลให้ความดันเปลี่ยนไปด้วยเหตุนี้ เข็มชี้จะเคลื่อนที่บอกอุณหภูมิ



รูปที่ 3-1 แสดงเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในงานปรับอากาศ (a) เทอร์โมมิเตอร์แบบเข็มหมุน (b) กลไกภายในวงจรเทอร์โมมิเตอร์แบบเข็มหมุน (c) เทอร์โมมิเตอร์แบบเข็มหมุน

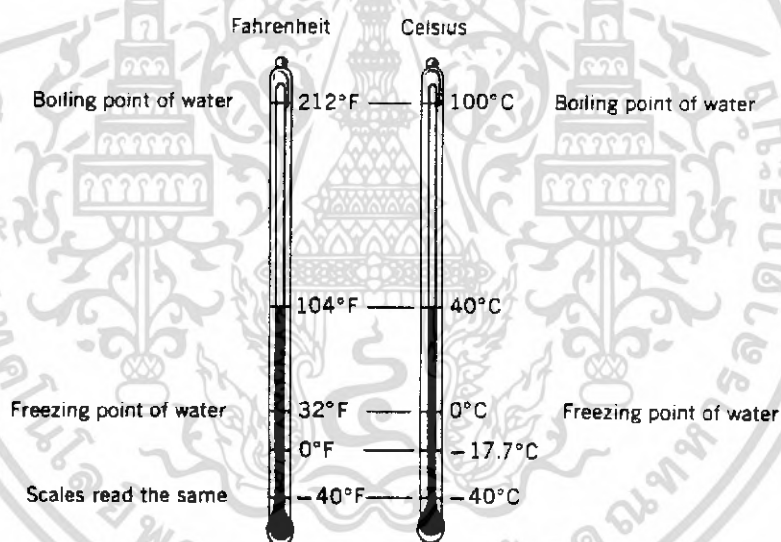
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่วัดได้เป็นองศาเซลเซียส

อุณหภูมิในหน่วยที่สองนี้ได้ใช้แพร่หลายภายในยุโรปและลาตินอเมริกาซึ่งเรียกว่า เซลเซียส (Celsius) (มาจากเซนติเกรด, Centigrade รูปที่ 3-2) มีอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศา อยู่ระหว่างจุด 2 จุด คือ จุดเดือดและจุดเยือกแข็ง ซึ่งเป็นของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิองศาเซลเซียสมีข้อได้เปรียบที่อุณหภูมิเป็นเลขจำนวนเต็มหลักสิบ และได้ใช้กันแพร่หลายในสาขาต่าง ๆ ของวิทยาศาสตร์ วิศวกรและช่างเทคนิคในสหรัฐอเมริกายังคงใช้องศาฟาเรนไฮต์อยู่แต่ในหลาย ๆ ประเทศได้เปลี่ยนมาใช้หน่วยเอสไอ (อุณหภูมิหน่วยเป็นองศาเซลเซียส)

การเปรียบเทียบองศาฟาเรนไฮต์กับองศาเซลเซียส

ตามรูป 3-2 ได้แสดงถึงอุณหภูมิในหน่วยวัดทั้งสองเปรียบเทียบกัน ซึ่งอุณหภูมิระหว่าง 100 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับอุณหภูมิ 180 องศาฟาเรนไฮต์ ดังนั้น $1^{\circ}\text{C} = 1.8^{\circ}\text{F}$ ซึ่งในบางโอกาสมีเหตุที่จะต้องเปลี่ยนจากอุณหภูมิในหน่วยหนึ่งไปยังอีกหน่วยหนึ่ง เพราะจุดเยือกแข็งของน้ำ (FP) เป็นจุดที่ใช้อ้างอิงเป็นส่วนในช่วงอุณหภูมิของการปรับอากาศ เราใช้จุดนี้ (32°F หรือ 0°C) เป็นจุดที่จะเปลี่ยนจากองศาฟาเรนไฮต์ไปเป็นองศาเซลเซียสในทางกลับกัน



รูปที่ 3-2 แสดงอุณหภูมิองศาฟาเรนไฮต์และองศาเซลเซียส

ลักษณะของความร้อน (Nature of heat)

ในสมัยก่อนผู้ที่ความรู้ได้เชื่อว่า ความร้อนหรือของไหลที่ไม่สามารถมองเห็นได้ โดยการเคลื่อนที่จากที่ร้อนไปยังวัตถุที่เย็นกว่า โดยมีคำว่า “แคลอรี” ได้ถูกนำมาใช้กับของไหลนี้ จนกระทั่งเวลาต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์ Robert Bayle (1627-1691) และ Sir Isuac Newton (1642-1727) ได้ให้ความคิดเกี่ยวกับความร้อนไว้ว่า “ความร้อนเป็นโมเลกุลของพลังงาน” การทดลองของ Benjamin Thomson (Count

Rumford) เป็นสิ่งที่ได้แสดงได้อย่างชัดเจนและสนับสนุนทฤษฎีของความร้อนนั้นที่จริงแล้วเป็นโมเลกุลของพลังงานที่กำลังเคลื่อนที่

ในประมาณปี 1795 Thomson ได้เริ่มสนใจศึกษาเกี่ยวกับปริมาณความร้อนที่วัดได้จากการทำงานของเครื่องเจาะ ซึ่งใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นในการเจาะ Thomson ทำการบันทึกไว้ว่าเมื่อเครื่องจักรได้ทำการเจาะความร้อนจะเกิดขึ้นตามมา จากจุดนี้แสดงให้เห็นว่าความร้อนเป็นแหล่งกำเนิดของแคลอรีที่ไม่มีวันหมดภายในทองเหลือง ในการทดลองนี้ Thomson ได้ทำการบันทึกและเสนอต่อนักวิทยาศาสตร์ในยุโรปแต่ไม่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งในบันทึกของ Thomson ได้เขียนทฤษฎีของความร้อนว่าเป็นเป็นแบบของพลังงานที่ได้พัฒนามาเป็นอันดับแรก และในเวลาต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์ เช่น Joule, Faraday, Maxwell ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาทฤษฎีของ Thomson ซึ่งจากความคิดที่ว่าความร้อนคือของไหลที่ไม่สามารถเห็นได้นั้นได้เลิกใช้ไปและความคิดใหม่ นั่นก็คือความร้อนเป็นพลังงานที่มีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลได้ถูกนำมาใช้แทน

โมเลกุลและความร้อน (Molecules and Heat)

เมื่อทฤษฎีของโมเลกุลได้ใช้กับวัตถุทุกชนิด (ธาตุและสารประกอบ, ของแข็ง, ของเหลว, แก๊ส) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากมายมหาศาลซึ่งเรียกว่า โมเลกุล คำว่า โมเลกุล หมายถึง อนุภาคที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ของสสารซึ่งยังคงรักษาคุณสมบัติของสสารนั้นอยู่ ตามทฤษฎีของโมเลกุล ได้แสดงถึงขนาดและระยะทางของโมเลกุลที่อยู่ภายในสสารนั้น ซึ่งแก๊สจะมีระยะทาง ของเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่างโมเลกุลห่างกันมากกว่าหลายเท่าใน 1 โมเลกุล

ที่อุณหภูมิปกติของโมเลกุลจะมีการเคลื่อนที่โดยเฉลี่ยแล้วด้วยความเร็วคงที่ แต่ไม่จำเป็นต้องทุกโมเลกุลที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานภายในมีค่าแตกต่างกันในการชนระหว่างโมเลกุล เป็นสาเหตุทำให้ความเร็วเปลี่ยนไป ซึ่งในขณะที่มันได้มีการถ่ายเทพลังงานไปอีกโมเลกุลหนึ่งโมเลกุลที่ชนจะมีความเร็วลดลงส่วนโมเลกุลที่ถูกชนจะได้รับพลังงาน ทำให้ความเร็วสูงขึ้นจำนวนพลังงานความร้อนทั้งหมดที่มีอยู่ในวัตถุคือผลรวมของพลังงานที่มีอยู่ในโมเลกุลทั้งหมด เพราะว่าพลังงานในแต่ละโมเลกุลขึ้นอยู่กับมวลของสสารนั้น (จำนวนโมเลกุลทั้งหมด) และความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุล (ดูรูปที่ 3-3)

ทฤษฎีของโมเลกุลที่สำคัญ 3 ข้อที่จะกล่าวนี้เป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับการปรับอากาศที่สำคัญดังนี้

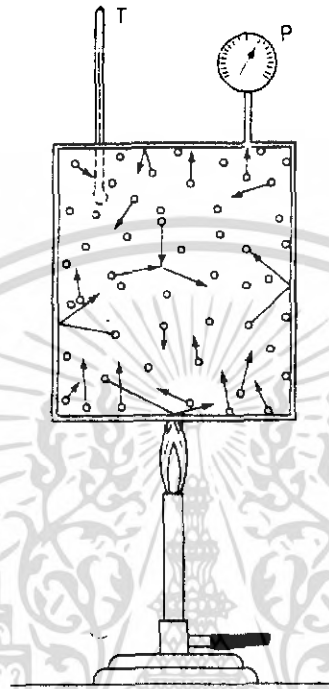
1. ความร้อนอยู่ในรูปของพลังงาน จำนวนพลังงานความร้อนทั้งหมดที่มีอยู่ในสสาร คือผลรวมของพลังงานที่มีอยู่ในโมเลกุลทั้งหมด

2. อุณหภูมิของสสาร หรือองศาของความร้อนเป็นสิ่งที่แสดงถึงความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลทั้งหมดในสสาร

3. โมเลกุลของสสาร สมมติว่าเคลื่อนที่แบบความเร็วที่กระจายบางโมเลกุลอาจจะอยู่กับที่ ในช่วงหนึ่ง และอาจจะเคลื่อนที่อยู่ภายใต้อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง หรืออาจจะเคลื่อนที่ที่ความเร็วเหนือจุดเดือดและจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมากที่อุณหภูมิไอร้อนยิ่งยวด เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่แบบความเร็วที่กระจายไม่สม่ำเสมอให้ชัดเจนขึ้น พิจารณาน้ำในบีกเกอร์ (beaker) ที่มีอุณหภูมิ 65 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟาเรนไฮต์ ซึ่งหมายถึง ความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุลที่องค์ความร้อนนี้ที่ 65 องศาฟาเรนไฮต์ น้ำภายในบีกเกอร์ที่มีบางโมเลกุลที่มีความเร็วที่อุณหภูมิเท่ากับหรือใกล้เคียงอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ -460 องศาโรเมอร์ บางโมเลกุลมีความเร็วสูงที่อุณหภูมิไอร้อนยิ่งยวดและเนื่องจากเกิดการกระจายของความเร็วระหว่าง 2 โมเลกุลเป็นผลให้องค์ความร้อนหรืออุณหภูมิต่ำเท่ากับ 65 องศาฟาเรนไฮต์

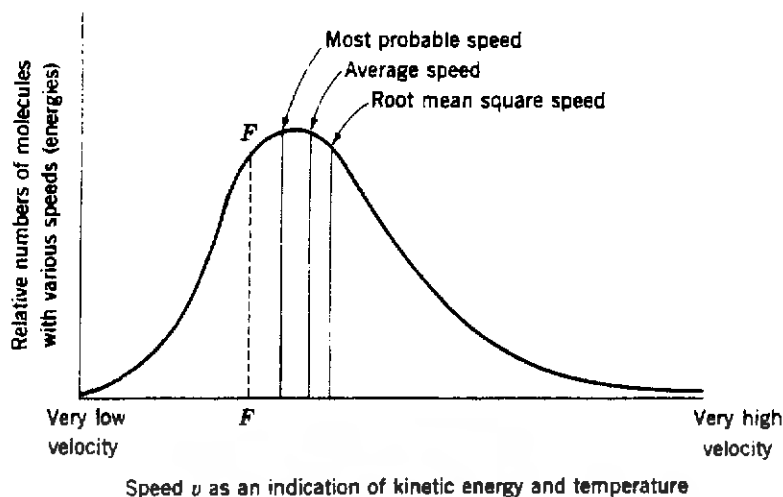


รูปที่ 3-3 แสดงทฤษฎีพลังงานจลน์ของโมเลกุลแก๊ส, พลังงานความร้อนทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นของโมเลกุลจะแสดงถึงตัวเลขในอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้การชนกันบ่อยและรุนแรงมากขึ้นภายในผนังภาชนะที่บรรจุซึ่งสามารถสังเกตได้ ในการเพิ่มขึ้นของความดันบนแก๊ส ช่องว่างระหว่างโมเลกุลมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลหลายเท่า พลังงานทั้งหมดมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานในแต่ละโมเลกุล

การกระจายความเร็วของโมเลกุลในวิธีแบบสุ่มนี้ไม่ถูกต้องตามที่ James Cleark Maxwell (1531-1879) ได้แสดงไว้ จากการทดลองเป็นเวลาหลายปีและจากทฤษฎีเช่นเดียวกัน ได้สรุปว่าข้อมูลที่แสดงในทางสถิติของโมเลกุลได้กระจายความเร็วในแบบที่แน่นอน (distribution of speeds) รูปที่ 3-4 แสดงถึงเส้นโค้งความเป็นไปให้ของการกระจายความเร็วของโมเลกุลซึ่งเรียกว่า เส้นการกระจายของ Maxwell (Maxwellian distribution curve)

พิจารณาโอกาสในการกระจายความเร็วของโมเลกุลที่อยู่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำอยู่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำอยู่ที่ 65 องศาฟาเรนไฮต์ โดยพิจารณาว่าจะมีสิ่งใดปรากฏขึ้น ถ้าพลังงานส่วนใหญ่ของโมเลกุลที่มีค่าสูงกว่า (อยู่ทางด้านขวาของเส้นประ FF ในรูป 3-4) ถูกนำเอาออกมาโดยทางหนึ่งทางใดมีสิ่งใดที่อุณหภูมิจะเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 แสดงเส้นกราฟในตัวอย่างของการกระจายอุณหภูมิจนของ Maxwell อุณหภูมิที่ขณะใดขณะหนึ่งจะแสดงถึงความเร็วเฉลี่ยที่จุดนั้น ซึ่งค่าอุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ เส้นกราฟในรูปนี้ไม่สามารถกับแนวตั้ง ดังนั้นการกระจายแบบสุ่มที่สมบูรณ์ (ในทางสถิติ) ไม่สามารถที่จะแสดงได้ในกรณีนี้

รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)

รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ถูกรับโดยพื้นผิวโลกขณะที่รังสีตกกระทบตั้งฉากมีค่าประมาณ $295 \text{ Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)$ ของพื้นผิวในวันที่อากาศแจ่มใสที่ระดับน้ำทะเล ลักษณะที่เกิดขึ้นสูงสุดนี้เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงเหนือศีรษะและลดลงตามลงมาเมื่อความสูงของมุมดวงอาทิตย์ที่ทำกับพื้นราบมีค่าลดลง ช่วงเวลาของวันและละติจูดที่ตั้งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออย่างมากกับค่ารังสีดวงอาทิตย์

การแผ่รังสีบางครั้งก็เกิดขึ้นจากท้องฟ้าโดยตรงถึงแม้ว่ารังสีจากดวงอาทิตย์จะไม่ได้ส่องมายังพื้นผิว การแผ่รังสีจากท้องฟ้านี้อาจจะเกิดขึ้นทางด้านขั้วโลกเหนือ ซึ่งไม่เคยได้รับแสงจากดวงอาทิตย์โดยตรงส่วนค่าการแผ่รังสีจากท้องฟ้านั้นอาจจะมากถึง $60 \text{ Btu}/(\text{hr})(\text{ft}^2)$ ของพื้นที่ผิวราบเมื่อความสูงของดวงอาทิตย์ที่ 80 ถึง 90

พื้นที่ที่ระจกโดยปกติแล้วจะไม่อยู่ในแนวราบหรือแนวตั้งฉากกับรังสีดวงอาทิตย์ ถึงแม้ว่าระจกเหล่านั้นจะอยู่ใกล้กับทิศตะวันออกและทิศตะวันตกในช่วงเช้าและช่วงเย็นตามลำดับก็ตาม

รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนระจกจะมี 3 ส่วน คือ

1. ส่วนที่มากกว่าจะถูกถ่ายเทโดยตรงไปยังภายในอาคาร
2. บางส่วนถูกดูดซึมโดยระจก
3. บางส่วนถูกสะท้อนกลับ

ผลรวมของ 1. และ 2. เป็นอัตราทั้งหมดของความร้อนที่ได้รับในแนวพื้นที่และถึงแม้ว่ารังสีที่ตกกระทบโดยตรงจะผ่านไปยังพื้นที่จะต้องถูกดูดซึมโดยผนังหรือเฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ เป็นอันดับแรกก่อนที่จะถ่ายเทไปยังอากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติทั่วไปเราถือว่าอัตราความร้อนที่ได้รับนี้เกิดขึ้นขณะนั้นทันที โดยไม่มีช่วงเวลาล่าช้าเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันนี้เนื่องจากบ้านสมัยใหม่และอาคารพาณิชย์ต่าง ๆ ได้ใช้กระจกใสเป็นจำนวนมาก ดังนั้นรังสีจากดวงอาทิตย์ในหลาย ๆ กรณีจะทำให้โหลดทำความเย็นในส่วนต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแน่นอนเป็นความร้อนสัมพัทธ์ทั้งหมด

โหลดทำความเย็นทั้งหมดเนื่องจากพื้นที่กระจกที่รับแสงแดด เป็นส่วนประกอบของการถ่ายเท (การนำความร้อน) ของโหลดเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายใน ภายนอกและพลังแสงอาทิตย์ (การแผ่รังสี) ประมาณของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านโดยกระจกขึ้นอยู่กับ ชนิดของกระจก ลักษณะของการตกแต่งกระจก ช่วงของเวลาของวัน และทิศทางของพื้นที่กระจก ผลต่าง ๆ สามารถลดได้โดยใช้อุปกรณ์ที่ลดแสง ซึ่งเป็นการลดพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับ

ความหนาแน่น (Density) คือ มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัตถุ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลว ต่อความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิมาตรฐาน

$$SG = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (3.2)$$

ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) คือ ปริมาตรของของโหลดต่อหนึ่งหน่วยมวล

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

ปริมาณความชื้นในอากาศ (Moisture Content of Air-Humidity)

อากาศเกือบทั้งหมดประกอบด้วยความชื้นต่าง ๆ และเมื่ออากาศมีปริมาณไอน้ำทั้งหมดจนถึงจุดสมมูลที่เรียกว่า อิ่มตัว (Saturated) โดยทั่วไปของปริมาณความชื้นในอากาศ คือ ความชื้น (Humidity) โดยมีความหมาย 2 ความหมายคือ ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity) และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

(1.) ความชื้นจำเพาะ เป็นน้ำหนักของไอน้ำที่มีอยู่จริง (ปอนด์) ของอากาศแห้ง สามารถที่แสดงได้ทั้งหมด ปอนด์ของไอน้ำต่อปอนด์ของอากาศแห้งและ grain ของไอน้ำต่อปอนด์ของอากาศแห้ง

$$\omega = \frac{m_r}{m_a} = 0.622 \frac{P_r}{P_a} \quad (3.4)$$

(2.) ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นการวัดระดับของการอึดตัวของอากาศที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งใด ๆ (DB) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของการอึดตัว โดยที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นสัมพัทธ์แสดงถึงอากาศอึดตัวและ 0 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นสัมพัทธ์แสดงถึง อากาศแห้งสมบูรณ์ ค่าความชื้นสัมพัทธ์, RH เป็นค่าของอัตราส่วน ความดันของไอน้ำที่เกิดขึ้นจริงต่อความดันร่วมของไอน้ำอึดตัวที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งใด ๆ

$$\phi = \frac{m_r}{m_g} = \frac{P_r}{P_g} \quad (3.5)$$

3.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

ลักษณะการถ่ายเทความร้อน

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ มโนทัศน์ของพลังงานนั้นได้ใช้ระบุสถานะของระบบโดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพลังงานนั้นไม่สามารถที่จะสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ เพียงแต่มีความสามารถเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่ง ความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนและรูปแบบอื่น ๆ ของพลังงาน แต่ทว่าความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบ การถ่ายเทพลังงานในแง่ของความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรงได้ แต่สามารถพิจารณาได้จากวิธีทางฟิสิกส์เพราะว่าความร้อนเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่วัดได้ โดยการสังเกตยังพบว่าเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิภายในระบบแล้ว จะมีการไหลของความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการไหลของความร้อนเกิดขึ้นเมื่อไหร่ก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิภายในระบบ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิในระบบจึงจำเป็นมากในการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และทราบการกระจายของอุณหภูมิแล้ว เราสามารถหาฟลักซ์ความร้อน (heat flux) ซึ่งเป็นค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาได้จากกฎหรือสมการซึ่งเกี่ยวข้องกับระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับเกรเดียนอุณหภูมิ

ในการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน สามารถแยกพิจารณาออกได้อย่างเด่นชัดเป็น 3 แบบ คือ การนำ การพา และการรังสี อันที่จริงแล้วการกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหนึ่งจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลรวมของการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบตามที่กล่าวเพราะฉะนั้นตามความเป็นจริงแล้ว จึงไม่สามารถแยกแบบใดแบบหนึ่งได้อย่างสิ้นเชิงจากแบบอื่น ๆ ที่เหลือได้ อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ เราจะแยกพิจารณาเป็นแบบใดแบบหนึ่งได้เช่น พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนอย่างเดียวถ้าเมื่อไหร่ก็ตามที่อิทธิพลของการพาและการแผ่รังสีมีผลต่อการวิเคราะห์น้อยมาก ดังนั้น เราจึงสามารถแยกพิจารณาในแต่ละแบบของการถ่ายเทความร้อนได้เพียงลำพัง ตามสมมุติฐานดังกล่าว

การนำความร้อน (Conduction)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยเคลื่อนแบบจลน์ (Kinetic motion) หรือการชนกันโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ภายในโครงสร้างของ โมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าวัตถุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็น

ตัวนำความร้อนที่ดีด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้

การพาความร้อน (Convection)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุที่เป็นของแข็งหรือไหลผ่านภายในช่องทางการไหล โดยที่อุณหภูมิของของไหลและผิวของของแข็งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของของแข็ง กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อน” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยการทำขึ้นเองโดยใช้ปัมหรือพัดลมเป็นทำให้เกิดแรงกระทำให้ของของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)” ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า “การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free or natural convection)”

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อน คือพลังงานถูกส่งออกไปโดยสารซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิจำกัดแน่นอน ถึงแม้ว่าเราจะเน้นการแผ่รังสีจากผิวของวัตถุแข็งก็ตาม การส่งออกของรังสีอาจเกิดขึ้นได้จากของเหลวและก๊าซ ดังนั้นโดยไม่คำนึงถึงรูปแบบของสาร การส่งออกของรังสีเชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานของสนามการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือเรียกว่า โฟตอน) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงานโดยการนำหรือการพาต้องการวัตถุตัวกลาง แต่การแผ่รังสีไม่ต้องการ ในความเป็นจริง การถ่ายเทโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ในสุญญากาศ

3.4 หลักความสบาย (Human Comfort)

เมื่อลักษณะอากาศภายนอกร้อนหรือหนาวจัดมากไม่เพียงแต่จะไม่เหมาะสมต่อมนุษย์แล้ว แต่ยังส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์ด้วย ในอากาศที่หนาวจัดมาก หัวใจจะต้องทำงานหนักกว่าเพื่อการหมุนเวียนของโลหิตเพิ่มมากขึ้น ในการที่จะรักษาความร้อนภายในร่างกาย นอกจากนั้นจะส่งผลให้การหายใจลำบากขึ้น โดยไปทำให้ระบบประสาทที่จมูกและหลอดลมเกิดความระคายเคือง ซึ่งสาเหตุจริง ๆ ของอากาศหนาวนั้นยังไม่รู้แน่ชัด แต่ถ้าอยู่ในลักษณะที่อากาศหนาวจัดบ่อย ๆ ครั้งอาจเป็นปัจจัยทำให้เกิดไข้หวัดหรือการติดเชื้อในระยะที่สอง เช่น คออักเสบ ไซนัสอักเสบ ไข้หวัดใหญ่ หลอดลมอักเสบ และปอดอักเสบได้

ในอากาศที่ร้อน ปัญหาที่จะเกิดขึ้นเกี่ยวกับ การกระจายความร้อนที่มากเกินไปเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิร่างกายสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ของเลือดจากร่างกายในอวัยวะไปยังผิวของร่างกาย เพื่อให้เกิดการระบายความร้อนโดยการนำความร้อน การแผ่รังสีและการระเหย ซึ่งปริมาณการระบายความร้อนทั้งหมดของเลือดจากร่างกายที่สำคัญนี้จะทำให้เกิดโรคภัยต่าง ๆ เช่น ปวดหัวเวียนศีรษะ และอ่อนเพลียขึ้น ถ้าอุณหภูมิของอากาศภายนอกร้อนมาก (ชื้นด้วย) เกินไปจนความร้อนที่ระบายออกจากร่างกายไม่เท่ากับความร้อนที่ร่างกายผลิตขึ้น ซึ่งอุณหภูมิจะสูงกว่า 98.6 องศาฟาเรนไฮต์ จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นได้ ลักษณะนี้เป็นสิ่งที่แสดงว่ากลไกควบคุมอุณหภูมิของร่างกายไม่อยู่ในสภาวะที่ปกติแล้ว ในร่างกายของมนุษย์ที่มีขบวนการเมตาบอลิซึม สร้างพลังงานความร้อน โดยที่ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่กับลักษณะของการทำกิจกรรม กิจกรรมปกติธรรมดาในร่างกายสามารถผลิตความร้อนได้ถึง 200 วัตต์ ของหลอดไฟ ความร้อนจากขบวนการเมตาบอลิซึม เกิดจากการกระจายความร้อนโดยการหมุนเวียนโลหิตที่เพิ่มขึ้นผ่านเส้นเลือดตลอดทั่วร่างกายซึ่งลักษณะนี้จะเป็นการเพิ่มไหลให้กับหัวใจ ด้วยเหตุผลนี้ อากาศที่ร้อนเป็นเวลานานจะเป็นอันตรายต่อผู้ป่วยโรคหัวใจ

ด้วย ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความรู้สึกสบายของร่างกายมนุษย์ คือ เสื้อผ้าที่มนุษย์สวมใส่ ระดับการทำกิจกรรม อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ และการเคลื่อนที่ของอากาศ (ความเร็วอากาศ) โดยอุณหภูมิที่รู้สึกสบายของมนุษย์อยู่ในช่วง 22 - 27 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 40 - 60 %RH และความเร็วของอากาศประมาณ 0.1 - 0.3 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐานของ (American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers) ASHRAE 1992; ISO 1994 ค่าแนะนำอุณหภูมิพื้นในระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นควรอยู่ในช่วง 18 - 19 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature)

เป็นอุณหภูมิที่มนุษย์รู้สึกได้ ที่เกิดจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงต่างๆ เช่น เวลาเที่ยงวันอุณหภูมิอากาศจะมีค่าที่สูง แต่ค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (Operative Temperature) จะมีค่าที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศรอบตัว โดยสมมติว่ามนุษย์ที่ได้รับอุณหภูมิรอบ ๆ ตัวเป็นอุณหภูมิที่มีการสวมใส่เสื้อผ้าของมนุษย์ด้วย สูตรที่ใช้คำนวณ คือ

$$T_{op} = \frac{h_r T_{MRT} + h_c T_{air}}{h_r + h_c} \quad (3.6)$$

เมื่อ h_r = Linearized radiant

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

T_{MRT} = อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature)

T_{air} = อุณหภูมิอากาศ

ใช้เมื่อมีอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย 50 องศาเซลเซียส และเมื่อมีความเร็วลมที่ 0.4 เมตรต่อวินาที โดยจะค่าสัมประสิทธิ์ของพาความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมาใช้ในการคำนวณด้วย แต่ในช่วงสภาวะที่มีอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยน้อยกว่า 50 องศาเซลเซียส และความเร็วลมน้อยกว่า 0.4 เมตรต่อวินาที จะใช้อุณหภูมิของการแผ่รังสีเฉลี่ยและอุณหภูมิของอากาศเป็นค่าเฉลี่ยกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ของพาความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ จะได้สูตรคำนวณ

$$T_{op} = \frac{(T_{MRT} + T_{Room})}{2} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย (Body-Temperature Regulation)

อุณหภูมิร่างกายเฉลี่ยของมนุษย์แล้วมีค่า 98.6 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งไม่จำเป็นเสมอไปสำหรับทุกคนที่จะมีอุณหภูมิอยู่ที่จุดนี้หรือมีอุณหภูมิคงที่ตลอดทั้งวัน อย่างไรก็ตามสำหรับคนที่มีสุขภาพดีอุณหภูมิเฉลี่ยของร่างกายเท่ากับ 98.6 องศาฟาเรนไฮต์ และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ไม่มากกว่า 0.2 หรือ 0.3 องศาที่วัดได้โดยไม่คำนึงถึง อุณหภูมิของอากาศภายนอก ทรายาคอเมื่อกลไกควบคุมอุณหภูมิของร่างกายทำหน้าที่ได้อย่างถูกต้อง ความสมดุลระหว่างความร้อนที่ได้รับและความร้อนที่สูญเสีย สามารถควบคุมให้คงที่ได้

ความร้อนที่รับจากร่างกายมาจาก 2 แห่งดังนี้

1. ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในร่างกายตัวเอง ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเมตาบอลิซึม
2. ความร้อนที่ได้รับจากแหล่งภายนอก โดยการแผ่รังสี จากดวงอาทิตย์หรือวัตถุที่ร้อนโดยการนำความร้อนและ โดยการพาความร้อนอากาศที่อยู่ภายนอก

ความร้อนที่ระบายออกจากร่างกายได้

1. การนำความร้อนเมื่อผิวของร่างกายมีอุณหภูมิสูงกว่า อากาศรอบนอก ความร้อนจะถูกนำมาจากผิวหนังสู่อากาศ การใส่เสื้อผ้าและลักษณะของเสื้อผ้าจะมีผลต่ออัตราความร้อนที่ระบายออกมา

2. การพาความร้อน ความร้อนที่ถูกนำมาจากร่างกายจะเกิดการนำความร้อนที่บริเวณผิวหนังและชั้นของอากาศที่อยู่ติดกันเท่านั้น อากาศร้อนที่อยู่ติดกับผิวหนังซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าจะลอยขึ้นไปด้านบน การพาความร้อนก็เริ่มขึ้น ถ้าให้อากาศหมุนเวียนผ่านร่างกาย การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามด้วยด้วยเหตุนี้จึงอธิบายได้ว่า ทำไมเราจึงรู้สึกเย็นเมื่อมีลมพัดถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะไม่ลดลง

3. การแผ่รังสี วัตถุใดที่มีอุณหภูมิสูงกว่ารอบข้างจะส่งรังสีความร้อน ไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นร่างกายของมนุษย์สามารถที่จะส่งรังสีความร้อนไปยังผนัง เพดาน พื้น ฝ้า ฝ้าต่างและภายนอกได้ ถ้ามีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิร่างกาย อุณหภูมิที่ผิวหนังอยู่ในช่วงระหว่าง 80 ถึง 90 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 86 องศาฟาเรนไฮต์ สำหรับคนที่มีสุขภาพดี

4. การระเหย ของเหลวจากร่างกายสามารถเคลื่อนที่ไปยังผิวหนังได้ โดยต่อมเหงื่อ โดยปกติแล้วผิวหนังมีปริมาณน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น กลไกควบคุมอุณหภูมิของร่างกายจะกระตุ้นต่อมเหงื่อให้ทำงานมากขึ้น ซึ่งทำให้อัตราของเหงื่อที่ออกมาเพิ่มขึ้น การระเหยของเหงื่อจากผิวหนังแสดงถึงการระบายความร้อนและช่วยให้ร่างกายเย็นลง อันที่จริงแล้วถ้าอากาศรอบข้างและวัตถุทั้งหมดที่อยู่ใกล้มีอุณหภูมิสูงกว่าผิวหนัง การระบายความร้อน โดยการนำความร้อนและการแผ่รังสีก็ไม่สามารถที่จะเกิดขึ้นได้ มีทางเดียวที่ร่างกายจะสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ ก็คือการระบายความร้อนโดยการระเหยของเหงื่อ ในวันที่อากาศร้อนมากร่างกายได้รับความร้อนโดยการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ได้รับจากกระบวนการเมตาบอลิซึมด้วย ร่างกายจะระบายความร้อนโดยการระเหยจากผิวหนัง

การระเหยของเหงื่อจะเร็วขึ้น ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าน้อย ดังนั้นร่างกายสามารถระบายความร้อนภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิกระเปาะแห้งสูงได้ (120 องศาฟาเรนไฮต์ หรือมากกว่า) ที่

ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 20% ในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิกระเปาะแห้งค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 95 องศาฟาเรนไฮต์) จะเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมกับความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 85 %

กลไกการควบคุมอุณหภูมิของร่างกายได้ใช้สถานะของอากาศในการทำหน้าที่ปกติ ของอวัยวะภายในร่างกาย ภายใต้อุณหภูมิควบคุมอุณหภูมิและความชื้นร่างกายสามารถเก็บพลังงาน ความร้อนที่จำเป็นในฤดูหนาวและกระจายความร้อนที่เกินออกไปในฤดูร้อน เพื่อรักษาภาวะสมดุลของอุณหภูมิไว้

อัตราเมตาบอลิซึม (Metabolic Rate)

ในขณะที่มนุษย์เราทำงานหรือกิจกรรมต่าง ๆ นั้นจะมีพลังงานส่วนหนึ่งที่สูญเสียออกไปในขณะที่ทำกิจกรรม ซึ่งระดับของการทำกิจกรรมแต่ละกิจกรรมนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานไม่เท่ากัน เช่น ในระหว่างที่เรานอนหลับนั้นจะมีการสูญเสียพลังงาน 60 วัตต์ แต่เมื่อเรตื่นขึ้นมาจะมีการสูญเสียพลังงาน 70-120 วัตต์ ระดับการทำงานของเราก็มีผลต่อการสูญเสียพลังงานเช่นเดียวกัน หากเราทำงานเบา ๆ เช่นงานในสำนักงานจะมีการสูญเสียพลังงานในช่วง 150-200 วัตต์ แต่หากเราทำงานหนัก ๆ เช่นงานแบกหามจะมีการสูญเสียพลังงานประมาณ 700 วัตต์ และตารางข้างล่างนี้จะแสดงการสูญเสียพลังงานในแต่ละกิจกรรม

ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงค่าอัตราเมตาบอลิซึมที่ระดับกิจกรรมต่าง ๆ

ระดับกิจกรรม	W/m^2	Met
นอน, เอน	46	0.8
นั่งแบบผ่อนคลาย	58	1
ช้อปปิ้ง	65	1.1
ยืนแบบผ่อนคลาย	70	1.2
ทำงานในสำนักงาน	70	1.2
กีฬา-วิ่ง 15 กิโลเมตร/ชั่วโมง	550	9.5
ขับรถ	80	1.4
งานออกแบบ-เอกสาร	85	1.5
การยืน, กิจกรรมกลางแจ้ง	93	1.6
สอนหนังสือ	95	1.6
ทำงานบ้าน	100	1.7
การเดินไม่กิน 2 กิโลเมตร/ชั่วโมง	110	1.9
การยืน, กิจกรรมที่ใช้พลังงานปานกลาง	116	2
ยืนล้างจาน	145	2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-1 (ต่อ) ตารางแสดงค่าอัตราเมตาโบลิซึมที่ระดับกิจกรรมต่าง ๆ

ระดับกิจกรรม	W/m^2	Met
งานบ้าน-ซักรีด	170	2.9
ก่อสร้าง-ขึ้นแบบ	180	3.1
เดินด้วยอัตราเร็ว 5 กิโลเมตร/ชั่วโมง	200	3.4
การตัดไม้	205	3.5
เกษตรกรรม-การไถนา	235	4
ก่อสร้าง-ยกหินด้วยรถเข็น 18 กิโลเมตร/ชั่วโมง	360	6.2
ขุดแร่ด้วยพลั่ว	380	6.5
กีฬา-กีฬาพลาญน้ำแข็ง	405	7
การตัดไม้โดยใช้ขวาน	500	8.6

อัตราการสวมใส่เสื้อผ้า (Clothing level)

เสื้อผ้าที่เราสวมใส่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนรอบ ๆ ตัวเรา เพราะว่าเสื้อผ้าที่เราสวมใส่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนฉนวนส่งผลให้ลดการพาและการแผ่ความร้อนออกจากร่างกายสู่สิ่งแวดล้อม โดยที่การสวมใส่เสื้อผ้าสามารถปกป้องร่างกายของคนเราให้ปลอดภัยจากอากาศหนาวเย็นและความร้อนได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของอากาศภายนอกอยู่ระหว่าง -20 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส

การพาและแผ่รังสีความร้อนระหว่างร่างกายและสิ่งแวดล้อมนั้นจะมีผลมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของเสื้อผ้าที่เราสวมใส่ ซึ่งหน่วยที่ใช้ในการวัดว่ามีผลต่อการแผ่รังสีมากน้อยเพียงใดนั้นคือหน่วย clo ส่วนหน่วยที่ใช้อย่างเป็นทางการคือหน่วยตารางเมตรเคลวินต่อวัตต์ โดยที่เรากำหนดให้คนที่เปลือยเปล่าจะมีค่า clo เท่ากับศูนย์ ส่วนคนที่สวมชุดสูทจะมีค่า clo เท่ากับหนึ่ง ซึ่งค่า clo ของเสื้อผ้าชนิดต่างจะมีค่าดังนี้

ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงอัตราการสวมใส่เสื้อผ้าในลักษณะต่าง ๆ

ชุดชั้นใน, กางเกง	ประเภทของเครื่องแต่งกาย	clo	$m^2 K / w$
	กางเกงชั้นในผู้หญิง	0.03	0.005
	กางเกงชั้นในผู้ชาย	0.04	0.006
	กางเกงรัดเข้าครึ่งขา	0.06	0.009
	กางเกงรัดเข้าขายาว	0.1	0.016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-2 (ต่อ) ตารางแสดงอัตราการสวมใส่เสื้อผ้าในลักษณะต่าง ๆ

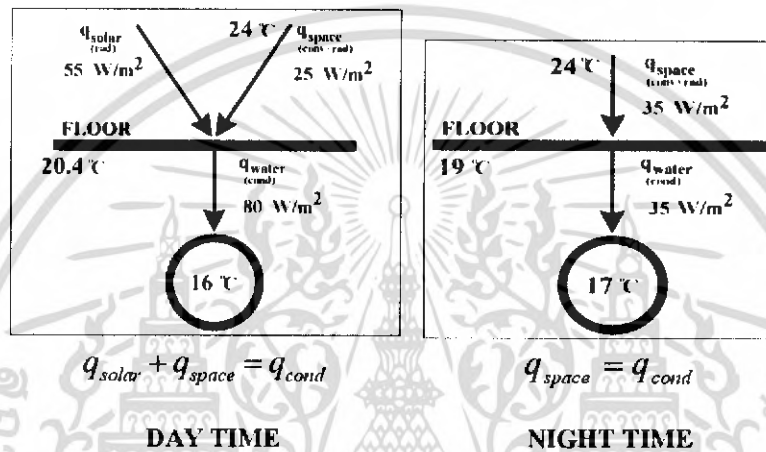
ประเภทของเครื่องแต่งกาย		<i>clo</i>	$m^2 K / w$
ชุดชั้นใน, เสื้อ	เสื้อในสตรี	0.01	0.002
	เสื้อที่ไม่มีแขน	0.06	0.009
	เสื้อเชิ้ต	0.09	0.014
	เสื้อเชิ้ตแขนยาว	0.12	0.019
	เสื้อยสังเคราะห์	0.14	0.022
เสื้อเชิ้ต	เสื้อคอกลม	0.06	0.009
	แขนสั้น	0.09	0.029
	เสื้อสตรีแขนยาวสีอ่อน	0.15	0.023
	เสื้อสตรีแขนสั้นสีอ่อน	0.2	0.031
	เสื้อแขนยาวพอดีตัว	0.25	0.039
	เสื้อแขนยาวทำจากสก็อต	0.3	0.047
กางเกงผู้ชาย	ขาสั้น	0.06	0.009
	กางเกงใส่วิ่ง	0.11	0.017
	กางเกงหลวม ๆ	0.2	0.031
	กางเกงพอดีตัว	0.25	0.039
	กางเกงคับ	0.28	0.043
	กางเกงทั่วไป	0.028	0.043
เสื้อคลุม	เสื้อคลุมที่ใช้ประจำวัน	0.049	0.076
	เสื้อคลุมที่ใส่ทำงาน	0.5	0.078
เสื้อกันหนาว	เสื้อกั๊ก	0.12	0.019
	เสื้อกันหนาวบาง ๆ	0.2	0.031
	แขนยาวบาง ๆ	0.26	0.04
	เสื้อกันหนาวหนา ๆ	0.35	0.054
	แขนยาวหนา ๆ	0.37	0.057
แจ็กเก็ต	เสื้อกั๊ก	0.13	0.02
	แจ็กเก็ตใส่ในฤดูร้อน	0.25	0.039
	เสื้อกันเปื้อน	0.3	0.047
	แจ็กเก็ต	0.35	0.054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบและคำนวณ

ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้นเป็นระบบที่ใช้น้ำในการถ่ายเทความร้อน โดยที่ผิวน้ำไว้ใต้พื้นเพื่อปรับอุณหภูมิพื้นตามที่ต้องการ หลักการทำงานจะอยู่ในรูปแบบผสม คือ การทำความเย็นโดยการแผ่รังสี และคอยล์เย็น ระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีมีข้อจำกัดมากกว่าการทำความร้อน เนื่องจากเสี่ยงต่อการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ ดังนั้นการควบคุมการทำงานของระบบเราต้องคำนึงถึงอุณหภูมิพื้นผิวไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิการควบแน่นของอากาศ เพื่อป้องกันการควบแน่นที่ผิวพื้น ซึ่งอุณหภูมิพื้นที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 19-20.5 องศาเซลเซียส

Heat Transfer from Space to Tube



รูปที่ 3-5 แสดงช่วงเวลาที่พื้นได้รับภาระรังสีความร้อนและไม่ได้รับภาระรังสีความร้อน

จากรูปที่ 3-5 จะเห็นว่าการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นในช่วงเวลากลางวันจะเท่ากับ 80 วัตต์ต่อตารางเมตร และการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นในช่วงเวลากลางคืนจะเท่ากับ 35 วัตต์ต่อตารางเมตร จึงทำการจำลองภาระความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้น ตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึงเวลา 19.00 น. โดยในช่วงเวลา 13.00 น. มีค่ารังสีความร้อนสูงสุด 325×10^{-2} เมกะจูลต่อตารางเมตร จึงต้องทำการคำนวณให้ได้ตามจำนวนวัตต์ต่อตารางเมตรตามระบบของห้องทดลอง โดยใช้ค่าภาระความร้อนจากแสงอาทิตย์สูงสุด

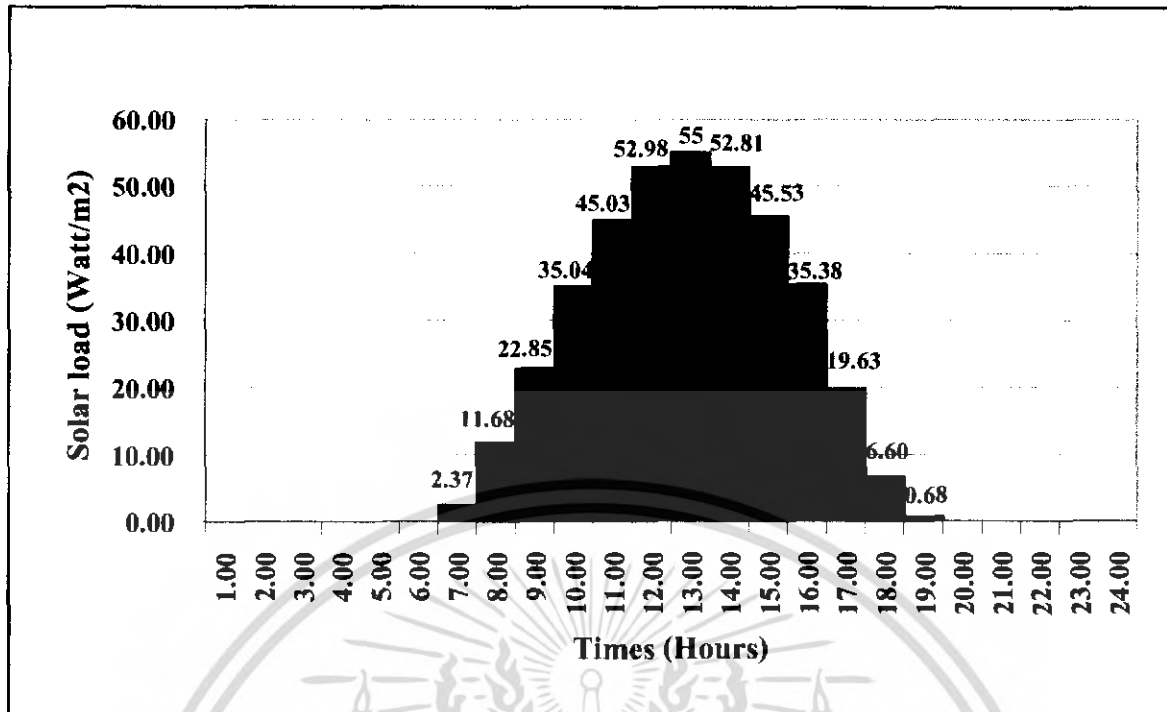
$$1 \text{ เมกะจูลต่อตารางเมตร} = 277.78 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร}$$

จาก 325×10^{-2} เมกะจูลต่อตารางเมตร ได้ 902.79 วัตต์ต่อตารางเมตร จากภาระรังสีความร้อนสูงสุดของระบบ 55 วัตต์ต่อตารางเมตร จะได้ว่า Factor 16.41

ตารางที่ 3-3 แสดงค่าการรังสีความร้อนแสงอาทิตย์

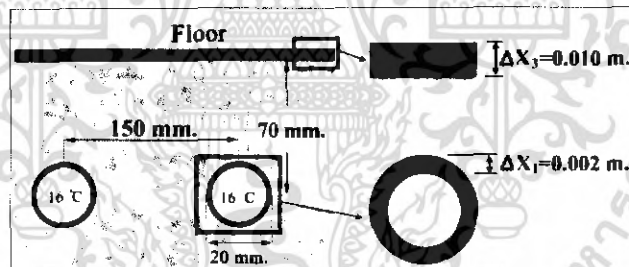
Time (Hour)	Solar Load-actual (10^{-2} MJ/m ²)	Solar Load-actual (10^{-2} Watt/m ²)	Factor	Solar Load (Watt/m ²)
7.00	14	38.89	16.41	2.37
8.00	69	191.67	16.41	11.68
9.00	135	375.00	16.41	22.85
10.00	207	575.00	16.41	35.04
11.00	266	738.89	16.41	45.03
12.00	313	869.45	16.41	52.98
13.00	325	902.79	16.41	55.00
14.00	312	866.67	16.41	52.81
15.00	269	747.23	16.41	45.53
16.00	209	580.56	16.41	35.38
17.00	116	322.22	16.41	19.63
18.00	39	108.33	16.41	6.60
19.00	4	11.11	16.41	0.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 แผนภูมิแสดงภาระรังสีความร้อนตลอดวัน

3.5.1 การออกแบบ



Case study : distance between of pipe is 150 mm.

รูปที่ 3-7 แสดงตำแหน่งการวางท่อน้ำ

ค่าที่ใช้ในการออกแบบ :

ค่าสภาพการนำความร้อนของท่อ PEX (k_1)	:	0.35	W/m °C
ความหนาของท่อ PEX	:	0.0023	m
ค่าสภาพการนำความร้อนของคอนกรีต (k_2)	:	1.3	W/m °C
ความหนาของชั้นคอนกรีต	:	0.06	m
ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน (k)	:	0.037	W/m °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การคำนวณ

สมการที่ใช้ในการทดลอง คือ สมการ Water Capacity

$$q_{cond} = \frac{\dot{m}_f C_p \Delta T}{A} \quad (3.1)$$

$$q_{cond} = \frac{\dot{m}_f C_p (T_{return} - T_{supply})}{A}$$

เมื่อ $q_{cond} = 80 \text{ W/m}^2$ ในช่วงเวลากลางวัน

$q_{cond} = 35 \text{ W/m}^2$ ในช่วงเวลากลางคืน

$C_p = 4.18 \text{ W/m}^2$

$= 4.18 \times 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{C}$

$A = 19.35 \text{ m}^2$

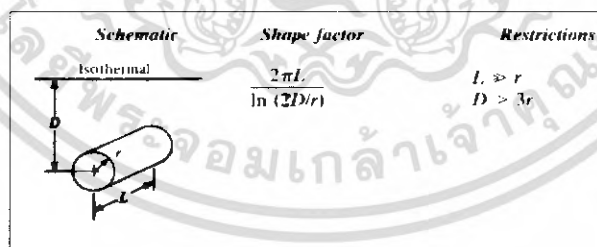
และสมการ Floor Capacity

$$q_{cond} = U \frac{(T_{return} + T_{supply})}{2} \quad (3.2)$$

เมื่อ U เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient)

$$\frac{1}{U} = \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{A}{sk_2} \quad (3.3)$$

S : shape factors ของท่อน้ำ



รูปที่ 3-8 แบบทรงกระบอกอุณหภูมิคงที่ยาว L วางในแนวนอน ฝังในตัวกลางกึ่งอนันต์

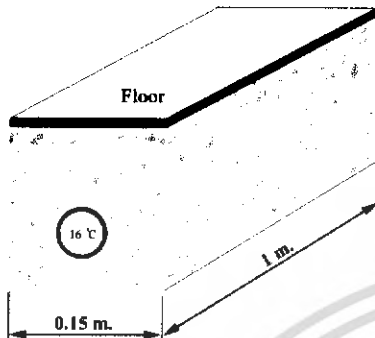
จากสมการ Shape Factors
$$S = \frac{2\pi L}{\ln(2D/r)} \quad (3.4)$$

แทนค่าที่ใช้ในการออกแบบในสมการที่ (3.4) ได้ค่า Shape Factors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{2\pi(1m)}{\ln[(2 \times 0.06m)/0.01m]}$$

$$S = 2.529m$$



รูปที่ 3-9 ชิ้นส่วนพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ

เมื่อ A คือพื้นที่ที่พิจารณาความยาว 1 เมตร กว้าง 0.15 เมตร

ดังนั้น $A = \text{กว้าง} \times \text{ยาว}$

$$A = 1 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$$

$$A = 0.15 \text{ m}^2$$

นำค่าที่ได้จากการคำนวณแทนในสมการ (3.3) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด

$$\frac{1}{U} = \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{A}{sk_2}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{0.0023m}{0.35W/m \cdot C} + \frac{0.15m^2}{(1.3W/m \cdot C)(2.529m)}$$

$$U = 18.16W/m^2 \cdot C$$

นำค่า U ที่ได้แทนลงในสมการที่ (3.2) จะได้สมการ คือ

$$q_{cond} = (18.16W/m^2 \cdot C) \frac{(T_{return} + T_{sup ply})}{2} \quad (3.5)$$

นำสมการที่ (3.1) จับเท่ากับสมการที่ (3.5) เพื่อหาอุณหภูมิน้ำเข้าในช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำ และก่อนที่จะนำสมการทั้งสองมาเท่ากัน จะต้องทราบอัตราการไหลที่เหมาะสมก่อน ซึ่งสามารถหาได้จากการทดลอง เมื่อได้อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิพื้นไม่เกิน 20.5 องศาเซลเซียส ในช่วงที่มีภาระแสงสูงสุดของวันแล้ว ก็สามารถหาอุณหภูมิน้ำในช่วงที่ไม่มีภาระแสงมากระทำได้ ซึ่งก็จะได้ลักษณะอุณหภูมิของน้ำเข้าห้องตลอดทั้งวันที่สามารถทำให้อุณหภูมิพื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดทั้งวัน

อัตราสูญเสียในท่อ (Friction Loss in PEX)

พลังงานที่สูญเสียในท่อนั้นจะเกิดขึ้นในหลายส่วนด้วยกันทั้งนี้จะแบ่งการสูญเสียพลังงานออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นการสูญเสียหลักและส่วนการสูญเสียรอง โดยที่การสูญเสียหลักนั้นจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ความยาวของท่อ ขนาดของท่อ และความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านท่อ โดยในที่นี้เราจะเลือกอัตราการไหลที่ 7 ลิตร/นาที เป็นตัวอย่างในการคำนวณส่วนอัตราการไหลอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลองก็จะใช้วิธีคิดแบบเดียวกัน ส่วนการสูญเสียรองนั้นจะเป็นส่วนของข้อต่อที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างท่อ

$$\text{จากสูตร} \quad Q = AV \quad (3.6)$$

$$V = Q/A \quad (3.7)$$

$$\text{โดยที่ } Q = 7l/min = 0.000117 m^3/s$$

$$\text{และ } A = \pi D^2 / 4 = (\pi \times 0.016^2) / 4 = 0.0002 m^2$$

$$V = (0.000117 m^3/s) / (0.0002 m^2)$$

$$= 0.585 m/s$$

หาค่า The relative roughness

$$\epsilon / D = 0.0005 mm / 16 mm = 3.125 \times 10^{-5} \quad (3.8)$$

หาค่า Reynolds Number

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.9)$$

$$= \frac{(999 kg/m^3)(0.528 m/s)(0.016 m)}{1.14 \times 10^{-3}}$$

$$= 7403$$

จะเห็นว่าค่า Reynolds Number ที่ได้มีค่ามากกว่า 4000 แสดงว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เพราะฉะนั้นสามารถหาค่า f ได้จากสูตร

$$f = 0.25 \left(\log \left(\frac{\epsilon / D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^{-2} \quad (3.10)$$

$$f = 0.25 \left(\log \left(\frac{3.125 \times 10^{-5}}{3.7} + \frac{5.74}{7403^{0.9}} \right) \right)^{-2}$$

$$f = 0.0337$$

พลังงานหลักที่สูญเสียในท่อโดยที่ท่อยาว 105 เมตร

$$h_f = \frac{fLV^2}{2Dg} = \frac{(0.0337)(105m)(0.585^2 m/s)}{2 \times 0.016m \times 9.81m/s} \quad (3.11)$$

$$= 3.875 m$$

พลังงานสูญเสียรองที่เกิดขึ้นในข้อต่อ

K = Loss Coefficient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ข้อโค้งแต่ละค่าจะมีค่า K ไม่เท่ากัน หากเป็นข้อค่อ 180° จะมีค่า $K = 1.5$ มีจำนวน 34 ตัว ส่วนข้องอ 90° แบบเกลียว จะมีค่า $K = 1.5$ มี 8 ตัว ซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณคือ

$$h_m = \frac{(\sum K)V^2}{2g} \quad (3.12)$$

$$= \frac{[(1.5 \times 34) + (1.5 \times 8)](0.528^2 \text{ m/s})}{(2 \times 9.81 \text{ m/s}^2)}$$

$$= 0.895 \text{ m}$$

เพราะฉะนั้นจะมีพลังงานที่สูญเสียในท่อทั้งหมด

$$h_{f_{\text{total}}} = h_f + h_m \quad (3.13)$$

$$= 3.875 \text{ m} + 0.895 \text{ m}$$

$$= 4.752 \text{ m}$$

เช่นเดียวกันหากเราต้องการหาอัตราการไหลอื่น ๆ ก็จะมีวิธีการคำนวณเช่นเดียวกันเพียงแค่เปลี่ยนอัตราการไหลใหม่เท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

4.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1) ศึกษาทฤษฎีและวิธีการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบแฟรงสิจากพื้น และวิเคราะห์หาข้อบกพร่องของระบบ เพื่อทำการแก้ไขปรับปรุง

2) ทดลองอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ได้ผลจากการคำนวณ

3) ทดลองหาการควบคุมอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้น เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิพื้นมีค่า 20.5 และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพื้นได้รับการระของแสงสูงสุด

4) ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิภายในห้อง โดยแบ่งการวัดอุณหภูมิออกเป็น 4 จุด ซึ่งแต่ละจุดสูงจากพื้น 110 เซนติเมตร

5) ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟ โดยแบ่งการวัดออกเป็น 2 จุด คือบริเวณหน้าห้องทดสอบและหลังห้องทดสอบ ทำการวัดที่ระยะความสูง 110 และ 60 เซนติเมตร จากพื้นห้องทดสอบ

6) ทดลองหาความสามารถของพื้นที่สามารถทำความเย็นได้สูงสุด ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน โดยไม่มีภาระของแสงมากระทำ

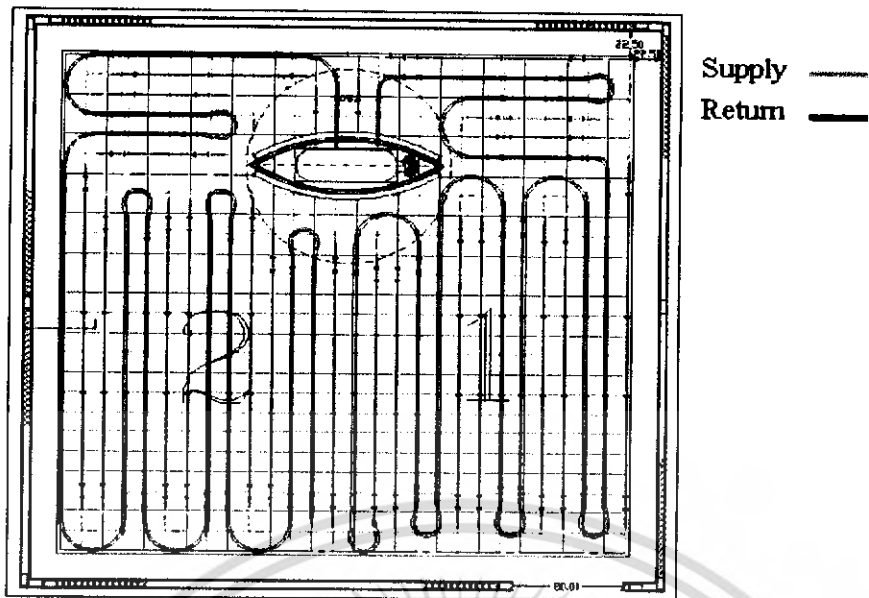
7) ทดลองหาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิห้องเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ มาปูพื้นห้องทดสอบ

8) ทดลองหาอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบในระดับต่าง ๆ

4.2 อุปกรณ์การทดลอง

ห้องทดลอง

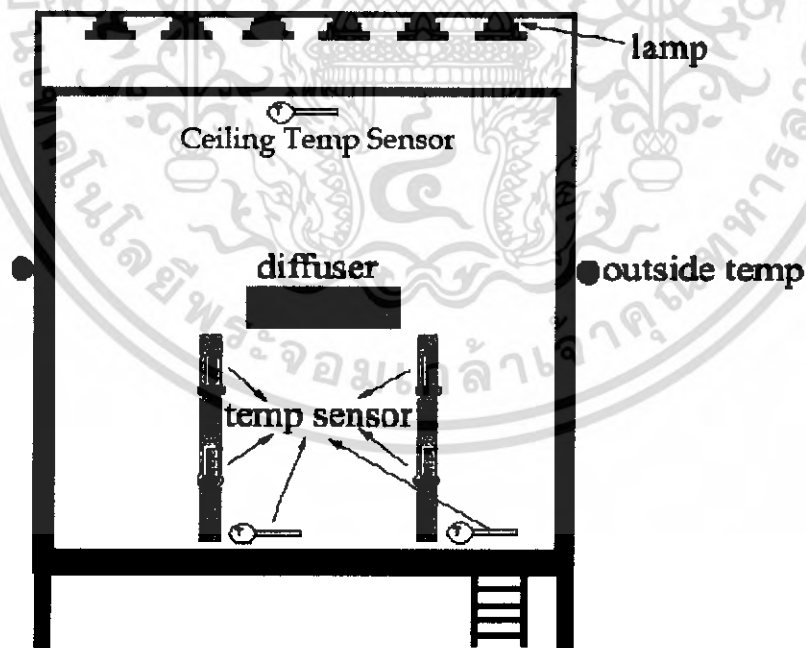
ขนาดกว้าง 4.5 เมตร ยาว 4.3 เมตร และความสูงจากพื้นถึงเพดาน 2.7 เมตร มีพื้นที่ในการทำความเย็นที่พื้นประมาณ 19.35 ตารางเมตร ประกอบด้วยพื้นคอนกรีตที่มีท่อน้ำอยู่ภายใน 2 ชุด หลังคากระจกใส และชุดคอยล์เย็น โดยเป็นการจำลองระบบทำความเย็นภายในอาคารขนาดใหญ่ ซึ่งได้รับการออกแบบให้พื้นของห้องได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง สำหรับภาระจากแสงอาทิตย์จะใช้การจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ด้วยแสงไฟ (Lamp) โดยค่าของแสงไฟที่ตกกระทบพื้นห้องทดสอบนั้นจะมีค่าต่าง ๆ กันตามรูปที่ 3-5 เพื่อให้เกิดการระรังสีความร้อนในปริมาณและรูปแบบต่าง ๆ กัน ในการทดลองตามกรณีการทดลองที่ได้กำหนดขึ้นมา



รูปที่ 4-1 แสดงลักษณะการวางท่อ นำไว้ภายใต้พื้นห้องทดสอบ

เซนเซอร์

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ วัตต์อุณหภูมิ ความชื้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในและภายนอกห้องดังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-2 แผนผังแสดงตำแหน่งของเซนเซอร์และโคมไฟของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟ

โอเปอร์ทีฟเป็นอุณหภูมิความรู้สึกของมนุษย์ที่สัมผัส การทดลองได้จำลองอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่ามีลักษณะเป็นรูปทรงไข่มุกด้วยผ้าสีเทา โดยมีเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิอยู่ภายในวัดได้แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสูตรการคำนวณในบทที่ 3

4.3 วิธีการทดลอง

1) ทดลองหาอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟ โดยใช้เซ็นเซอร์วางท่ามุมต่าง ๆ กัน คือ 0, 60 และ 90 องศา ตามลำดับ เพื่อใช้แทนลักษณะของถนนในอิริยาบถต่างๆ คือ ยืน, นั่ง และ นอน โดยวางสูงจากพื้น 110 เซนติเมตร โดยทำการทดลองที่ภาวะของแสงต่างกันดังนี้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 วัตต์/ตารางเมตร แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับการคำนวณ

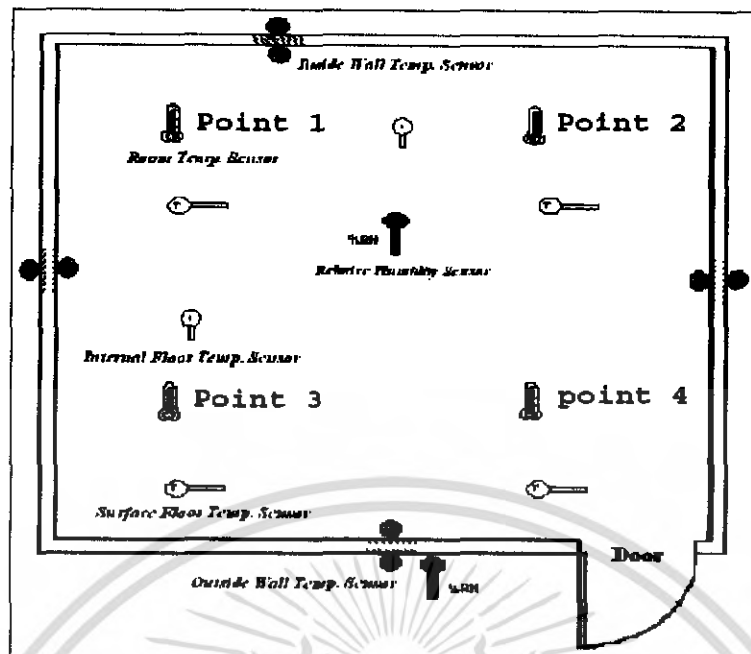


รูปที่ 4-3 แสดงลักษณะการวางโอเปอร์ทีฟเซนเซอร์

2) ทดลองหาการควบคุมอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่โดยใช้อัตราการไหลที่เหมาะสม เมื่อมีภาวะของแสงสูงสุดที่ 55 วัตต์/ตารางเมตร ในที่นี้เลือกใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 13 องศาเซลเซียส แล้วทำการปรับอัตราการไหลโดยเริ่มที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ แล้วนำค่าของอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ได้มาวิเคราะห์อัตราการไหล ที่ทำให้อุณหภูมิพื้นเข้าใกล้ 20.5 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลที่ทำให้อุณหภูมิในพื้นที่เข้าใกล้ 20 องศาเซลเซียส ทำการทดลองใหม่ซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนมาใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 14 องศาเซลเซียส แล้วนำค่าอัตราการไหลที่ได้ทั้งสี่ค่าไปทดสอบกับภาวะแสงตลอดทั้งวัน

3) ทำการทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิภายในห้องโดยกำหนดอุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 13 องศาเซลเซียสจากนั้นทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องโดยใช้เซ็นเซอร์ที่กระจายอยู่ในห้องทั้ง 4 จุด และสูงจากพื้น 110 เซนติเมตร กำหนดอัตราการไหลแต่ละครั้งที่ทำการวัดอุณหภูมิห้องเท่ากับ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ เสร็จแล้วทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 14 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 แสดงตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ใช้วัดการกระจายอุณหภูมิภายในห้อง

4) ทำการทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิโอเปอร์เทิร์ฟ โดยกำหนดอุณหภูมิหน้าเข้าคองที่ 13 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องโดยใช้เซ็นเซอร์วางท่ามุมต่าง ๆ กัน คือ 0, 60 และ 90 องศา ตามลำดับ โดยวางสูงจากพื้น 110 และ 60 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งจุดที่ 1 และจุดที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4-4 และทำการทดลองที่ภาระของแสงต่างกันดังนี้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 วัตต์/ตารางเมตร แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ และเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ไ้ระหว่างจุดที่ 1 กับจุดที่ 3

5) ทำการทดลองหาความสามารถของพื้นที่ที่สามารถทำความเย็นได้สูงสุด โดยกำหนดอุณหภูมิหน้าเข้าคองที่ 13 องศาเซลเซียส และไม่มีภาระของแสงมากระทำที่พื้นของห้องทดสอบ แล้วทำการปรับอัตราการไหลโดยเริ่มที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ แล้วนำอุณหภูมิพื้นที่อัตราการไหลนั้น ๆ สามารถทำได้ต่ำที่สุดมาศึกษา จากนั้นเปลี่ยนมาใช้อุณหภูมิหน้าเข้าคองที่ 14 องศาเซลเซียส แล้วนำผลการทดลองที่มาเปรียบเทียบกัน

6) ทำการทดลองหาอุณหภูมิพื้นของวัสดุที่นำมาปูบนพื้นห้องทดสอบ และอุณหภูมิห้องทดสอบ โดยนำกระเบื้องปูพื้นสี่เหลี่ยมมาปูในห้องทดสอบ แล้วให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบตลอดทั้งวัน โดยใช้อัตราการไหลคองที่ 7 ลิตร/นาที่ เสร็จแล้วทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนวัสดุปูพื้นมาใช้กระเบื้องสีดำ, หินแกรนิต และหินอ่อน ตามลำดับ แล้วนำผลที่ได้จากวัสดุทั้ง 4 ชนิดมาศึกษาหาข้อเปรียบเทียบกัน

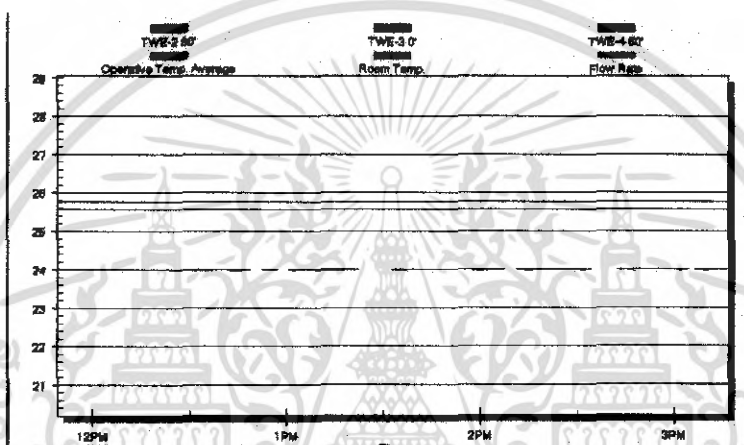
7) ทดลองหาอุณหภูมิโอเปอร์เทิร์ฟโดยปรับอัตราการไหลเริ่มที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ โดยไม่ให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบแต่อย่างใด จากนั้นรอก่อนว่าอุณหภูมินิ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง นำผลอุณหภูมิโอเปอร์เทิร์ฟที่ในแต่ละอัตราการไหลมาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 5

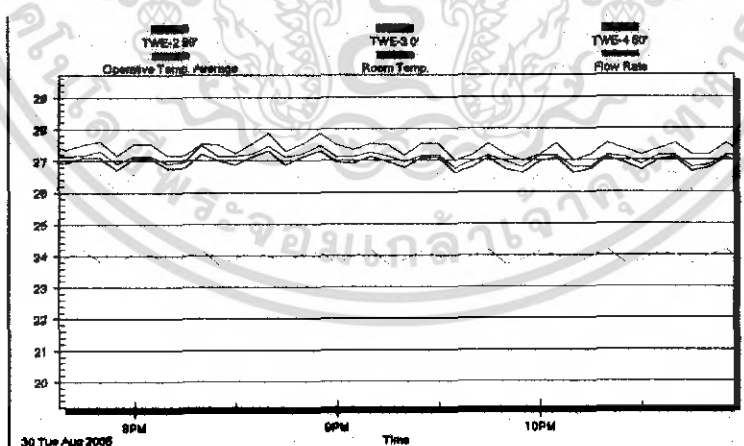
ผลการทดลอง

1. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

โดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณซึ่งแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการที่ (3.7) นั้น ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้นให้มีลักษณะเป็นรูปทรงไข่มุ่ด้วยผ้าสีเทาโดยมีเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิอยู่ภายในวัสดุ จัควางที่ตำแหน่งตรงกลางห้องทดลองและจัควางให้อยู่ในระดับความสูง 110 เซนติเมตรจากระดับพื้นห้องทดสอบ และให้พื้นได้รับภาวะรังสีความร้อนตกกระทบที่พื้น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 วัตต์/ตารางเมตร ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปต่อไปนี้

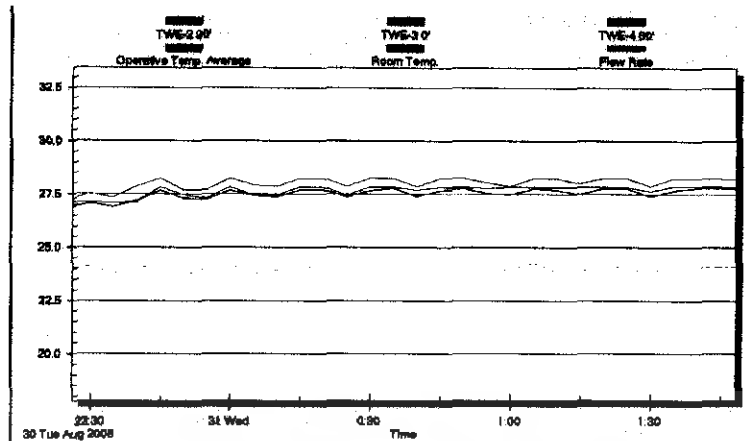


รูปที่ 5-1 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาวะแสงที่ 0 วัตต์/ตารางเมตร

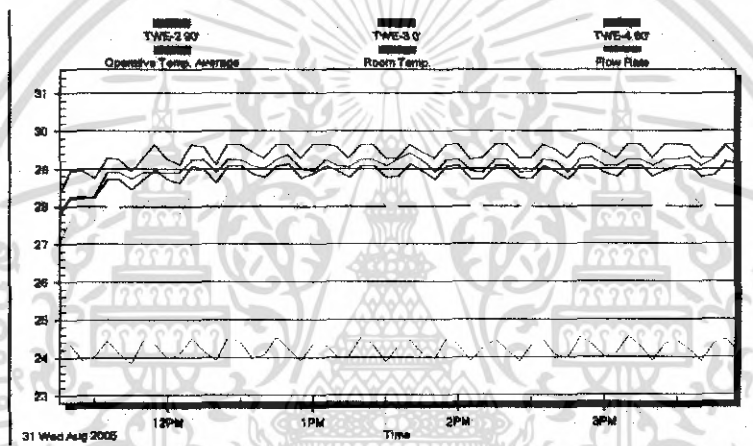


รูปที่ 5-2 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาวะแสงที่ 10 วัตต์/ตารางเมตร

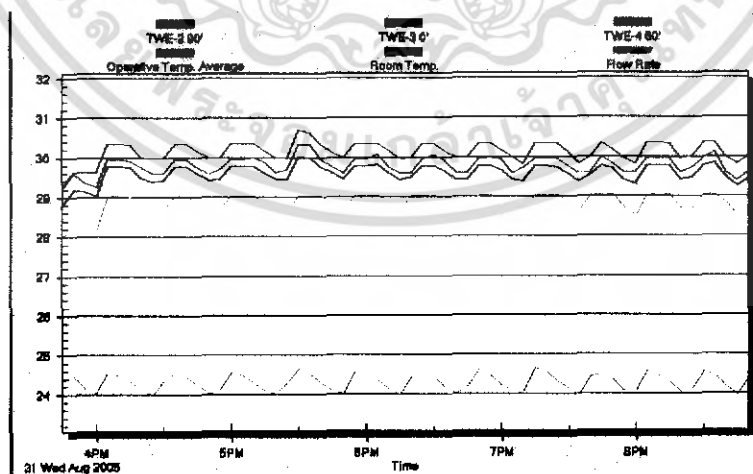
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-3 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ให้การแสงที่ 20 วัตต์/ตารางเมตร

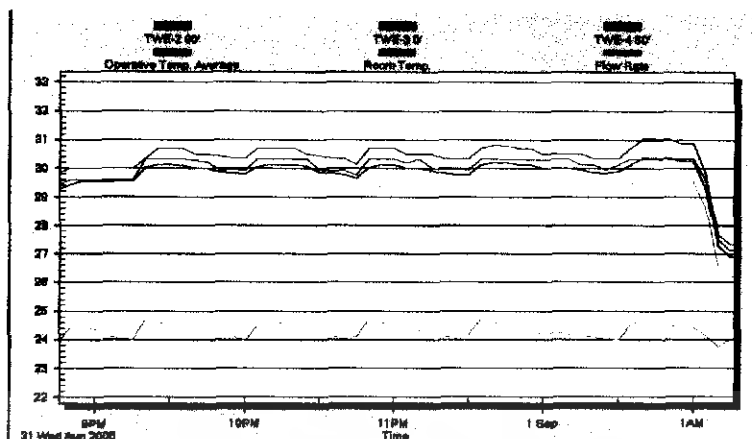


รูปที่ 5-4 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ให้การแสงที่ 30 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5-5 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ให้การแสงที่ 40 วัตต์/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-6 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ให้ภาระแสงที่ 50 วัตต์/ตารางเมตร

จากผลการทดลองที่แสดงตั้งแต่รูปที่ 5-1 ถึงรูปที่ 5-6 นั้นเราสามารถหาค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟได้โดย เอาค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวที่วางในมุม 90, 60 และ 0 องศา ซึ่งแทนลักษณะของคนในอิริยาบถต่าง ๆ คือ ยืน, นั่ง และ นอน มารวมกันแล้วหารด้วยจำนวนเซนเซอร์ที่ทำการวัดนั้นก็คือ 3 ก็จะได้ค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่แท้จริงที่ต้องการออกมา ซึ่งค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 แสดงผลการทดลองหาอุณหภูมิโอเปอเรทีฟจากเซนเซอร์ที่ใช้ทำการวัดค่า

ภาระแสง (วัตต์/ตารางเมตร)	ค่าที่วัดได้ (องศาเซลเซียส)
0	25.563
10	26.936
20	27.591
30	28.925
40	29.67
50	30.27

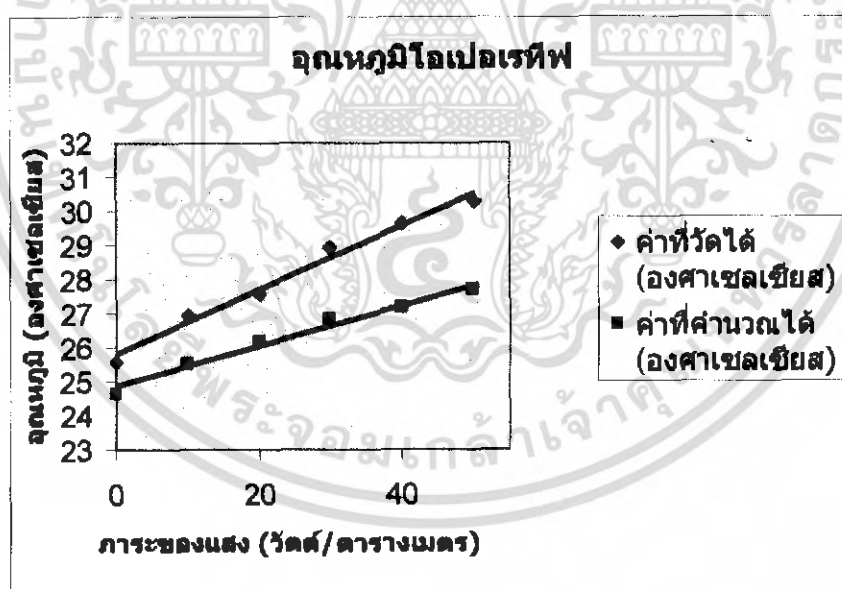
และเอาค่าที่ทำกรวัดได้จากตัวเซนเซอร์ที่ทำขึ้นมานั้น ไปเปรียบเทียบกับกรคำนวณที่แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (3.7) ซึ่งแสดงค่าออกมาดังตารางที่ 5-2 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-2 แสดงอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการคำนวณ

ภาระแสง (วัตต์/ตารางเมตร)	T_{MRT}	T_{Room}	ค่าที่คำนวณได้ (องศาเซลเซียส)
0	25.4	23.92	24.66
10	27	24.1	25.55
20	28	24.3	26.15
30	29.3	24.4	26.85
40	29.8	24.6	27.2
50	30.6	24.8	27.7

เมื่อได้ค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการทดลองและการคำนวณแล้ว นำค่าทั้งสองที่หาได้ไปเปรียบเทียบกันโดยการเขียนกราฟ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กราฟดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5-7



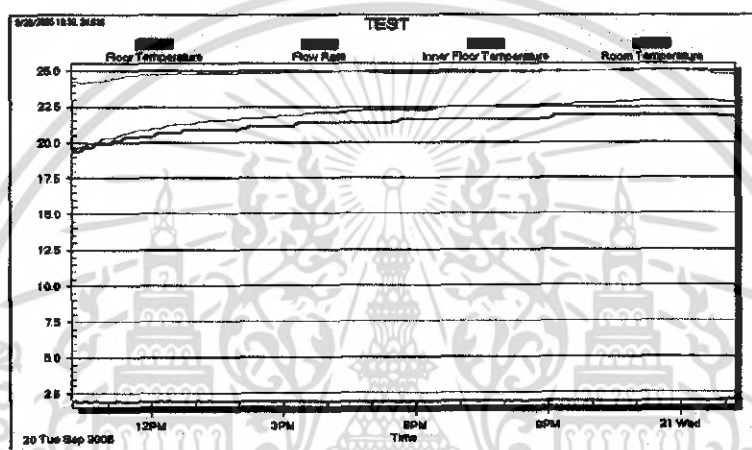
รูปที่ 5-7 กราฟอุณหภูมิโอเปอเรทีฟเปรียบเทียบค่าระหว่างจากการทดลองและจากการคำนวณ

จากรูปที่ 5-7 จะพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้ โดยที่สภาวะที่เราให้ภาระแสงในระดับที่ต่ำ ค่าที่ได้จากการทดลองและค่าได้จากการคำนวณจะมีไม่มากนัก แต่ที่สภาวะที่เราให้ภาระแสงในระดับที่สูงแก่ห้องทดสอบพบว่า ค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการทดลองและการคำนวณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

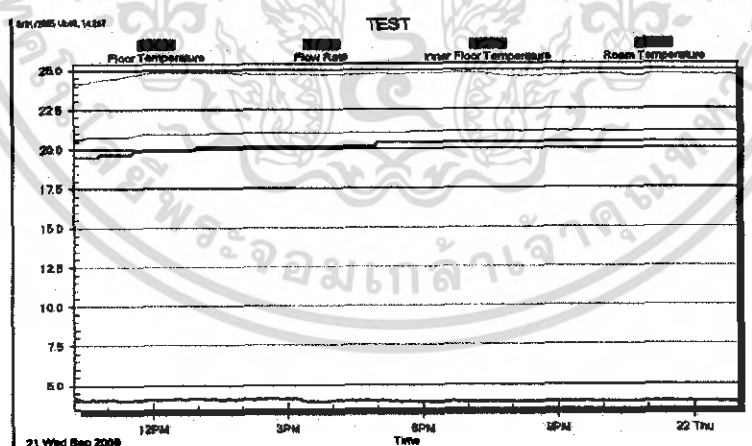
มีค่าต่างกันมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากว่า ขณะที่ให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบตัวเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟนั้นจะ โคนแสงที่มาจากหลอดไฟก่อนที่จะได้รับความเย็นที่แผ่รังสีมาจากพื้น และลักษณะของเซนเซอร์นั้นมีค่าตีเทามอยู่ด้วย ทำให้ตัวเซนเซอร์ดูคลื่นแสงที่ส่องมาไว้ จึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าการคำนวณและมีค่าต่างกันมากขึ้นเมื่อให้ภาระแสงในระดับที่สูงแก่ห้องทดสอบ

2. ทดลองหาการควบคุมอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้น เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม

2.1 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าครั้งที่ 13 องศาเซลเซียส แล้วทำการปรับอัตราการไหลโดยเริ่มที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที ตามลำดับ และให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบที่ระดับ 55 วัตต์/ตารางเมตร ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบในแต่ละอัตราการไหล ได้ผลการทดลองดังรูปต่อไปนี้

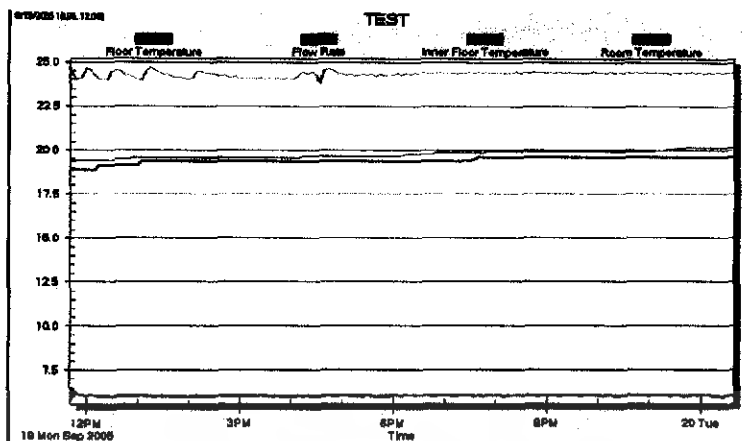


รูปที่ 5-8 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 2 ลิตร/นาที

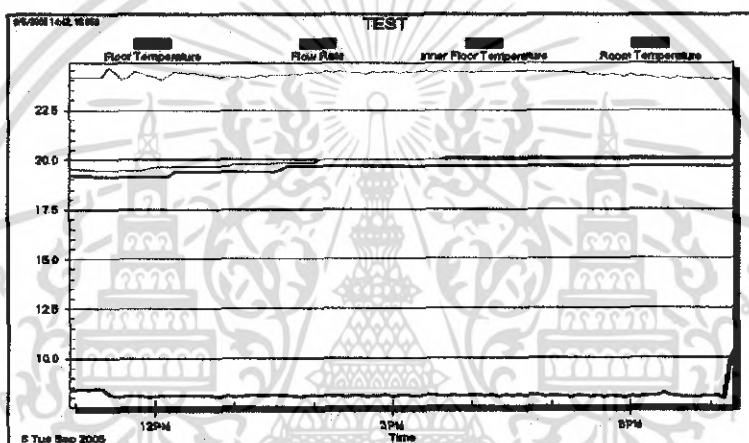


รูปที่ 5-9 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 4 ลิตร/นาที

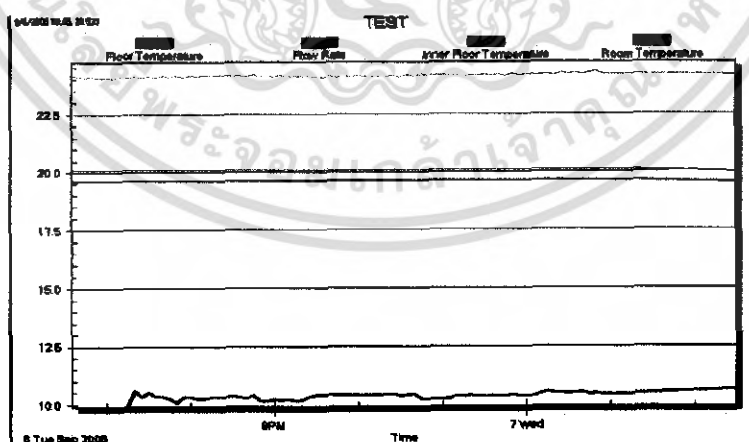
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-10 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 6 ลิตร/นาที

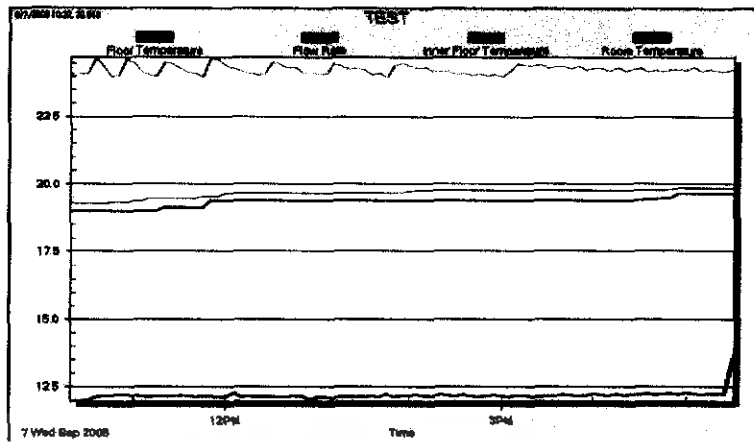


รูปที่ 5-11 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 8 ลิตร/นาที

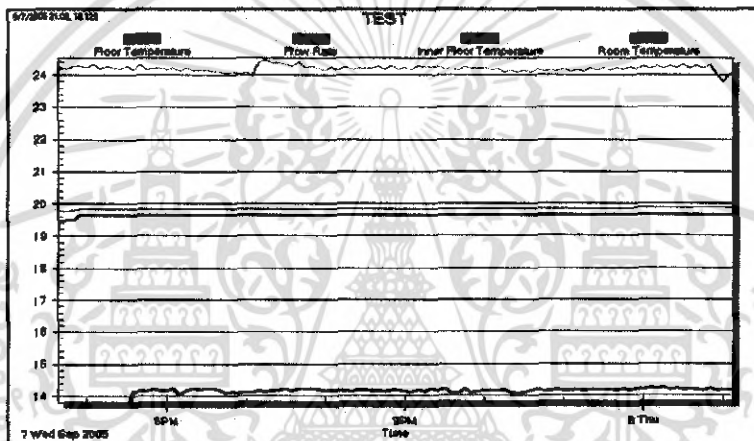


รูปที่ 5-12 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 10 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-13 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 12 อัตรานาที



รูปที่ 5-14 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 14 อัตรานาที

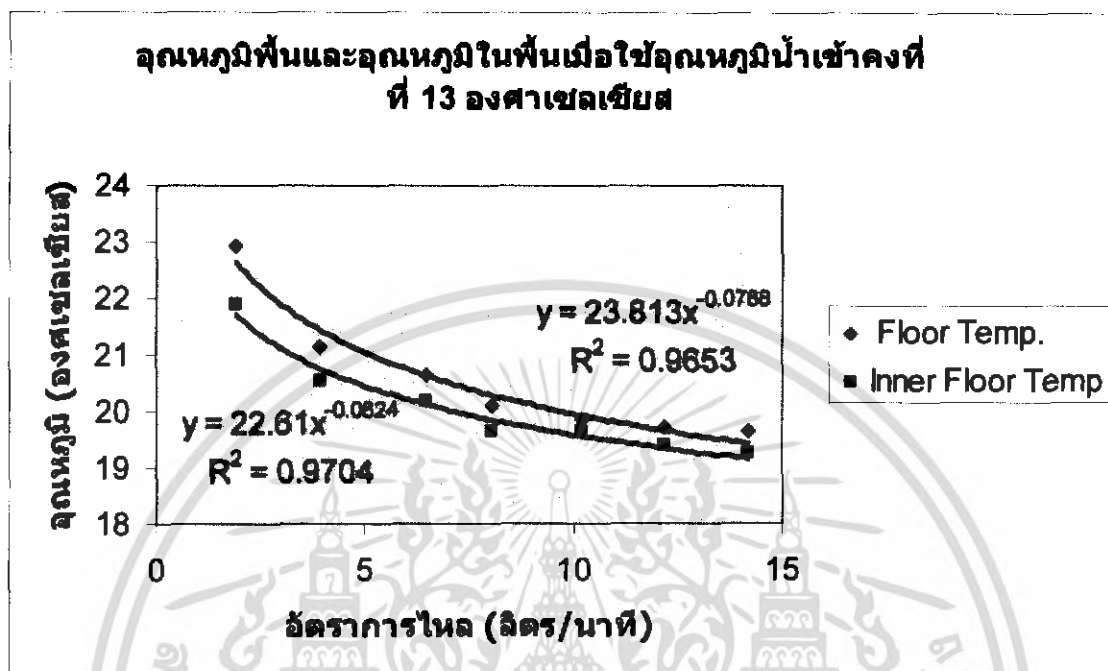
จากรูปที่ 5-8 ถึงรูปที่ 5-14 เราจะได้อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นของห้องทดสอบออกมา จะใช้ช่วงที่อุณหภูมิของพื้นและอุณหภูมิในพื้นหนึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะได้ผลการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่อุณหภูมิหน้าข้างที่ที่ 13 องศาเซลเซียส

Flow Rate	Floor Temp.	Inner Floor Temp.
1.92	22.93	21.891
3.916	21.13	20.53
6.461	20.65	20.17
8.063	20.094	19.641
10.211	19.84	19.641
12.18	19.72	19.391
14.188	19.66	19.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองดังกล่าว จึงนำค่าอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่มาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาสมการที่นำไปใช้อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิพื้นมีค่า 20.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในพื้นที่มีค่า 20 องศาเซลเซียส และกราฟดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5-15



รูปที่ 5-15 กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคงที่ที่ 13 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5-15 จะได้สมการออกมาสองสมการด้วยกัน

$$y = 23.813x^{-0.0768} \quad (5.1)$$

และ

$$y = 22.61x^{-0.0824} \quad (5.2)$$

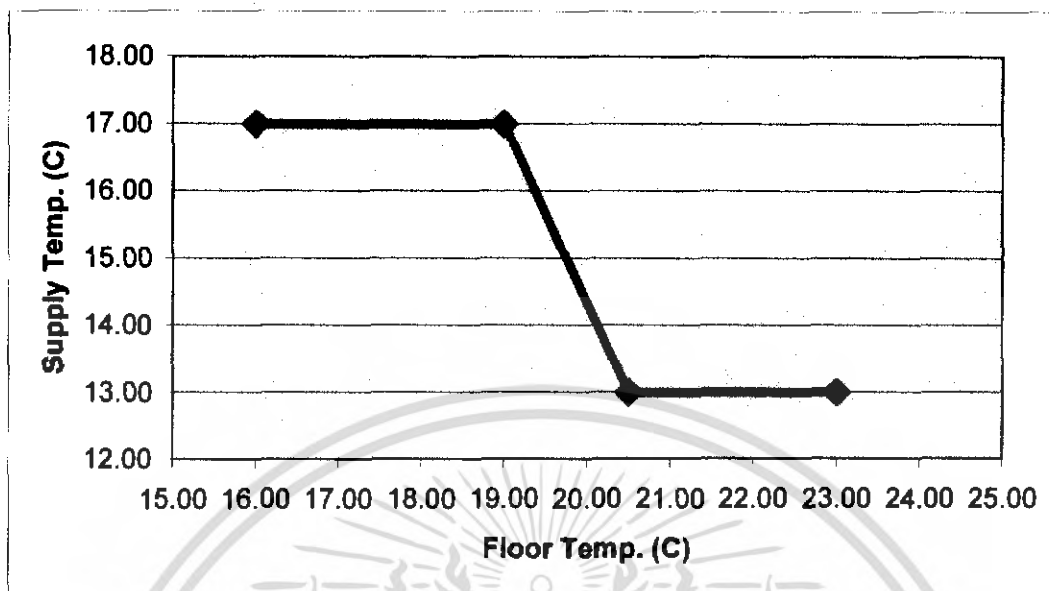
โดยที่สมการที่ (5.1) ใช้สำหรับหาอัตราการไหลที่ทำให้อุณหภูมิพื้นมีค่าใกล้เคียง 20.5 องศาเซลเซียส เมื่อห้องรับภาระโหลดสูงสุดที่ 55 วัตต์/ตารางเมตร และสมการที่ (5.2) ใช้หาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิในพื้นที่มีค่าใกล้เคียง 20 องศาเซลเซียส เมื่อห้องรับภาระโหลดสูงสุดที่ 55 วัตต์/ตารางเมตรเช่นกัน

ดังนั้นหาค่าอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้พื้นมีอุณหภูมิ 20.5 องศาเซลเซียสก่อน จากสมการที่ (5.1) แก้สมการหาค่า x โดยแทนค่า $y = 20.5$ องศาเซลเซียส จะได้ค่า $x = 7.032$ ลิตร/นาท

เมื่อเราได้อัตราการไหลที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปก็ต้องหาอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำแก่ห้องทดสอบ เพื่อที่จะได้ลักษณะของอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบตลอดทั้งวันที่เหมาะสม โดยแทนค่า $x = \dot{m}_f = 7.032$ ลิตร/นาท ลงในสมการที่ (3.1) แล้วนำสมการที่ได้ไปเท่ากับสมการที่ (3.5) เพื่อหาอุณหภูมิน้ำ ($T_{sup,ply}$) เข้าห้องทดสอบในช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำแก่ห้องทดสอบ ซึ่งเมื่อสมการออกมาแล้วได้ค่าอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบเท่ากับ 17.0609 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 17 องศา

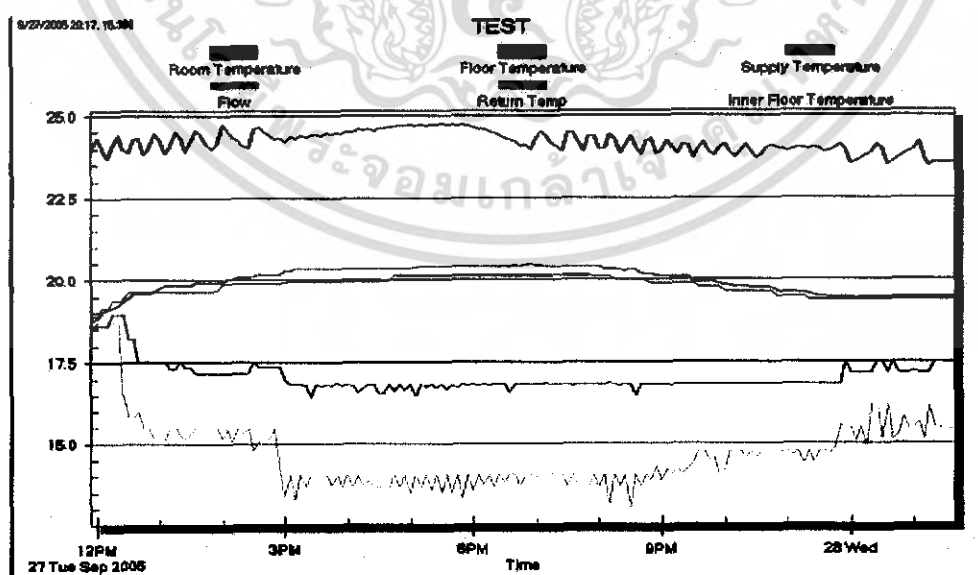
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซตเจียสนั่นเอง ชุดท้ายเราก็จะได้ลักษณะของอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบตลอดทั้งวัน ดังที่แสดงในรูปที่ 5-16



รูปที่ 5-16 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน

จากนั้นนำค่าที่หาได้ทั้งอัตราการไหลที่เหมาะสมคือ 7.032 ลิตร/นาที และอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีภาระแสงมากระทำคือ 17 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิน้ำเข้าที่ 13 องศาเซลเซียสเมื่อห้องได้รับการระของแสงสูงสุดของวันที่กำหนดขึ้นมาเอง มาทดสอบตลอดทั้งวัน โดยเปลี่ยนแปลงภาระของแสง ตามตารางที่ 3-1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิใบพื้นรวมถึงอุณหภูมิห้องว่าอยู่ในหลักความสบายที่ต้องการหรือไม่ และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5-17

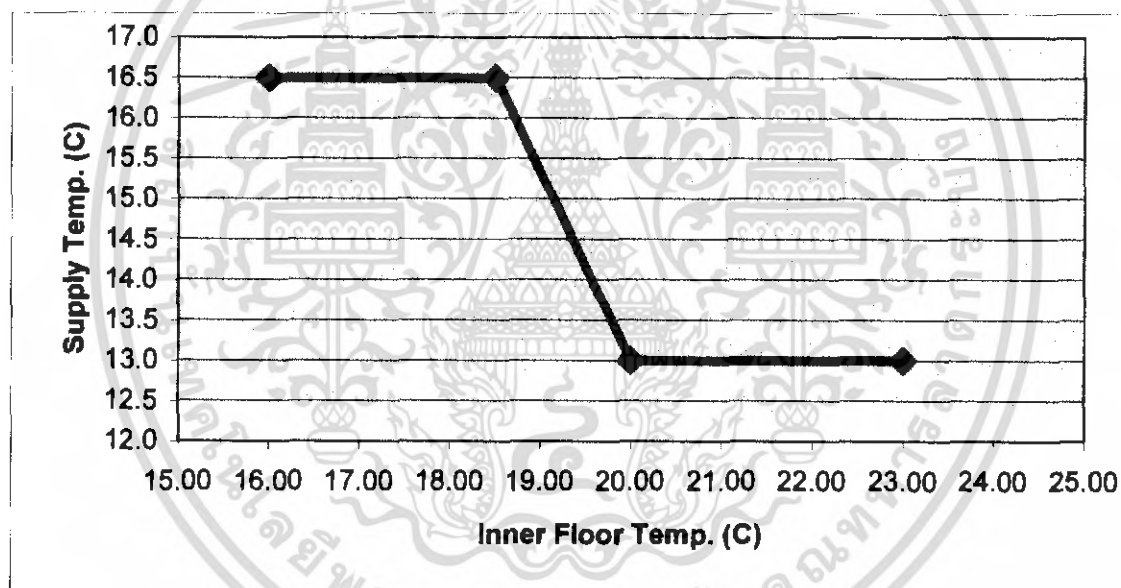


รูปที่ 5-17 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.032 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

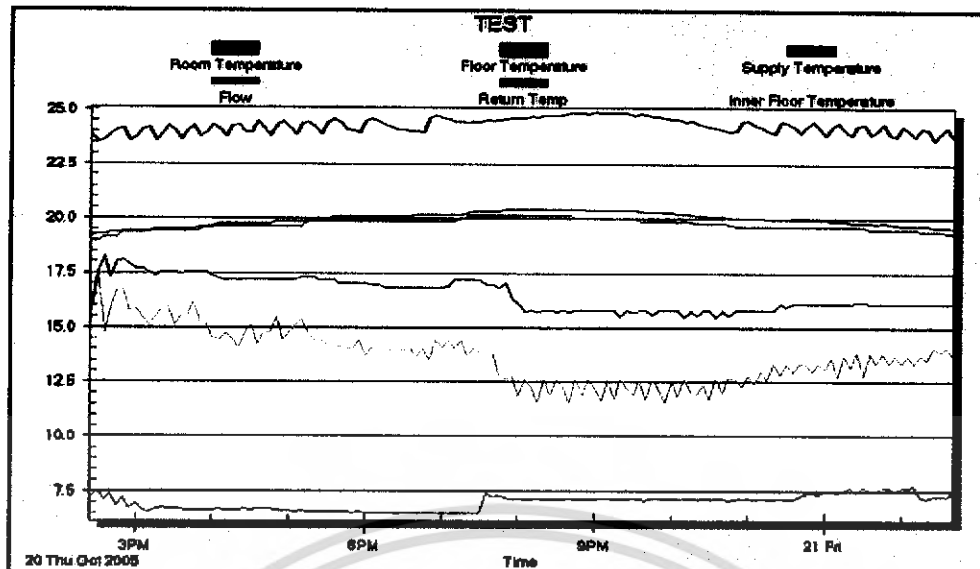
จากรูปที่ 5-17 พบว่าเมื่อเราใช้อัตรการไหลที่ 7.032 ลิตร/นาทึ สามารถทำให้อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 23.438-24.750 องศาเซลเซียส โดยที่ได้ห้องรับภาระของแสงตามลักษณะของแสงอาทิตย์จริงตลอดทั้งวัน และอัตราการไหลที่เหมาะสมนี้ยังส่งผลถึงอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ที่ต้องการควบคุมอีกด้วย จากการทดลองดังกล่าว ได้อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่สูงสุดของวันอยู่ที่ 20.422 และ 20.141 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งตรงกับความต้องการที่ได้กำหนดไว้ในตอนแรกของการทดลอง

จากนั้นนำเอาอุณหภูมิในพื้นที่ได้การการทดลองมาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมเพื่อควบคุมห้องทดสอบบ้าง โดยต้องการทำให้อุณหภูมิในพื้นที่อยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส ดังนั้นแทนค่า $y = 20$ องศาเซลเซียสลงในสมการที่ (5.2) แล้วแก้สมการหาค่า x ซึ่งสามารถหาค่า x ได้เท่ากับ 7.139 ลิตร/นาทึ ต่อไปก็หาอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำแก่ห้องทดสอบ แทน $x = \dot{m}_f = 7.139$ ลิตร/นาทึ ลงในสมการที่ (3.1) แล้วนำสมการที่ได้ไปเท่ากับสมการที่ (3.5) เพื่อหาอุณหภูมิน้ำ ($T_{sup,ply}$) ดังนั้นจะได้อุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำเท่ากับ 16.66 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 16.5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้อุณหภูมิของอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบตลอดทั้งวัน ดังที่แสดงในรูปที่ 5-18



รูปที่ 5-18 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน

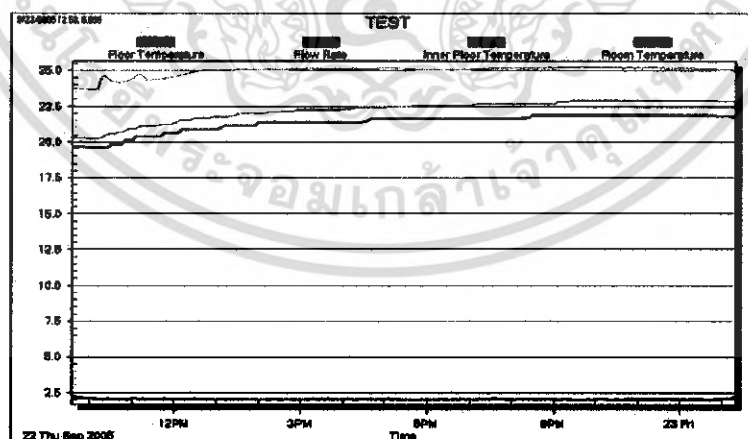
จากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งสอง คือ อัตราการไหลของน้ำและอุณหภูมิน้ำเข้าห้องช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำ และอุณหภูมิน้ำเข้าคงที่ที่ 13 องศาเซลเซียสเมื่อห้องได้รับภาระของแสงสูงสุดของวันที่กำหนดขึ้นมาเอง มาทดสอบตลอดทั้งวันโดยเปลี่ยนแปลงภาระของแสง โดยผลการทดลองแสดง ดังรูปที่ 5-19



รูปที่ 5-19 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.139 ลิตร/นาทึ

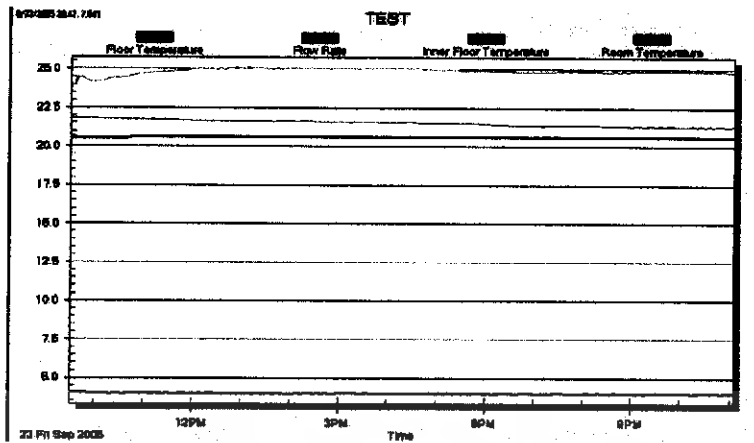
จากรูปที่ 5-19 พบว่าเมื่อเราใช้อัตราการไหลที่ 7.139 ลิตร/นาทึ สามารถทำให้อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 23.531-24.906 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่สูงสุดของวันอยู่ที่ 20.422 และ 20.141 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ตรงกับเงื่อนไขที่ได้กำหนดขึ้นมาในตอนต้นของการทดลอง และสอดคล้องกับหลักความสบายที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.4

2.2 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าคองที่ที่ 14 องศาเซลเซียส แล้วทำการปรับอัตราการไหลโดยเริ่มที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาทึ ตามลำดับ และให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบที่ระดับ 55 วัตต์/ตารางเมตร ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบในแต่ละอัตราการไหล ได้ผลการทดลองดังรูปต่อไปนี้

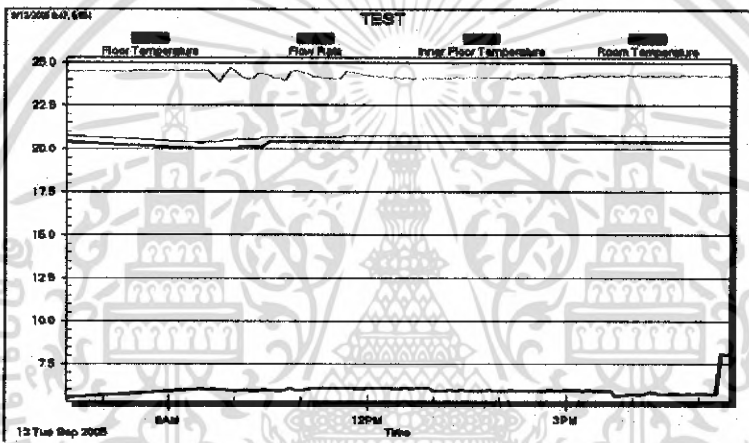


รูปที่ 5-20 ผลการควบคุมอัตราการไหลคองที่ที่ 2 ลิตร/นาทึ

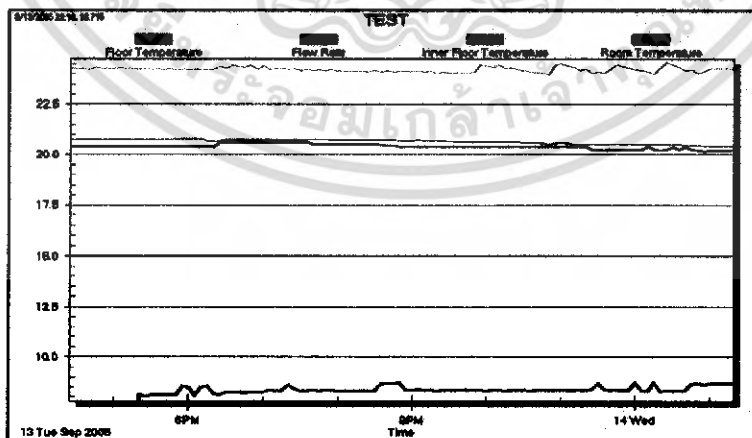
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-21 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 4 อัตร/นาทึ

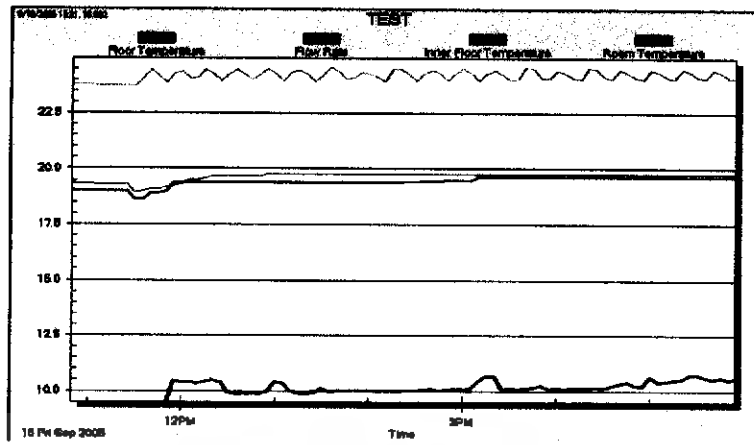


รูปที่ 5-22 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 6 อัตร/นาทึ

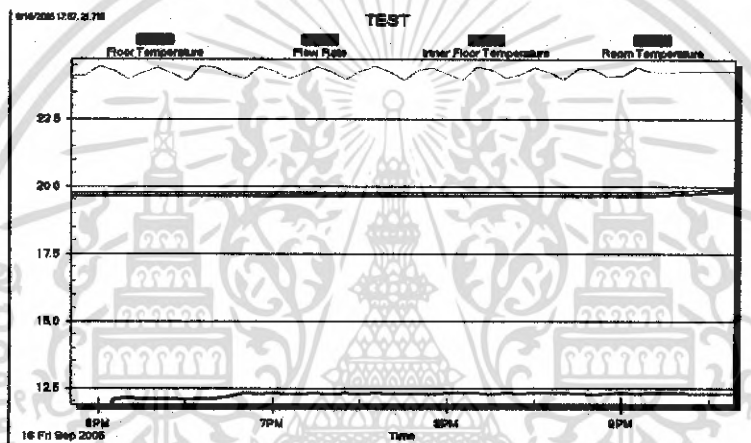


รูปที่ 5-23 ผลการควบคุมอัตราการไหลครั้งที่ 8 อัตร/นาทึ

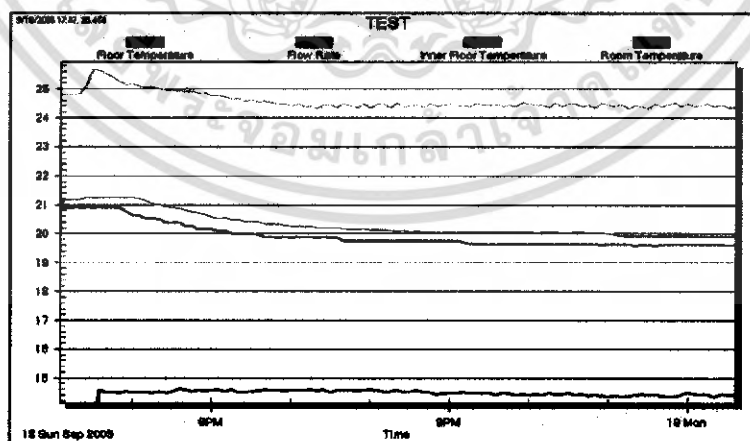
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-24 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 10 ลิตร/นาที



รูปที่ 5-25 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 12 ลิตร/นาที



รูปที่ 5-26 ผลการควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 14 ลิตร/นาที

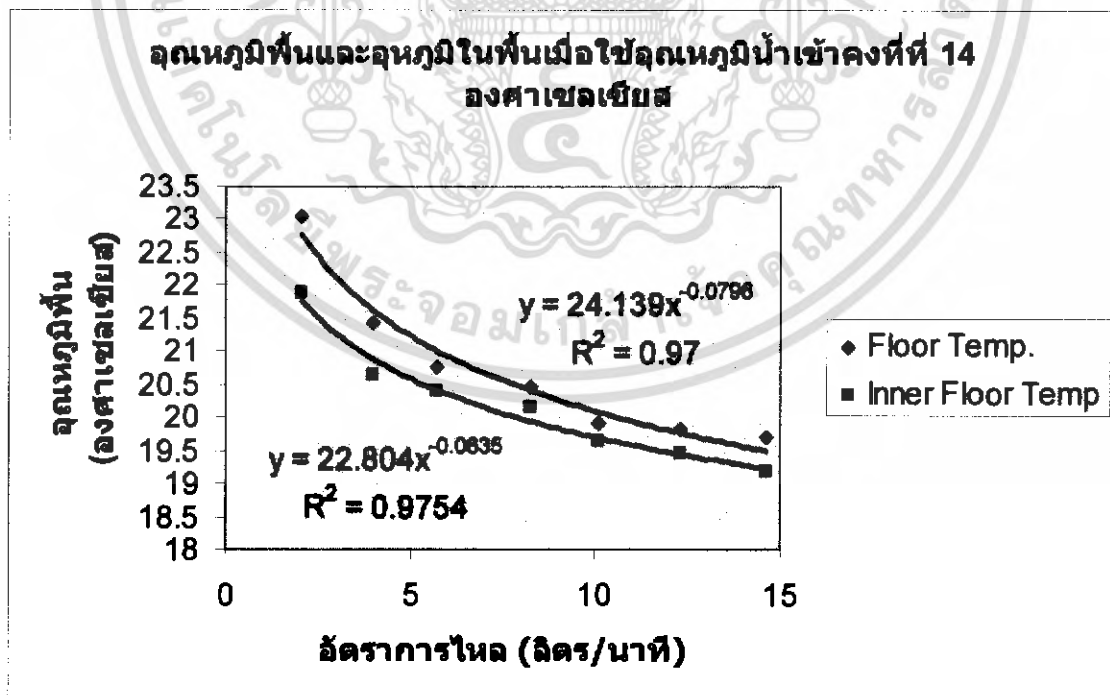
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5-20 ถึงรูปที่ 5-26 เราจะได้อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ของห้องทดสอบออกมา ที่อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 14 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5-4 ดังนี้

ตารางที่ 5-4 อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 14 องศาเซลเซียส

Flow Rate	Floor Temp.	Inner Floor Temp.
2.07	23.05	21.891
4.012	21.42	20.641
5.727	20.766	20.391
8.273	20.469	20.16
10.102	19.91	19.641
12.281	19.83	19.46
14.602	19.71	19.2

จากผลการทดลองดังกล่าว นำเอาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ได้มาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาสมการที่นำไปใช้หาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิพื้นมีค่า 20.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในพื้นที่มีค่า 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับที่ทำกับอุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 13 องศาเซลเซียสและกราฟดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5-27



รูปที่ 5-27 กราฟแสดงอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำคังที่ 14 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5-27 จะได้สมการออกมาสองสมการอีกเช่นกัน

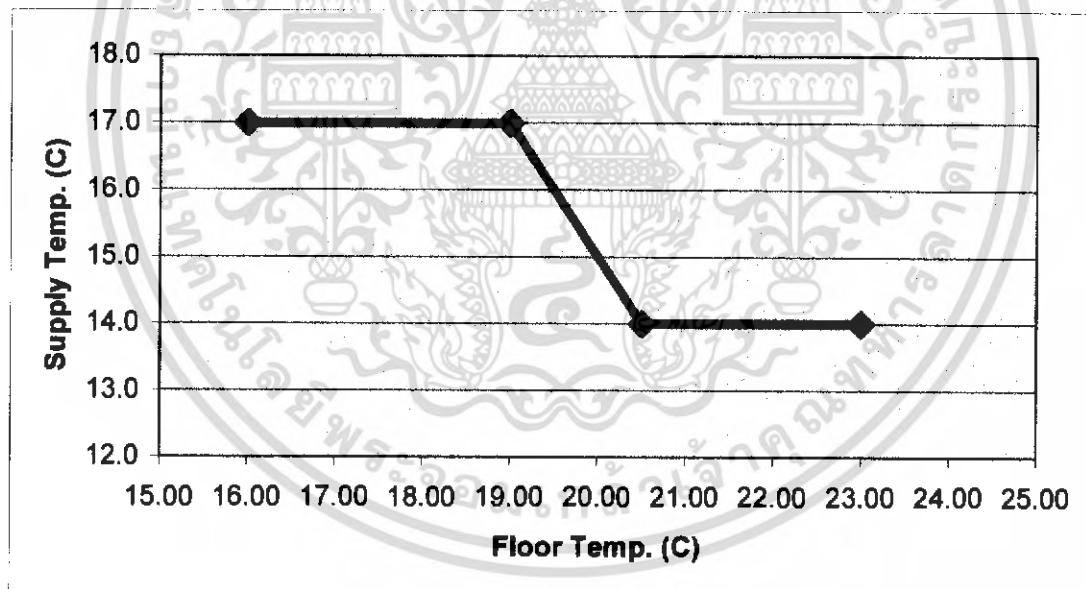
$$y = 24.139x^{-0.0796} \quad (5.3)$$

และ

$$y = 22.804x^{-0.0635} \quad (5.4)$$

โดยที่สมการที่ (5.3) ใช้สำหรับหาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้พื้นมีอุณหภูมิที่ 20.5 องศาเซลเซียส เมื่อได้รับการระของแสงที่ระดับสูงสุด ส่วนสมการที่ (5.4) ใช้สำหรับหาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิในพื้นที่มีค่า 20 องศาเซลเซียส เมื่อห้องทดสอบได้รับการระของแสงในระดับที่สูงสุดอีกเช่นกัน และอัตราการไหลดังกล่าวนี้คือทำให้อุณหภูมิอยู่ในหลักความสบายตลอดเวลาที่เราทำการทดสอบ

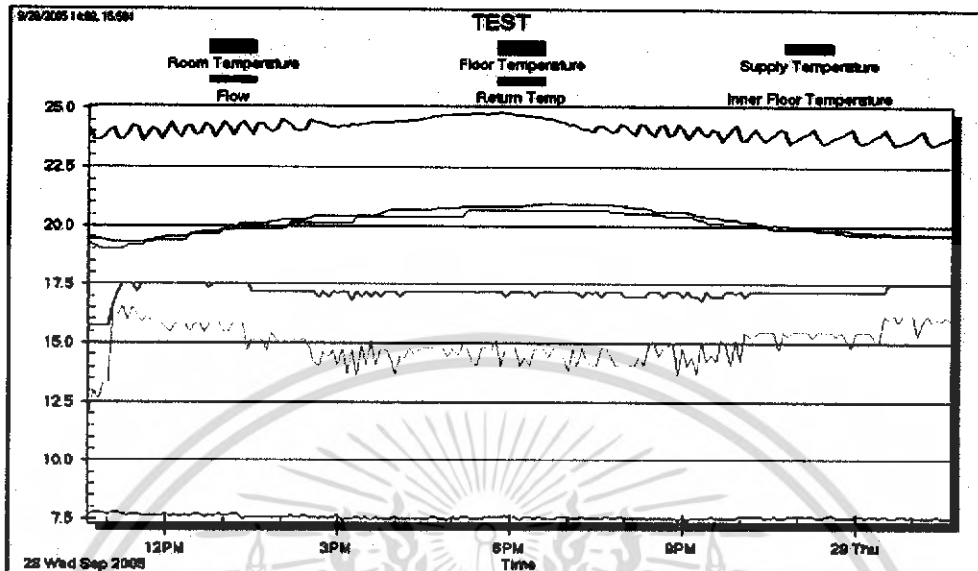
ดังนั้นหากอัตราการไหลที่เหมาะสมกรณีที่ทำให้พื้นมีอุณหภูมิ 20.5 องศาเซลเซียส เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 14 องศาเซลเซียสเมื่อห้องได้รับการระของแสงในระดับสูงสุด จากสมการที่ (5.3) แก้สมการหาค่า x โดยแทนค่า $y = 20.5$ องศาเซลเซียส จะได้ค่า $x = 7.789$ ลิตร/นาทิจากนั้นหาอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีการระของแสงมากระทำ โดยทำเช่นเดียวกับกรณีที่ใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคงที่ที่ 13 องศาเซลเซียสเมื่อห้องได้รับการระของแสงในระดับสูงสุด ดังนั้นสามารถที่จะหาค่าอุณหภูมิน้ำเข้าในช่วงที่ไม่มีการระของแสงมากระทำได้เท่ากับ 17.062 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 17 องศาเซลเซียสนั่นเอง ซึ่งลักษณะการควบคุมอุณหภูมิน้ำตลอดทั้งวันในกรณีที่ควบคุมอุณหภูมิต้นให้มีค่า 20.5 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 5-28



รูปที่ 5-28 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงการระของแสงตลอดทั้งวัน

เมื่อได้ลักษณะของอุณหภูมิน้ำแล้ว ในลำดับต่อไปก็เอาค่าทั้งหมดที่หาได้ไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลที่ 7.789 ลิตร/นาทิจ และอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีการระของแสงมากระทำ รวมถึงอุณหภูมิน้ำที่ 14 องศาเซลเซียสเมื่อห้องได้รับการระของแสงในระดับสูงสุด ที่ได้กำหนดขึ้นมาในตอนเริ่มต้นของการทดลอง

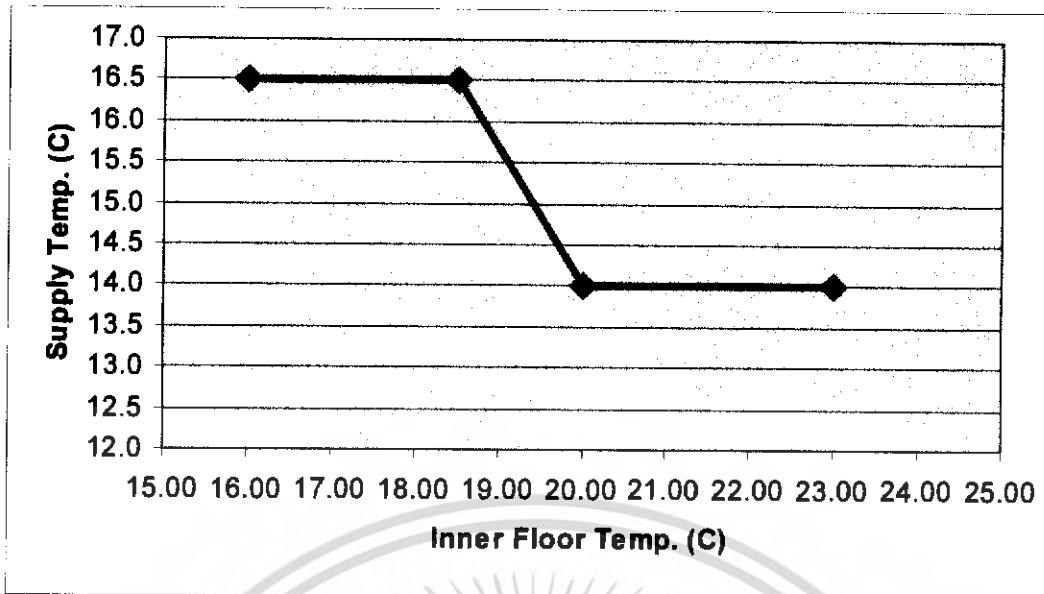
นำมาทดสอบเมื่อห้องทดสอบได้รับการระแสงตลอดทั้งวัน โดยค่าภาระของแสงนี้เปลี่ยนแปลงตามจริงในลักษณะที่คล้ายกับแสงอาทิตย์ และผลการทดลองดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5-29



รูปที่ 5-29 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราไหล 7.789 ลิตร/นาที่

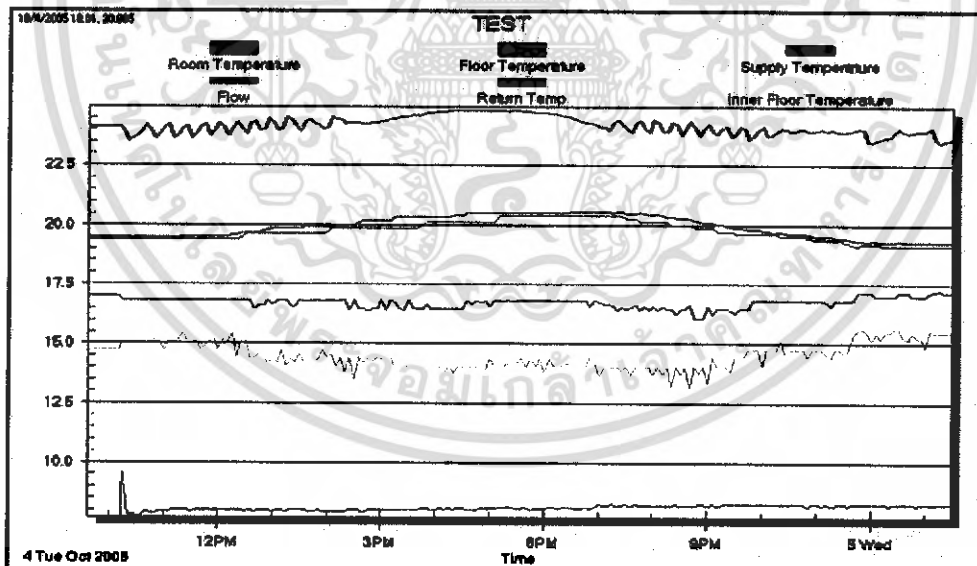
จากรูปที่ 5-29 ทำให้ทราบว่าอัตราไหลและอุณหภูมิของน้ำที่เข้าห้องในลักษณะดังกล่าวสามารถที่จะทำให้อุณหภูมิห้องอยู่ในช่วง 23.544-24.844 องศาเซลเซียส ตลอดทั้งวันที่เราทำการทดสอบ และยังทำให้อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่เมื่อได้รับการระของแสงสูงสุดของวันอยู่ที่ 20.533 และ 20.144 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ตั้งแต่ตอนแรก และค่าที่ได้ดังกล่าวก็อยู่ในหลักของความสบายที่เหมาะสมกับหริบมนุษย์

ในลำดับต่อไปหาวิธีควบคุมห้องทดสอบโดยใช้อุณหภูมิในพื้นที่ข้าง โดยแทนค่า $y = 20$ องศาเซลเซียส ลงในสมการที่ (5.4) จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่า x โดยได้ค่า x มีค่าเท่ากับ 7.89 ลิตร/นาที่ จากนั้นหาอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำ ซึ่งทำในลักษณะคล้ายกับกรณีที่แล้ว ซึ่งเราสามารถหาอุณหภูมิน้ำเข้าช่วงที่ไม่มีภาระของแสงมากระทำได้เท่ากับ 16.663 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 16.5 องศาเซลเซียส ดังนั้นจะได้ลักษณะของอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบตลอดทั้งวัน แสดงดังรูปที่ 5-30



รูปที่ 5-30 อุณหภูมิน้ำเข้าที่ใช้เมื่อทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงภาระของแสงตลอดทั้งวัน

เมื่อเราได้ลักษณะของอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบตลอดทั้งวันแล้ว และจากอัตราการไหลที่เหมาะสมที่หาได้นั้น ต่อจากนั้นจึงนำค่าทั้งหมดมาทดสอบตลอดทั้งวันในลักษณะเดียวกับกรณีที่ได้กล่าวไปแล้วทั้ง 3 กรณีในหัวข้อนี้ ดังนั้นจึงได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5-31



รูปที่ 5-31 กราฟแสดงผลการทดลองที่ภาระแสงตลอดทั้งวันที่อัตราการไหล 7.89 ลิตร/วินาที

จากรูปที่ 5-31 ได้ข้อมูลต่าง ๆ จากการทดลองครั้งนี้ โดยอุณหภูมิของห้องทดสอบตลอดทั้งวันอยู่ที่ 23.641-24.828 องศาเซลเซียส อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ของห้องทดสอบเมื่อได้รับภาระของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดของวันอยู่ที่ 20.547 และ 20.191 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากการทดลองก็พบว่าลักษณะของอัตราการไหลและอุณหภูมิที่เข้าห้องทดสอบสามารถให้ห้องทดสอบอยู่ในลักษณะที่ต้องการได้ ซึ่งได้กำหนดไว้แล้วตั้งแต่ตอนเริ่มการทดลอง

3. ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิห้อง

3.1 ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิห้องทดสอบโดยใช้อุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบครั้งที่ 13 องศาเซลเซียส และให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบที่ระดับ 55 วัตต์/ตารางเมตร คงที่ตลอดการทดสอบ จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิของห้องทดสอบที่อัตราการไหลต่าง ๆ กันและทำการวัดค่าที่จุดต่าง ๆ 4 จุดที่กระจายอยู่ในห้องทดสอบ ซึ่งได้ค่าของอุณหภูมิห้องที่อุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบครั้งที่ 13 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 แสดงอุณหภูมิของห้องทดสอบที่อุณหภูมิน้ำเข้าห้องครั้งที่ 13 องศาเซลเซียส

Flow Rate	point 1	point 2	point 3	point 4
2	25.79	25.80	25.53	25.21
4	25.33	25.34	25.16	24.78
6	25.07	24.96	25.11	24.46
8	24.80	24.79	24.89	24.22
10	24.69	24.65	24.44	24.06
12	24.63	24.65	24.27	23.94
14	24.59	24.65	23.92	23.91
ผลรวม	174.90	174.84	173.32	170.57
เฉลี่ย	24.99	24.98	24.76	24.37

จากตารางที่ 5-5 พบว่าเมื่อเราใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบมากขึ้น ส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายในห้องอย่างเด่นชัดคือ ทำให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต่ำลงเมื่อใช้อัตราการไหลที่มากขึ้น ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลที่ 14 ลิตร/นาที สามารถทำให้ห้องมีอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเราให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบที่ระดับ 55 วัตต์/ตารางเมตร และจากการทดลองยังพบว่า จากการที่วัดอุณหภูมิทั้ง 4 จุด ทำให้ทราบว่าแต่ละจุดมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ต่างกันเพียงจุดทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่งเท่านั้น และจากที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ที่ทำการวัดอุณหภูมินั้นเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ฮีตเตอร์ ซึ่งติดอยู่ที่บริเวณผนังของท้ายห้องทดสอบ จึงส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณจุดที่ 1 และจุดที่ 2 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ 3 และจุดที่ 4 เพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งดูได้จากตารางที่ 5-5

3.2 ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิห้องทดสอบโดยใช้อุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบครั้งที่ 14 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองในลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 ที่เพิ่งได้กล่าวไป และผลการทดลองจากการทดลองนี้ แสดงดังตารางที่ 5-6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-6 แสดงอุณหภูมิของห้องทดสอบที่อุณหภูมิน้ำเข้าห้องครั้งที่ 14 องศาเซลเซียส

Flow Rate	point 1	point 2	point 3	point 4
2	25.75	25.97	25.53	25.32
4	25.01	25.22	24.93	25.83
6	24.86	24.72	24.66	24.57
8	24.81	24.57	24.40	24.36
10	24.68	24.43	24.32	24.29
12	24.66	24.41	24.31	24.27
14	24.65	24.39	24.29	24.24
ผลรวม	174.42	173.70	172.45	172.88
เฉลี่ย	24.92	24.81	24.64	24.70

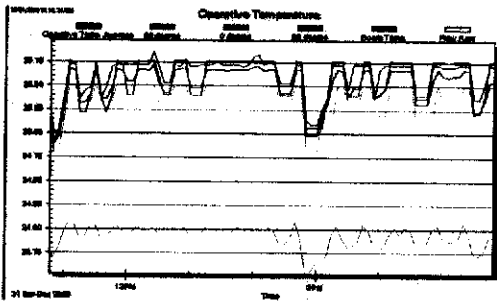
จากตารางที่ 5-6 พบว่าลักษณะของอุณหภูมิที่เข้าห้องทดสอบมีลักษณะคล้ายกับการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 จะต่างกันตรงที่ เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของห้องทดสอบสูงขึ้น แต่จะสูงขึ้นในลักษณะของค่าในทศนิยมตำแหน่งที่ 1 เท่านั้น ส่วนของค่าของอุณหภูมิในหลักหน่วยยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนลักษณะที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ 3 และ 4 เพียงเล็กน้อยนั้น เนื่องจากที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ใกล้กับฮีตเตอร์มากกว่า ซึ่งลักษณะผลการทดลองที่ออกมาคล้ายกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.1 โดยพบว่าห้องมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดทั่วห้อง อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่เราฝังท่อเอาไว้ทั่วบริเวณของห้องทดสอบ

4. ทดลองหาการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ

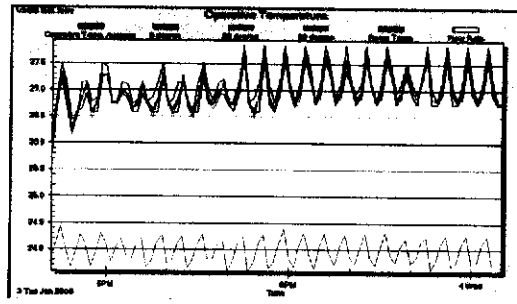
ทดลองหาการกระจายอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ โดยใช้เซนเซอร์วางทำมุมต่าง ๆ กัน คือ 0, 60 และ 90 องศา ตามลำดับ โดยวางสูงจากพื้น 110 และ 60 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งจุดที่ 1 และจุดที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4-4 และทำการทดลองที่ภาระของแสงต่าง ๆ กันดังนี้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 วัตต์/ตารางเมตร ซึ่งจะทำการศึกษาหาอุณหภูมิโอเปอเรทีฟในระดับ 110 เซนติเมตร ที่จุดที่ 1 และจุดที่ 3 ก่อนเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบในระดับ 60 เซนติเมตร ที่จุด 1 และจุดที่ 3 ซึ่งได้ผลการทดลองที่ระดับต่าง ๆ และจุดต่าง ๆ ดังนี้

ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ระดับ 110 เซนติเมตร

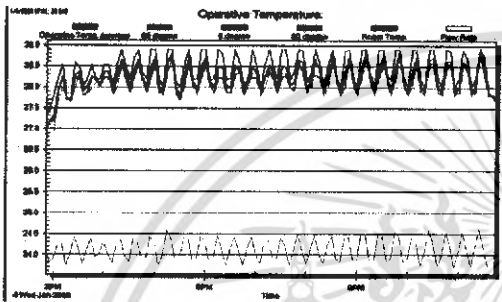
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



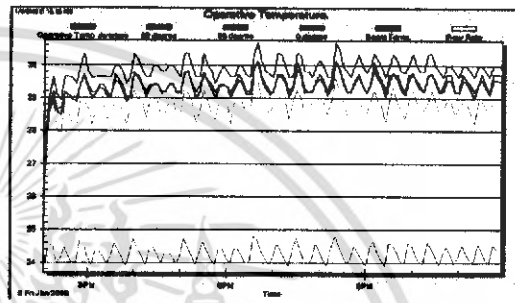
รูปที่ 5-32 จุดที่ 1 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร



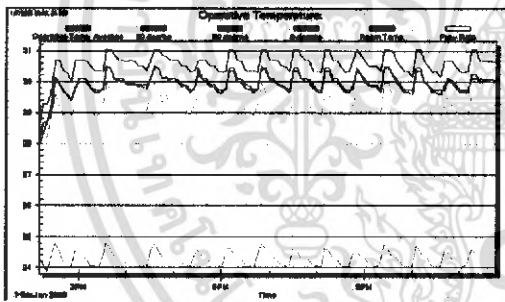
รูปที่ 5-33 จุดที่ 1 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร



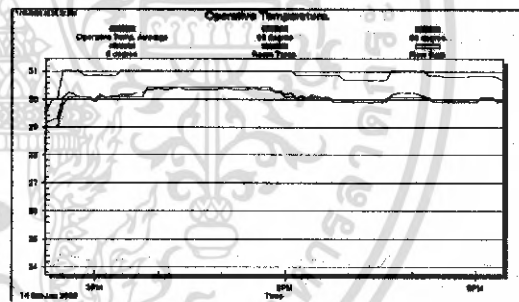
รูปที่ 5-34 จุดที่ 1 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร



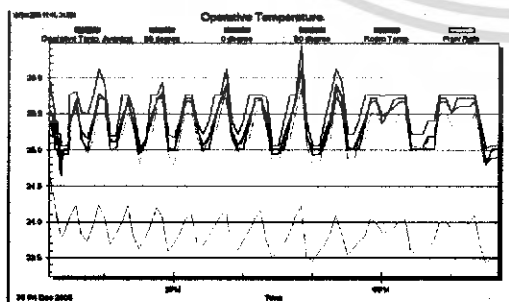
รูปที่ 5-35 จุดที่ 1 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร



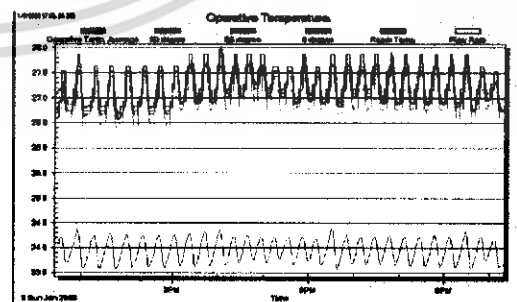
รูปที่ 5-36 จุดที่ 1 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5-37 จุดที่ 1 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร

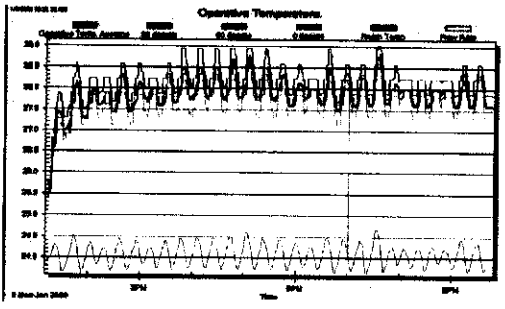


รูปที่ 5-38 จุดที่ 3 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร

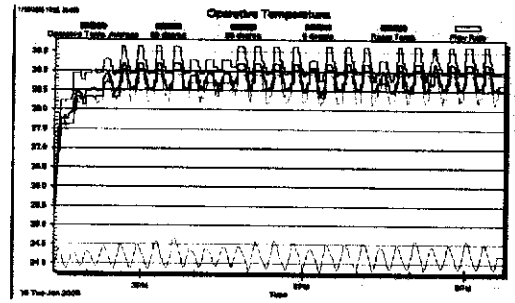


รูปที่ 5-39 จุดที่ 3 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร

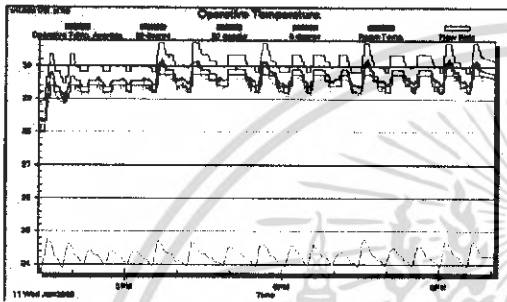
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



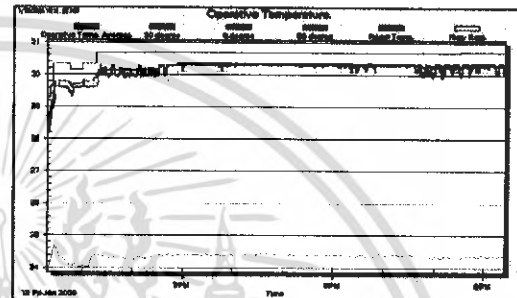
รูปที่ 5-40 จุดที่ 3 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5-41 จุดที่ 3 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร

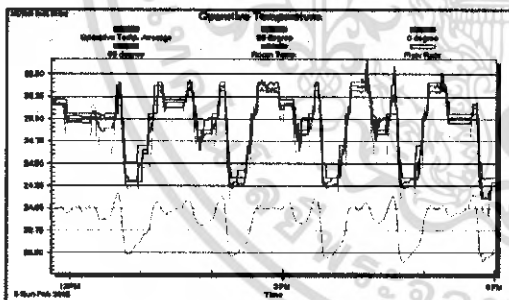


รูปที่ 5-42 จุดที่ 3 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร

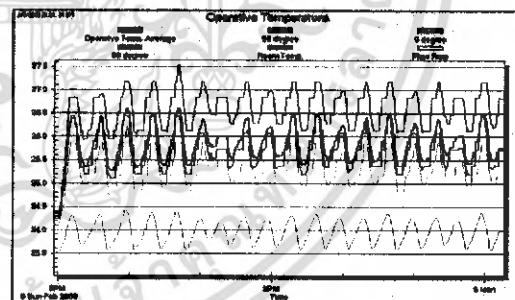


รูปที่ 5-43 จุดที่ 3 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร

ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ระดับ 60 เซนติเมตร

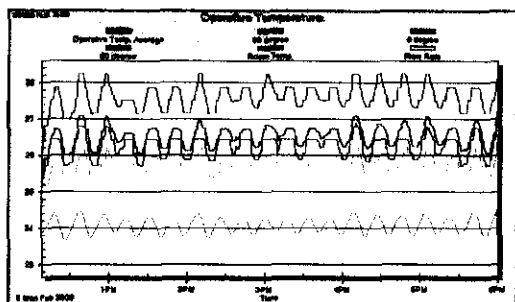


รูปที่ 5-44 จุดที่ 1 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร

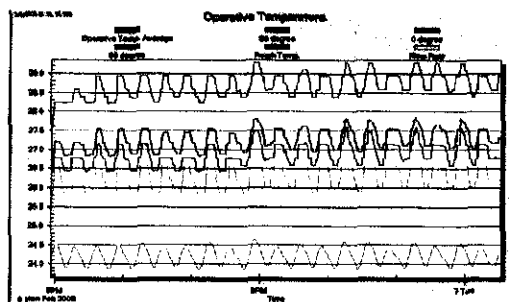


รูปที่ 5-45 จุดที่ 1 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร

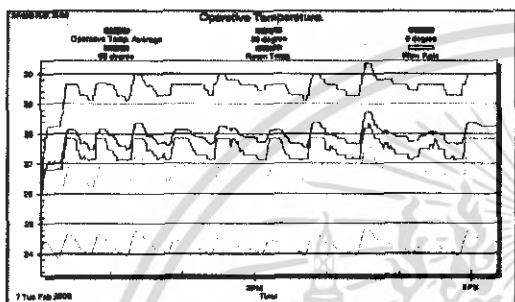
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



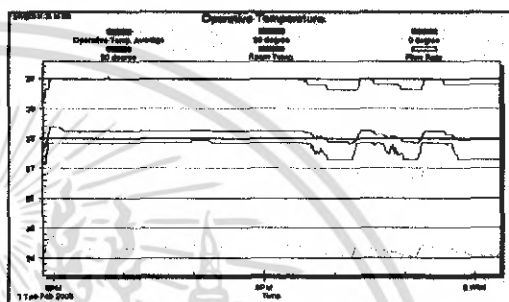
รูปที่ 5-46 จุดที่ 1 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร



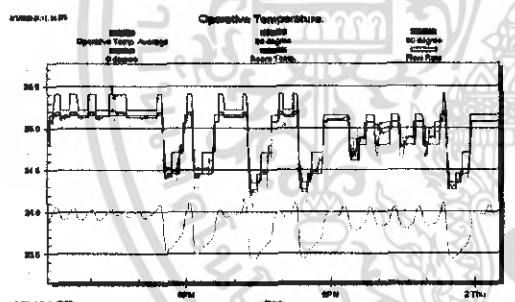
รูปที่ 5-47 จุดที่ 1 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร



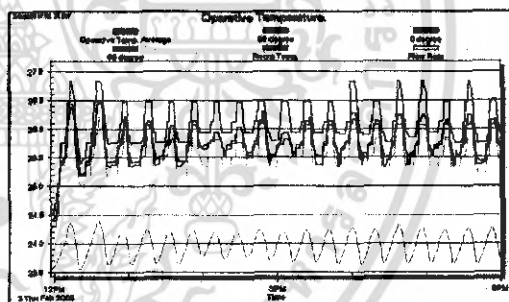
รูปที่ 5-48 จุดที่ 1 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร



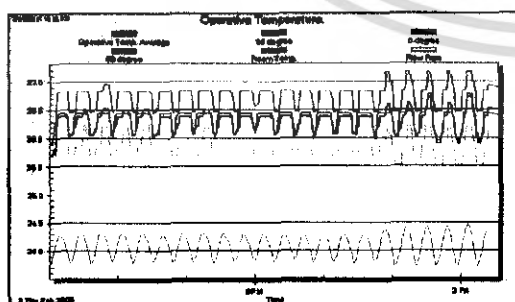
รูปที่ 5-49 จุดที่ 1 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร



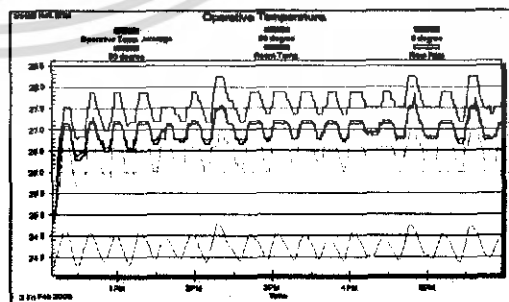
รูปที่ 5-50 จุดที่ 3 ที่ระดับ 0 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5-51 จุดที่ 3 ที่ระดับ 10 วัตต์/ตารางเมตร

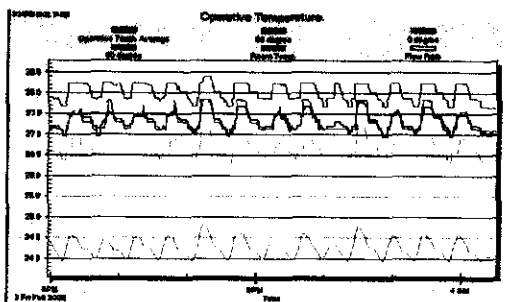


รูปที่ 5-52 จุดที่ 3 ที่ระดับ 20 วัตต์/ตารางเมตร

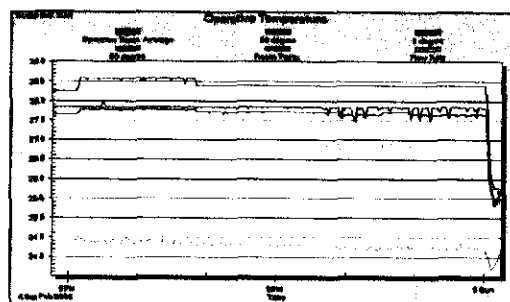


รูปที่ 5-53 จุดที่ 3 ที่ระดับ 30 วัตต์/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-54 จุดที่ 3 ที่ระดับ 40 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5-55 จุดที่ 3 ที่ระดับ 50 วัตต์/ตารางเมตร

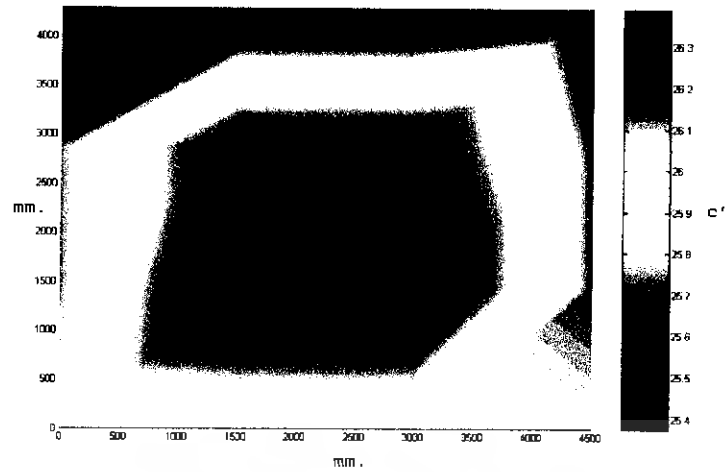
จากรูปที่ 5-32 ถึงรูปที่ 5-55 ได้ผลการทดลองอุณหภูมิโอเพอร์เทิฟที่จุดที่ 1 และจุดที่ 3 ที่ตำแหน่งความสูง 110 และ 60 เซนติเมตร ดังตารางข้างล่างนี้ โดยจะใช้อุณหภูมิโอเพอร์เทิฟช่วงที่หนึ่งไม่มีการเปลี่ยน เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิโอเพอร์เทิฟที่มีค่าถูกต้องมากที่สุด ซึ่งจะเก็บค่าในช่วงท้าย ๆ ของการทดลอง เพราะระบบจะนิ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5-7 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเพอร์เทิฟที่ตำแหน่งความสูง 110 เซนติเมตร

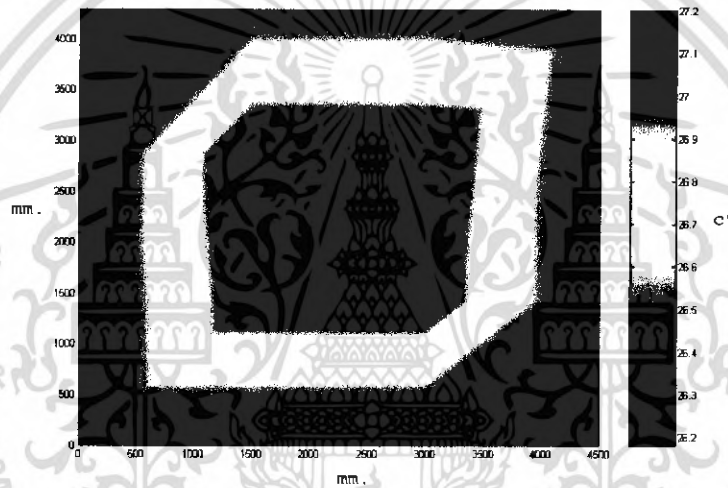
ภาระแสง (วัตต์/ตารางเมตร)	จุดที่ 1 (องศาเซลเซียส)	จุดที่ 3 (องศาเซลเซียส)	ผลต่าง (องศาเซลเซียส)
0	25.531	25.375	0.156
10	27.203	27.136	0.067
20	28.297	27.946	0.351
30	29.462	28.82	0.642
40	29.948	29.695	0.253
50	30.342	30.046	0.296

จากตารางข้างบนนี้ สามารถเขียนเป็นรูปการกระจายของอุณหภูมิโอเพอร์เทิฟที่ตำแหน่งความสูง 110 เซนติเมตร ที่ภาระแสงต่าง ๆ กันดังนี้

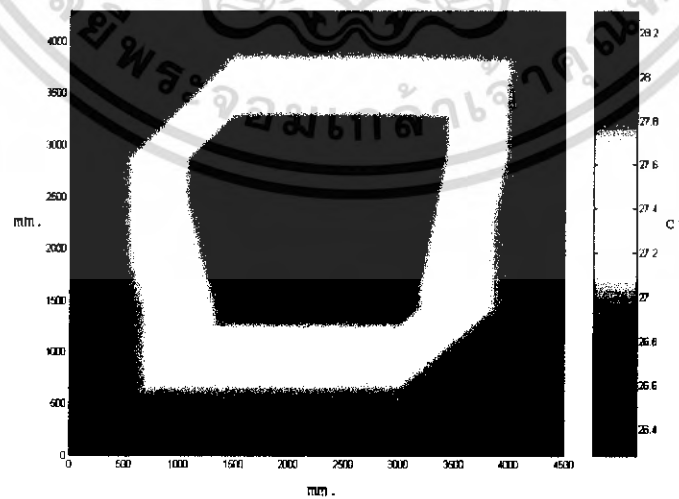
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-56 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่การะแสง 0 วัตต์/ตารางเมตร

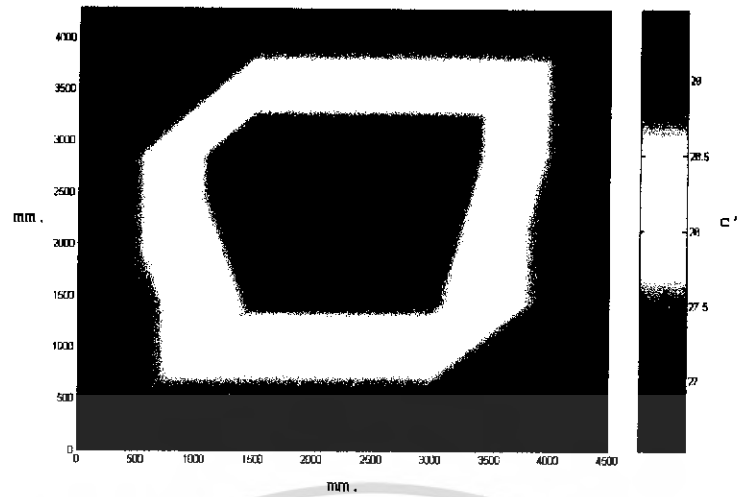


รูปที่ 5-57 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่การะแสง 10 วัตต์/ตารางเมตร

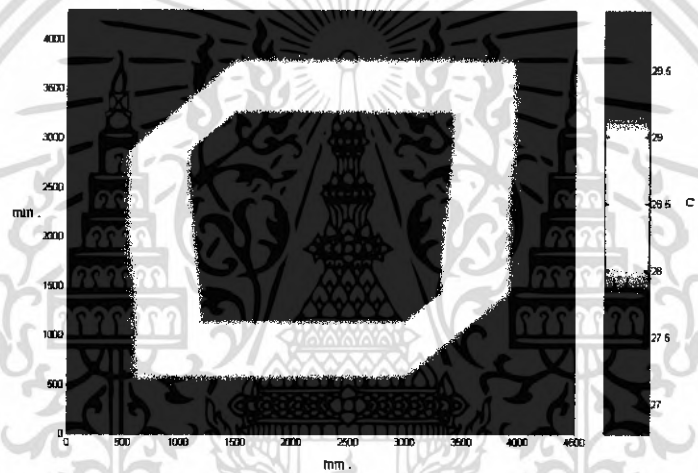


รูปที่ 5-58 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่การะแสง 20 วัตต์/ตารางเมตร

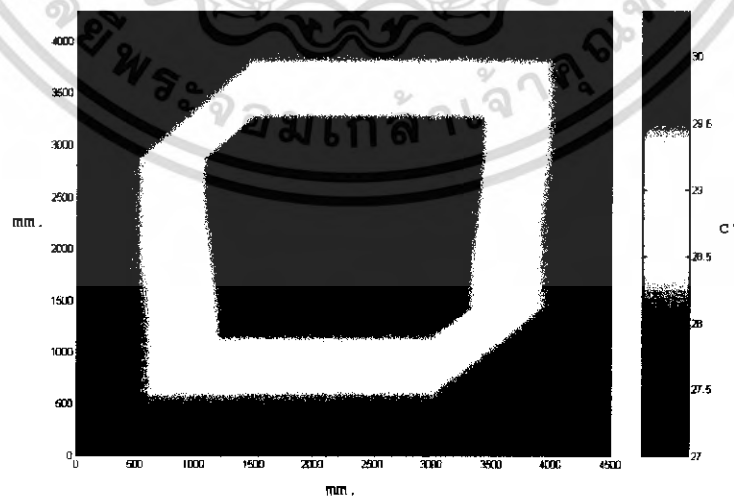
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-59 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ภาระแสง 30 วัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 5-60 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ภาระแสง 40 วัตต์/ตารางเมตร



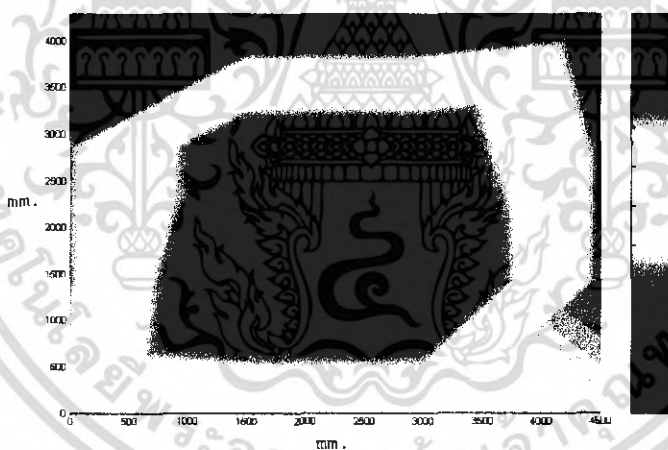
รูปที่ 5-61 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ภาระแสง 50 วัตต์/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5-8 ผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร

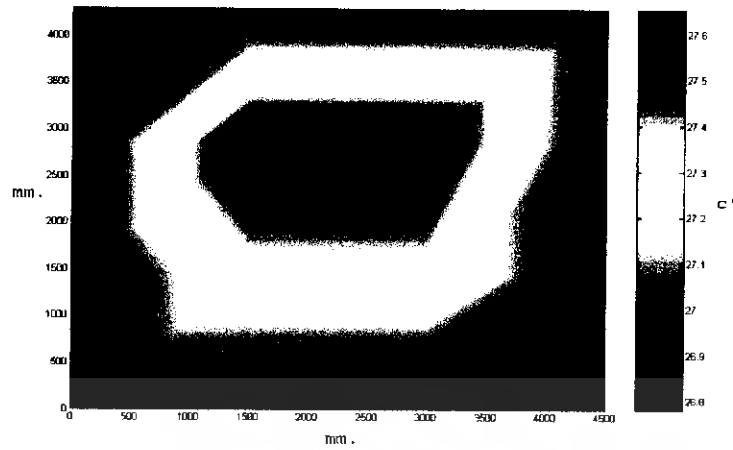
ภาวะแสง	จุดที่ 1	จุดที่ 3	ผลต่าง
(วัตต์/ตารางเมตร)	(องศาเซลเซียส)	(องศาเซลเซียส)	(องศาเซลเซียส)
0	24.878	24.866	0.012
10	25.863	25.814	0.049
20	26.565	26.286	0.279
30	27.363	27.072	0.291
40	27.653	27.339	0.314
50	28.089	27.676	0.413

และจากตารางที่ 5-8 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาเขียนเป็นรูปของกราฟกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร ได้รูปต่าง ๆ ข้างล่างนี้

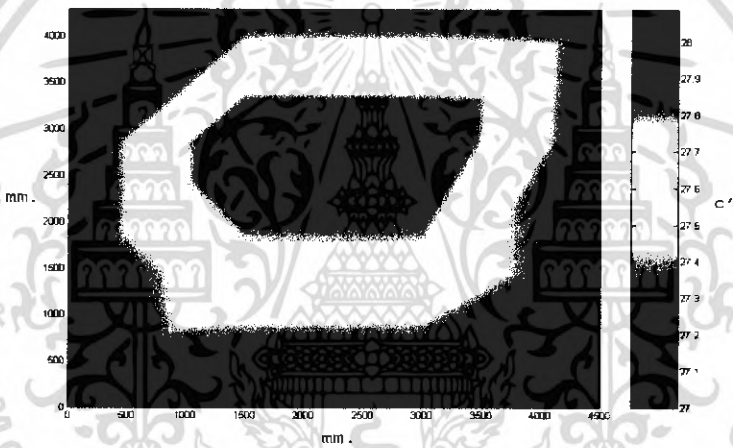


รูปที่ 5-62 รูปการกระจายอุณหภูมิโอเปอร์ทีฟที่ภาวะแสง 0 วัตต์/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



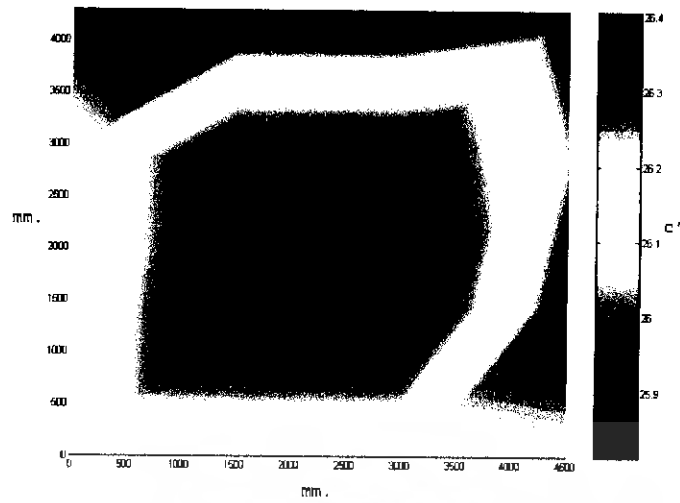
รูปที่ 5-66 รูปการกระจายจุดของโฮมโพอเรทีฟที่การะแสง 40 วัตต์/ตารางเมตร



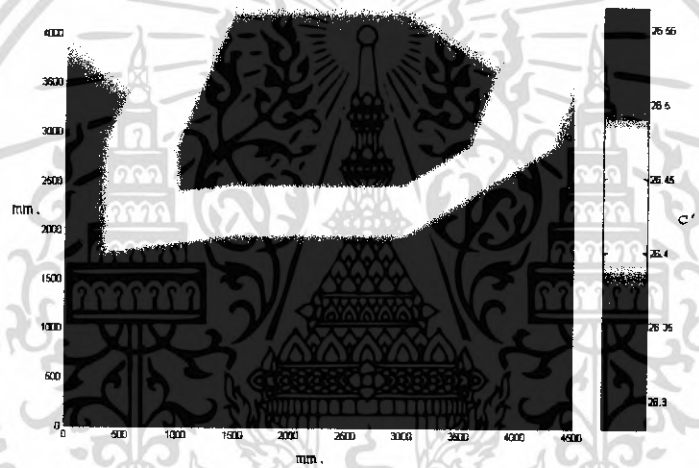
รูปที่ 5-67 รูปการกระจายจุดของโฮมโพอเรทีฟที่การะแสง 50 วัตต์/ตารางเมตร

และจากข้อมูลจากรายที่ 5-7 และ 5-8 เราสามารถมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบของจุดของโฮมโพอเรทีฟที่ตำแหน่งความสูง 110 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งกราฟทั้งสองแสดงดังรูปต่อไปนี้

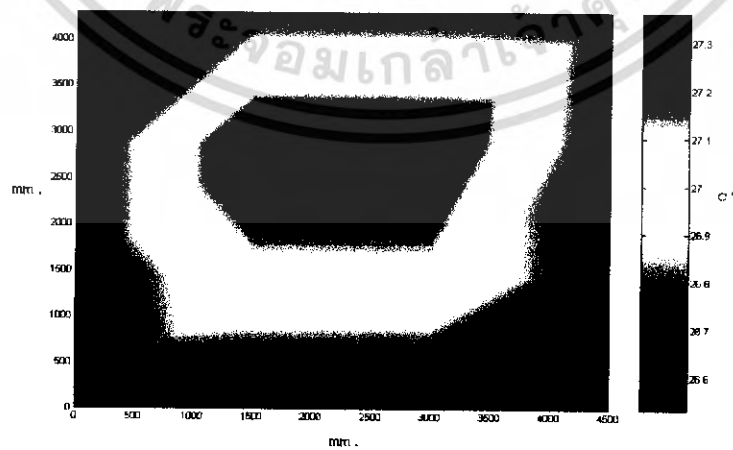
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-63 รูปการกระจายจุดหมึกไอโอเปอร์ทีฟที่การะแสง 10 วัตต์/ตารางเมตร

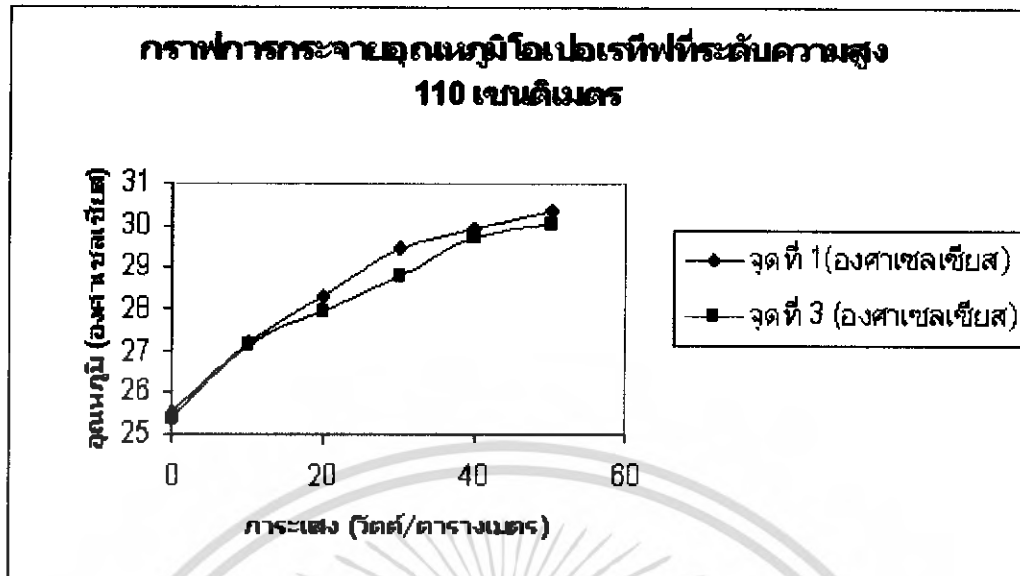


รูปที่ 5-64 รูปการกระจายจุดหมึกไอโอเปอร์ทีฟที่การะแสง 20 วัตต์/ตารางเมตร

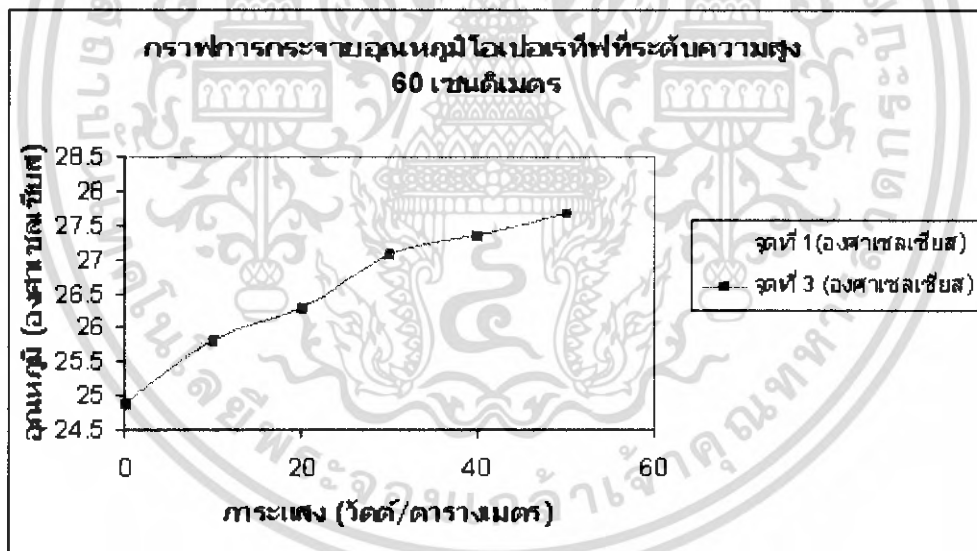


รูปที่ 5-65 รูปการกระจายจุดหมึกไอโอเปอร์ทีฟที่การะแสง 30 วัตต์/ตารางเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-68 กราฟแสดงผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ตำแหน่งความสูง 110 เซนติเมตร



รูปที่ 5-69 กราฟแสดงผลการทดลองอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร

ในที่นี้บริเวณหลังห้องหมายถึงจุดที่ 1 บริเวณหน้าห้องหมายถึงจุดที่ 3 และจากกราฟจะเห็นว่า อุณหภูมิโอเปอเรทีฟบริเวณหลังห้องทั้งที่ความสูงจากพื้น 110 เซนติเมตรและ 60 เซนติเมตรจะมีอุณหภูมิ สูงกว่าบริเวณหน้าห้อง โดยที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร ที่สภาวะไม่มีภาระแสงนั้นจะมีผลต่างของ อุณหภูมิโอเปอเรทีฟน้อยที่สุด คือต่างกัน 0.012 องศาเซลเซียส ส่วนที่ภาระแสง 50 วัตต์/ตารางเมตร นั้นมี ค่าผลต่างอุณหภูมิโอเปอเรทีฟมากที่สุด คือ 0.413 องศาเซลเซียส และที่ตำแหน่งความสูงจากพื้น 110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนติเมตรนั้นค่าผลต่างอุณหภูมิโอเปอเรทีฟน้อยที่สุดต่างกัน 0.067 องศาเซลเซียส ที่ภาระแสง 10 วัตต์/ตารางเมตร ส่วนผลต่างที่มีค่ามากที่สุดนั้นมีค่า 0.642 องศาเซลเซียส ที่ภาระแสง 30 วัตต์/ตารางเมตร ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่า การกระจายของอุณหภูมิโอเปอเรทีฟภายในห้องนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งที่ความสูง 60 และ 110 เซนติเมตร ส่วนสาเหตุที่บริเวณหลังห้องมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณหน้าห้องนั้นเป็นเพราะบริเวณหลังห้องนั้นอยู่ใกล้กับฮีตเตอร์ และเมื่อนำค่าที่ตำแหน่งความสูง 110 เซนติเมตร กับ 60 เซนติเมตร มาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ตำแหน่ง 110 เซนติเมตรจะมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง 60 เซนติเมตร เป็นเพราะว่าที่ตำแหน่ง 60 เซนติเมตรนั้นอยู่ใกล้พื้นมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าอุณหภูมิที่แผ่รังสีจากพื้นชั้นบนนั้นจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศบริเวณรอบ ๆ ยิ่งสูงจากพื้นมากเท่าใดก็ยิ่งมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศชั้นที่แผ่รังสีขึ้นมากับอากาศบริเวณรอบ ๆ มากขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น

5. ทดลองหาความสามารถของพื้นที่ที่สามารถทำความเย็นได้สูงสุด

การทดลองหาความสามารถของพื้นที่นั้น ทำโดยการใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ตลอดการทดลอง คือที่ 13 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มปรับอัตราการไหลในระดับต่าง ๆ โดยเริ่มจาก 2, 4, 6, 7, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาทีก และไม่ให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบเลย จากนั้นเก็บค่าอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่อัตราการไหลนั้น โดยจะใช้ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ที่นิ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริง ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5-9 ผลการทดลองหาความสามารถของพื้นที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 13 องศาเซลเซียส

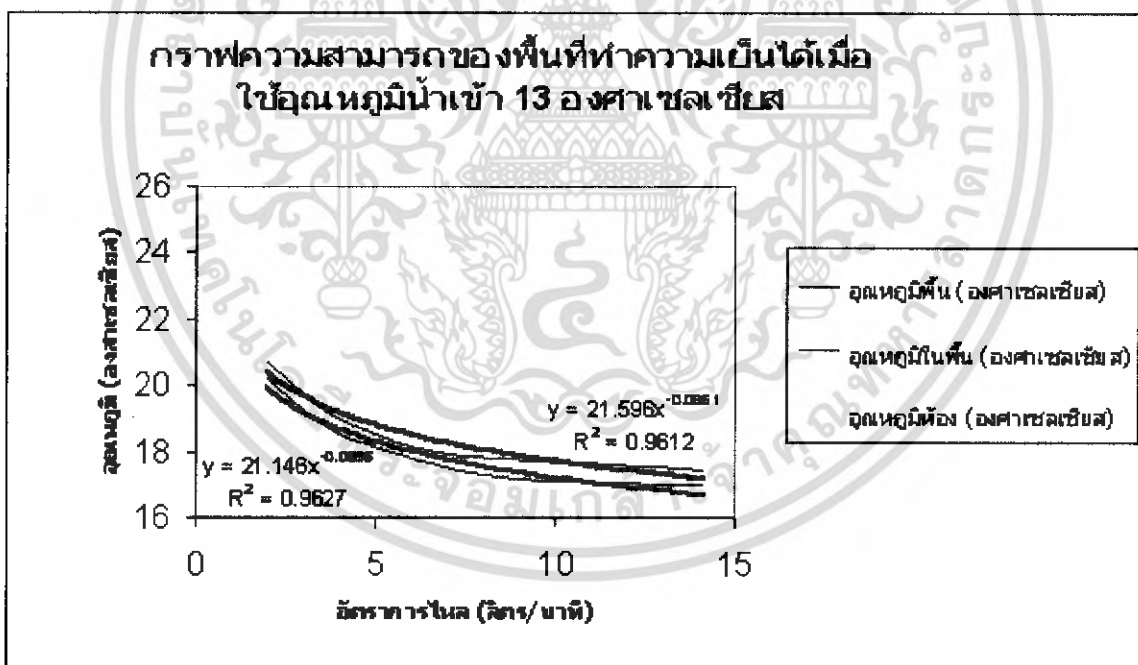
อัตราการไหล (ลิตร/นาทีก)	อุณหภูมิพื้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิในพื้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)
1.926	20.703	20.216	23.859
3.692	19.172	18.691	23.722
6.047	18.156	17.756	23.606
8.461	17.781	17.225	23.528
10.477	17.681	17.119	23.449
11.898	17.566	17.009	23.405
14.094	17.419	16.989	23.355

จากนั้นเปลี่ยนมาใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคังที่ 14 องศาเซลเซียสบ้าง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5-10 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของพื้นที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 14 องศาเซลเซียส

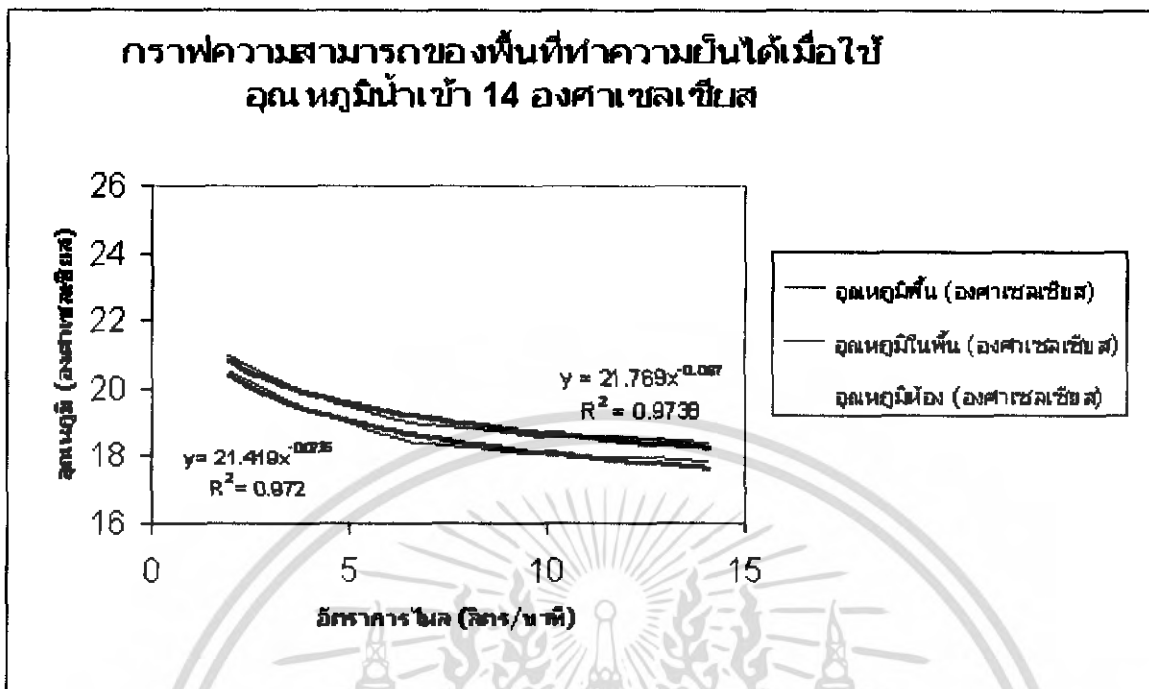
อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	อุณหภูมิพื้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิในพื้น (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง (องศาเซลเซียส)
1.977	20.953	20.516	23.916
3.947	19.828	19.391	23.891
6.34	19.047	18.459	23.75
7.422	18.875	18.325	23.644
10.086	18.594	18.009	23.553
11.836	18.578	17.969	23.456
14.094	18.375	17.809	23.422

จากตารางทั้งสองสามารถนำข้อมูลที่ได้มาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาแนวโน้มของอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ กราฟทั้งสองอุณหภูมิน้ำเข้าแสดงดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 5-70 กราฟความสามารถของพื้นที่ทำความเย็นได้เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคงที่ที่ 13 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



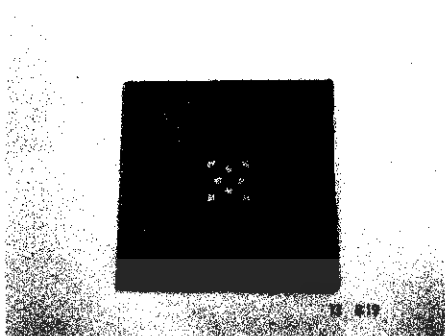
รูปที่ 5-71 กราฟความสามารถของพื้นที่ทำความเย็นได้เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าคงที่ที่ 14 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5-70 และ รูปที่ 5-71 ทำให้ทราบว่าไม่ว่าอุณหภูมิน้ำเข้าจะเป็นเท่าไรก็ตามพบว่า อุณหภูมิในพื้นและอุณหภูมิมิค่าต่างกันประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อยืนยันว่าอุณหภูมิของพื้นและอุณหภูมิในพื้นมีค่าต่างกันเท่านี้ไม่ว่าจะให้หรือไม่ให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบก็ตาม

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิน้ำเข้าคงที่ที่ 13 องศาเซลเซียสสามารถทำให้อุณหภูมิพื้นห้องได้เย็นกว่าที่ 14 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราการไหลน้อย ๆ ผลต่างอุณหภูมิจะมีค่าน้อยประมาณ 0.43 องศาเซลเซียส แต่เมื่อใช้อัตราการไหลมากขึ้นผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าทั้งสองกลับต่างกันมากขึ้น คือประมาณ 1.034 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าเมื่อใช้อัตราการไหลมากขึ้นภายในห้องทดสอบก็สามารถที่จะไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ได้มากขึ้นซึ่งส่งผลให้ห้องทดสอบได้รับความเย็นมากขึ้นจึงทำให้ผลต่างของค่าทั้งสองมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้อัตราการไหลมากขึ้น

แต่ในทางกลับกันนั้นที่อัตราการไหลต่าง ๆ กลับไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิห้องเลย โดยอุณหภูมิห้องมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23 องศาเซลเซียส ของทุก ๆ อัตราการไหล สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะระบบทำความเย็นที่ใช้เป็นระบบทำความเย็นแบบแฟรงค์ตี ซึ่งอุณหภูมิพื้นห้องมีค่าต่างกันไม่มากที่อัตราการไหลต่าง ๆ จึงทำให้อุณหภูมิภายในห้องต่างกันไม่มากนัก เนื่องจากว่าอัตราการแฟรงค์ตีของพื้นที่อัตราการไหลต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นเมื่อจะเลือกอุณหภูมิน้ำเข้าห้องทดสอบควรจะเลือกที่ 13 องศาเซลเซียส เพราะสามารถทำให้พื้นห้องได้เย็นกว่า และเมื่ออุณหภูมิพื้นจะมีค่าสูงขึ้นอีกเมื่อได้รับภาระจากแสง การที่ใช้อุณหภูมิน้ำเข้าเท่านี้จะช่วยให้พื้นห้องมีอุณหภูมิพื้นที่เหมาะสมไม่ว่าจะอยู่ในสถานะใดก็ตาม

6. ทดลองหาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิห้องเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ มาปูพื้นห้องทดสอบ
ทดลองหาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิห้องโดยนำวัสดุต่าง ๆ มาปูพื้นห้องทดสอบดังรูปข้างล่างนี้



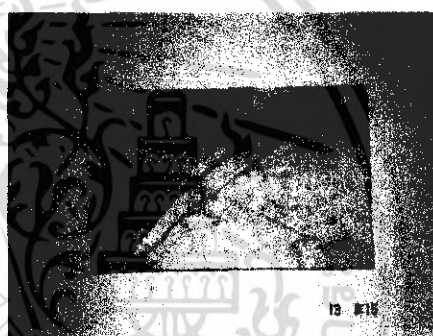
รูปที่ 5-72 กระเบื้องปูพื้นลิเซียวที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 5-73 กระเบื้องปูพื้นสีดำที่ใช้ทดสอบ



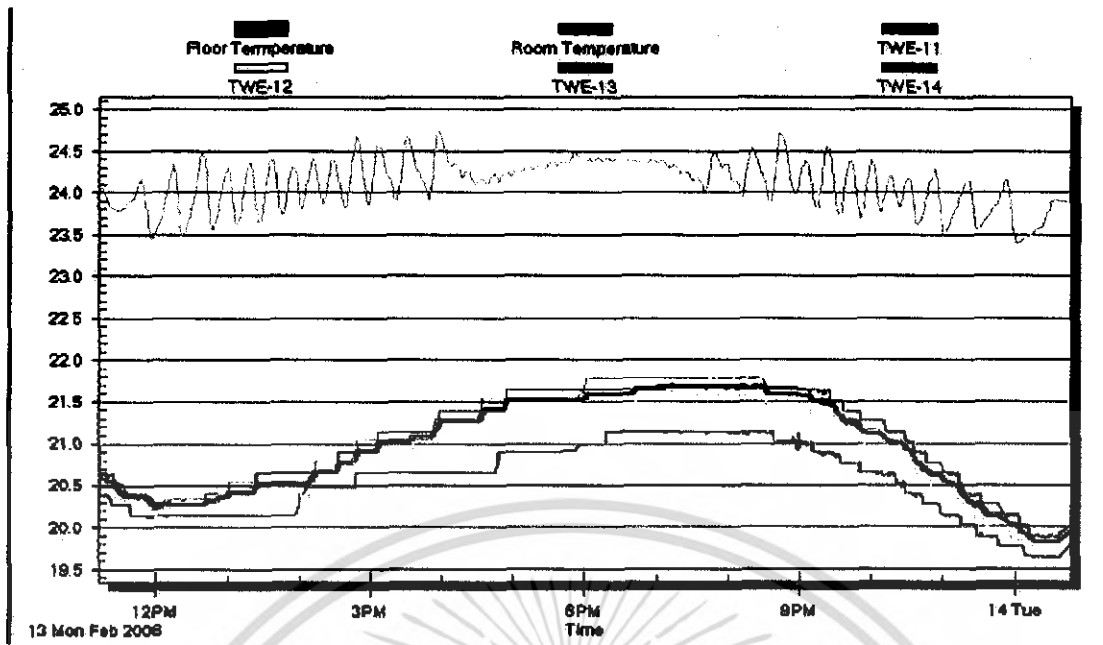
รูปที่ 5-74 หินแกรนิตปูพื้นที่ใช้ทดสอบ



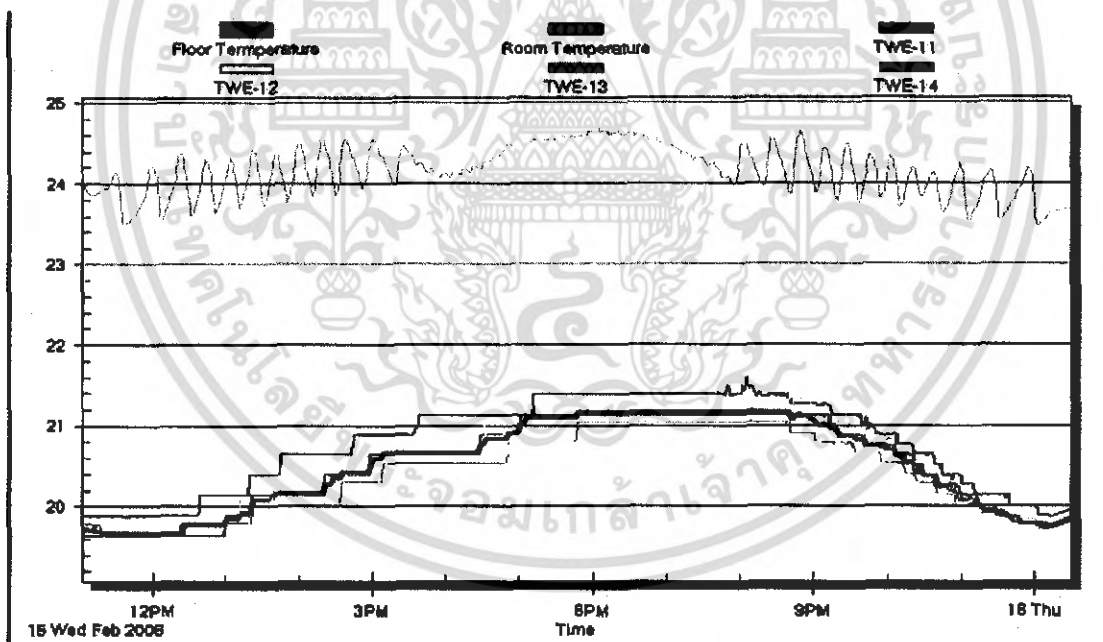
รูปที่ 5-75 หินอ่อนปูพื้นที่ใช้ทดสอบ

ทำการทดลองโดยนำวัสดุชนิดต่าง ๆ ปูบนพื้นห้องทดสอบ จากนั้นทำการติดเซนเซอร์ที่วัสดุปูพื้นเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ เสร็จแล้วเปิดอัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบโดยใช้เลือกใช้อัตราการไหลคงที่ที่ 7 ลิตร/นาที่ ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิพื้นในช่วงที่เหมาะสมที่ได้ทดลองไปแล้วในการทดลองที่ 2 ที่ทดลองหาการควบคุมอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้น เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม และใช้อุณหภูมิน้ำเข้าเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 อีกเช่นกัน กรณีควบคุมอุณหภูมิพื้นเมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 13 องศาเซลเซียสเมื่อพื้นมีอุณหภูมิสูงกว่า 20.5 องศาเซลเซียส จากนั้นให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบตลอดทั้งวันเพื่อค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังรูปข้างล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

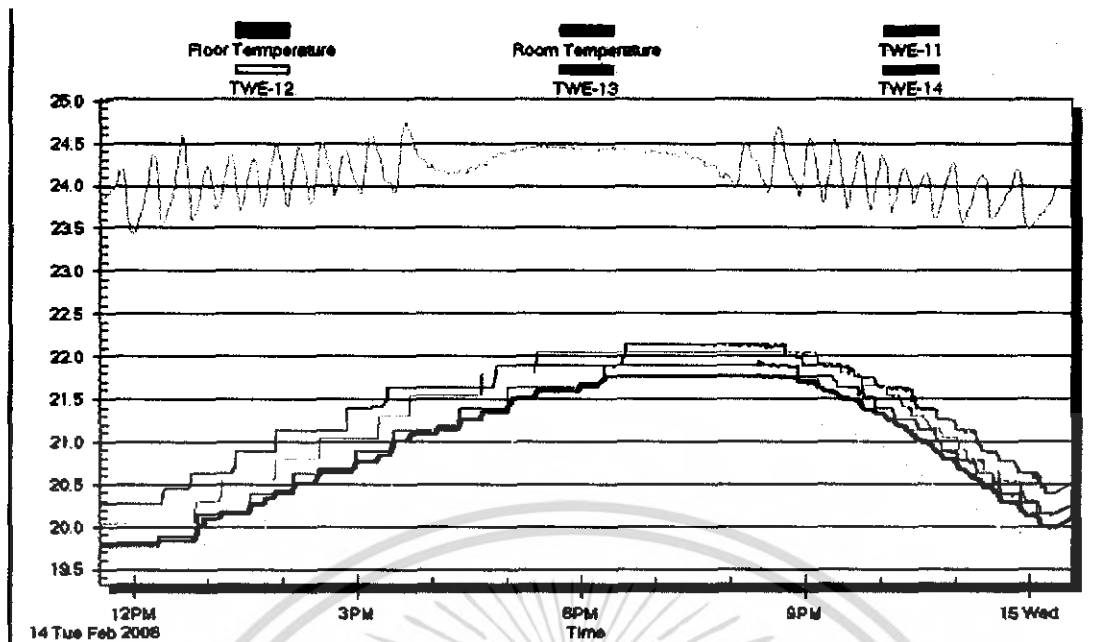


รูปที่ 5-76 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นกระเบื้องสีเขียว
เมื่อให้ภาระแสงตลอดทั้งวัน

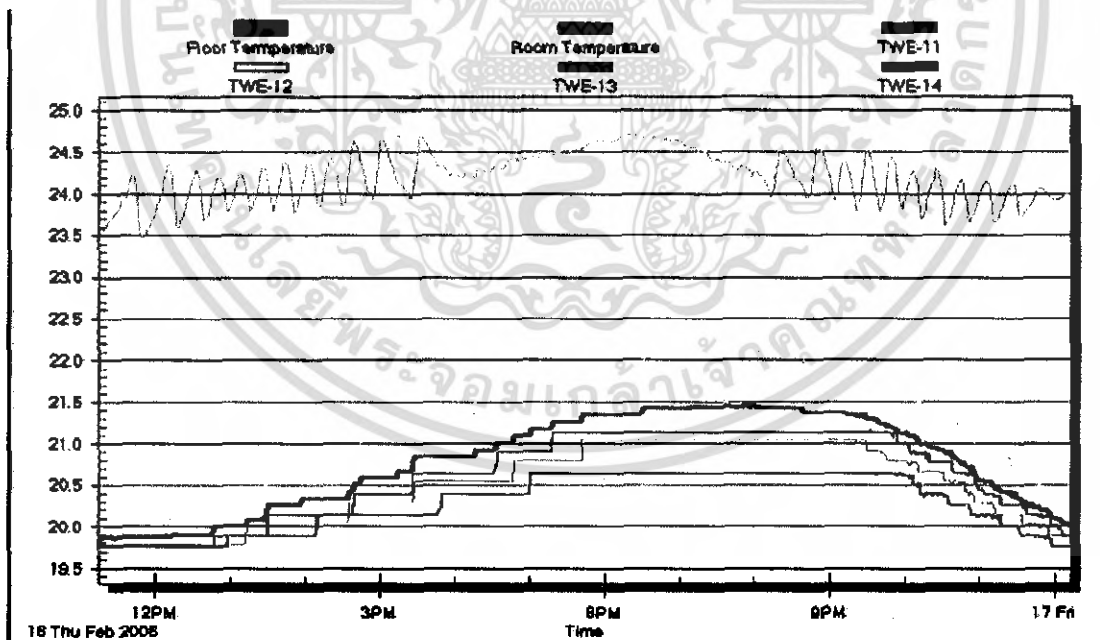


รูปที่ 5-77 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นกระเบื้องสีดำ
เมื่อให้ภาระแสงตลอดทั้งวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-78 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นแกรนิตปูพื้น
เมื่อให้ภาระแสงตลอดทั้งวัน



รูปที่ 5-79 กราฟแสดงลักษณะของอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิพื้นอ่อนปูพื้น
เมื่อให้ภาระแสงตลอดทั้งวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 5-76 ถึงรูปที่ 5-79 สามารถที่จะสรุปค่าอุณหภูมิต่าง ๆ จากการทดลองแสดงดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5-11 แสดงค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของวัสดุที่นำมาปูพื้นห้องทดสอบ

ชนิดของวัสดุ	อุณหภูมิห้องสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้องต่ำสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิพื้นสูงสุด (องศาเซลเซียส)
กระเบื้องสีเขียว	24.734	23.469	21.688
กระเบื้องสีดำ	24.688	23.547	21.712
หินแกรนิต	24.734	23.531	21.766
หินอ่อน	24.688	23.531	21.453

จากการทดลองจะเห็นว่าที่อัตราการไหลที่เหมาะสมกับพื้นปูนซีเมนต์เมื่อนำมาทดสอบกับกระเบื้องที่ใช้ปูพื้นแบบต่าง ๆ กัน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิห้องนั้นยังอยู่ในหลักความสบาย โดยที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ยของกระเบื้องสีเขียว, กระเบื้องสีดำ, หินแกรนิต และหินอ่อน มีค่าเท่ากับ 24.1015, 24.1175, 24.1325 และ 24.1325 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดลองกับพื้นปูนซีเมนต์ สามารถใช้ได้ครอบคลุมกับวัสดุที่ใช้ปูพื้นหลายชนิด

แต่จากข้อมูลอุณหภูมิพื้นที่ปูกระเบื้องในลักษณะต่าง ๆ จะสูงกว่าค่าอุณหภูมิพื้นที่เหมาะสมคือ 18-19 องศาเซลเซียส อยู่ประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่แตกต่างกันของพื้นนี้ก็ไม่ส่งผลถึงอุณหภูมิของอากาศภายในห้องแต่อย่างใด ดังนั้นเราสามารถที่จะเลือกใช้กระเบื้องชนิดใดก็ได้ตามความเหมาะสมเพื่อเพิ่มความสวยงามของห้อง ซึ่งไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิห้อง และความรู้สึกว่าเป็นเท้าเมื่ออุณหภูมิพื้นเย็นก็หมดไปด้วยเพราะมีกระเบื้องมาช่วยให้อุณหภูมิพื้นสูงขึ้น

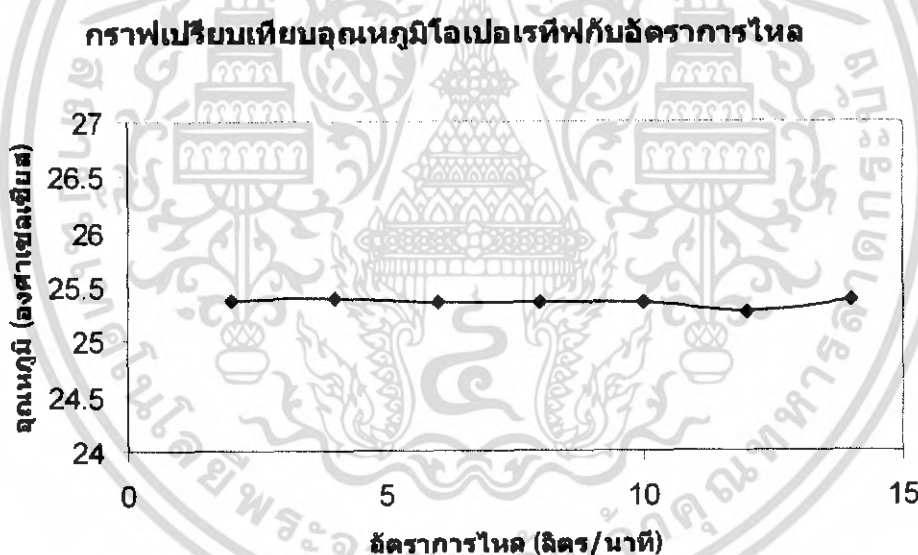
7. ทดลองหาอุณหภูมิโอเปอเรทีฟเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบในระดับต่าง ๆ

ทำการทดลองหาอุณหภูมิโอเปอเรทีฟโดยปรับอัตราการไหลเริ่มต้นที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 14 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ โดยไม่ให้ภาระแสงในห้องทดสอบแต่อย่างใด จากนั้นเก็บค่าในช่วงท้าย ๆ ของการทดลอง ซึ่งจะเป็นช่วงอุณหภูมินิ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ 13 องศาเซลเซียสที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองที่ 6 ที่ผ่านมา ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงเป็นค่าดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5-12 แสดงค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่อัตราการไหลต่าง ๆ

อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	อุณหภูมิโอเปอเรทีฟ (องศาเซลเซียส)
2	25.377
4	25.396
6	25.347
8	25.35
10	25.353
12	25.255
14	25.379

จากผลการทดลองนำข้อมูลที่ได้มาเขียนเป็นกราฟได้กราฟแสดงดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 5-80 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิโอเปอเรทีฟกับอัตราการไหลในระดับต่าง ๆ

จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล ๆ ต่างให้ผลของอุณหภูมิออกมามีลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากต่างกันเพียงทศนิยมตำแหน่งที่สองและที่สามเท่านั้น ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงถือว่ามีความเท่ากัน เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อไม่มีภาระของแสงมากระทำ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีจากภาระของแสงก็หายไป จึงเหลือแต่อุณหภูมิห้องที่มาจากพื้นเท่านั้นที่มีผลต่ออุณหภูมิโอเปอเรทีฟ ซึ่งที่อัตราการไหลต่าง ๆ นั้น ทำให้อุณหภูมิพื้นมีค่าต่างกันไม่มากซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิโอเปอเรทีฟ ทำให้อุณหภูมิที่ได้มีค่าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นสิ่งที่อิทธิพลอย่างมากกับอุณหภูมิโอปอเรทีฟก็คืออุณหภูมิการแผ่รังสี ซึ่งได้มาจากการที่ให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบนั่นเองและอัตราการไหลไม่มีผลต่ออุณหภูมิโอปอเรทีฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ทดลองอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้ผลการคำนวณ พบว่าเมื่อให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบในระดับค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ จะมีค่าต่างกันน้อย แต่เมื่อให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบมากขึ้นผลต่างของค่าอุณหภูมิจากการทดลองและการคำนวณกลับมีค่ามากขึ้น เนื่องจากขณะที่ให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบตัวเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิโอเปอเรทีฟนั้นจะโดนแสงที่มาจากหลอดไฟก่อนที่จะได้รับความเย็นที่แผ่รังสีมาจากพื้น และลักษณะของเซนเซอร์นั้นมีผ้าสีเทาหุ้มอยู่ด้วย ทำให้ตัวเซนเซอร์ดูดกลืนแสงที่ส่องมาไว้ จึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าการคำนวณ และมีค่าต่างกันมากขึ้นเมื่อให้ภาระแสงในระดับที่สูงแก่ห้องทดสอบ

2. ทดลองหาการควบคุมอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้ อุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิพื้นมีค่า 20.5 และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการทดลองสามารถหาอัตราการไหลที่เหมาะสมได้ทั้งกรณีควบคุมอุณหภูมิพื้นหรือกรณีควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่เป็นหลัก แต่จากการทดลองพบว่าถ้าควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่ ใช้อุณหภูมิน้ำเข้า 13 องศาเซลเซียส จะให้ผลของอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิในพื้นที่ใกล้เคียง 20.5 และ 20 องศาเซลเซียส มากที่สุด และจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิในพื้นที่จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเร็วและนิ่งกว่าอุณหภูมิพื้น ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่เป็นหลักจึงให้ค่าที่ถูกต้องมากกว่า

3. ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อเราใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบมากขึ้น ส่งผลต่ออุณหภูมิภายในห้องคือ ทำให้อุณหภูมิห้องอยู่ในระดับที่ต่ำลงเมื่อใช้อัตราการไหลที่มากขึ้น ซึ่งพบว่าใช้อัตราการไหลที่ 14 ลิตร/นาที่ สามารถทำให้ห้องมีอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเราให้ภาระแสงแก่ห้องทดสอบที่ระดับ 55 วัตต์/ตารางเมตร และจากการทดลองยังพบว่า จากการที่วัดอุณหภูมิทั้ง 4 จุด ทำให้ทราบว่าแต่ละจุดมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ต่างกันเพียงจุดทศนิยมตำแหน่งที่หนึ่งเท่านั้น และจากที่จุดที่ 1 และจุดที่ 2 ที่ทำการวัดอุณหภูมินั้นเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ฮีตเตอร์ ซึ่งติดอยู่ที่บริเวณผนังของท้ายห้องทดสอบ จึงส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณจุดที่ 1 และจุดที่ 2 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดที่ 3 และจุดที่ 4 ประมาณ 0.2 องศาเซลเซียสเท่านั้น

4. ทดลองหาการกระจายของอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ พบว่าการกระจายของอุณหภูมิโอเปอเรทีฟภายในห้องนั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งที่ความสูง 60 และ 110 เซนติเมตร แต่ตำแหน่ง 110 เซนติเมตรจะมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง 60 เซนติเมตร อยู่ประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะว่าที่ตำแหน่ง 60 เซนติเมตรนั้นอยู่ใกล้พื้นมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่าอุณหภูมิที่แผ่รังสีจากพื้นขึ้นมาจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศบริเวณรอบ ๆ ยิ่งสูงจากพื้นมากเท่าใดก็ยิ่งมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศเย็นที่แผ่รังสีขึ้นมาที่อากาศบริเวณรอบ ๆ มากขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทดลองหาความสามารถของพื้นที่ที่สามารถทำความเย็นได้สูงสุด จากการทดลองพบว่าที่ อุณหภูมิน้ำเข้าห้องที่ 13 องศาเซลเซียส สามารถทำให้อุณหภูมิพื้นห้องได้เย็นกว่าที่ 14 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราการไหลน้อย ๆ ผลต่างอุณหภูมิพื้นจะมีค่าน้อย แต่เมื่อใช้อัตราการไหลมากขึ้นผลต่างของอุณหภูมิ น้ำเข้าทั้งสองกลับต่างกันมากขึ้น โดยเฉพาะแล้วอุณหภูมิพื้นมีค่าต่างกันประมาณ 0.8 องศาเซลเซียส และมี อุณหภูมิในพื้นที่ต่างกันประมาณ 0.7 องศาเซลเซียส เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำเข้าต่างกัน เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าเมื่อ ใช้อัตราการไหลมากน้ำภายในห้องทดสอบก็สามารถที่จะไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน (heat exchanger) ได้มากขึ้นซึ่งส่งผลให้ห้องทดสอบได้รับความเย็นมากขึ้นจึงทำให้ผลต่างของ ค่าทั้งสองมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้อัตราการไหลมากขึ้น และจากการทดลองทำให้ทราบอีกว่าอุณหภูมิพื้นและ อุณหภูมิในพื้นที่มีค่าต่างกันประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส ไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิน้ำเข้าห้องเท่าไรก็ตาม

6. ทดลองหาอุณหภูมิพื้นและอุณหภูมิห้องเมื่อใช้วัสดุต่าง ๆ มาปูพื้นห้องทดสอบ จากการทดลอง จะเห็นว่าที่อัตราการไหลที่เหมาะสมกับพื้นปูนซีเมนต์เมื่อนำมาทดสอบกับกระเบื้องที่ใช้ปูพื้นแบบต่าง ๆ กัน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิห้องนั้นยังอยู่ในหลักความสบาย คืออยู่ในช่วง 24 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลที่ได้จากการทดลองกับพื้นปูนซีเมนต์ สามารถใช้ได้ครอบคลุมกับวัสดุที่ใช้ปูพื้นหลายชนิด

7. ทดลองหาอุณหภูมิโอเปอเรทีฟเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบในระดับต่าง ๆ จาก การทดลองพบว่าที่อัตราการไหล ๆ ต่างให้ผลของอุณหภูมิออกมามีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 25 องศาเซลเซียส เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อไม่มีภาระของแสงมากระทำ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีจากภาระของ แสงก็หายไป จึงเหลือแต่อุณหภูมิห้องที่มาจากพื้นเท่านั้นที่มีผลต่ออุณหภูมิโอเปอเรทีฟ ซึ่งที่อัตราการไหล ต่าง ๆ นั้น ทำให้อุณหภูมิพื้นมีค่าต่างกันไม่มากซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิโอเปอเรทีฟ ทำให้อุณหภูมิที่ ได้มีค่าต่างกันเพียงทศนิยมตำแหน่งที่สองเท่านั้น ดังนั้นอัตราการไหลไม่มีผลต่ออุณหภูมิโอเปอเรทีฟ

6.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. ควรทำความสะอาดและตรวจสอบสภาพการใช้งานของชุดอุปกรณ์ในการทดลอง โดยเฉพาะ เครื่องทำน้ำเย็นควรทำความสะอาดทุก ๆ เดือนโดยการเปลี่ยนน้ำที่ใช้ในระบบทำน้ำเย็น

2. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ ควรจะเปลี่ยนผ้าที่หุ้มตัวเซนเซอร์เพื่อจะได้วัดค่าได้ถูกต้อง มากขึ้นทั้งที่สภาวะภาระแสงน้อยและสภาวะแสงมาก

3. อัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบค่อนข้างจะไม่คงที่ และไม่สามารถเปิดอัตราการไหล ตามที่ต้องการ ได้จริง ดังนั้นควรหาอุปกรณ์มาเสริมเพื่อให้เปิดอัตราการไหลของน้ำเข้าห้องทดสอบ ได้ ตามที่ต้องการ

4. ในการทดสอบวัสดุปูพื้นห้องทดสอบ ควรหาอัตราการไหลที่เหมาะสมกับพื้นที่แต่ละชนิด เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 เพื่อให้ได้อุณหภูมิพื้นที่เหมาะสมตามหลักความสบาย

บรรณานุกรม

- [1] กรมอุตุนิคมวิทยา
- [2] เกียรติยศ ศีรอด, จินดา เจริญพรพาณิชย์, มนต์ศักดิ์ พิมสาร และ จักรกริช จึงศิริวัฒนา, “การเกิดการควบแน่นบนวัสดุผิวพื้นในระบบพื้นทำความเย็นแบบการแผ่รังสี”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น
- [3] เกียรติยศ ศีรอด, ชโลธร ธรรมแท้, อุन्नัตติ พินโสภณ และ จินดา เจริญพรพาณิชย์, “การควบคุมการทำงานของระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546 จังหวัดปราจีนบุรี
- [4] เกียรติยศ ศีรอด, อรุพงษ์ ลัทธิสุงเนิน, จิตราภรณ์ วงสว่างม และ จินดา เจริญพรพาณิชย์, “พฤติกรรมของการควบแน่นในระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสี”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์, “การถ่ายเทความร้อน Heat Transfer”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [6] อัครเดช สีนุทภัค, “การทำความเป็น Refrigeration”, พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [7] อัครเดช สีนุทภัค, “การปรับอากาศ Air Conditioning”, พิมพ์ครั้งที่ 4 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [8] อรุพงษ์ ลัทธิสุงเนิน, อุन्नัตติ พินโสภณ, จินดา เจริญพรพาณิชย์, จักรกริช จึงศิริวัฒนา, “การศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องที่ใช้ระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย 18, 18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัดขอนแก่น
- [9] Jan F. Kreider, Peter s. Curtiss and Ari Rabl, “Heating and Cooling of Buildings” 2nd Edition, McGraw-Hill, 2002
- [10] K. Deerod, K. Rodjanakid and C. Charoenphonphanich, “Study of Condensation Problem in Radiant Floor Cooling System”, The 15th International Symposium on Transport Phenomena, May 2004, Bangkok, Thailand
- [11] Richard D. Watson and Kirby S. Chapman, “Radiant Heating Cooling Handbook”, McGraw-Hill, 2002
- [12] Robert W. Fox, Alan T. McDonald and Philip J. Pritchard, “Introduction to Fluid Mechanics”, John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [13] U. Latthisoongnern, C. Trumtae, C. Charoenphonphanich, “Effect of Direct Sunshine on Characteristics of Radiant Floor Cooling”, The 15th International Symposium on Transport Phenomena, May 2004, Bangkok, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] Yuan's A. Engel and Michel A. Boles, "Thermodynamics: An Engineering Approach" 4th Edition, McGraw-Hill, 2002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้