

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พฤศจิกายนการควบแน่นในระบบการทำความร้อนแบบแผ่รังสี

CONDENSATION CHARACTERISTICS IN A RADIANT COOLING SYSTEM



เกียรติยศ คีรอต
KEITYYOT DEEROD

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 60229
วัน,เดือน,ปี 27 ส.ย. 2549

b. 11584671
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1472-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CONDENSATION CHARACTERISTICS IN A RADIANT COOLING SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974-15-1472-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการควบคุมความชื้นในระบบการทำความเย็นแบบแผล่งสี
นักศึกษา	นายเกียรติยศ ศีรอก
รหัสนักศึกษา	45060610
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.จินดา เจริญพรพามิษฐ์

บทคัดย่อ

ระบบการทำความเย็นแบบการแผล่งสีจากพื้นเป็นหลักการใหม่ที่เข้ามาสำหรับระบบปรับอากาศ ซึ่งจะฝังท่อน้ำเย็นไว้ภายใต้โครงสร้างของอาคาร ปัญหาที่สำคัญและต้องหลีกเลี่ยงคือ การเกิดการควบแน่นบนวัสดุที่ใช้ปูพื้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อที่จะศึกษาการเกิดการควบแน่นบนวัสดุปูพื้นในกรณีต่าง ๆ กัน ซึ่งจะทำการทดลองในห้องทดลอง โดยอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะถูกควบคุมด้วย อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง ซึ่งเมื่อผลต่างของอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวที่ใช้ทดสอบห่างกันระดับหนึ่งแล้ว จะเกิดการควบแน่นพื้นผิวของวัสดุทดสอบนั้น แต่จะยังไม่ได้เกิดขึ้นในทันทีทันใด ต้องใช้ระยะเวลาหนึ่ง และเมื่อเกิดการควบแน่นขึ้นได้ทำการวัดหาขนาดของเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบในช่วงเวลา ต่าง ๆ กัน ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบและป้องกันปัญหาการเกิดการควบแน่นที่จะเกิดกับระบบทำความเย็นแบบแผล่งสี รวมทั้งรู้ขีดจำกัดในการทำความเย็นของพื้น โดยปราศจากปัญหาการควบแน่นที่พื้นผิว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการควบแน่น ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม ภาวะความร้อนจากแสงแดด และชนิดของวัสดุ โดยจะทำให้ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นแตกต่างกันไป

Thesis Title **Condensation Characteristics in a Radiant Cooling System**
Student **Keitiyot Deerod**
Student ID. **45060610**
Degree **Master of Engineer**
Programme **Mechanical Engineering**
Year **2005**
Thesis Advisor **Asst.Prof. Dr. Chinda Charoenphonphanich**

ABSTRACT

Radiant cooling system is the new concept for passive cooling system. In the radiant floor cooling system, the cooling water pipes were embedded in the floor structure. The floor surface temperature will be lower than air temperature that effects to lower the operative temperature. The condensation on the floor covering is the one of critical problems in radiant floor cooling system that should be avoided. The objective of this paper is to study the condensation phenomena on floor covering in radiant floor cooling system (RFC). The experiment was done in the radiant floor cooling test room. The dew point temperature was controlled by room temperature and relative humidity in test room. The time consumption for forming the water droplet on the floor surface and the size of water droplet at various conditions was measured. The results data will be useful for designing the system or developing the control strategy.

The affected factors on condensation including temperature, humidity , air velocity , solar load and type of material due to the different for starting period of condensation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและการให้คำปรึกษาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมาก และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนให้ทุนในการศึกษาวิจัย และบริษัทจาร์คิน แมททีสัน (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ รวมถึงห้องปฏิบัติการ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ มากมาย ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ พี่น้อง ๆ ปริณญาโท และน้อง ๆ ปริณญาตรีที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับการลงและเป็นการกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา และมารดา เป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่ต้นจนสำเร็จ ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการความสุขสวัสดิ์จงมีแก่ทุกท่าน

เกียรติยศ ศีรอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีการปรับอากาศและวรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 ทฤษฎีการปรับอากาศ.....	4
2.2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	16
บทที่ 3 ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	19
3.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับความร้อนและการถ่ายเทความร้อน.....	19
3.2 ความรู้เกี่ยวกับความชื้นและการควบแน่น.....	32
บทที่ 4 ระบบพื้นที่ทำความเย็นและวิธีดำเนินการวิจัย.....	50
4.1 ระบบพื้นที่ทำความเย็น.....	50
4.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	57
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	64
5.1 อุณหภูมิห้องที่ 24°C.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 อุณหภูมิห้องที่ 26°C.....	90
5.3 พิจารณาถึงความเร็วลม.....	102
5.4 มีภาระจากแสงมากระทำโดยปราศจากเงาบังพื้นผิวทดสอบ.....	105
5.5 มีภาระจากแสงมากระทำโดยมีเงามาบังพื้นผิวทดสอบ.....	108
5.6 เปลี่ยนชนิดของวัสดุปูพื้น.....	111
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	123
เอกสารอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก.....	126
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	127
ภาคผนวก ข รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	141
ภาคผนวก ค ตารางค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	154

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าการคายรังสีโดยเฉลี่ย ของวัสดุจำพวกโลหะ-อโลหะ.....	31
4.1 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อให้อุณหภูมิห้องคงที่ที่ 24 °C และ 26 °C.....	59
4.2 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วลม.....	59
4.3 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อแปรเปลี่ยนภาระจากแสงที่มากกระทำ.....	60
4.4 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อแปรเปลี่ยนชนิดของวัสดุปูพื้น.....	60
5.1 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 24 °C.....	114
5.2 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 26 °C.....	115
5.3 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่นเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วลม.....	115
5.4 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่นเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของแสงที่มากกระทำ.....	116
5.5 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่นเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุ.....	116
ข-1 แสดงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิต่าง ๆ	145
ข-2 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความเร็วจากเครื่อง TA3 กับความเร็วจริง.....	146
ค-1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ.....	150
ค-2 แสดงค่าการปล่อยออกของวัสดุ.....	153

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดง T-s diagram เมื่อ h คงที่.....	7
2.2 กระบวนการอิมิตัวแอเคียบติก และแผนภาพของ T-s.....	11
2.3 อุปกรณ์อย่างง่ายที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก.....	13
2.4 Sling psychrometer.....	13
2.5 แผนภาพของแผนภูมิ psychometric.....	15
3.1 แสดงรังสีความร้อนที่ตกกระทบ ถูกดูดกลืน และทะลุผ่าน.....	22
3.2 ช่วงค่าการนำความร้อนของสารต่าง ๆ.....	23
3.3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของสาร.....	24
3.4 แสดงความสัมพันธ์ของการนำความร้อนของวัสดุและความหนาแน่นของวัสดุ.....	25
3.5 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน.....	26
3.6 แสดงอัตราส่วนการดูดซับความร้อนและการคายรังสีของพื้นผิวแต่ละชนิด.....	39
3.7 ลักษณะการคายรังสีของผิวโลหะ ที่เปลี่ยนแปลงกับมุมกระทำ.....	30
3.8 ลักษณะการคายรังสีของผิวโลหะ ที่เปลี่ยนแปลงกับมุมกระทำ.....	30
3.9 แสดงประเภทของความชื้นในผนัง.....	37
3.10 แสดงแรงดึงในรูพรุน.....	38
3.11 แสดงการควบแน่นเป็นหยดน้ำในผนังของผนังที่มีช่องอากาศ.....	42
3.12 แสดงการควบแน่นแบบต่าง ๆ.....	43
3.13 การควบแน่นบนพื้นผิวในแนวตั้ง.....	44
3.14 แสดงการไหลของของเหลว หลังจากการควบแน่นบนพื้นลาดเอียง.....	45
4.1 แสดงโครงสร้างของห้องทดสอบ.....	52
4.2 แสดงลักษณะการวางท่อน้ำไว้ภายใต้พื้นห้องทดสอบ.....	52
4.3 แสดงโครงสร้างของพื้นในห้องทดสอบ.....	53
4.4 แผนผังแสดงตำแหน่งของเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ในห้องทดสอบ.....	53
4.5 แสดงภาระจากแสงอาทิตย์ที่มากกระทำใน 1 วัน.....	54
4.6 แผนผังแสดงการทำงานของระบบ RFC.....	55
4.7 แผนผังแสดงระบบควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่ส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	56
4.8 แผนผังแสดงระบบควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่ส่งไปยัง fan coil.....	56
4.9 แสดงแผนผังการทำงานของระบบ heater.....	57

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10	วัสดุที่นำมาทดสอบ.....58
4.11	การจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง.....61
4.12	แสดงเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่ถูกติดตั้งบนวัสดุทดสอบ..... 61
4.13	การจัดวางอุปกรณ์เมื่อมีความเร็วลมมาเกี่ยวข้อง..... 62
4.14	แสดงการใช้โปรแกรมคำนวณช่วยในการหาขนาด..... 63
5.1	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%(อุณหภูมิพื้น 19 °C)..... 64
5.2	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 65
5.3	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%(อุณหภูมิพื้น 19 °C)..... 66
5.4	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 66
5.5	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%(อุณหภูมิพื้น 19 °C)..... 67
5.6	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 68
5.7	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%(อุณหภูมิพื้น 18 °C)..... 68
5.8	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 69
5.9	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%(อุณหภูมิพื้น 18 °C)..... 69
5.10	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 70
5.11	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%(อุณหภูมิพื้น 18 °C)..... 70
5.12	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 71
5.13	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%(อุณหภูมิพื้น 18 °C)..... 71
5.14	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 72
5.15	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%(อุณหภูมิพื้น 17 °C)..... 72
5.16	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 73
5.17	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%(อุณหภูมิพื้น 17°C)..... 73
5.18	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%(อุณหภูมิพื้น 17 °C)..... 74
5.20	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 75
5.21	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%(อุณหภูมิพื้น 17 °C)..... 75
5.22	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 76
5.23	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%(อุณหภูมิพื้น 17 °C)..... 76
5.24	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 77
5.25	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%(อุณหภูมิพื้น 16 °C)..... 77
5.26	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 78
5.27	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%(อุณหภูมิพื้น 16 °C)..... 78
5.28	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 79
5.29	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%(อุณหภูมิพื้น 16 °C)..... 79
5.30	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 80
5.31	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%(อุณหภูมิพื้น 16 °C)..... 80
5.32	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 81
5.33	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%(อุณหภูมิพื้น 16 °C)..... 81
5.34	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 82
5.35	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70%(อุณหภูมิพื้น 16 °C)..... 82
5.36	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 83
5.37	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%(อุณหภูมิพื้น 15 °C)..... 83
5.38	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 84
5.39	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%(อุณหภูมิพื้น 15 °C)..... 84
5.40	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 85
5.41	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%(อุณหภูมิพื้น 15 °C)..... 85
5.42	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 86
5.43	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%(อุณหภูมิพื้น 15 °C)..... 86
5.44	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 87
5.45	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%(อุณหภูมิพื้น 15 °C)..... 87
5.46	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 88

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.47	กราฟแสดงการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70%(อุณหภูมิพื้น 15 °C)..... 88
5.48	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 89
5.49	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 95%RH (อุณหภูมิพื้น 19 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....90
5.50	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ.....91
5.51	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 90%RH (อุณหภูมิพื้น 19 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....91
5.52	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 92
5.53	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 85%RH (อุณหภูมิพื้น 19 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C).... 92
5.54	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 93
5.55	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 80%RH (อุณหภูมิพื้น 19 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....93
5.56	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 94
5.57	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 75%RH (อุณหภูมิพื้น 19 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....94
5.58	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 95
5.59	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 95%RH (อุณหภูมิพื้น 18 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....95
5.60	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 96
5.61	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 90%RH (อุณหภูมิพื้น 18 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....96
5.62	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 97
5.63	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 85%RH (อุณหภูมิพื้น 18 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....97
5.64	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 98
5.65	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 80%RH (อุณหภูมิพื้น 18 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....98
5.66	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 99
5.67	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 75%RH (อุณหภูมิพื้น 18 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....99
5.68	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ..... 100
5.69	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 70%RH (อุณหภูมิพื้น 18 °C, อุณหภูมิห้อง 26 °C)....100
5.70	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ.....101
5.71	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเป็น 90% (พิจารณาความเร็วลม).....102
5.72	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ (0.5 m/s)..... 103
5.73	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ (1.0 m/s)..... 103
5.74	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ (1.5 m/s)..... 104

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.75	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ (2.0 m/s)..... 104
5.76	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อมีภาระจากแสงมากระทำ 105
5.77	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 5W/m ² 106
5.78	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 10W/m ² 106
5.79	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 15W/m ² 107
5.80	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 20W/m ² 107
5.81	กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อมีภาระจากแสงมากระทำ (เงาบัง)..... 108
5.82	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 5W/m ² 109
5.83	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 10W/m ² 109
5.84	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 15W/m ² 110
5.85	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบ 20W/m ² 110
5.86	กราฟแสดงการปรับเงื่อนไขการทดสอบเมื่อเปลี่ยนชนิดของวัสดุ..... 111
5.87	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบหินแกรนิต..... 112
5.88	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบหินอ่อน..... 112
5.89	แสดงผลที่ได้จากการทดสอบหินกาบ..... 113
5.90	แสดงกราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิพื้นผิว เมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบเป็น 24 °C.....117
5.91	แสดงกราฟระหว่างเวลาและความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19°C.....118
5.92	แสดงกราฟระหว่างเวลาและความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18°C.....118
5.93	แสดงกราฟระหว่างเวลาและความเร็วลม.....119
5.94	แสดงกราฟระหว่างเวลาและภาระจากแสงที่มากระทำ.....120
ข-1	แสดงกล้องดิจิทัล Canon EOS300D..... 142
ข-2	แสดงวงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นบนแผ่นทดสอบ..... 143
ข-3	แสดงวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC..... 144
ข-4	แสดงเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ..... 144
ข-5	แสดงเครื่องวัดความเร็วลม TA3.....146
ข-6	แสดงพัดลมไฟฟ้ากระแสตรง..... 147
ข-7	แสดงเครื่องเพิ่มความชื้น..... 147

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในอดีตจนถึงปัจจุบันมนุษย์มีความพยายามที่จะทำการประดิษฐ์สิ่งต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกสบายให้กับตนเองไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ยานพาหนะ รวมไปถึงระบบปรับอากาศ ซึ่งความสบายส่วนหนึ่งของมนุษย์คือ การที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมไม่ร้อนหรือเย็นจนเกินไป ดังนั้นระบบปรับอากาศจึงมีความสำคัญต่อความสบายของมนุษย์

ในปัจจุบันเราพบว่าสภาพอากาศของโลกมีแนวโน้มที่จะร้อนขึ้น ทำให้ความต้องการในการใช้ระบบปรับอากาศมีมากขึ้น ขณะเดียวกันการนำพลังงานความร้อนและแสงสว่างจากดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มนุษย์คำนึงถึงอย่างมากเช่นกัน เช่น การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การต้มน้ำ การใช้เป็นพลังงานในการขับเคลื่อนยานพาหนะ รวมไปถึงการออกแบบโครงสร้างของอาคารในส่วนหลังคาให้มีลักษณะที่โปร่งแสง เพื่อช่วยเพิ่มแสงสว่างภายในอาคาร แต่สิ่งที่พบคู่กันเสมอคือ การสะสมของความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารนั้น ๆ

ซึ่งความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์นั้นเมื่อนำมาใช้ในการส่องสว่าง จะมีผลทำให้ต้องเพิ่มพลังงานในการขับเคลื่อนสำหรับทำความเย็นเพิ่มขึ้น ซึ่งหากมีการออกแบบที่ไม่ดี ค่าการประหยัดพลังงานที่ได้จากการลดการใช้งานของหลอดไฟลงนั้น ไม่อาจเทียบได้กับค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการที่ใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในระบบทำความเย็น

ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามที่จะลดการใช้พลังงานลงด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การออกแบบอาคารให้มีการใช้พลังงานน้อยลง การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทำความเย็น รวมไปถึงการออกแบบระบบทำความเย็นใหม่

ที่ผ่านมาระบบปรับอากาศที่ใช้กันอยู่นั้นจะใช้การพาความร้อนด้วยอากาศเป็นหลักในการทำ ความเย็น ซึ่งจะมีข้อจำกัดในเรื่องของประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นระบบปรับอากาศแบบใหม่ขึ้นมา โดยจะใช้รูปแบบของการฝังท่อน้ำเย็นไว้ภายใต้พื้น เพื่อรักษาอุณหภูมิของพื้นและจัดการความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีที่มาจากแสงที่ส่องลงมากระทบพื้น ข้อดีของระบบนี้คือ ความสามารถในการดูดซับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยการอาศัยพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนั้นยังสามารถลดพลังงานในส่วนเครื่องทำน้ำเย็น (chiller) ลงได้อีกด้วยเนื่องจากเมื่อมีขนาดของการทำความเย็นที่เท่ากันระบบพื้นเย็นจะลดภาระของการปรับอากาศลงได้มาก รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ระบบจะมีน้อยเนื่องจากเป็นระบบปิด และปราศจากมลภาวะทางค่านเสียรบกวน อีกทั้งอุปกรณ์ที่ติดตั้งจะถูกฝังในพื้นที่ทำให้ไม่มีอุปกรณ์ที่ติดตั้งกีดขวางพื้นที่ใดๆ แต่สามารถควบคุมภาระความร้อนที่ผ่านเข้ามากระทบพื้น ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แต่อย่างไรก็ตาม ระบบการทำความเย็นแบบนี้ยังมีข้อจำกัด คือไม่สามารถที่จะจัดการกับความชื้นที่อยู่ในระบบได้ จึงต้องจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับระบบปรับอากาศแบบทั่วไปที่ใช้การพาความร้อนของอากาศมาช่วยในการควบคุมความชื้นภายในพื้นที่ทำความเย็น ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เมื่อความชื้นในพื้นที่ทำความเย็นมีค่าสูงเกิดกว่าระดับที่กำหนด ระบบลมเย็นจะทำงานเพื่อลดความชื้น ออกจากระบบ โดยการรวมระบบทั้งสองเข้าด้วยกันนี้ เราจะเรียกว่าระบบผสม (hybrid system)

ในประเทศไทยได้มีการ ติดตั้งระบบปรับอากาศแบบการทำความเย็น โดยการฝังท่อน้ำไว้ภายใต้พื้น (radiant floor cooling system) โดยมีการติดตั้งและใช้งานจริงครั้งแรกที่สนามบินสุวรรณภูมิ เมื่อถูกนำมาใช้ในการทำความเย็น จะมีความเสี่ยงต่อปัญหาการเกิดการควบแน่นที่พื้นผิว ซึ่งจะต่างจากการนำไปใช้ในการทำความร้อน

ปัญหาการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวของวัสดุพื้นนั้น นับเป็นปัญหาที่สำคัญมากสำหรับผู้ออกแบบระบบที่จะต้องให้ความสนใจ ซึ่งพื้นของอาคาร หรือสถานที่ที่มีการติดตั้งระบบทำความเย็นนี้จะต้องไม่ใช้วัสดุที่ดูดซับน้ำได้ดี เช่น พื้นพรม พื้นไม้ เป็นต้น เพราะเมื่อเกิดการควบแน่นแล้ววัสดุเหล่านี้จะทำการดูดซับน้ำเอาไว้ อันเป็นสาเหตุของเชื้อราและแบคทีเรียที่เกิดขึ้นซึ่งมีผลเป็นอันตรายต่อผู้อาศัย ดังนั้นจึงนิยมใช้วัสดุพื้นจำพวก อิฐ หินอ่อน หินแกรนิต และพวกกระเบื้องปูพื้นต่าง ๆ ที่ไม่ดูดซับน้ำ แต่ปัญหาอีกประการหนึ่งที่จะพบเมื่อพื้นเกิดการควบแน่นก็คือ เรื่องพื้นผิวที่ลื่นจนก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้อยู่ในพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งถ้าพื้นเกิดการควบแน่น บริเวณทั้งหมดที่มีการติดตั้งระบบนี้จะเปียกชุ่มไปด้วยน้ำ ซึ่งยากแก่การที่จะไปเช็ดให้พื้นแห้งโดยเร็วและก่อให้เกิดอันตรายได้จากการลื่นของผู้คนที่สัญจร ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาที่ต้นเหตุคือ ทำการศึกษาสภาวะที่จะมีผลให้เกิดการควบแน่นบนพื้น เพื่อที่จะดูระยะเวลาของการเกิดการควบแน่น ลักษณะทางกายภาพของการเกิด เพื่อนำเอาข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์เพื่อในการออกแบบระบบต่อไปโดยปราศจากปัญหาที่กล่าวมาแล้ว

ในการออกแบบระบบปรับอากาศที่คืนนั้น จะด้วยมีประสิทธิภาพที่สูง และง่ายต่อการใช้งาน สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการคำนึงถึงสวัสดิภาพ ความสุขสบายของผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรที่จะทำการศึกษาและพัฒนาให้สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ผู้จัดจึงได้เลือกเอาระบบทำความเย็นแบบฝังท่อน้ำไว้ในพื้น เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากระบบนี้มีแนวโน้มจะถูกนำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต จึงเป็นการดีที่มีการศึกษาระบบนี้ไว้ก่อน เพื่อเป็นฐานข้อมูล ที่อาจจะเป็นประโยชน์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาและวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาการทำงานของระบบการทำความเย็น โดยการฝังท่อน้ำเย็นไว้ภายใต้พื้น
2. เพื่อหาข้อจำกัดของระบบการทำความเย็นแบบการฝังท่อน้ำไว้ภายใต้พื้น โดยปราศจากปัญหาการควบแน่นที่พื้นผิว

3. ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว เช่น ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น ขนาดของเมฆน้ำที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ กัน
4. ศึกษาชนิดของวัสดุ ความเร็ว และแสงสว่าง ว่ามีผลต่อการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาการเกิดการควบแน่นบนวัสดุปูพื้นในเงื่อนไขที่แตกต่างกันไปเช่นเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิพื้น ความเร็วลม อุณหภูมิห้อง ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง เป็นต้น
2. ทหาระยะเวลาที่เริ่มเกิดการควบแน่น ขนาดของเมฆน้ำที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ กัน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงข้อดี ข้อเสียของระบบการทำความเย็นโดยการฝังท่อน้ำไว้ใต้พื้น
2. สามารถนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ไปใช้ในการออกแบบและติดตั้งระบบการทำ ความเย็นลักษณะนี้ต่อไปโดยปราศจากปัญหาการเกิดการควบแน่นที่พื้นผิว
3. ลดความเสียหายและอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผลของการเกิดการควบแน่น
4. ทำให้สามารถใช้งานระบบการทำความเย็นโดยการฝังท่อน้ำไว้ใต้พื้น ได้เต็มประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการปรับอากาศและวรรณกรรมปริทรรศน์

2.1 ทฤษฎีการปรับอากาศ

2.1.1 คำจำกัดความของการปรับอากาศ

การปรับอากาศคือการกระทำต่ออากาศเพื่อที่จะควบคุมให้ทั้งอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศ ได้เป็นไปตามต้องการของที่นั้น ๆ และพร้อม ๆ กันไปก็จะต้องควบคุมความบริสุทธิ์และการเคลื่อนไหวของอากาศด้วย

โดยทั่วไป การปรับอากาศอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. การปรับอากาศเพื่อความสบาย เป็นการปรับอากาศที่มุ่งส่งเสริมสุขภาพ ความสบายและประสิทธิภาพในการทำงานของผู้คนที่อาศัยหรือทำงานอยู่ในที่นั้น เช่น การปรับอากาศภายในบ้าน สำนักงาน โรงพยาบาล เป็นต้น
2. การปรับอากาศเพื่อการอุตสาหกรรม เป็นการปรับอากาศเพื่อควบคุมภาวะบรรยากาศในกระบวนการผลิต ในการทำงานวิจัย และการเก็บรักษาผลผลิตต่าง ๆ เช่น โรงงานทอผ้า โรงบ่มยา เป็นต้น

2.1.2 การปรับตัวของคนต่อสภาวะอากาศ

ตามปกติคนเราภายในร่างกายอุณหภูมิเฉลี่ยจะเป็น 37°C ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวหนังจะเป็น 33°C (สุขภาพดี) และจะไม่มีรู้สึกร้อนหรือหนาวในทันทีทันใด เมื่ออุณหภูมิรอบตัวมีค่า $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเรียกว่า “ขอบเขตเป็นกลาง” (neutral band) แต่ร่างกายจะเป็นปฏิกิริยาต่อสภาวะบรรยากาศหนาวเย็นทันทีทันใด ด้วยการหดตัวของเส้นเลือดสำหรับการสร้างสภาวะในห้องปรับอากาศในเมืองร้อนมักจะต้องการอุณหภูมิภายในห้องต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกประมาณ 7°C

2.1.3 ขอบเขตการปรับตัวต่อรังสีความร้อน

ถ้าคนเราอยู่ใน สภาวะที่มีรังสีความร้อน เช่น แดดร้อนจัดหรือ อยู่หน้าเตา เส้นเลือดก็จะขยายตัว โลหิตจะมาที่ผิวหนังเพื่อสร้างเหงื่อ โดยที่อากาศร้อนมีความสามารถอบความชื้นได้มากขึ้น (หรือมีความชื้นสัมพัทธ์สูง) เหงื่อก็จะระเหยไปยังอากาศร้อนรอบตัวได้ง่ายสามารถพาความร้อนไปด้วย (ความร้อนแฝง) ซึ่งเป็นกระบวนการระบายความร้อน เพื่อช่วยลดอุณหภูมิที่ผิวหนังไม่ให้เกินค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (33°C)

สำหรับขอบเขตการปรับตัวเพื่อลดการระบายรังสีความร้อนจากร่างกาย จะขึ้นอยู่กับวัยและภารกิจของคนด้วย เช่น คนหนุ่มและทำงานหนักจะชอบค่า DB ของแวดล้อมค่อนข้างต่ำเพราะ ต้องการระบายความร้อนจากตัวให้มาก และสามารถปรับตัวเข้ากับ DB ได้กว้าง ส่วนคนแก่และงานที่ทำได้เฉพาะงานเบา มักจะชอบอากาศอุ่นกว่า (ค่า DB ของอากาศจะสูงขึ้น) และอยู่ในขอบเขต DB ที่แคบลง ดังนั้นการปรับอากาศให้เหมาะสมกับวัยตลอดถึงภารกิจที่กระทำจะเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณาในการปรับอากาศ

2.1.4 ปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากร่างกาย

การดำรงชีวิตประจำของคน จำเป็นต้องรับประทานอาหารเพื่อให้เกิดกระบวนการทางเมตาบอลิซึม ทำให้มีกำลัง เพื่อปฏิบัติหน้าที่ของแต่ละคนและขณะที่ทำงานก็จะเกิดพลังงานความร้อนในร่างกายขึ้น ความร้อนจำนวนนี้จะถูกระบายไปยังภาวะแวดล้อมรอบตัว หากความร้อนนี้ระบายไม่ได้ เช่น อุณหภูมิอากาศรอบตัวขณะนั้นยังสูงอยู่ จะเป็นผลทำให้อุณหภูมิของร่างกายสูง

ปริมาณความร้อนที่เกิดในร่างกายมาจาก 2 แหล่งคือ

ก) เกิดจากการรับประทานอาหาร ตามกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolic) ของร่างกาย ได้กำลังเพื่อปฏิบัติภารกิจ แล้วเกิดความร้อนในร่างกาย

ข) เกิดจากภาวะแวดล้อมรอบตัว เช่น แสงแดดจ้า, อยู่ใกล้เตาไฟ ความร้อนจะไหลเข้าสู่ร่างกายได้โดยการแผ่รังสี, การนำ และการพา

ปริมาณความร้อนที่ระบายออกจากร่างกายได้ 4 ทางคือ

ก) โดยการนำความร้อน (Conduction)
กรณีอุณหภูมิของร่างกายสูงกว่าอากาศรอบตัว ความร้อนจะถ่ายโอนจากร่างกายสู่อากาศที่เย็นกว่า การสวมเสื้อผ้าที่หนาขึ้นจะช่วยลดความร้อนถ่ายโอนได้

ข) โดยการพาความร้อน (Convection)
ลมเย็นรอบตัวจะพาความร้อนออกไปได้ ลักษณะการพาความร้อนอาจจะเป็นทั้งแบบธรรมชาติ (natural convection) หรือแบบบังคับ (force convection) อย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

ค) โดยการแผ่รังสี (Radiation)
เนื่องจากผิวหนังร้อนส่วนรอบตัวเย็น จะเกิดการแผ่รังสีความร้อนออกจากร่างกายได้ (อุณหภูมิผิวหนัง 33 °C)

ง) โดยการระเหยของเหงื่อ (Evaporation of Perspiration)
การทำงานหนัก หรืออยู่ในภาวะที่ร้อนอบอ้าว ร่างกายจะมีเหงื่อมาก เนื่องจากการปรับตัวของร่างกายโดยอัตโนมัติ เนื่องจากอากาศร้อนขึ้นจะสามารถรับไอน้ำได้สูงขึ้น เหงื่อจึงระเหยได้ดี ในการระเหยของน้ำต้องใช้ความร้อนแฝง ซึ่งความร้อนแฝงนี้จะมาจากร่างกายนั่นเอง

ดังนั้นเครื่องจึงระบายความร้อนของร่างกายได้วิธีหนึ่ง สำหรับการระเหยของเหงื่อจะได้ดี หรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอีกด้วย เช่น ในห้องฉื้นที่อากาศอบอ้าว ค่า DB ของอากาศ 95 °F ความชื้นสัมพัทธ์ 85% (แถบเมืองร้อน) เหงื่อจะระเหยได้ยากกว่าอากาศที่มี DB 120 °F แต่ความชื้นสัมพัทธ์ 20% (แถบทะเลทราย) ดังนั้นแถบเมืองร้อนจะรู้สึกว่ามีเหงื่อเหนียวไม่สบายตัว ส่วนแถบทะเลทรายอากาศร้อนแต่รู้สึกสบายดีกว่า

2.1.5 อุณหภูมิสมประสงค์

ความรู้สึกต่อภาวะอากาศรอบตัวของแต่ละคน อาจไม่เหมือนกัน เช่น บางคนว่าขณะนี้อากาศหนาว แต่สำหรับบางคนบอกว่าสบายดีแล้ว เป็นต้น

โดยทั่วไปค่า DB (dry bulb temperature) ไม่ได้เป็นตัวเลขที่บ่งชี้ว่าเป็นสภาวะที่สบาย แต่จะมีปัจจัยอื่นเป็นองค์ประกอบด้วย เช่น ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วและความสะอาดของอากาศรวมอยู่ด้วย

จากผลการวิจัยของ The American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) ซึ่งได้ทำการวิจัยอยู่หลายปี จากคนหลายร้อยคน ซึ่งอยู่ในท้องถิ่นต่าง ๆ กัน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ, ความชื้น และความเร็วลม และผลของการวิจัยได้สรุปค่าออกมาเป็นอุณหภูมิสมประสงค์ (Effective Temperature)

2.1.6 อากาศ

อากาศเป็นแก๊สผสมที่มี แก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน และแก๊สชนิดอื่น ๆ อีกเล็กน้อย โดยปกติแล้วอากาศในบรรยากาศจะมีไอน้ำ หรือความชื้น (water-vapor หรือ moisture) เป็นส่วนประกอบรวมอยู่ด้วยและเรียกว่า “อากาศบรรยากาศ” (atmospheric air) และในทางตรงกันข้ามอากาศที่ไม่มีไอน้ำปะปนอยู่เราเรียกว่า “อากาศแห้ง” (dry air)

โดยปกติทั่วไปในการวิเคราะห์เราจะพิจารณาอากาศในบรรยากาศเป็นแก๊สผสม ที่มีส่วนประกอบระหว่าง ไอน้ำกับอากาศแห้ง เนื่องจากปริมาณมวลของอากาศแห้งในแก๊สผสมนั้นจะมีปริมาณคงที่ แต่ปริมาณไอน้ำจะเปลี่ยนไป ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกลั่นตัวและการระเหยของน้ำในมหาสมุทร ทะเล แม่น้ำ หรือแม้แต่ร่างกายมนุษย์ ถึงแม้ว่าปริมาณไอน้ำในอากาศมีปริมาณที่น้อย และมีผลต่อความสบายตัวของคนเรา อุณหภูมิของอากาศที่ต้องการในการปรับอากาศ จะอยู่ในช่วง -10°C ถึง 50°C ที่สภาวะดังกล่าว อากาศบรรยากาศเราถือว่าเป็นอากาศแห้ง มีพฤติกรรมเป็นแก๊สจินตภาพ และมีค่าความร้อนจำเพาะ C_p คงที่ เท่ากับ $1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นในการวิเคราะห์ที่อากาศแห้งจึงสามารถใช้หลักการวิเคราะห์แก๊สจินตภาพผสมได้ และสำหรับ เอนทาลปีของอากาศแห้งสามารถคำนวณหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$h_{dryair} = C_p T = [1.005 \text{ kJ} / \text{kg}\cdot\text{C}] T \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.1)$$

$$\text{และ } \Delta h_{dryair} = C_p \Delta T = [1.005 \text{ kJ} / \text{kg}\cdot\text{C}] \Delta T \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.2)$$

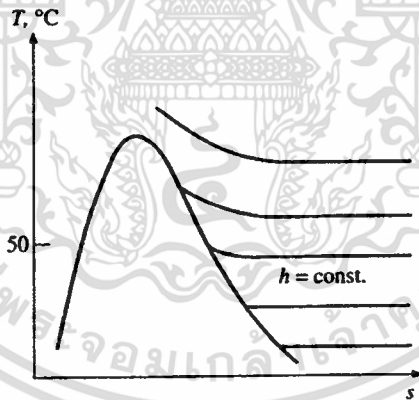
เมื่อ T คือ อุณหภูมิของอากาศในหน่วย $^{\circ}\text{C}$ และ ΔT หรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในกระบวนการปรับอากาศ เราจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี Δh ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับจุดอ้างอิงที่เลือก

ตามสมการความสัมพันธ์ของแก๊สอุดมคติ $P v = RT$ ถ้าอากาศในบรรยากาศสามารถถูกพิจารณาว่าเป็นแก๊สอุดมคติแล้ว ความดันของอากาศในบรรยากาศจะเท่ากับผลรวมของความดันย่อยของอากาศแห้ง P_d^* และความดันย่อยของไอน้ำ P_v^* (*ตลอดทั้งบทนี้ ตัวห้อยท้าย a จะหมายถึงอากาศแห้ง และตัวห้อยท้าย v จะหมายถึงไอน้ำ) ดังนี้

$$P = P_d + P_v \quad (\text{kPa}) \quad (2.3)$$

ความดันย่อยของไอน้ำมักจะหมายถึง ความดันไอ (vapor pressure) และความดันย่อยนี้จะหมายถึงความดันของไอน้ำที่ปรากฏราวกับว่า ไอน้ำนั้นอยู่โดดเดี่ยวที่อุณหภูมิและปริมาตรของแก๊สผสมนั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความดันย่อยของไอน้ำสามารถคำนวณหาได้ที่สภาวะอุณหภูมิและปริมาตรและแก๊สผสมนั้น

เนื่องจากไอน้ำเป็นแก๊สอุดมคติ ดังนั้น ค่าเอนทัลปีของไอน้ำจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเท่านั้น นั่นคือ $h = C_p T$ ซึ่งก็สามารถสังเกตเห็นได้จากแผนภาพ T-s ของน้ำที่เขียนไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C เส้นที่ h คงที่จะทับเส้นที่ $T = \text{คงที่}$ ในบริเวณที่น้ำอยู่ในสถานะร้อนยวดยิ่ง

2.1.7 ความชื้น

อากาศของโลกโดยทั่วไปจะมีไอน้ำผสมอยู่ หรือเรียกว่า ความชื้น ในการผสมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศโดยตรง กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศจะมีความชื้นสูงขึ้นตามด้วย ในบางครั้งจะขึ้นอยู่กับท้องถิ่นด้วย เช่น แถบชายทะเลทรายอากาศจะแห้ง ส่วนแถบเขตร้อนจะมีฝนตกหรือมีหนองบึงอากาศจะชื้นกว่า เป็นต้น

คุณสมบัติของไอน้ำในบรรยากาศของโลกเป็นสภาวะที่มีความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำด้วย ซึ่งสภาพของไอน้ำจะเป็นไอคง ค่าคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของไอน้ำจะถือเอาว่าเป็นแก๊สจินตภาพสามารถใช้สูตรความสัมพันธ์จากกฎของแก๊สได้ (จากผลการวิจัยพบว่าค่าที่ได้คลาดเคลื่อนไปประมาณ 1%)

การควบคุมความชื้นของอากาศเป็นเรื่องที่สำคัญ เพราะความชื้นมีอิทธิพลต่อความสบายของคน และในงานอุตสาหกรรม เช่น การพิมพ์ , ทอผ้า ความชื้นของอากาศก็สำคัญต่อขบวนการผลิต เช่น กรณีอากาศแห้งเกินไป จะทำให้เกิดผลต่อทางเดินหายใจ ผิวหนังแห้ง ร่างกายจะเสียน้ำเร็วและมาก แต่ถ้าอากาศชื้นเกินไปผิวหนังจะเปียกแฉะ ทำให้เกิดความรำคาญ

กฎทั่วไปของแก๊ส (The General Gas Law)

เป็นการรวมกฎของบอยล์และชาร์ลเข้าด้วยกันจะได้กฎทั่วไปของแก๊ส ดังนี้คือ

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2.4)$$

อากาศในท้องถิ่นต่าง ๆ จะมีไอน้ำผสมอยู่ด้วย ซึ่งปริมาณ ไอน้ำนี้จะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิของส่วนผสม โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิส่วนผสมสูงอากาศจะมีปริมาณไอน้ำมากกว่าขณะที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

ที่อุณหภูมิใด ๆ อากาศมีความสามารถผสมกับไอน้ำได้มากที่สุด ซึ่งเราเรียกว่า “อากาศอิ่มตัว” (Saturation air) แต่อย่างไรก็ตามในสภาวะธรรมชาติแล้วอากาศจะอยู่ในสภาวะต่ำกว่าจุดอิ่มตัว แต่กรณีถ้าอากาศที่พัฒนาจากทะเล เมื่อมากระทบกับอุณหภูมิที่เย็นกว่า จนกระทั่งไอน้ำนั้นสามารถกลั่นตัวเป็นหยดน้ำแยกออกบางส่วน อากาศจะสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากที่สุด เราจะเรียกว่า อากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมินั้น

โดยทั่วไปปริมาณไอน้ำในอากาศเราจะเรียกว่า ความชื้น (humidity) ซึ่งสามารถแสดงได้เป็น 3 ลักษณะด้วยกันคือ

1. ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity or Humidity ratio)
2. ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute humidity)
3. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)

ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity or humidity ratio ; w)

เป็นค่าที่เกิดจากมวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้งที่มีปริมาตรเท่ากัน นิยมใช้ กิโลกรัมของไอน้ำ ต่อ กิโลกรัมของอากาศแห้ง

$$w = \frac{m_v}{m_o} \quad (\text{kg water/kg dry air}) \quad (2.5)$$

เราลองพิจารณาอากาศแห้ง 1 kg จากนิยามที่กำหนด อากาศแห้งที่ไม่มีไอน้ำอยู่จะมีค่าความชื้นจำเพาะเท่ากับศูนย์ ถ้าเราเติมไอน้ำบางส่วนเข้าไปในอากาศแห้งนี้ ความชื้นจำเพาะก็จะเพิ่มมากขึ้น และถ้าเรายังคงเติมไอน้ำหรือความชื้นเพิ่มต่อไปอีก ความชื้นจำเพาะของอากาศก็จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอากาศจะไม่สามารถมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นได้อีกเราอาจกล่าวได้ว่าอากาศที่จุดนี้เป็นอากาศที่อิ่มตัวความชื้นและจะถูกเรียกว่า “อากาศอิ่มตัว” (saturated air) ความชื้นที่ถูกป้อนให้กับอากาศอิ่มตัวจะเกิดการควบแน่น ปริมาณของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันใด ๆ

ความชื้นสมบูรณ์ (Absolute humidity)

เป็นค่ามวลของไอน้ำในอากาศต่อปริมาตรของอากาศนั้น ในหน่วย SI unit เป็น g/m^3 ซึ่งเป็นค่าของความหนาแน่นของไอน้ำนั่นเอง (ปริมาตรของอากาศชื้น=ปริมาตรอากาศแห้ง=ปริมาตรไอน้ำ)

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity ; RH)

คืออัตราส่วนของความดันบางส่วนของไอน้ำในอากาศต่อความดันอิ่มตัวของไอน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของอากาศ หรือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่มีอยู่ (m_v) เทียบกับปริมาณความชื้นมากที่สุดที่จะอยู่ได้ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน (m_g) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_g V / (R_v T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (2.6)$$

เมื่อ $P_g = P_{sat@T}$

ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าตั้งแต่ 0 สำหรับอากาศแห้ง จนถึง 1 สำหรับอากาศอิ่มตัว ข้อสังเกตคือ ปริมาณความชื้นที่สามารถมีอยู่ได้ในอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเมื่อความชื้นจำเพาะจะมีค่าคงที่

2.1.8 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-Point Temperature)

ถ้าเราอาศัยอยู่ในสภาวะอากาศที่มีความชื้น เมื่อเราตื่นขึ้นในตอนเช้าในช่วงฤดูร้อน เรามักจะพบว่าหญ้าจะเปียก ทั้ง ๆ ที่เมื่อคืนที่ผ่านมาผ่านไม่ได้ตก คุชทราบหรือไม่ว่ามันเกิดอะไรขึ้น คำตอบก็คือ ความชื้นที่มากเกินไปในอากาศเกิดการควบแน่นที่ผิวที่เย็น ทำให้เกิดสิ่งที่เราเรียกว่า น้ำค้าง (dew) ในช่วงฤดูร้อนปริมาณน้ำจำนวนมากมายังจะทำให้เกิดการระเหยในช่วงกลางวัน แต่เมื่ออุณหภูมิของอากาศลดลงในช่วงตอนกลางคือ “ความจุความชื้น” (moisture capacity) ของอากาศซึ่งหมายถึงปริมาณของความชื้นสูงสุดที่มีอยู่ได้ในอากาศก็จะลดน้อยลงเช่นกัน (ความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างกระบวนการเพิ่มมากขึ้น) หลังจากนั้นชั่วขณะหนึ่งความชื้นของอากาศก็จะมีค่าเท่ากับปริมาณความชื้นในอากาศที่สภาวะนี้อากาศจะอิ่มตัว และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% และถ้าอุณหภูมิของอากาศลดต่ำลงอีกความชื้นบางส่วนก็จะเกิดการควบแน่น ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดน้ำค้าง

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew-point temperature, T_{dp}) ถูกนิยามไว้ว่าเป็นอุณหภูมิที่เริ่มมีการควบแน่นเกิดขึ้นเมื่ออากาศถูกทำให้เย็นตัวลงที่ความดันคงที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ค่า T_{dp} คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดันไอของน้ำนั่นเอง

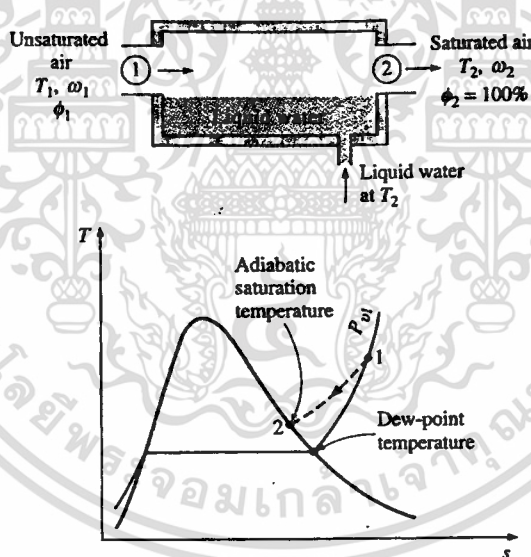
$$T_{dp} = T_{sat@P_v} \quad (2.7)$$

กล่าวคือ ขณะที่อากาศถูกทำให้เย็นตัวลงที่ความดันคงที่ ความดันไอ P_v ก็ยังคงมีค่าคงที่ ดังนั้น ไอในอากาศ (สภาวะที่ 1) จะมีอุณหภูมิลดลงตามแนวเส้นของความดันคงที่จนกระทั่งตัดกับเส้นโค้งของไออิ่มตัว (สภาวะที่ 2) อุณหภูมิที่จุดนี้คือ T_{dp} และถ้าอุณหภูมิลดต่ำกว่านี้ ไอบางส่วนก็จะเกิดการควบแน่น ผลที่ตามมาคือ ปริมาณของไอในอากาศจะลดลง ซึ่งเป็นผลทำให้ P_v ลดลง อากาศยังคงอิ่มตัวในระหว่างกระบวนการควบแน่น ดังนั้น กระบวนการจะดำเนินไปตามแนวเส้นของความชื้นสัมพัทธ์ 100% (เส้นโค้งของไออิ่มตัว) อุณหภูมิอิ่มตัวและอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศอิ่มตัวคือ จุดเดียวกัน

อุณหภูมิที่จุดน้ำค้างของอากาศภายในห้องสามารถถูกวัดได้อย่างง่าย ๆ โดยวิธีการดังนี้คือ โดยการทำให้ไอน้ำในถ้วยโลหะเย็นตัวลงด้วยการเติมน้ำแข็งและกวน หลังจากนั้นวัดอุณหภูมิที่ผิวนอกของถ้วยโลหะพร้อมทั้งสังเกตอุณหภูมิของผิวนอกของโลหะที่เริ่มเกิดหยดน้ำค้าง คือ อุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศนั่นเอง

2.1.9 การอิมตัวแบบแอดเคียบติกและอุณหภูมิกระเปาะเปียก

โดยปกติ ความชื้นสัมพัทธ์และความชื้นจำเพาะ มักจะใช้ในงานด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ แต่ค่าทั้งสองก็ไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง ดังนั้น เราจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาความชื้นสัมพัทธ์ของค่าทั้งสองกับค่าที่สามารถวัดได้ง่าย เช่น อุณหภูมิและความดันวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาความชื้นสัมพัทธ์ คือ การหาอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วถ้าเรารู้อุณหภูมิจุดน้ำค้าง จะทำให้เราสามารถหาค่าความดันไอ P_v ได้ และเมื่อทราบค่า P_v แล้วจะทำให้เราสามารถหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย แต่ไม่ค่อยสะดวกในเชิงปฏิบัติ อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าความชื้นสัมบูรณ์หรือความชื้นสัมพัทธ์คือ วิธีการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอิมตัวแบบแอดเคียบติก (adiabatic saturation process) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 กล่าวคือ ระบบจะประกอบด้วยท่อยาวที่มีฉนวนหุ้ม และมีน้ำบรรจุอยู่ภายใน กระแสของอากาศไหลผ่านเหนือ น้ำ น้ำบางส่วนจะระเหยและผสมเข้ากับกระแสของอากาศนี้ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศจะเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการ และอุณหภูมิของอากาศจะลดลงเพราะความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยของน้ำได้มาจากอากาศนั่นเอง ถ้าท่อนี้มีความยาวเพียงพอ กระแสของอากาศที่ไหลออกที่อุณหภูมิ T_2 จะเป็นอากาศอิมตัว ($\phi = 100\%$) ซึ่งเราจะเรียกอุณหภูมิ T_2 นี้ว่า “อุณหภูมิอิมตัวแอดเคียบติก” (adiabatic saturation temperature)



รูปที่ 2.2 กระบวนการอิมตัวแอดเคียบติก และแผนภาพของ T-s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเรามีการเติมน้ำเข้าสู่ท่อด้วยอัตราเท่ากับอัตราของการระเหยที่อุณหภูมิ T_2 แล้ว กระบวนการ อิ่มตัวแอเดียเบติกที่กล่าวข้างต้นนี้จะสามารถถูกวิเคราะห์ว่าเป็นกระบวนการการไหลแบบคงตัวได้ กระบวนการนี้จะ ไม่เกี่ยวข้องกับ การถ่ายโอนความร้อน หรืองานระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม และมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์น้อยมาก ดังนั้น กฎอนุรักษ์มวลสาร และพลังงาน สำหรับทางเข้า 2 ทางและทางออก 1 ทาง ของระบบที่มีการไหลคงตัวนี้ จะเขียนได้ดังนี้

กฎการคงตัวของมวล

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้งคงที่})$$

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_f = \dot{m}_{w2} \quad (\text{อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำในอากาศจะเพิ่มขึ้น})$$

ในปริมาณคงที่เท่ากับอัตราการระเหยของน้ำ \dot{m}_p)

หรือ
$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_f = \dot{m}_a \omega_2$$

ดังนั้น
$$\dot{m}_f = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1)$$

กฎอนุรักษ์พลังงาน

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e \quad (\text{เพราะว่า } \dot{Q} = 0 \text{ และ } \dot{W} = 0)$$

$$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_f h_f = \dot{m}_{a2} h_2$$

แทนค่า \dot{m}_f ได้
$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_f = \dot{m}_a h_2$$

ให้ \dot{m}_a แทน อัตราการไหลเชิงมวล

หารด้วยอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง \dot{m}_a จะได้

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_f = h_2$$

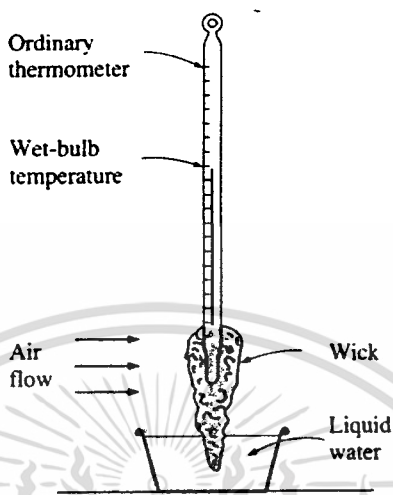
$$(C_p T_1 + \omega_1 h_{f1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_f = (C_p T_2 + \omega_2 h_{f2})$$

จะได้
$$\omega_1 = \frac{C_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{f2}}{h_{g1} - h_{g2}} \quad (2.8)$$

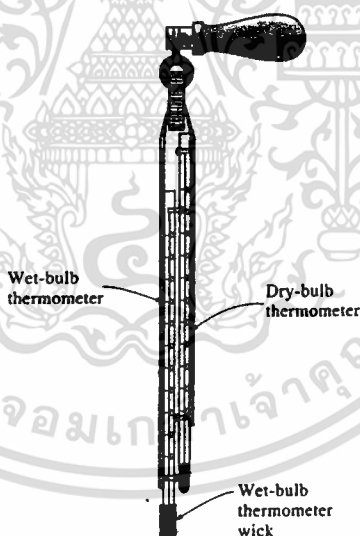
ถ้าอากาศที่ไหลเข้าที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวด้วยไอน้ำแล้ว อุณหภูมิอิ่มตัวแอเดียเบติก T_2 จะเท่ากับ อุณหภูมิที่ทางเข้า T_1 ในกรณีนี้จากสมการ (2.8) เราจะได้ว่า $\omega_1 = \omega_2$ โดยทั่วไป อุณหภูมิอิ่มตัวแอเดียเบติกจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

กระบวนการอิ่มตัวแอเดียเบติกที่ได้กล่าวข้างต้นเป็นกระบวนการที่สามารถใช้ในการหาค่า ความชื้นสัมบูรณ์หรือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศได้ แต่เราจำเป็นต้องให้ท่อที่ยาวหรือระบบฉนวนที่ดี เพียงพอ เพื่อให้ได้อากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำที่ทางออก ดังนั้น เรามีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ได้

ทางปฏิบัติมากกว่าคือ การใช้เทอร์โมมิเตอร์ที่มีกระเปาะถูกหุ้มด้วยสำลีที่อิมตัวด้วยน้ำ และมีการเป่าอากาศผ่านสำลีนั่น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อุณหภูมิที่ถูกรวัดด้วยวิธีนี้จะเรียกว่า “อุณหภูมิกระเปาะเปียก” (wet-bulb temperature T_{wb}) และมักถูกใช้ในงานปรับอากาศ



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์อย่างง่ายที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก



รูปที่ 2.4 sling psychrometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการพื้นฐานในกรณีนี้จะเหมือนกับหลักการของกระบวนการอิมตัวแอเคียเบติก กล่าวคือ เมื่ออากาศที่ไม่อิมตัวไหลผ่านลำลึที่เปียก น้ำบางส่วนในลำลึนี้จะเกิดการระเหย ผลที่ตามมาคือ อุณหภูมิของน้ำจะลดลง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอากาศและน้ำขึ้น (ซึ่งจะเป็นแรงขับเคลื่อนทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อน) หลังจากนั้นสักครู่หนึ่ง ความร้อนที่สูญเสียออกจากราน้ำเนื่องจากการระเหยเท่ากับความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนจากอากาศ อุณหภูมิของกระเปาะจะคงที่ ค่าของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์อ่านได้ที่จะนี้คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกนอกจากนี้อุณหภูมิกระเปาะเปียกยังอาจสามารถถูกวัดได้โดยการใส่เทอร์โมมิเตอร์ที่มีลำลึเปียกหุ้มที่ปลายนั้นเข้าไปในอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับใส่ และมีที่จับเพื่อใช้ในการเหวี่ยง หลังจากนั้นจะทำการเหวี่ยงอุปกรณ์นี้อย่างรวดเร็ว ซึ่งวิธีการนี้จะใช้การเคลื่อนที่ของเทอร์โมมิเตอร์แทนการไหลของอากาศ อุปกรณ์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการนี้จะถูกเรียกว่า “sling psychrometer” ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งก็มักจะถูกใส่ไว้ในอุปกรณ์นี้เช่นกันเพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก และอุณหภูมิกระเปาะแห้งได้พร้อม ๆ กัน

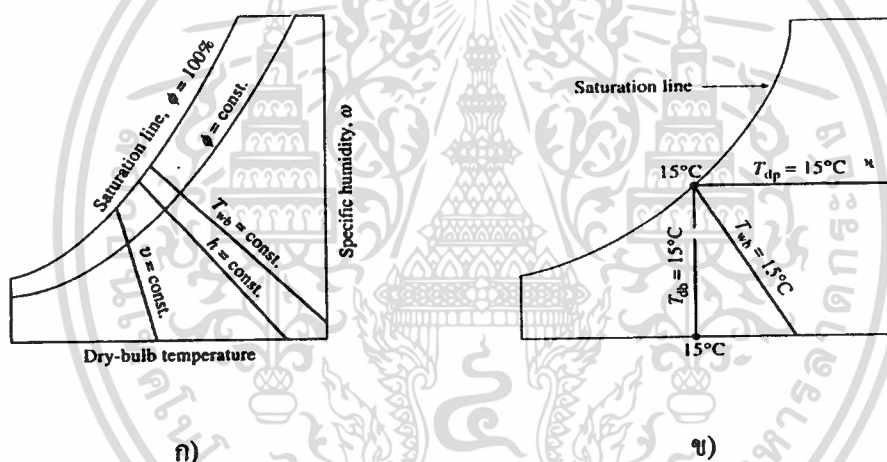
นอกจากนี้ในปัจจุบันนี้เรายังมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยที่สามารถใช้วัดความชื้นได้โดยตรง และรวดเร็วอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและมีหลักการทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าของฟิล์มบางของพอลิเมอร์ และมีการส่งสัญญาณแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็นตัวเลข เมื่อฟิล์มนั้นมีการดูดซึมไอน้ำโดยทั่วไป อุณหภูมิอิมตัวแอเคียเบติก และอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีค่าไม่เท่ากัน แต่สำหรับของผสมระหว่าง อากาศ - ไอน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับค่าอิมตัวแอเคียเบติกดังนั้น ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก T_{wb} สามารถใช้แทน T_2 ในสมการ (2.8) เพื่อหาค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ

2.1.10 แผนภูมิ psychrometric

โดยปกติสภาวะของอากาศในบรรยากาศที่ความดันค่าหนึ่งนั้น สามารถถูกกำหนดได้อย่างสมบูรณ์โดยค่าสมบัติไม่ขึ้นกับมวลอิสระ 2 ค่า เราจะทราบค่าสมบัติของสภาวะของอากาศดังกล่าวได้โดยการคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น โดยการออกแบบระบบการปรับอากาศมักจะต้องการคำนวณเช่นนั้นมากมาย ซึ่งมักจะทำให้เกิดความรำคาญต่อนักวิศวกรรมออกแบบเป็นอย่างมาก ดังนั้น จึงได้มีการคิดค้นที่จะหาวิธีการคำนวณหาค่าทั้งหมด และนำค่าที่คำนวณได้มาทำเป็นรูปของแผนภูมิที่ง่ายต่อการอ่าน แผนภูมิที่ได้นี้จะถูกเรียกว่า แผนภูมิ psychrometric (psychrometric charts) ซึ่งมักจะถูกใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบระบบปรับอากาศ แผนภูมิ psychrometric ที่ความดัน 1 atm (101.325 kPa หรือ 14.696 psia)

รูปร่างพื้นฐานทั่วไปของแผนภูมิ Psychrometric ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 กล่าวคือ อุณหภูมิ กระเปาะแห้งถูกแสดงไว้เป็นแกนนอน และค่าความชื้นจำเพาะถูกแสดงไว้เป็นแกนตั้ง (บางแผนภูมิก็ได้แสดงค่าความดันไอไว้ในแกนตั้งด้วย เพราะค่าความชื้นจำเพาะ ω จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันไอ P_v ตามสมการ (2.8) เมื่อมีการกำหนดค่าความดันรวม P) ที่ส่วนปลายด้านซ้ายของแผนภูมิ เราจะเห็นเส้นโค้ง ซึ่งเรียกว่า เส้นอิ่มตัว (saturation line) แทนที่จะเป็นเส้นตรง สภาวะของอากาศอิ่มตัวทั้งหมดจะอยู่บนเส้นโค้งนี้ ดังนั้น เส้นโค้งนี้ก็คือเส้นโค้งที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ 100% ส่วนเส้นโค้งที่ค่าคงที่ของความชื้นสัมพัทธ์อื่น ๆ ก็ได้แสดงในรูปร่างที่คล้ายคลึงกัน

เส้นของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของที่จะมีลักษณะเฉียงลงมาจากขวามือ และเส้นของปริมาณจำเพาะคงที่ (ในหน่วยของ m^3/kg dry air) จะคล้ายคลึงกัน เว้นแต่ว่าจะมีความชื้นที่มากกว่า ส่วนเส้นของค่าเอนทัลปีคงที่ (ในหน่วยของ kJ/kg dry air) จะเกือบที่จะขนานกับเส้นของอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ ดังนั้น เส้นของอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่จึงมักถูกใช้เป็นเส้นของเอนทัลปีคงที่ในแผนภูมิเดียวกันด้วย



รูปที่ 2.5 แผนภาพของแผนภูมิ psychrometric

สำหรับอากาศอิ่มตัว อุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และจุดน้ำค้าง จะเท่ากัน (รูปที่ 2.5 ข) ดังนั้นอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศในบรรยากาศที่จุดใด ๆ บนแผนภูมิสามารถถูกหาได้โดยลากเส้นแนวนอน (เส้นของ $\omega = \text{คงที่}$ $P_v = \text{คงที่}$) จากจุดนั้น ๆ ไปยังเส้นอิ่มตัว ค่าอุณหภูมิที่จุดตัดคือ ค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

2.2 วรรณกรรมปริทรรศน์

ในการศึกษาทำวิจัยเรื่องระบบพื้นทำความเย็นนี้ ได้ทำการศึกษาข้อมูลจากบทความที่ได้รับ การตีพิมพ์มาแล้วในนิตยสารทางวิชาการต่าง ๆ ซึ่งจะได้นำบทความบางส่วนมานำเสนอดังต่อไปนี้

Dale (1993) ทำการติดตั้งระบบผนังพื้นทำความร้อนแบบแผ่รังสี และระบบทำความร้อน โดยการพาความร้อนแบบบังคับในห้องทดสอบเพื่อทำการเก็บข้อมูล จากผลการทดสอบที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ระบบทั้งสองไม่มีข้อแตกต่างในด้านของประสิทธิภาพของพลังงานมากนัก โดยพลังงานรวมที่ใช้ในแต่ละระบบจะมีความแตกต่างกันไม่เกิน 5% แต่จะพบว่าการใช้ผนังทำความร้อนแบบแผ่รังสีจะมี อุณหภูมิโดยรวมสูงกว่า ซึ่งให้เห็นถึงอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายของ อุณหภูมิจากพื้นถึงเพดานมีรูปแบบที่แตกต่างกัน และที่ระดับพื้น และระดับเพดาน ระบบผนังทำความ ร้อนแบบแผ่รังสี จะสามารถสร้างอุณหภูมิได้สูงกว่าระบบทำความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ ของอากาศ

Feustel (1994) ได้ทำการเปรียบเทียบระบบการทำความเย็นโดยการแผ่รังสี (Hydronic Radiant cooling) กับระบบการทำความเย็นแบบ conventional HVAC system ซึ่งได้ทำการทดสอบกับอาคารที่ ตั้งอยู่ California โดยพบว่า ภาระในการทำความเย็นนั้น สามารถจะแบ่งออกได้เป็นส่วนต่าง ๆ ได้ ดังนี้คือ 31% จากแสง , 13% จากคนอาศัย , 14% จาก การถ่ายเทอากาศและ 6% จากสิ่งแวดล้อม ซึ่ง พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสี กับระบบ HVAC นั้น พบว่าระบบการทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้จะใช้พลังงานทั้งหมดเพียง 57.7% ของระบบ HVAC เท่านั้น โดยจะเห็นว่าพลังงานที่ลดลงอย่างมากนั้นเป็นพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมและปั๊ม (HVAC system ใช้ 37.5% ส่วน Radiant cooling system ใช้ 1.5%)

Simmonds (1996) ทำการติดตั้งระบบผนังทำความเย็น ในงานวิจัยของเขาที่ทำในอาคาร สำนักงานในประเทศจีน ซึ่งพื้นผิวทำความเย็นจะถูกต่อเข้ากับวงจรน้ำเย็น ซึ่งมีอุณหภูมิน้ำเข้า (supply water temperature) 13°C และน้ำกลับ (return water temperature) 17 °C ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวที่ ทำความเย็นได้คือ 15 °C และอุณหภูมิของอากาศในห้องสามารถแปรเปลี่ยนระหว่าง 20 - 25 °C ดังนั้น ที่ความสามารถสูงสุด พื้นผิวที่ทำความเย็นสามารถดึงเอาความร้อนจากอากาศออกได้

Kochendorfer (1996) ได้ทำการทดสอบหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้โดยผนังทำความเย็น โดยห้องที่ทำการทดสอบที่ถูกปิดล้อมจะถูกใช้ในการทดสอบปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่ทำได้ ความ ร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยผนังทำความเย็น กำหนดได้โดยผลคูณของอัตราการไหลโดยมวล และความ แตกต่างของเอนทาลปีของสารทำความเย็น โดยสมการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความ ร้อนที่ถ่ายเทได้ และความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็น ดังแสดงได้เป็น

$$q = c\Delta t$$

ซึ่งค่าคงที่ (C) และเลขชี้กำลัง (n) ขึ้นอยู่กับระบบผนังทำความเย็น โดยแบบแบนและแบบ
 ปีกมีเลขชี้กำลังประมาณ 1.1 สมการสำหรับความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็นคือ

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

เมื่อ t_1 = อุณหภูมิน้ำเข้า (°C)
 t_2 = อุณหภูมิน้ำกลับ (°C)
 t_{ref} = อุณหภูมิห้องอ้างอิง (°C)

Mumma (2001) ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะ ราคาค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการ
 ดำเนินการและอัตราการใช้พลังงาน ของระบบการทำความเย็น 2 ชนิดด้วยกันคือ ระบบปรับอากาศแบบ
 ทัวไปที่ใช้การเป่าลมเย็นออก กับระบบปรับอากาศแบบฝ้าเพดานทำความเย็น (chilled ceiling) ซึ่งจะ
 พบว่า ความร้อนจากคนที่ระบบสามารถรับได้เป็นดังต่อไปนี้คือ ถ้าเป็นระบบเป่าลมเย็น (diffuser) จะ
 สามารถแบ่งความร้อนออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้คือ radiation 35% , convection 40% และ evaporation
 อีก 25% ส่วนระบบฝ้าเพดานทำความเย็นจะแบ่งได้เป็น radiation 50% , convection 30% และ
 evaporation 20% นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงการควบแน่นที่เกิดขึ้นบนฝ้าเพดาน โดยพบว่าเมื่อเวลาผ่าน
 ไป 8.5 ชั่วโมง อุณหภูมิของฝ้าเพดานจะต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 7.8 °C โดยการควบแน่นจะเกิดทั่วทั้ง
 บริเวณ และถ้าอุณหภูมิจุดน้ำค้างต่ำกว่าอุณหภูมิพื้นผิว 3 °F (1.5 °C) เมื่อทิ้งไว้ 8.5 ชั่วโมงพบว่าจะไม่
 เกิดการควบแน่น และยังพบอีกว่า ถ้าใช้ระบบฝ้าเพดานทำความเย็นจะพบว่า ขนาดของ chiller และ
 pump จะลดลงรวมถึงราคาของ ductwork ลดลงเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศใน DOAs เหลือ
 ประมาณ 15-20% ของระบบ VAV นอกจากนั้นยังทำให้ใช้ขนาดของ AHU ลดลงด้วย และมีผลทำให้
 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ลดลงเนื่องจากอุปกรณ์ต่าง ๆ มี ขนาดเล็กลง

Olesen (2002) ได้ทำการวัดสมรรถนะของระบบการทำความร้อน และทำความเย็นของ
 ระบบที่มีการฝังท่อเอาไว้ ไม่ว่าจะเป็น พื้น ผนัง หรือ ที่เพดาน ซึ่งการวัดนี้จะทำการวัดในอาคารทั้งหมด
 4 หลังด้วยกัน โดยตั้งอยู่ในสถานที่ที่แตกต่างกันไป ซึ่งการวัดจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาค่าของ operative
 temperature เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์หาค่าของ thermal comfort ในอาคารแต่ละหลัง แต่ในการวัดนี้จะ
 มีการเก็บค่าทั้ง operative temperature , surface temperature, air temperature และ external temperature
 ซึ่งจากการทดสอบพบว่า การวัดค่าของ operative temperature ในอาคารทั้ง 4 หลัง นั้น ในช่วงฤดูร้อน
 ค่าของ comfort rang จะมีค่ามากกว่า 26 °C โดยค่าอุณหภูมิภายนอกจะมีค่าสูงกว่า 30 °C และใน
 ระหว่างวันทำงานการเปลี่ยนแปลงค่าของ operative temperature จะต่ำกว่า 4 °C

จากการวิจัยที่ผ่านมาเริ่มแรกจะเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับระบบผนัง พื้น ทำความร้อนที่นิยมใช้
 ในประเทศแถบเมืองหนาวและจะมีงานวิจัยบางส่วนที่ศึกษาเกี่ยวกับการทำความเย็น ซึ่งงานวิจัยส่วน

ใหญ่จะเน้นไปที่ประสิทธิภาพของระบบ เช่นในแง่ของพลังงานที่ใช้ ถ้าใช้ง่ายในการติดตั้ง โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับระบบปรับอากาศแบบทั่วไป เป็นต้น แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาของการควบแน่นบนพื้นผิวนั้นมีน้อยมาก ซึ่งเท่าที่ทำการศึกษามีแค่หนึ่งบทความที่พูดถึงผลของการควบแน่น แต่ไม่ได้เป็นสาระที่สำคัญของบทความนั้น

แต่เมื่อมีการนำเอาระบบนี้มาใช้ในการทำความเย็น ปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือมีความเสี่ยงต่อการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว โดยเฉพาะระบบที่มีการฝังท่อน้ำไว้ภายใต้พื้น ดังนั้นจึงมีงานวิจัยนี้เกิดขึ้นมาเพื่อทำการศึกษาลักษณะของการเกิดการควบแน่นที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิจัยทางด้านนี้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับความร้อนและการถ่ายเทความร้อน

3.1.1 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใหญ่ที่สุดสำหรับโลก พลังงานจากดวงอาทิตย์จะส่งมายังโลก พลังงานจากดวงอาทิตย์จะส่งมายังโลกด้วยการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานของดวงอาทิตย์บริเวณนอกชั้นบรรยากาศของโลกมีค่าประมาณ 1,400 วัตต์/ตารางเมตร พื้นที่รับแสงจากดวงอาทิตย์ของผิวโลกเฉลี่ยเท่ากับ 1.24×10^{14} ตารางเมตร ดังนั้นพลังงานที่โลกได้รับจึงมีค่าประมาณ 1.74×10^{17} วัตต์

พลังงานของดวงอาทิตย์ ไม่ได้ตกถึงผิวโลกทั้งหมด เนื่องจากเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศจะมีพลังงานบางส่วนถูกสะท้อนกลับไปด้วยก้อนเมฆ ไอน้ำ หรืออนุภาคของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ และเมื่อตกกระทบพื้นผิวโลกก็จะมีพลังงานบางส่วนถูกสะท้อนกลับออกไปด้วย โดยปริมาณการสะท้อนจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของโลกที่ถูกตกกระทบ เช่น บริเวณที่เป็นป่าไม้ จะมีการสะท้อนน้อยกว่าบริเวณขั้วโลกที่เป็นน้ำแข็งปกคลุมอยู่ พลังงานทั้งหมดที่สะท้อนออกไปจากโลกมีค่าประมาณ 36% ของพลังงานทั้งหมดที่มาถึงโลก ลักษณะการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก (Short-wave Radiation) และการแผ่รังสีบนพื้นผิวโลก (Long-wave Radiation)

ก) การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก

การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่อยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลกเป็นรังสีคลื่นสั้น (Short-wave Radiation) ถูกส่งมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- รังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultra-Violet) เรียกกันทั่วไปว่ารังสียูวี (UV) หรือรังสีเหนือม่วง เป็นตัวการทำให้สีของวัตถุซีดจาง ผิวหนังไหม้เกรียม มีความยาวคลื่นประมาณ 290 – 380 นาโนเมตร
- แสงสว่างที่มนุษย์มองเห็น (Visible Light) มีความยาวคลื่นประมาณ 380 – 700 นาโนเมตร
- รังสีอินฟราเรด (Infrared or Short Infrared) มีความยาวคลื่นประมาณ 700 – 2300 นาโนเมตร

ประมาณรังสีดวงอาทิตย์จะแปรผกผันกับระยะทางที่ส่งผ่านมายังพื้นผิวโลก เช่น ในเวลาเที่ยงวันดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวโลกมากที่สุด ระยะทางที่แสงส่องมาถึงโลกน้อยที่สุด ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์จะมากที่สุด ในทางกลับกัน เวลาเช้าและเย็นดวงอาทิตย์ไม่ได้อยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวโลก ระยะทางที่แสงส่องมาจึงมากขึ้น ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์จึงลดลงตามลำดับ

รังสีของดวงอาทิตย์ในแนวตั้งฉากถือเป็นค่าคงที่ของรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Constant) มีค่าประมาณ 1,395 วัตต์/ตารางเมตร ภูมิภาคต่าง ๆ ของโลกจะได้รับความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์แตกต่างกันไปตามมุมที่รังสีตกกระทบ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบ ω บริเวณใด ๆ จะเท่ากับผลคูณของค่าคงที่ของรังสีดวงอาทิตย์ กับค่าโคไซน์ (Cosine) ของมุมที่รังสีตกกระทบ

ข) การแผ่รังสีบนพื้นผิวโลก

การแผ่รังสีบนพื้นผิวโลก เป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างวัสดุบนพื้นผิวโลกในลักษณะรังสีคลื่นยาว (Long-wave Radiation) เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นรังสีคลื่นสั้นส่องผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกและตกกระทบวัตถุต่าง ๆ ทำให้เกิดพฤติกรรม 3 อย่าง คือ การดูดกลืน (Absorptance) ใช้สัญลักษณ์ α การส่องผ่าน (Transmittance) ใช้สัญลักษณ์ τ และการสะท้อน (Reflectance) ใช้สัญลักษณ์ λ โดยที่ค่าการดูดกลืนของวัตถุ คือ สัดส่วนของการดูดกลืนพลังงานต่อปริมาณพลังงานที่ตกลงบนพื้นผิวโลก

เนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ได้รวมถึงช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นด้วยตา ดังนั้นจึงสามารถใช้ตาในการประเมินความสัมพันธ์ของการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์กับสีของวัสดุ โดยสามารถทราบได้ว่าการมองวัตถุที่มีสีเข้ม จะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ได้มากกว่าวัตถุที่มีสีอ่อน และในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของวัตถุไม่จำเป็นต้องเท่ากับการแผ่รังสีคลื่นยาว โดยพลังงานส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ถูกดูดกลืนก็จะถูกสะท้อนหรือส่องผ่านไป ซึ่งถ้าให้ค่าของรังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 1 จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืน การส่องผ่าน และการสะท้อนดังต่อไปนี้

$$\text{การดูดกลืน } (\alpha) + \text{การส่องผ่าน } (\tau) + \text{การสะท้อน } (\lambda) = 1 \quad (3.1)$$

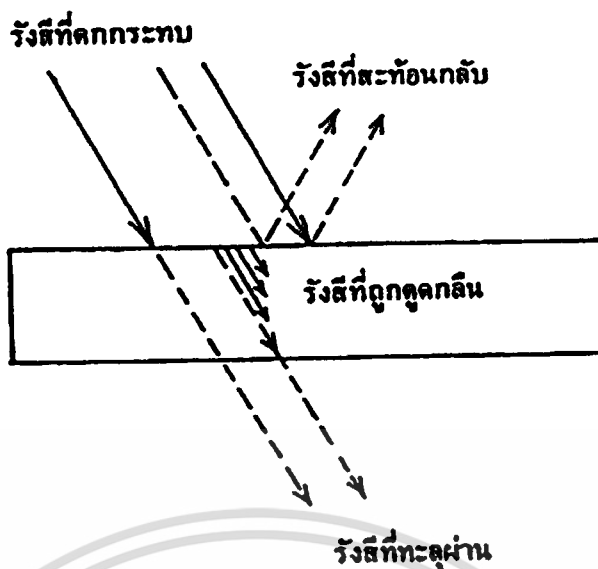
รังสีคลื่นสั้นที่ถูกดูดกลืนจะสะสมในวัตถุโดยเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน ทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นและแผ่รังสีความร้อนในลักษณะรังสีคลื่นยาว ไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งคุณสมบัตินี้จะเรียกว่า การคายความร้อน (Emittance) ใช้สัญลักษณ์ ϵ ค่าการคายความร้อน มีค่าเท่ากับการแผ่รังสีจากพื้นผิวของวัตถุ ต่อการแผ่รังสีที่สมบูรณ์

$$\epsilon = \frac{\text{การแผ่รังสีจากวัตถุ (Radiation from material)}}{\text{การแผ่รังสีจากวัตถุดำ (Radiation from blackbody)}} \quad (3.2)$$

เมื่อ $\epsilon = 1.00$ แสดงว่าวัตถุดำ (blackbody) ก็คือตัวคายความร้อนที่สมบูรณ์ (Perfect emitter) นั่นเอง พบว่าบนพื้นผิวโลก โดยทั่วไปจะมีค่าการคายรังสีความร้อนประมาณ 0.9 ในความสัมพันธ์ของค่าการคายรังสีกับค่าการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่ขนาดเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน

การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มายังพื้นโลกสามารถเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะตามทิศทางของการเกิดรังสีได้ รังสีที่ได้รับจากดวงอาทิตย์โดยตรง (Direct Solar Radiation or Direct Sun) รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) และรังสีสะท้อน (Reflected Radiation)

- รังสีที่ได้รับจากดวงอาทิตย์โดยตรง (Direct Solar Radiation or Direct Sun) คือรังสีที่ได้รับจากดวงอาทิตย์โดยตรง ในทิศทางของพลังงานที่มาจากดวงอาทิตย์ถึงพื้นโลกโดยไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อมาถึงชั้นบรรยากาศของโลกจะมีค่าประมาณ 429 Btu/hr.ft^2 เมื่อรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวโลก โดยผ่านชั้นบรรยากาศที่บางที่สุด ถ้าแนวรังสีเบี่ยงออกจากแนว 90 องศา ค่าความเข้มของพลังงานจะลดลง
- รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมาถึงชั้นบรรยากาศและถูกตกกระทบเมฆ ไอน้ำ และฝุ่นละออง ที่มีอยู่ในอากาศ ซึ่งการกระจายออกจะเป็นไปอย่างไร้สมำเสมอ แต่จะมีความเข้มสูงที่บริเวณเส้นขอบฟ้า รังสีกระจายจะมีประมาณ 10% – 90% ของปริมาณการแผ่รังสีดวงอาทิตย์โดยรวมที่เข้าสู่ในอาคาร ในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย สภาพท้องฟ้ามีปริมาณละอองไอน้ำและเมฆที่สูง ทำให้รังสีกระจายมีอิทธิต่อปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นกับอาคาร
- รังสีสะท้อน (Reflected Radiation) คือรังสีที่สะท้อนจากพื้นผิวต่าง ๆ มีค่าขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อนของพื้นผิวนั้น ๆ ปริมาณของรังสีสะท้อนที่ตกลงบนพื้นผิวใด ๆ มีอิทธิพลมาจากลักษณะของพื้นผิวและทิศทางของวัตถุที่อยู่โดยรอบ แม้ว่าผนังภายนอกอาคารจะไม่ถูกรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงก็ตาม แต่อุณหภูมิก็สูงได้ เนื่องจากรังสีกระจาย และรังสีสะท้อนที่สะท้อนมาจากสภาพแวดล้อมรอบอาคาร



รูปที่ 3.1 แสดงรังสีความร้อนที่ตกกระทบ ถูกดูดกลืน และทะลุผ่าน

3.1.2 การถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่งซึ่งสามารถเคลื่อนที่และสามารถเปลี่ยนรูป จากรูปหนึ่งไปสู่อีกรูปหนึ่งได้ เช่น จากพลังงานความร้อนไปสู่พลังงานไฟฟ้า และสามารถเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่สูงไปยังสถานะที่ต่ำกว่าได้เอง เช่น จากที่อุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำโดยการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ก) การนำความร้อน

การนำความร้อน เป็นถ่ายเทพลังงานความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าระหว่างโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกัน หรือสสารที่สัมผัสกัน โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลที่ร้อนกว่าและการเคลื่อนที่ของตัวกลาง การนำความร้อนจะเกิดขึ้นในทุกทิศทางไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลกและจะเกิดขึ้นจนกว่าทุกจุดที่สัมผัสจะมีอุณหภูมิเท่ากัน

กฎสหสัมพันธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง กำเนิดจากบิโตร์ (Biot) แต่ต่อมานักฟิสิกส์ - คณิตศาสตร์ของฝรั่งเศส ชื่อ โจเซฟ ฟูรีเยร์ (Joseph Fourier) นำหลักการนี้มาใช้วิเคราะห์เป็นทฤษฎีความร้อน กฎนี้กล่าวว่า “อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูรีเยร์กำหนดเป็น

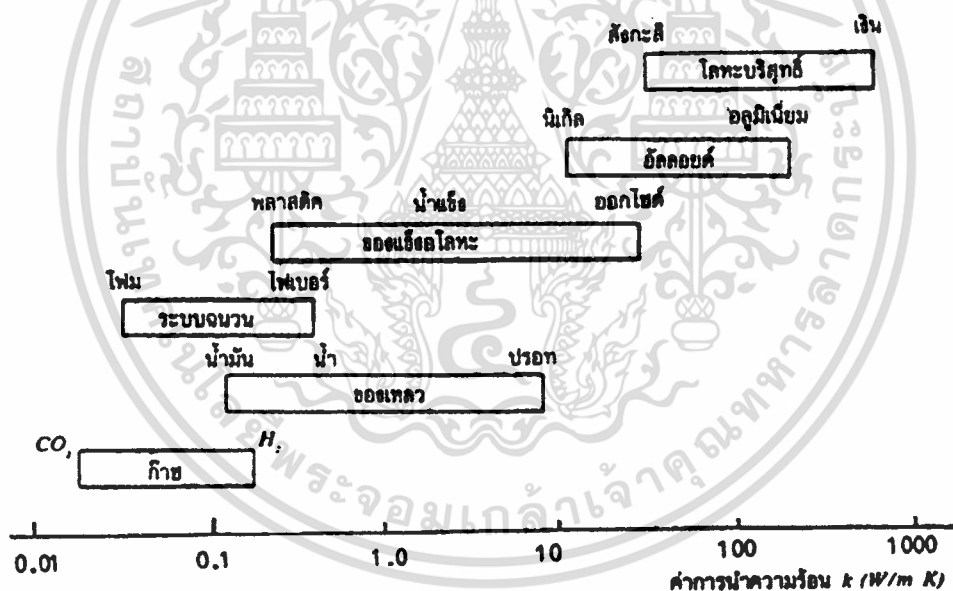
$$q_x = -kA (dT/dx) \quad W \quad (3.3)$$

หรือ $q''_x = q_x / A = -k(dT/dx) \quad W/m^2 \quad (3.4)$

โดย q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x
 q''_x คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x
 k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity of material) และเป็นค่าบวก

คุณสมบัติทางความร้อนของสาร

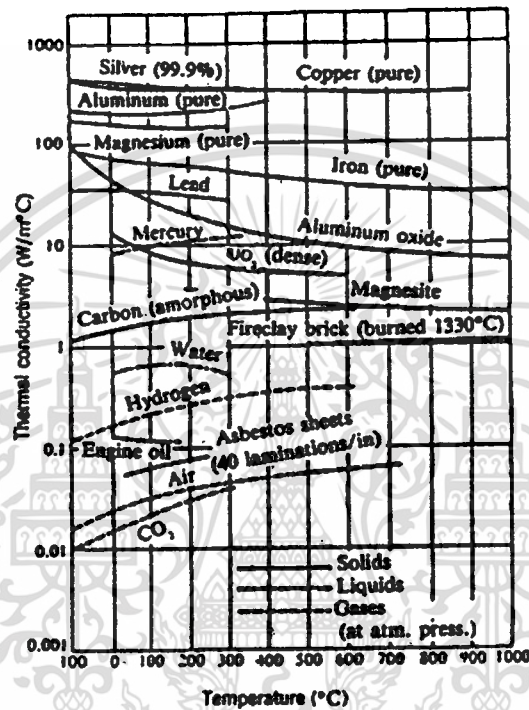
การใช้กฎของฟูริเยร์จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับ ค่าการนำความร้อนคุณสมบัตินี้จะเป็นการบ่งชี้ถึงอัตราที่ซึ่งพลังงานถูกถ่ายเทโดยขบวนการที่กระจาย อัตราการถ่ายเทพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางฟิสิกส์ของสาร อะตอมและโมเลกุล ซึ่งเกี่ยวกับสภาวะของสาร ค่าการนำความร้อน (k) ในสมการต่าง ๆ มีหน่วยเป็น w/mK หรือ $J/m.s.K$ ดังรูป 3.2 จะแสดงให้เห็นถึงช่วงกว้างของความแตกต่างของค่าการนำความร้อนของสารต่าง ๆ ในทางวิศวกรรม



รูปที่ 3.2 ช่วงค่าการนำความร้อนของสารต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการนำความร้อนยังแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิเช่นกัน สำหรับสารบางตัวมีการแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิน้อยจนอาจถือว่า ค่า k คงที่ก็ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วเกือบทุกกรณีสารทุกตัวจะแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ เช่น k จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับอุณหภูมิกตัวอย่างเช่นค่า k ของทองแดง อลูมิเนียมหรือเงินจะมีค่าจาก 50 ถึง 100 เท่าของค่า k ของมัน ที่อุณหภูมihองปกติดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนของสารทางวิศวกรรมบางอย่างแปรเปลี่ยนกับอุณหภูมิอย่างไร



รูปที่ 3.3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าการนำความร้อนของสาร

โดยค่าการนำความร้อน (Thermal Conductance) จะแปรผันตามค่าความหนาแน่นของวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าการนำความร้อนสูงตามไปด้วย ถือเป็นวัสดุที่นำความร้อนดีด้วย เช่น โลหะต่าง ๆ คอนกรีต อิฐและหิน จะมีค่าการนำความร้อนสูงแต่ยังต่ำกว่าวัสดุจำพวกโลหะ วัสดุเช่นไม้ วัสดุที่มีรูพรุน (Porpus Material) อากาศ จะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ

$$\text{Thermal Conductance} = K \times D \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Thermal Conductance = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Btu / hr.ft²)

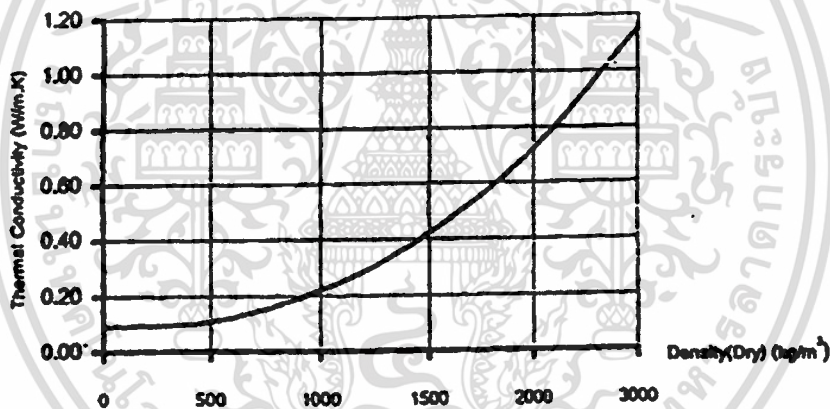
K = ค่า Thermal Conductivity (Btu.ft / hr.lb.°F)

D = ค่าความหนาแน่นของวัสดุ (lb / ft³)

ค่า Thermal Conductance คืออัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุชนิดหนึ่งที่ประกอบกันที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่ง ในหนึ่งหน่วยเวลาในที่นี้ คือจำนวนบีทียู (BTU) ต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านวัสดุที่มีพื้นที่ 1 ตารางฟุต เมื่ออุณหภูมิตกลง 1 องศาฟาเรนไฮด์

บีทียู คือ หน่วยที่ใช้ในการวัดพลังงานความร้อน โดยกำหนดให้ปริมาณความร้อน 1 บีทียู หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ ร้อนขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮด์

ค่าการคายความร้อนของวัสดุจะขึ้นอยู่กับ Thermal Conductance และความหนาแน่นของวัสดุ วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำจะส่งผ่านความร้อนออกมาได้น้อยและช้ากว่าวัสดุที่มีการนำความร้อนสูง เช่น โลหะ การส่งผ่านความร้อนออกมายังภายนอกจะมีปริมาณมากและรวดเร็ว



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ของการนำความร้อนของวัสดุและความหนาแน่นของวัสดุ

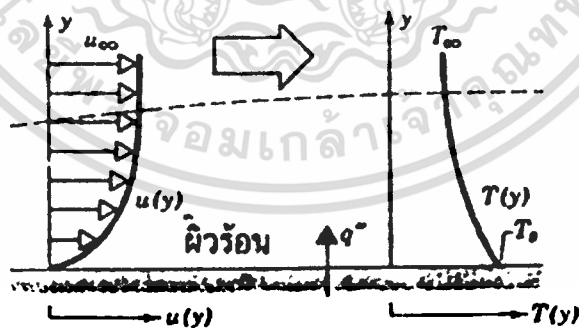
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล ได้แก่ ของเหลวและก๊าซ การพาความร้อนเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผิวของแข็งนั้น การพาความร้อนจะเกิดขึ้นร่วมกับการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน การถ่ายเทความร้อนระหว่างของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกัน ของไหลที่ไหลผ่านสัมผัสของแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำจะถูกทำให้ร้อนขึ้น โดยกระบวนการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ความร้อนดังกล่าวจะถูกแพร่ให้กับส่วนอื่น ๆ ของของไหล

ข้อแตกต่างของการนำความร้อน และการพาความร้อนก็คือชนิดของโมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่ ในกระบวนการนำความร้อนโมเลกุลไม่มีการเคลื่อนที่ย้ายตำแหน่ง แต่จะถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับโมเลกุลอื่น ๆ โดยการสั่นสะเทือนหรือชนต่อเนื่องกันไป สำหรับการพาความร้อนพลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับโมเลกุลอื่น ๆ โดยการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลของของไหลที่เป็นตัวกลางเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างของการพาความร้อนที่พบได้ทั่วไป ได้แก่ การไหลเวียนของอากาศภายในห้อง เมื่ออากาศได้รับความร้อนโมเลกุลของมันจะเกิดการเคลื่อนที่ห่างจากกันมากขึ้น จึงทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลง อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจะไหลเข้าไปแทนที่อากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า และเนื่องจากการพาความร้อนขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงไหลขึ้นด้านบนเสมอ

ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นเองโดยไร้ปัมหรือพัดลมเป็นตัวทำให้เกิดแรงกระทำทำให้ของไหลไหลผ่านบนพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การพาความร้อนแบบบังคับ” (forced convection) ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากแรงลอยตัว ซึ่งมีผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของไหล การถ่ายเทความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ” (free or natural convection)



รูปที่ 3.5 การพัฒนาชั้นของขอบเขตในการพาความร้อน

การเคลื่อนที่ของของไหลมีผลกระทบต่อสนามอุณหภูมิภายในของไหล การคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนแบบการพา ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อนมาก

ในทางวิศวกรรม เพื่อให้การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f ตามที่แสดงในรูป 3.5 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จะถูกกำหนดเป็น

$$q'' = h(T_w - T_f) \quad (3.6)$$

โดยที่ q'' เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังร้อนไปยังของไหลที่เย็นกว่า (มีหน่วยเป็น W/m^2) แต่ถ้าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากของไหลที่ร้อน ไปยังผนังที่เย็น จะได้ว่า

$$q'' = h(T_f - T_w) \quad (3.7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h (Convective heat transfer coefficient or film convective coefficient) จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล เช่น ลามินาร์ หรือ เทอร์บูเลนซ์ รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ของไหลไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ย และตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ นอกจากนี้ยังขึ้นกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนว่าเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ หรือเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ค่าของ h จะแปรเปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิววัตถุ ดังนั้นในทางวิศวกรรมแล้ว เพื่อความสะดวกจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดพื้นผิว (h_m) แทนค่า h ที่ตำแหน่งนั้น ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถวิเคราะห์ได้จากการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น แผ่นเรียบ หรือ การไหลภายในท่อทรงกระบอก สำหรับการไหลผ่านวัตถุที่มีรูปทรงสลับซับซ้อน ค่า h สามารถหาได้จากวิธีการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้จะมีช่วงของความแตกต่างกันกว้างมากตามแต่ละรูปแบบ สำหรับการประยุกต์ต่าง ๆ (ค่า h ดูได้จากภาคผนวก)

ก) การแผ่รังสีความร้อน

เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics Waves) เมื่อวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะมีพลังงานภายในตัวจากการสั่นของโมเลกุล ซึ่งพลังงานส่วนนี้จะถูกปล่อยออกจากวัตถุนั้น ในลักษณะการแผ่รังสีความร้อนผ่านผิวของวัตถุโดยอาศัยกลไกของการแผ่รังสีด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานความร้อนจะถ่ายเทจากที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ สามารถเกิดขึ้นได้อยู่ในภาวะสุญญากาศ

รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจะเดินทางผ่านช่องว่างในบรรยากาศในลักษณะเป็นเส้นตรงจนกว่าจะตกกระทบวัตถุใด ๆ ก็จะเกิดการดูดซับรังสีความร้อนขึ้น โมเลกุลที่ผิวของวัตถุที่ถูกตกกระทบจะดูดซับพลังงานของรังสีความร้อนและเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานความร้อน และทำให้โมเลกุลของตัววัตถุเองสั่นและอุณหภูมิสูงขึ้น เช่นเดียวกับการนำความร้อน การแผ่รังสีความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกทิศทาง ไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก

อุณหภูมิผิวของวัตถุไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น แต่จะขึ้นกับความยาวคลื่น (Wavelength) หรือความถี่ของรังสี (Frequency) ของวัตถุด้วย โมเลกุลของสสารหรือวัตถุจะสั่นด้วยความเร็วที่ขึ้นกับความยาวคลื่นและความถี่ของรังสี โมเลกุลที่มีความเร็วสูงสุดหรือมีอุณหภูมิสูงสุด จะปลดปล่อยรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดและมีความถี่สูงสุดด้วย

ความสามารถในการปลดปล่อยหรือการคายความร้อนของวัตถุ (Emissivity, ϵ) เป็นค่าที่ใช้ในการวัดความสามารถของพื้นผิวของวัตถุในการคายรังสีความร้อน เมื่อได้รับความร้อนค่าหนึ่งซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.00 คือไม่สามารถคายรังสีความร้อนได้เลย จนถึง 1.00 คือมีการแผ่รังสีในอัตราสูงสุด ซึ่งวัตถุที่จะเกิดการคายรังสีความร้อนแบบนี้ได้เรียกว่า “วัตถุดำ” (Black body) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าของการคายรังสีความร้อนของผิวจะมีค่าเท่ากับค่าการดูดซับความร้อนตามกฎของเคอร์ชอฟ (Kirchoff's Law)

ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ซึ่งการแผ่รังสีถูกส่งออกไปได้จากพื้นผิวหนึ่งจะกำหนดโดย กฎของสเติเฟน-โบลซ์แมน (Stefan-Boltzmann Law)

$$q'' = \sigma T_s^4 \quad (3.8)$$

โดยที่ T_s คือ ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ของผิว

σ คือ ค่าคงที่ของสเติเฟน-โบลซ์แมน มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$

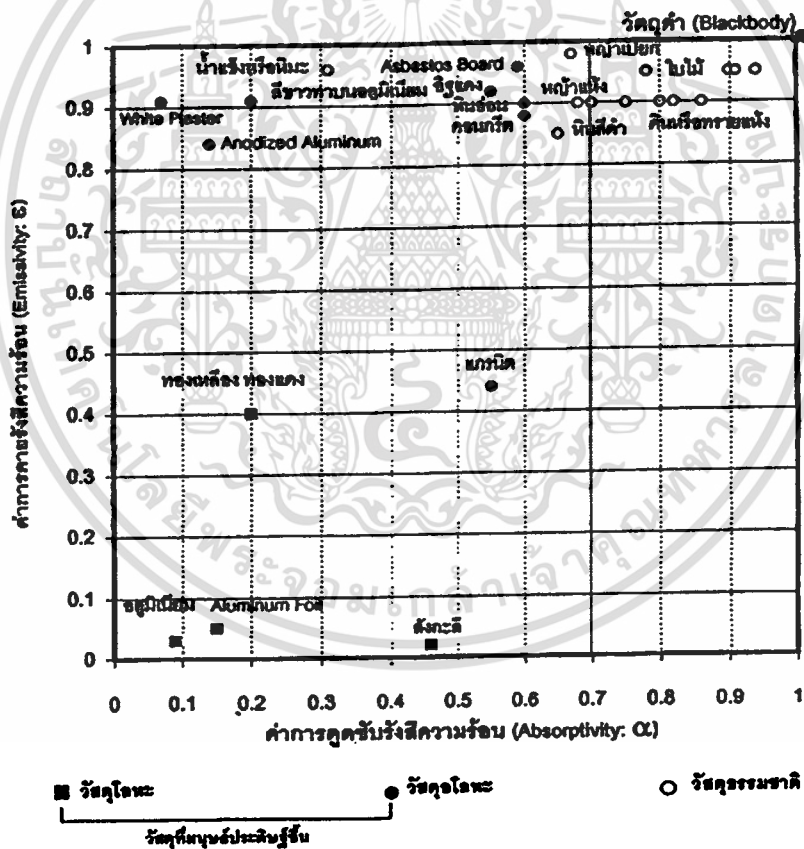
กรณีที่ฟลักซ์ความร้อนได้ถูกส่งออกโดยผิวจริง ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าการส่งออกจากตัวแผ่รังสีอุดมคติ (ideal radiator) กำหนดเป็น

$$q'' = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3.9)$$

โลหะที่มีพื้นผิวมันวาวจะมีค่าการดูดซับความร้อนต่ำ และค่าการสะท้อนความร้อนสูง ดังนั้นค่าการคายความร้อนจึงมีค่าต่ำ เกิดการแผ่รังสีได้ยาก แต่หากมีความร้อนที่ผิวของวัตถุนั้นแล้ว จะสามารถดูดซับความร้อนไว้ได้ดี ส่วนใหญ่โลหะจะมีค่าการคายความร้อนที่ต่ำ ส่วนอโลหะจะมีค่าการคายความร้อนที่สูง ค่าการคายความร้อนขึ้นกับลักษณะพื้นผิวและสีของวัตถุ

ผิววัสดุทั่วไปบนพื้นโลกสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ซึ่งแต่ละพื้นผิวจะมีค่าการดูดซับและการคายความร้อนที่ต่างกันออกไป ดังนี้

1. วัสดุธรรมชาติ (natural materials) ได้แก่
 - น้ำ, น้ำแข็ง, หิมะ โดยทั่วไปมีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ประมาณ 0.94 – 0.99
 - ดินและแร่ธาตุต่าง ๆ
 - พืชพันธุ์โดยทั่วไปมีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ประมาณ 0.90 – 0.95
2. วัสดุที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น (man-made materials) แบ่งออกเป็น
 - วัสดุโลหะ (electric materials) เช่น polished metal จะมีค่าการคายรังสีความร้อนต่ำ ประมาณ 0.01 – 0.04
 - วัสดุอโลหะ (dielectric materials) ได้แก่ ไม้ อีฐก่อ และคอนกรีต จะมีค่าการนำความร้อนสูง ประมาณ 0.9 – 0.98 และการเคลือบผิววัสดุต่าง ๆ (coating) เช่น anodizing, painted เป็นต้น

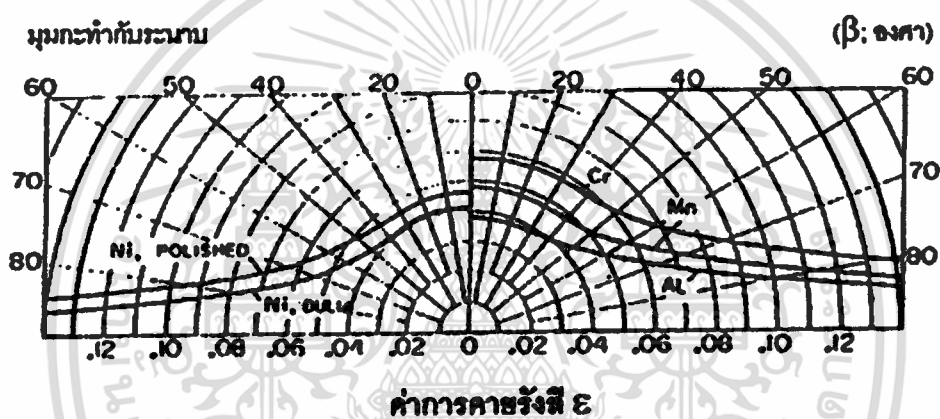


รูปที่ 3.6 แสดงอัตราส่วนการดูดซับความร้อนและการคายรังสีของพื้นผิวแต่ละชนิด

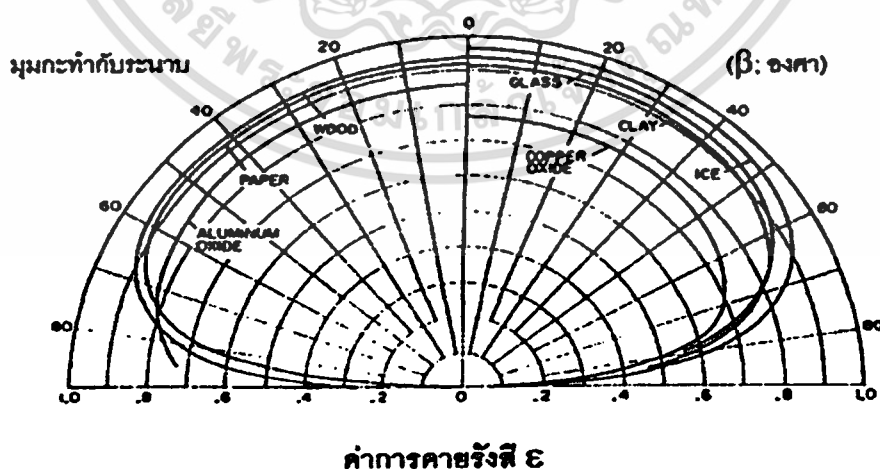
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแบ่งประเภทตามการคายรังสีของผิววัสดุบนพื้นโลก จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การคายรังสีของผิวโลหะ (metal) และการคายรังสีของผิวอโลหะ (non-metal) ซึ่งลักษณะการคายรังสีของผิวทั้งสองจะมีความแตกต่างกันตามปริมาณการคายรังสี โดยที่

- การคายรังสีของผิวโลหะจะมีค่าคงที่ เมื่อมีมุมกระทำกับระนาบน้อย β น้อยกว่า 40° และค่าการคายรังสีจะสูงขึ้นเมื่อมุมกระทำกับระนาบเพิ่มขึ้น (โดยประมาณ 40° ขึ้นไป) พฤติกรรมแบบนี้จะเกิดขึ้นกับความยาวคลื่นมาก ดังแสดงในภาพที่ 3.7
- การคายรังสีของผิวอโลหะ จะมีค่ามากกว่าผิวโลหะและมีค่าสูงสุดเมื่อมุมกระทำกับระนาบ β เท่ากับ 0° ค่าการคายรังสีจะค่อนข้างคงที่ตลอดเมื่อมีมุม $0^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ (ค่าประมาณ) และลดลงเมื่อมุมกระทำกับระนาบเพิ่มขึ้น (ตั้งแต่ 45° ขึ้นไป) โดยที่ค่าการคายรังสีเท่ากับ 0 เมื่อมีมุมกระทำกับระนาบ $\beta = 90^\circ$ ดังแสดงในภาพที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ลักษณะการคายรังสีของผิวโลหะ (Electric) ที่เปลี่ยนแปลงกับมุมกระทำ (β)



รูปที่ 3.8 ลักษณะการคายรังสีของผิวอโลหะ (Dielectric) ที่เปลี่ยนแปลงกับมุมกระทำ (β)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าการคายรังสีโดยเฉลี่ย (average emissivity) ของวัสดุ

ประเภทของพื้นผิววัสดุ	พื้นผิววัสดุ	ค่าการคายรังสีของพื้นผิว
Low emissivity พวกลโลหะ	Zinc	0.02-0.05
	Silver polished	0.02-0.07
	Aluminum polished	0.04-0.06
	Copper polished	0.04-0.05
	Steel polished	0.08-0.14
	Stainless steel polished	0.17-0.30
High emissivity พวกลโลหะ	Oil paint (all color)	0.92-0.96
	White acrylic	0.90
	White enamel	0.90
	Red primer/red lead	0.93
	Teflon	0.85-0.92
	PVF	0.80-0.88
	Grass, high and dry	0.90
	Asbestos cement	0.95
	Concrete	0.88-0.94

การศึกษาพฤติกรรมการคายรังสีความร้อนของผิวโลหะที่มีสีขาว 3 ชนิดได้แก่ วัสดุเคลือบสี (white enamel) , ยิปซัม (gypsum) และดินเผา (fire clay) ดังรูป 3.9

ผลจากการทดลองพบว่า ในช่วงแสงที่มองเห็น (visible wavelength : 0.5 μm) จะมีค่าการคายรังสีต่ำหรือมีค่าการสะท้อนกลับสูง แต่ในช่วงคลื่นยาว 3 μm ขึ้นไป วัสดุที่เคลือบสีและเคลือบเงาจะมีค่าการคายรังสีสูง ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับ blackbody Z(Siebler, 1941 อ้างใน Sparrow, 1978:38)

3.1.3 อิทธิพลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ก) ความจุความร้อนของวัสดุ (Thermal Heat Capacity)

หมายถึง ความสามารถในการเก็บกักความร้อนของสสารถ้าสสาร 2 ชนิดมีความจุความร้อนต่างกันแล้วจะพบว่า สสารที่มีความจุความร้อนมากกว่าเมื่อได้รับความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นช้ากว่าสสารที่มีความจุความร้อนน้อย

ข) ความสามารถในการดูดกลืนและการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ

โดยปกติแล้ว หากเป็นสีของพื้นผิวธรรมชาติของวัสดุตามธรรมชาติ ค่าการคายความร้อนจะค่อนข้างสูงคือ ประมาณ 0.8 – 0.9 เป็นส่วนใหญ่ นอกจากว่าเป็นสีเคลือบผิวพิเศษ (Selective Absorption) อาจจะมีค่าการดูดกลืนความร้อนต่ำแต่มีค่าสัมประสิทธิ์การคายความร้อนสูง จะทำให้ผิววัสดุสูง จะทำให้ผิววัสดุเย็นกว่าปกติ สำหรับค่าการดูดกลืนความร้อน ส่วนมากจะแปรตามความเข้มของสีผิว เข้มมากก็จะดูดกลืนความร้อนสูง

ค) การหน่วงเหนี่ยวความร้อน

ส่วนใหญ่จะนิยมใช้คำว่า “Time Lag” แทนคำว่า “Thermal Time Lag” ในความหมายเดียวกัน ซึ่งหมายถึง ระยะเวลาที่ความร้อนเคลื่อนที่จากด้านที่ร้อนกว่าไปยังด้านที่เย็นกว่าของผนังหรือหลังคาอาคาร กระบวนการเคลื่อนที่ของความร้อนดังกล่าว อาจเกิดขึ้นล่าช้าออกไปอันเป็นผลเนื่องมาจากอิทธิพลของมวลสารและความจุความร้อนของผนัง โดยทั่วไปสำหรับผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 4 นิ้ว ความล่าช้าดังกล่าวอาจนานถึง 4 ชั่วโมง นั้นหมายความว่าความร้อนที่เกิดจากด้านหนึ่งของผนังต้องใช้เวลา 4 ชั่วโมงกว่าจะเคลื่อนตัวไปสู่อีกด้านหนึ่งของผนังได้

3.2 ความรู้เกี่ยวกับความชื้นและการควบแน่น

อากาศประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิดรวมถึงน้ำในสภาวะของไอน้ำแทรกอยู่ในอากาศในปริมาณที่มากน้อยต่างกัน ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศจะเรียกว่า “ความชื้น” การเกิดความร้อนในอาคารจะเกิดจากการระเหยของน้ำที่มีอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับอาคาร เช่น การคายน้ำของต้นไม้ บริเวณที่ตั้งอาคาร การระเหยของน้ำจากแหล่งน้ำใกล้อาคาร การระเหยน้ำจากดินผ่านทางเดินหรือวัสดุปูพื้นที่มีรูพรุนที่ความชื้นสามารถระเหยผ่านขึ้นมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังฝนตก และการระเหยจากแหล่งน้ำใกล้อาคารทำให้ไอน้ำในอากาศมีปริมาณสูงขึ้น เป็นต้น ไอน้ำในอากาศบางครั้งเกิดการกลั่นตัวในระดับต่าง ๆ กัน เช่น การกลั่นตัวขนาดเล็กก่อให้เกิดน้ำค้าง และหมอก บริเวณใกล้พื้นดิน และการกลั่นตัวขนาดใหญ่จะก่อให้เกิดเมฆ

การเปลี่ยนรูปของน้ำในอากาศในลักษณะต่าง ๆ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในอากาศ พลังงานในการที่ให้น้ำเปลี่ยนอุณหภูมิเรียกว่า “ความร้อนจำเพาะ”(Sensible Heat) และ

เมื่อน้ำเกิดระเหยจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ โดยอุณหภูมิกงเดิม เรียกว่า “ความร้อนแฝง”(Latent Heat)

เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ อากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีความสามารถในการรับไอน้ำไว้ได้ สูงสุดในปริมาณจำกัด ถ้าเกินกว่าขีดสูงสุดนี้แล้วอากาศไม่สามารถรับไอน้ำได้เพิ่มอีก และการที่อากาศ ไม่สามารถรับไอน้ำได้อีก จะเรียกว่า “การอิ่มตัว”(Saturation) และจุดที่ไอน้ำแทรกตัวอยู่ในอากาศใน ปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิต่าง ๆ เรียกว่า “จุดอิ่มตัว”(Saturated Point)

ไอน้ำที่แทรกตัวอยู่ในอากาศทำให้อากาศเกิดความดันไอน้ำ (Vapor Pressure) เมื่ออากาศรับไอน้ำจนถึงจุดอิ่มตัว (Saturated Point) ก็จะมีความดันสูงสุด และจากการสังเกตทดลองในเชิงฟิสิกส์พบว่า ในมวลอากาศที่เท่ากันอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะสามารถบรรจุไอน้ำได้ปริมาณมากกว่าปริมาณไอน้ำใน อากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

ความชื้นสามารถอธิบายได้หลายวิธีการ เช่น ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) ความชื้น สัมพัทธ์ (Relative Humidity) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point Temperature) หรือความกดไอน้ำ (Vapor Pressure) เป็นต้น

3.2.1 ประเภทของความชื้น

พิจารณาตามวิธีการของกรมอุตุนิยมวิทยา

ก) ความกดไอน้ำ (Vapor Pressure)

อากาศประกอบด้วยก๊าซต่าง ๆ รวมถึงไอน้ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ อากาศที่มีไอน้ำที่เป็นก๊าซ อีตรระผสมอยู่ จะมีความกดอากาศที่เกิดจากความกดของก๊าซ และไอน้ำ (Vapor Pressure) มีหน่วยเป็น กิโลปาสกาล (kPa) การคำนวณหาค่าความกดไอน้ำ จะใช้วิธีเดียวกับของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยมีสูตร การคำนวณดังนี้

$$e_s(T) = 0.611 \times \text{Exp}(17.27 \times T / (T + 273.3)) \text{ กิโลปาสกาล} \quad (3.10)$$

$$e = (RH / 100) \times e_s(T) \quad (3.11)$$

โดยที่ $e_s(T)$ = ความกดไอน้ำอิ่มตัวในขณะที่อุณหภูมิขณะนั้นในบรรยากาศมีความชื้น สูงสุด หน่วยเป็นกิโลปาสกาล

e = ความดันไอน้ำ หน่วยเป็นกิโลปาสกาล

T = อุณหภูมิ หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

RH = ความชื้นสัมพัทธ์มี หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

ความกดไอน้ำจะสูงสุดเมื่ออากาศเกิดการอิ่มตัว (Saturated) ความกดไอน้ำมีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาภายในหนึ่งวัน และแตกต่างตามสภาพที่ตั้งอาคาร ความกดไอน้ำจะมีสูงสุดที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรและลดลงน้อยที่สุดบริเวณขั้วโลก เนื่องจากการเกิดไอน้ำมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ด้วยเหตุผลเดียวกันในฤดูร้อนก็จะมี ความกดไอน้ำในอากาศมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความกดไอน้ำในฤดูหนาว

ข) ความชื้นแท้ (Absolute Humidity)

ความชื้นแท้คือ ความหนาแน่น หรือน้ำหนักของไอน้ำ ตามปกติใช้วัดเป็น กรัม ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร หรือ เกรน ต่อ 1 ลูกบาศก์ฟุต

$$\text{ความชื้นแท้ } a = [10^6 e / R_{\text{water vapor}}] \times T \quad \text{gm.m}^{-3} \quad (3.12)$$

โดยที่

a = ความชื้นแท้

e = ความกดไอน้ำ

R = ค่าก๊าซคงที่ของไอน้ำ

T = อุณหภูมิ

ค) ปริมาณความชื้น (Moisture Content or Humidity Ratio)

คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่น หรือน้ำหนักของไอน้ำต่อน้ำหนักอากาศแห้ง หรืออาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "อัตราส่วนความชื้น" (Humidity Ratio) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อกิโลกรัม หรือ กรัมต่อกิโลกรัม และแต่ความละเอียดในการใช้งาน

อัตราส่วนความชื้น = ความหนาแน่นของไอน้ำ / ความหนาแน่นของอากาศแห้ง

ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$R = 623e \text{ (in gram of water vapor) / } Pd \text{ (Kilogram of dry air)} \quad (3.13)$$

โดยที่ R = อัตราส่วนความชื้นมีหน่วยเป็นกิโลกรัมของไอน้ำต่อกิโลกรัมของอากาศแห้ง

e = ความกดไอน้ำ

Pd = ความกดของอากาศแห้ง ($Pd = P - e$)

P = ความกดดันของบรรยากาศมาตรฐานที่ระดับน้ำทะเลมีหน่วยเป็นบาร์ (bar)

มีค่าเท่ากับ 1.01325 บาร์ มีค่าเท่ากับ 100 กิโลปาสกาล

ง) ความชื้นจำเพาะ (Specific Humidity)

ความชื้นจำเพาะคือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่น หรือน้ำหนักของไอน้ำที่มีอยู่จริง ในอากาศขณะนั้นเทียบกับน้ำหนักของอากาศชื้น (น้ำหนักอากาศแห้งรวมกับน้ำหนักไอน้ำในอากาศ) มักใช้เป็น กรัมของไอน้ำ ต่อ 1 กิโลกรัมของอากาศชื้น หรือ เกรนของไอน้ำ ต่อ 1 ปอนด์ของอากาศ ถ้าไอน้ำในอากาศมีมากขึ้นค่าความชื้นจำเพาะก็จะมากขึ้น และถ้าไอน้ำในอากาศน้อยลง ค่าความชื้นจำเพาะก็จะลดลง

จ) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ คืออัตราส่วนระหว่างความชื้นที่มีอยู่ในอากาศขณะนั้นกับปริมาณความชื้นมากที่สุดที่อากาศสามารถรับเอาไว้ได้ หรือเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของไอน้ำในอากาศ เทียบกับน้ำหนักของไอน้ำที่ควรจะมีได้เต็มที่ในขณะนั้นเมื่อมีปริมาตรและอุณหภูมิเดียวกัน ตัวอย่างเช่น อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณความชื้นเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณไอน้ำที่สูงที่สุดที่อุณหภูมิอากาศในขณะนั้นสามารถรับเอาไว้ได้ หรืออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีปริมาณไอน้ำสูงสุดที่อุณหภูมิอากาศในขณะนั้นสามารถรับได้ และเราเรียกในกรณีที่สองนี้ว่าการอิ่มตัว

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะมีค่าสูงสุดในช่วงเช้ามืดที่ดวงอาทิตย์เริ่มจะขึ้นซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิลดต่ำ ในบางครั้งขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดนั้นอาจถึงจุดอิ่มตัวและกลั่นตัวเกิดเป็นหมอกขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศเริ่มสูงขึ้นความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงและหมอกก็จะสลายไป ปริมาณไอน้ำในอากาศไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิก่อนจึงมีปริมาณใกล้เคียงเท่ากันตลอดวัน

ฉ) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point Temperature)

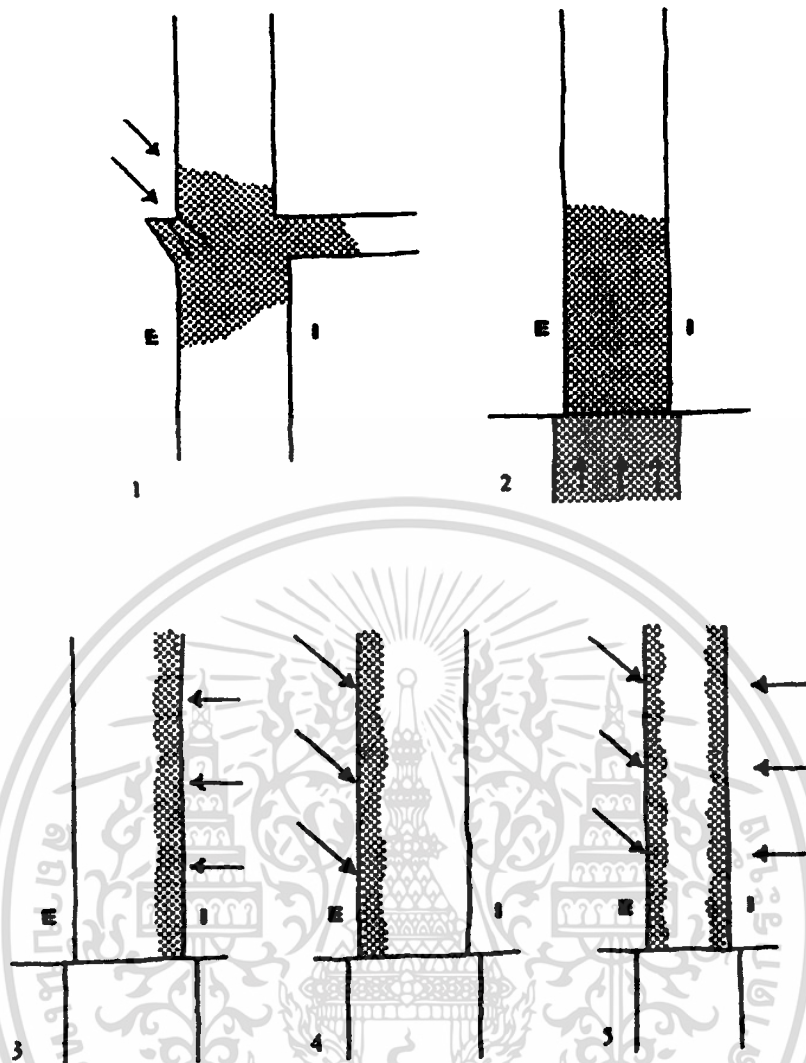
เป็นอุณหภูมิที่ไอน้ำเกิดการควบแน่นของอากาศ ในขณะที่อุณหภูมิลดลง ณ จุดที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเท่ากับ 100% เป็นจุดที่อากาศอิ่มตัว อากาศในขณะนั้นไม่สามารถรับปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นอีก หากมีปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น หรืออุณหภูมิลดลงในขณะที่ยังมีปริมาณไอน้ำในอากาศเท่าเดิม จะทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ซึ่ง ณ จุดที่ไอน้ำในอากาศกลั่นตัวเป็นหยดน้ำนี้จะเรียกว่า “จุดอุณหภูมิน้ำค้าง” ซึ่งสามารถเกิดได้ในกรณีที่อุณหภูมิจากพื้นผิวใดมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศที่อยู่โดยรอบ ก็จะทำให้เกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำบนพื้นผิวนั้น

3.2.2 ปัญหาจากความชื้นที่มีผลกระทบต่ออาคาร

โดยปกติวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างส่วนใหญ่จะมีรูพรุน ซึ่งจะทำให้น้ำสามารถผ่านเข้าออกได้ วัสดุเหล่านี้จะแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศตลอดเวลา ซึ่งวัสดุจะทั้งรับและสูญเสียความชื้น ขึ้นอยู่กับว่าขณะนั้นในอากาศมีความชื้นมากหรือน้อยกว่าวัสดุ และในที่สุดเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณความชื้นในวัสดุจะคงที่เรียกว่า อยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเปลี่ยนแปลงอีกครั้ง ปริมาณความชื้นในวัสดุจะค่อย ๆ เปลี่ยนด้วย ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแต่ละค่า จะมีค่าปริมาณความชื้นที่แน่นอนที่ทำให้วัสดุอยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศ โดยค่าเหล่านี้จะแตกต่างกันออกไปในวัสดุก่อสร้างแต่ละชนิดโดยปกติจะถือว่าวัสดุชื้น เมื่อความชื้นในวัสดุที่มีค่ามากกว่าความชื้นที่วัสดุสามารถมีได้ในสภาวะที่สมดุลกับอากาศ (Oxley and Gobert, 1983)

ประเภทของความชื้นในผนัง

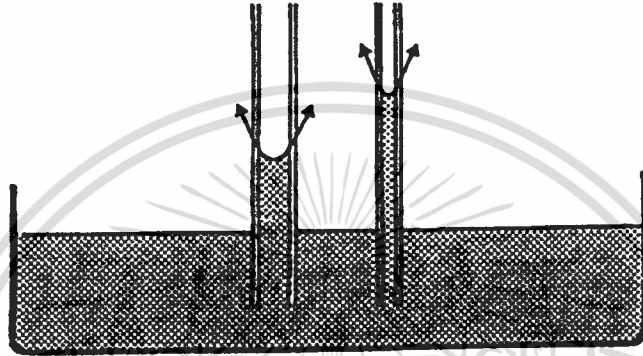
1. ความชื้นที่ปะทะ/สัมผัสกับผนังโดยตรง ความชื้นประเภทนี้จะมาจากน้ำฝนที่สาดโดน ผิวหน้าของผนังด้านนอกอาคาร ดังรูปที่ 3.13
2. ความชื้นที่ไหลซึมไปสู่ผนัง แหล่งกำเนิดที่สำคัญของความชื้นประเภทนี้คือน้ำฝน โดยน้ำฝนสามารถไหลซึมเข้าไปในผนังได้จากการซ้ารุดเสียหายของอาคาร เช่นจากหลังคา รอยแตกร้าวของผนังด้านนอก นอกจากนี้ความชื้นสามารถมาจากน้ำในระบบน้ำของอาคารด้วย เช่น จารอยรั่วของระบบระบายน้ำ หรือท่อประปา เป็นต้น
3. ความชื้นที่กลั่นตัวจับอยู่บนผนัง จะเกิดในกรณีที่อุณหภูมิที่ผิวหน้าลดลงจนต่ำกว่าจุดน้ำค้างของอากาศ อากาศที่มาสัมผัสกับผนังจะเย็นลงจนถึงจุดน้ำค้างและหยดน้ำจะกลั่นตัวออกมาจับอยู่บนผนัง อย่างไรก็ตาม Mora (1974) กล่าวว่า การกลั่นตัวของความชื้นที่จับอยู่บนผนัง จะเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่ผนังมีความหนาแน่นมาก หรือความต้านทานต่ำหรือการนำความร้อนสูง จึงจะสามารถเกิดการกลั่นตัวที่จะให้ความชื้นจับตัวบนผนังด้านในได้ การเกิดปรากฏการณ์การจับตัวของความชื้นที่ผนังจากการกลั่นตัวของหยดน้ำ มักจะเกิดขึ้นในประเทศซึ่งมีอุณหภูมิ เฉลี่ยต่ำ



รูปที่ 3.9 แสดงประเภทของความชื้นในผนัง 1. ความชื้นที่ไหลซึม ไปสู่ผนัง (Infiltration) ความชื้นที่ขึ้นไปตามแรงดึงในรูพรุนของผนัง (Capillarity) 3.ความชื้นที่กลั่นตัวจับอยู่บนผนัง (Condensation) 4.ฝนและลม 5.ฝนและลมทำให้ผนังเย็นจัดจนเกิดการกลั่นตัวที่ผนังด้านใน
E. ผนังภายนอกอาคาร (External) I.ผนังภายในอาคาร (Internal)

4. ความชื้นที่ขึ้นไปตามแรงดึงในรูพรุนของผนัง ความชื้นประเภทนี้มีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำใต้ดิน ใต้ดินหรือน้ำฝนที่ท่วมขังบริเวณฐานอาคาร โดยน้ำเหล่านี้จะขึ้นมาตามรูพรุนในผนังและ จะปรากฏให้เห็นรอยซำรุคเป็นแนวทางยาว จากพื้นถึงที่ความสูงระดับหนึ่ง ๆ หรือบางครั้งจะปรากฏเกล็ดตกผลึกอยู่ด้วย โดยปกติเมื่อน้ำสัมผัสกับวัสดุที่แห้ง น้ำจะ

พยายามแพร่กระจายไปทั่วผิวหน้าที่เปียกน้ำได้ของวัสดุ และต่อจากนั้นจะซึมผ่านเข้าไปในวัสดุ สำหรับในรูพรุนของวัสดุก่อสร้าง น้ำจะพยายามแพร่กระจายไปทั่วผิวหน้าที่เปียกน้ำได้ เช่นเดียวกัน ทำให้เกิดแรงดันน้ำขึ้น แต่ด้วยแรงดึงดูดของโลกจะดึงน้ำลงมา ทำให้น้ำในรูพรุนเกิดการเว้าลง ดังรูป 3.10 ดังนั้นกล่าวได้ว่าน้ำสามารถขึ้นไปตามรูพรุนได้เนื่องจากอาศัยแรงดึงของรูพรุน หรือ Capillary Attraction (Oxley and Gobert, 1983) แต่เนื่องจากในความเป็นจริง รูพรุนและรอยแตกหักในผนังไม่ต่อเนื่องกัน กระบวนการที่เกิดขึ้นจึงเป็นไปอย่างช้า ๆ



รูปที่ 3.10 แสดงแรงดึงในรูพรุน

การระเหยของน้ำออกจากผนัง จะเกิดที่ผิวหน้าของผนัง โดยความชื้นในวัสดุต้องเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของผนังเพื่อจะสามารถระเหยไปสู่อากาศได้ ถ้าการเคลื่อนที่ของน้ำเกิดจากแรงดึงในรูพรุน ผิวหน้าจะได้รับน้ำอย่างสม่ำเสมอทำให้มีการระเหยที่ผิวหน้าอย่างต่อเนื่อง แต่ถ้าแรงดึงในรูพรุนน้อย ความชื้นจะมาไม่ถึงผิวหน้า ผิวหน้าจะแห้งและแนวการระเหยจะเลื่อนลงมาที่ใต้ผนัง ให้น้ำจากการระเหยจะเกิดในรูพรุนระหว่างแนวการระเหยกับผิวหน้าของผนังก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้าและระเหยในที่สุด ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของน้ำออกจากวัสดุที่มีรูพรุนมีดังนี้

- ลักษณะของสภาวะแวดล้อมโดยรอบ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และปริมาณการระเหยอากาศ
- ลักษณะของโครงสร้างของวัสดุที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังผิวหน้า เช่น ความเป็นรูพรุนของวัสดุทั้งจำนวนและขนาดของรูพรุน โดยวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะทำให้น้ำเคลื่อนที่มาถึงผิวหน้าของผนังได้มาก ทำให้น้ำระเหยออกได้มาก ในขณะที่วัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และวัสดุที่มีจำนวนรูพรุนน้อย จะต้านทานการเคลื่อนที่ของน้ำได้มาก ทำให้น้ำระเหยออกได้น้อย (Mora, 1974)

ความชื้นนอกจากจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาวะความสบายแล้วยังมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และยังมีผลกระทบต่ออาคารที่อยู่อาศัยด้วยในอาคารที่มีความชื้นสูง ความชื้นจะก่อให้เกิดเชื้อโรคและเชื้อราส่วนใหญ่เติมโตได้ดี มีผลให้คุณภาพอากาศภายในอาคาร (Indoor Air Quality) ลดลง ทำให้เจ็บป่วยได้ง่าย ความชื้นเป็นตัวทำให้วัสดุอาคารเสื่อมสภาพลดความสวยงาม และความชื้นที่มีมากในอาคาร ที่มีการปรับอากาศจะเพิ่มภาระให้เครื่องปรับอากาศในการรีดความชื้น มากกว่าการลดอุณหภูมิอากาศ

ก) เชื้อรา

อาคารที่ตั้งอยู่ในภูมิอากาศชื้นบ่อยครั้งที่พบการเกิดเชื้อราตามผนัง หรือเพดานในอาคาร ราและกลิ่นที่เกิดขึ้น ไม่ใช่แค่เรื่องความสวยงามแต่จะมีผลไปถึงคุณภาพอากาศภายในอาคาร

เชื้อราเติบโตบนพื้นผิววัสดุอาคารเกิดได้ในอุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาฟาเรนไฮต์ (10 องศาเซลเซียส) ถึง 100 องศาฟาเรนไฮต์ (37.7 องศาเซลเซียส) สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 75 องศาฟาเรนไฮต์ (23.8 องศาเซลเซียส) ถึง 95 องศาฟาเรนไฮต์ (35 องศาเซลเซียส) เชื้อราบางชนิดสามารถเจริญเติบโตที่อุณหภูมิ 35 องศาฟาเรนไฮต์ (1.6 องศาเซลเซียส) ความชื้นสัมพัทธ์ที่ราสามารถโตได้ตั้งแต่คือตั้งแต่ 75% ขึ้นไป การเกิดและเติบโตของราต้องอาศัยความชื้นในขบวนการผลิตเอนไซม์ (Enzymes) และ Metabolic activities ในการย่อยอาหาร

ในการออกแบบอาคารเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราที่จะเกิดขึ้น จะต้องควบคุมความชื้นภายในอาคาร ซึ่งประกอบด้วยการควบแน่นน้ำและไอน้ำที่จะเข้ามาภายในอาคาร อากาศในภูมิอากาศร้อนชื้นถ้ามีการปรับอากาศภายในอาคาร เครื่องปรับอากาศจะทำหน้าที่ในการทำความเย็นด้วยการปรับอุณหภูมิ และพร้อมกับการปรับความชื้นให้ลดลง การทำความเย็นเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิอากาศ และการลดความชื้นและสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำค้าง ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องสูง เชื้อราและเชื้อโรคสามารถเติบโตได้ดี

ข) วัสดุประกอบอาคาร

การออกแบบให้อาคารอยู่ในภาวะความสบายโดยใช้การระบายอากาศจะเกิดผลที่ดีเมื่ออากาศที่ผ่านเข้ามาในอาคารมีความเย็น แต่ไม่มีความชื้นมากเกินกว่าความชื้นของอากาศภายในอาคาร นั้น การนำอากาศภายนอกที่มีความชื้นเข้ามาเมื่อเกิดการเชื่อมต่อของวัสดุประกอบอาคาร ทางด้านคุณภาพและความสวยงาม ตัวอย่างเช่น การซีดของสี การที่ผนังเกิดรา การอ่อนตัวของยิปซัม และการเกิดสนิมของโลหะ เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุประเภทไม้ที่มีการดูดความชื้นได้มากอาจเกิดการบวม หดตัว หรือโค้งตัวของไม้ ความชื้นจึงเป็นสาเหตุของการเสื่อมคุณสมบัติของวัสดุหลายประการดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงสารเคมีในวัสดุ (Chemical changes) เช่น การเกิดสนิมของเหล็กเป็นการเกิดปฏิกิริยากันระหว่างเหล็กกับน้ำทำให้เกิดสนิม เป็นต้น

- การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุ (Physical changes) เช่น การที่เกิดการหลุดร่วงของผนังอิฐจากการสะสมของความชื้น
- การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ (Biological process) เช่น การผุของไม้

ค) การเกิดของความชื้นภายในอาคาร

การควบคุมระดับความชื้นภายในอาคารต้องเข้าใจถึงวิธีการที่ความชื้นเข้าสู่อาคาร หรือวิธีการที่ความชื้นเกิดขึ้นในอาคารเสียก่อน เพื่อสามารถแก้ปัญหาที่ตรงจุด การเคลื่อนที่ของไอน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีปริมาณไอน้ำมาก และมีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีไอน้ำน้อยและมีอุณหภูมิต่ำกว่า ไอน้ำในอากาศจะมีความดันที่ขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำในอากาศ อากาศที่มีไอน้ำมากก็จะมีปริมาณไอน้ำสูง และไอน้ำจะเคลื่อนที่ในอากาศโดยการกระจายจากบริเวณที่มีความดันไอน้ำมาก ไปสู่ที่ที่มีความดันไอน้ำน้อยกว่าโดยไม่ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนตัวของอากาศที่รับมันเอาไว้ การเกิดความชื้นภายในอาคารเกิดจากการที่ความชื้นในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซเข้ามาภายในอาคาร โดยสามารถแบ่งการที่ความชื้นเข้าสู่ภายในอาคารออกเป็นกรณีต่าง ๆ ได้ดังนี้

- การผ่านเข้าสู่อาคารของฝน (Rain Penetration)
- การควบแน่น
- ความชื้นในดิน
- ความชื้นจากแหล่งกำเนิดภายในอาคาร

3.2.3 การควบคุมความชื้นภายในอาคาร

ก) การเพิ่มอุณหภูมิของพื้นผิวภายในที่มีการกลั่นตัว

ในส่วนที่มีการทำความเย็น ส่วนที่จะเกิดการกลั่นตัวขึ้นคือ ส่วนที่เป็นผนังภายใน ถ้าอุณหภูมิผนังสูงขึ้นไปกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศภายนอก ก็จะไม่เกิดการกลั่นตัว การเพิ่มของอุณหภูมิของผนังจะเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดควบแน่นที่ผิวผนังได้

ข) การนำความชื้นออกโดยการแพร่ของไอน้ำ

การเอาความชื้นออกจากกรอบอาคาร ถ้าอัตราของความชื้นที่ผ่านผนังภายใน และวัสดุผิวผนังมากกว่าอัตราของความชื้นที่เข้ามาอยู่ของผนัง ความชื้นก็จะไม่เกิดการสะสม ความชื้นที่ผ่านเข้าไปภายในอาคารจะถูกกำจัดออกโดยการรีดความชื้นของระบบปรับอากาศ การป้องกันความชื้นวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของแผ่นผนังด้านในที่จะให้ความชื้นผ่าน และขึ้นกับอัตราความชื้นที่เข้ามาในอาคาร แต่การที่ความชื้นเข้าไปภายในอาคารก็จะเป็นการเพิ่มภาระให้ระบบปรับอากาศ

ค) การระบายอากาศที่บริเวณหลังคา

ปัญหาของความชื้นที่สะสมอยู่ภายใต้หลังคา เมื่อเกิดการกลั่นตัวจะทำให้เกิดความเสียหายให้กับฝ้าเพดาน และสร้างปัญหาเรื่องการเกิดเชื้อรา กลิ่นอับ การป้องกันความชื้นที่เกิดขึ้นทำได้โดยการใช้การระบายอากาศในส่วนพื้นที่ใต้หลังคาซึ่งเป็นการระบายความร้อนที่ช่วยลดภาระการทำความเย็นให้กับระบบปรับอากาศ แต่การนำเอาอากาศเข้าไปในพื้นที่ใต้หลังคานั้นความชื้นจะถูกพาเข้าไปด้วยและจะเกิดการสะสมความชื้น เนื่องจากอัตราความชื้นที่เข้าไปมีมากกว่าอัตราความชื้นที่จะผ่านออกมา ความชื้นที่สะสมอยู่ในส่วนใต้หลังคาจากการที่มีลมพัดผ่าน การเกิดการควบแน่นขึ้นได้นั้น ถ้าอากาศที่สัมผัสกับผิวฝ้าเพดานที่มีความเย็นที่ได้รับจากอากาศภายในอาคาร

3.2.4 การควบแน่น

อากาศสามารถรับไอน้ำในปริมาณที่จำกัดที่อุณหภูมิหนึ่ง ปริมาณไอน้ำที่อากาศสามารถรับได้นั้นจะเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์จะเป็น 100 % เมื่ออากาศอิ่มตัว และจะเป็นอัตราส่วนของปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศขณะนั้นเทียบกับความชื้นที่อากาศสามารถรับได้สูงสุดเมื่ออิ่มตัว เมื่ออากาศที่ยังไม่อิ่มตัว เกิดการเย็นขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้อากาศอิ่มตัว อุณหภูมินี้เรียกว่า “อุณหภูมิจุดน้ำค้าง” ความเย็นที่เพิ่มเข้าไปจนอากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง จะก่อให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำ ส่วนเกินที่อากาศไม่สามารถรับไว้ได้

ปัจจัยหลักของการเกิดขึ้นและปริมาณการกลั่นตัว คือ อุณหภูมิผิววัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ความกดไอน้ำ และไอน้ำที่ผ่านเข้ามาภายในอาคาร ความสัมพันธ์ของความดันไอน้ำภายในและภายนอกขึ้นอยู่กับ การถ่ายเทอากาศ ความกดไอน้ำภายในอาคาร ที่ไม่มีการปรับอากาศจะสูงกว่าอาคารที่มีการปรับอากาศและลดไอน้ำจากอากาศภายนอกที่จะเข้ามาด้วย

แนวโน้มในการเกิดการควบแน่นของหยดน้ำในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย พบว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง หมายความว่า โอกาสที่จะเกิดการควบแน่นของหยดน้ำในผนังอาคารก็จะสูงตามไปด้วย การวิเคราะห์จากข้อมูลจริงของสภาพภูมิอากาศในกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2538 พบว่าการควบแน่นของหยดน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส มีจำนวนชั่วโมงถึง 27.65 เปอร์เซ็นต์ในหนึ่งปี และที่อุณหภูมิสูงกว่า 27 องศาเซลเซียสมีถึง 18.68 เปอร์เซ็นต์ (อ้างอิงจากกรมอุตุนิยมวิทยา พ.ศ.2538)

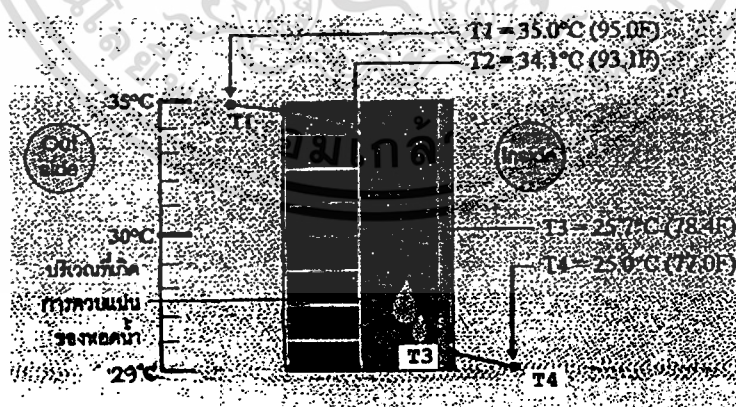
ก) การกลั่นตัวที่พื้นผิว (Surface Condensation)

เมื่ออากาศที่ไม่ถึงจุดอิ่มตัวเคลื่อนตัวมากระทบพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง อากาศส่วนที่สัมผัสกับผิววัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้างของมันจะอิ่มตัวและไอน้ำที่อากาศไม่สามารถรับได้อีกต่อไปจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำที่พื้นผิววัสดุนั้น จากการที่ไอน้ำในอากาศบริเวณที่มีไอน้ำมีการกลั่นตัว ทำให้ความดันอากาศส่วนหนึ่งในบริเวณนั้นต่ำกว่าความดันอากาศเฉลี่ยของห้อง ความแตกต่างดังกล่าวจะทำให้มีการเคลื่อนตัวของไอน้ำไปสู่บริเวณที่มีการกลั่นตัว ทำให้มีการไหลเวียนของอากาศ

การกลั่นตัวไม่ได้จำเป็นที่จะต้องเกิดขึ้นในบริเวณที่ไอน้ำถูกสร้างขึ้น แต่จะเกิดในที่ที่มีพื้นผิวอุณหภูมิต่ำที่สุด ห้องน้ำและห้องครัวเป็นห้องที่ไม่สามารถที่จะป้องกันการเกิดการกลั่นตัวได้ เนื่องจากเป็นห้องที่มีไอน้ำเกิดขึ้นมาก แต่ไอน้ำที่เกิดขึ้นในห้องเหล่านี้พยายามที่จะขยายตัวไปสู่บริเวณที่มีไอน้ำน้อยกว่า เนื่องจากไอน้ำที่มีความดันไอน้ำมากกว่าจะทำให้ในอาคารมีความดันไอน้ำเท่ากัน และการกลั่นตัวก็จะเกิดในบริเวณที่มีพื้นผิวอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

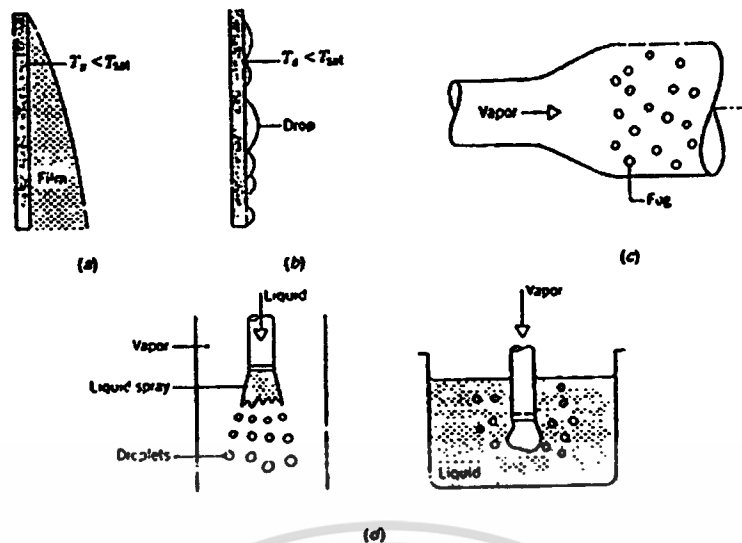
ข) การกลั่นตัวภายในผนัง (Condensation within the wall)

การที่ความชื้นผ่านเข้ามาภายในผนังอาคารนั้น อาจจะเป็นความชื้นที่มาจากภายใน ภายนอกอาคาร หรือผนังอาคาร โดยตรงจากน้ำฝนหรือน้ำจากแหล่งอื่น ๆ ความชื้นสามารถผ่านเข้ามาภายในผนังจากการแพร่ของไอน้ำ การเคลื่อนที่ของอากาศ เมื่อไอน้ำเกิดการสะสมอยู่ภายในผนังและมีการถ่ายเทอุณหภูมิต่างกัน เมื่ออากาศภายนอกและภายในมีอุณหภูมิต่างกัน ทำให้เกิดการเกิดหยดน้ำในผนัง เนื่องจากอุณหภูมิจากอากาศภายในผนังที่มีความชื้นสะสมอยู่ต่ำกว่าจุดน้ำค้าง ซึ่งจุดนี้จะอยู่ในช่วงระยะใดระยะหนึ่งในช่องอากาศในผนัง การเกิดการกลั่นตัวขึ้นภายในผนังจนเกิดการสะสมของน้ำภายในผนังได้



รูปที่ 3.11 แสดงการควบแน่นเป็นหยดน้ำในผนังของผนังที่มีช่องอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



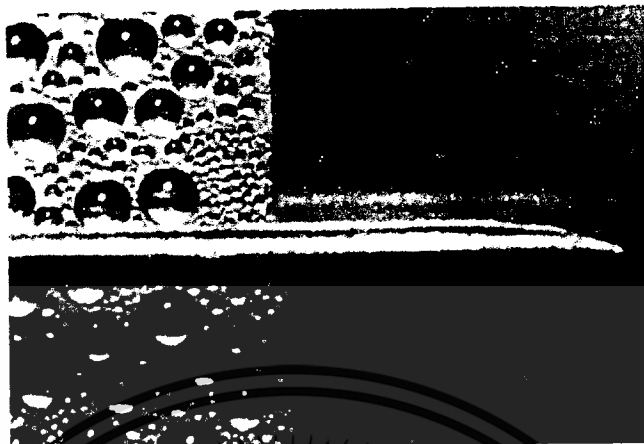
รูปที่ 3.12 แสดงการควบแน่นแบบต่าง ๆ a) Film b) Dropwise c) Homogeneous Condensation d) Direct contact condensation

เรทราบมาแล้วว่าการควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิจากไอ (vapor) ลดต่ำกว่าอุณหภูมิจอมตัวของมัน การควบแน่นในอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ทางอุตสาหกรรมนั้นมักจะเป็นผลมาจากการที่ไอสัมผัสกับพื้นผิวที่เย็นกว่า (รูปที่ 3.12 a,b) ซึ่งในกรณีนี้ความร้อนแฝงจะถูกถ่ายออกจากไอ และส่งถ่ายไปยังพื้นผิว ทำให้ไอควบแน่นเป็นของเหลว วิธีการอื่น ๆ ในการควบแน่นนั้นได้แก่ การควบแน่นแบบ “homogeneous” (รูปที่ 3.12 c) ซึ่งไอจะควบแน่นเป็นหยดน้ำลอยอยู่ในก๊าซทำให้เกิดลักษณะคล้ายหมอกอีกวิธีหนึ่งได้แก่การควบแน่นแบบสัมผัสโดยตรง (direct contact condensation) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการนำไอไปสัมผัสกับของเหลวที่เย็นกว่าโดยตรง (รูปที่ 3.12 d)

การพิจารณาจากรูป 3.12 a,b พบว่าการควบแน่นนั้นสามารถเป็นไปได้สองแบบซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิว คือ

1. การควบแน่นแบบเป็นแผ่น (film condensation) การควบแน่นที่ของเหลวที่ได้จากการควบแน่น มีลักษณะเป็นแผ่นบางอยู่บนผิวของผนัง มักจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่สะอาดวางอยู่ในแนวตั้ง
2. การควบแน่นแบบเป็นหยด (dropwise condensation) เป็นการควบแน่นที่ของเหลวที่ได้จากการควบแน่นมีลักษณะเป็นหยดอยู่บนผิวของผนัง มักจะเกิดกับพื้นผิวที่เคลือบด้วยวัสดุที่ป้องกันไม่ให้พื้นผิวเปียก จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ปกปรกหรือแตก โดยหยดของเหลวจะก่อตัวขึ้นที่รอยแตกหรือรูบนพื้นผิว เมื่อการควบแน่นนานขึ้นหยดของเหลวดังกล่าวจะขยายตัวและรวมตัวกัน ซึ่งหยดของเหลวที่เกิดขึ้นนี้จะมียุทธศาสตร์ตั้งแต่เป็นไมโครมิลลิเมตร จนถึงขนาดที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ โดยปกติทั่วไปจะครอบคลุมเนื้อที่

ถึง 90% ของพื้นผิว และอัตราการถ่ายเทความร้อนของการควบแน่นแบบนี้จะมีค่าสูงมาก แต่การควบแน่นแบบนี้จะเกิดในระยะแรกของการควบแน่น



(a) Drop wise (b) Film

รูปที่ 3.13 การควบแน่นบนพื้นผิวในแนวตั้ง

ไม่ว่าการควบแน่นจะเป็นแบบหนึ่งแบบใดก็ตาม การเกิดขึ้นของเหลวหรือหยดของเหลวบนพื้นผิวจะทำให้เกิดความต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอและพื้นผิว ความต้านทานดังกล่าวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของชั้นของเหลวหรือหยดของเหลวมากขึ้น และเนื่องจากความหนานี้เพิ่มขึ้นในทิศทางการไหล

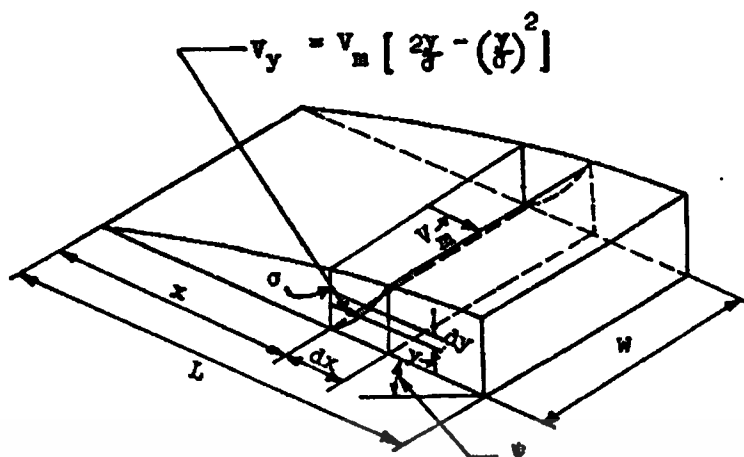
แม้ว่าในการใช้งานทางอุตสาหกรรม เราต้องการให้การควบแน่นเป็นแบบ dropwise แต่มันก็เป็นการยากที่จะให้พื้นผิวคงสภาพการควบแน่นแบบนี้ ตลอดจนการที่สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการควบแน่นแบบ film condensation มีค่าต่ำกว่า การคำนวณจึงมักใช้สมมติฐานว่าเป็นการควบแน่นแบบ film condensation

สำหรับวิศวกรนั้น จะต้องมีความรู้พอที่จะทำนายสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนขณะที่เกิดการควบแน่นได้ ซึ่งผู้ที่ได้พัฒนาสมการสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขณะที่เกิดการควบแน่นเป็นคนแรกคือ นัสเซลท์ (Nusselt) โดยสมการที่นัสเซลท์พัฒนาขึ้นยังคงใช้กันจนถึงปัจจุบัน

การควบแน่นบนพื้นลาดเอียง (Condensation on an Inclined Plane)

ในขั้นแรกนี้ จะแสดงการวิเคราะห์ของนัสเซลท์ในการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นราบที่มีความยาว L และมีความกว้าง W เอนทำมุมกับแนวราบด้วยมุม ψ ดังแสดงในรูปที่

3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการไหลของของเหลว หลังจากการควมแน่นบนพื้นลาดเอียง

ในการวิเคราะห์ นัสเซิลต์ต้องตั้งสมมุติฐาน 2 ประการคือ

1. การไหลของของไหลลงมาตามพื้นลาดเอียงเป็นการไหลแบบราบเรียบ นั่นก็คือ ความร้อนเคลื่อนที่ผ่านชั้นของเหลวโดยวิธีการนำ (conduction)
2. ความเร็วของของเหลว ที่ระยะทาง y จากผิวของผนังให้ได้โดยสมการ

$$v_y = v_0 [2(y/\sigma) - (y/\sigma)^2] \quad (3.14)$$

โดยที่ σ เป็นความหนาของของเหลว ที่ไหลบนพื้นลาดเอียง

v_0 เป็นความเร็วสูงสุด นั่นก็คือ ความเร็วที่ส่วนบนสุดของของเหลว

ก่อนอื่น พิจารณาของเหลวบนพื้นราบที่มีความยาว dx แรงที่กระทำบนของเหลวนั้น จะต้องอยู่ในลักษณะสมดุล นั่นก็คือ น้ำหนักของของเหลวในทิศทางตามพื้นลาดเอียง จะต้องเท่ากับ แรงเสียด (shear force) ซึ่งกระทำบนของเหลว ดังนั้น เราจะเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} mg \sin \psi &= A\tau_0 \\ g(dx \sigma W \rho) \sin \psi &= (dx W) \mu \left[\frac{\partial v_y}{\partial y} \right]_{y=0} \\ &= dx W \mu v_0 (2/\sigma) \end{aligned}$$

[หมายเหตุ เพราะว่ $\left[\frac{\partial v_y}{\partial y} \right]_{y=0} = v_0 (2/\sigma)$]

$$\text{ดังนั้น } V_0 = \frac{\sigma^2 \rho g \sin \psi}{2\mu} \quad (3.15)$$

ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวจะได้จาก

$$\bar{V} = \frac{\int_0^\sigma V_v dA}{A} = \frac{\int_0^\sigma V_0 [(2y/\sigma) - (y/\sigma)^2] x dy}{\sigma W}$$

$$\bar{V} = \frac{2}{3} V_0 = \frac{\sigma^2 \rho g \sin \psi}{3\mu} \quad (\text{จาก 3.15})$$

อัตราการไหลของของไหล (condensate) จะหาได้จาก

$$\begin{aligned} m &= \bar{V} \rho A = \frac{\sigma^2 \rho g \sin \psi (\sigma W \rho)}{3\mu} \\ &= \frac{\sigma^3 \rho^2 g \sin \psi W}{3\mu} \end{aligned} \quad (3.16)$$

ดิฟเฟอเรนเชียล สมการ 3.16 จะได้

$$dm = \frac{\sigma^2 \rho^2 g \sin \psi W d\sigma}{\mu} \quad (3.17)$$

ดังนั้น

ถ้ามีสารหนัก dm ความแน่นลงบนพื้นที่ $dx \cdot W$ จะกลายความร้อนออกมา dQ ซึ่งจะเขียนได้

$$dQ = dm h_{fg} \quad (3.18)$$

ความร้อนจำนวนนี้ จะเคลื่อนที่ไปสู่ผนังโดยวิธีการนำ ซึ่งเขียนได้ดังนี้คือ

$$dQ = \frac{k dA (T_s - T_w)}{\sigma} = \frac{k dx W \Delta T}{\sigma}$$

จากสมการที่ 3.18 จะได้ว่า

$$dm h_{fg} = \frac{k dx W \Delta T}{\sigma} \quad (3.19)$$

แทนค่า dm จากสมการ 3.17 ลงในสมการ 3.19 จะได้ว่า

$$\frac{\sigma^2 \rho^2 g \sin \psi W h_{fg} d\sigma}{\mu} = \frac{k dx W \Delta T}{\rho}$$

$$\sigma^3 d\sigma = \frac{k \mu \Delta T dx}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}}$$

จะหาค่าของความหนาของของเหลวที่ x ได้โดยการอินทิเกรต จาก 0 ถึง ρ_x

$$\int_0^{\sigma_x} \sigma^3 d\sigma = \frac{k \Delta T}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}} \int_0^x dx$$

$$\frac{\sigma_x^4}{4} = \frac{k \mu \Delta T x}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}}$$

$$\sigma_x = \left[\frac{4k \mu \Delta T x}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}} \right]^{1/4} \quad (3.20)$$

การเคลื่อนที่ของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ q_x จะหาได้จาก

$$q_x = \frac{k \Delta T}{\sigma_x} \quad (3.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า σ_x จากสมการ 3.20 ลงในสมการ 3.21 จะได้

$$q_x = \frac{k \Delta T}{\left[\frac{4k \mu \Delta T x}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}} \right]^{1/4}}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด จะหาได้จาก

$$Q = \int_0^L q_x dA = W \int_0^L q_x dx$$

$$= \frac{W k \Delta T}{\left[\frac{4k \mu \Delta T}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}} \right]^{1/4}} \int_0^L x^{-1/4} dx$$

$$= \left(\frac{4}{3} \right) \frac{k \Delta T L^{3/4} W}{\left[\frac{4k \mu \Delta T}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}} \right]^{1/4}} \quad (3.22)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จะมีค่า

$$\bar{h} = \frac{Q}{A \Delta T} = \frac{Q}{LW \Delta T} \quad (3.23)$$

แทนค่า Q จากสมการที่ 3.22 จะได้ว่า

$$\bar{h} = \frac{4kL^{3/4}}{3L \left[\frac{4k \mu \Delta T}{\rho^2 g \sin \psi h_{fg}} \right]^{1/4}} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{และ } \overline{Nu} = \overline{h}L/k = 0.94 \left[\frac{\rho^2 g \sin \psi h_f L^3}{k \Delta T \mu} \right]^{1/4} \quad (3.25)$$

สมการนี้ให้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบนพื้นราบที่ทำมุม ψ กับแนวราบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ระบบพื้นทำความเย็น และวิธีดำเนินการวิจัย

4.1 ระบบพื้นทำความเย็น

ระบบปรับอากาศสำหรับอาคารขนาดใหญ่โดยทั่วไปนั้น เป็นระบบที่สามารถทำความเย็นในอาคารที่ได้รับผลกระทบจากแสงอาทิตย์ได้ไม่มากนัก แต่เนื่องจากปัจจุบันนี้การออกแบบหรือการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ มักนิยมออกแบบโดยการนำเอาแสงอาทิตย์มาทำให้เกิดประโยชน์ในการส่องสว่างแทนการใช้พลังงานจากหลอดไฟฟ้า เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน แต่ก็มีผลที่จะทำให้ภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิจากแสงอาทิตย์

ดังนั้นจึงได้มีการการออกแบบระบบปรับอากาศแบบใหม่ขึ้นมา โดยเป็นระบบที่เรียกว่า Radiant Floor Cooling System ซึ่งจะอาศัยการควบคุมอุณหภูมิที่พื้นผิวของพื้น ซึ่งพื้นจะทำหน้าที่รับภาระความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์โดยการแผ่รังสี โดยอาศัยการไหลเวียนของน้ำเย็น โดยพื้นที่ทำความเย็นนี้จะถูกติดตั้งให้กับบริเวณที่ต้องการปรับอากาศ และจะมีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญ 2 อย่างคือ การแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

พบว่าระบบนี้ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เพราะสามารถดูดซับรังสีความร้อนที่กระทบพื้นได้ดีโดยจะเป็นการลดภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศลง รวมทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายอื่นเนื่องมาจากขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการทำความเย็นอื่น ๆ ที่มีภาระการทำความเย็นที่เท่ากัน และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเนื่องจากระบบนี้เป็นระบบปิด รวมไปถึงยังสามารถที่จะควบคุมให้การทำความเย็นได้ในระดับความสูงที่ต้องการ ซึ่งเป็นการลดภาระในการทำความเย็นในส่วนที่ไม่จำเป็นของระบบ แต่ในการทำงานของระบบจะต้องอยู่ในลักษณะของระบบผสม เนื่องจากลำพังระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้ ไม่สามารถที่จะควบคุมความชื้นที่อยู่ในอากาศหรือความร้อนแฝง (Latent Heat) ได้ จึงต้องจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับระบบปรับอากาศแบบทั่วไปที่ใช้การเป่าลมเย็นเพื่อการปรับอากาศ (Fan Coil Unit) ซึ่งจะใช้ในการควบคุมความชื้นภายในห้อง

พื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้ เป็นระบบทำความเย็นที่อาศัยกลไกการรับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรงจากผนังห้อง รวมไปถึงวัตถุ และบุคคลที่อยู่ภายในห้อง ไปยังพื้นที่ที่มีการฝังท่อน้ำเย็นเอาไว้ และอีกกลไกหนึ่งคือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณชั้นของอากาศที่อยู่ติดกับพื้นทำความเย็น แล้วอากาศที่ได้รับการถ่ายเทความร้อนนี้จะเกิดการเคลื่อนตัวเข้าไป

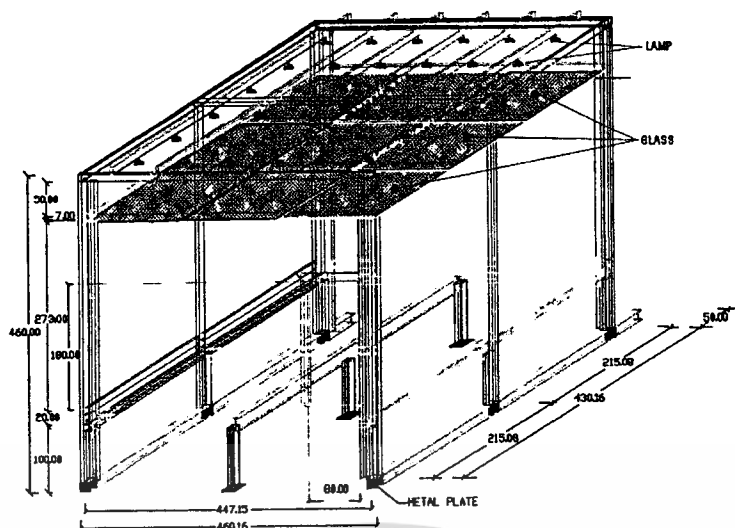
ผสมกับอากาศที่อยู่ภายในห้องด้วยแรงลอยตัว กลไกที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เกิดจากพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาศัยการไหลเวียนของน้ำที่อยู่ภายในท่อใต้พื้น แล้วอาศัยการนำความร้อนจากพื้นทำความเย็นที่ได้รับ การแผ่รังสีความร้อนจากผนัง วัตถุ และบุคคลในห้อง และการพาความร้อนจากอากาศภายในห้อง ผ่าน ท่อน้ำไปสู่ฝ้าแล้วนำไประบายความร้อนยังภายนอกต่อไป

ข้อดีของระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสี

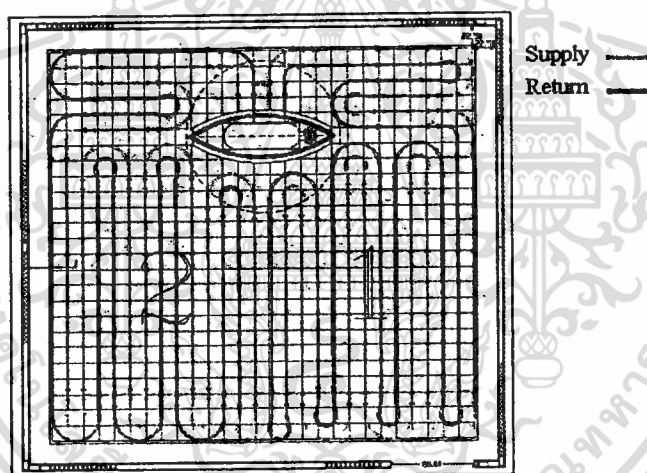
- มีประสิทธิภาพที่สูง แต่มีความสามารถในการทำความเย็นที่จำกัด เนื่องจากระบบระบบปรับอากาศแบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้จะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการพาความร้อน ซึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวจะมีค่าสูงกว่าของอากาศ เมื่อเทียบกับระบบปรับอากาศแบบการเป่าลมเย็น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นที่มีค่าการนำความร้อนที่ดีหรือไม่
- ไม่มีอุปกรณ์ในระบบที่ติดตั้งที่ด้านบนพื้น ช่วยให้การออกแบบอาคารง่ายขึ้น สวยงาม
- อุปกรณ์ทางกลเกือบทั้งหมดของระบบสามารถติดตั้งให้อยู่รวมกันได้ ซึ่งเป็นการง่ายต่อการเดินระบบ และการซ่อมบำรุง
- ไม่มีเสียงรบกวนที่เกิดจากคอยล์ และอุปกรณ์เหนี่ยวนำ เช่น พัดลม
- ลดภาระทำความเย็นลง ทำให้ใช้ระบบปรับอากาศที่เล็กลงได้

4.1.1 ห้องทดสอบและการออกแบบห้องทดสอบ

ห้องทดสอบจะเป็นการจำลองการทำความเย็นภายในอาคารขนาดใหญ่ ซึ่งได้มีการออกแบบให้พื้นห้องสามารถรับแสงอาทิตย์ได้โดยตรง ซึ่งการจำลองการรับภาระจากแสงอาทิตย์นี้ เราจะใช้แสงไฟช่วย โดยห้องจะมีขนาดความกว้างประมาณ 4.5 เมตร ยาว 4.3 เมตร และสูง 2.7 เมตร มีพื้นที่ทำความเย็นประมาณ 19.8 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งภายในห้องจะประกอบไปด้วย หลังคาไส เพื่อให้แสงส่องลงมาอย่างทั่วถึง ชุด fancoil อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นที่ถูกติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ



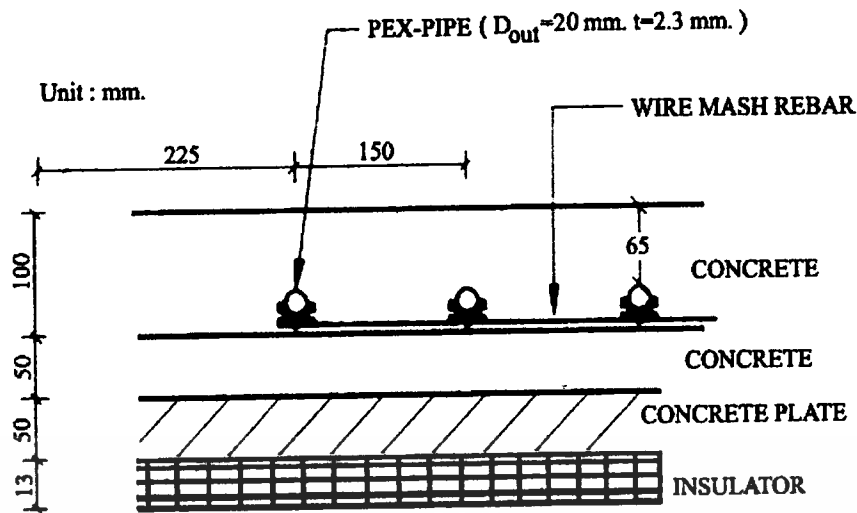
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของห้องทดสอบ



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการวางท่อน้ำไว้ภายใต้พื้นห้องทดสอบ

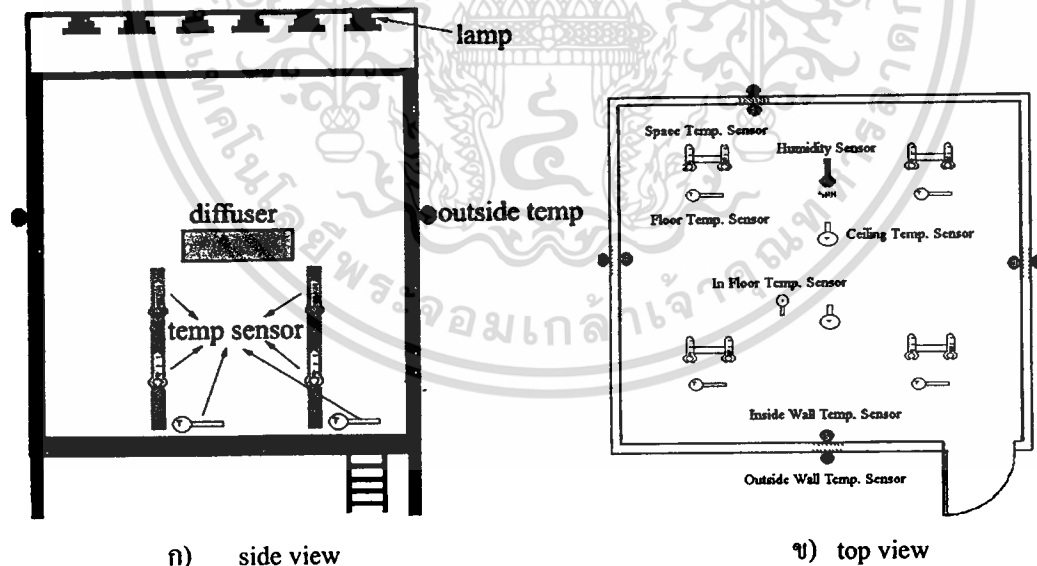
จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของการวางท่อน้ำไว้ภายใต้โครงสร้างของพื้น โดยท่อน้ำนั้นจะถูกวางไว้เป็น 2 ชุดด้วยกัน ซึ่งแต่ละชุดจะมีท่อน้ำเข้า (Supply) และท่อน้ำออก (Return) สาเหตุที่มีการวางท่อน้ำไว้ 2 ชุด เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น หากท่อชุดใดชุดหนึ่งเกิดขัดข้อง ท่ออีกชุดสามารถที่จะทำงานแทนได้ โดยไม่ต้องทำการปิดระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของพื้นในห้องทดสอบ

จากรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นห้องทดสอบ และขนาดของท่อ โดยที่จะทำการฝังท่อเอาไว้ให้มีความห่างจากผิวคอนกรีตด้านบนประมาณ 65 มิลลิเมตร และแต่ละท่อจะห่างกันประมาณ 150 มิลลิเมตร

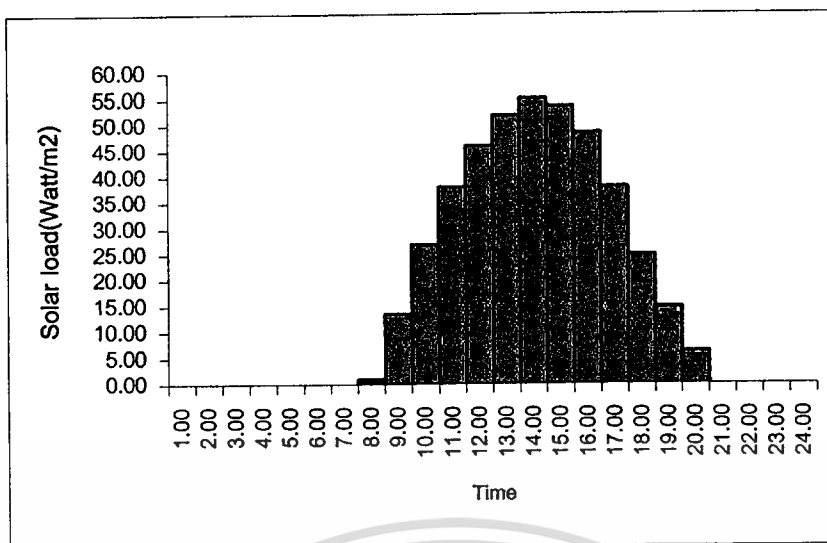


ก) side view

ข) top view

รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่ง sensor ต่าง ๆ ของห้องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

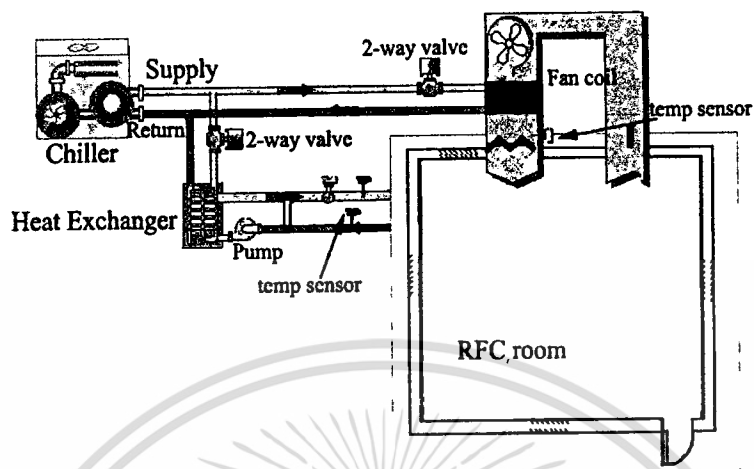


รูปที่ 4.5 แสดงภาระความร้อนจากแสงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีที่มากระทำในช่วงเวลา 1 วันของประเทศไทย (ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา)

จากรูปที่ 4.4 จะแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น sensor วัดอุณหภูมิ การติดตั้งโคมไฟเพื่อใช้ในการจำลองภาระจากแสงอาทิตย์ที่มากระทำในแต่ละวัน ซึ่งภาระจากแสงอาทิตย์ที่มากระทำในช่วงเวลาต่าง ๆ ในแต่ละวันนั้นจะแสดงดังในรูปที่ 4.5 เซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งไว้ภายในและภายนอก ห้องทดสอบ ซึ่งจะประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิพื้นผิว (surface temperature sensor) เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของอากาศ (air temperature sensor) และ เซ็นเซอร์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งภายในห้องทดสอบ เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิของอากาศ จะทำการติดตั้งไว้ทั้งหมด 4 จุดด้วยกัน โดยแต่ละจุดจะติดตั้ง 2 ระดับ คือระดับสูงจากพื้นประมาณ 50 เซนติเมตร และ 100 เซนติเมตร ส่วนเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่พื้นผิวจะทำการติดตั้งไว้ที่ผนังของห้องทั้ง 4 ด้าน รวมไปถึงพื้นผิวของห้องทดสอบด้วย ส่วนเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องจะมีการติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องทดสอบ

4.1.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสี

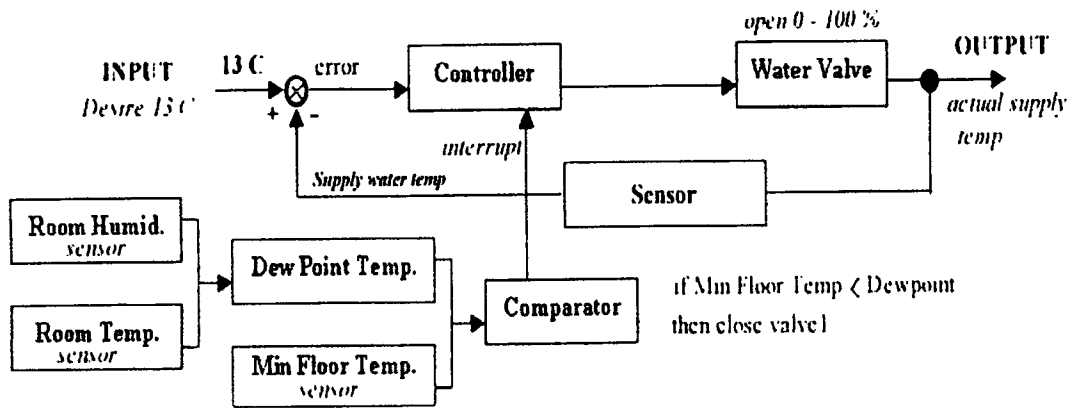
ระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้ จะแสดงแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.6



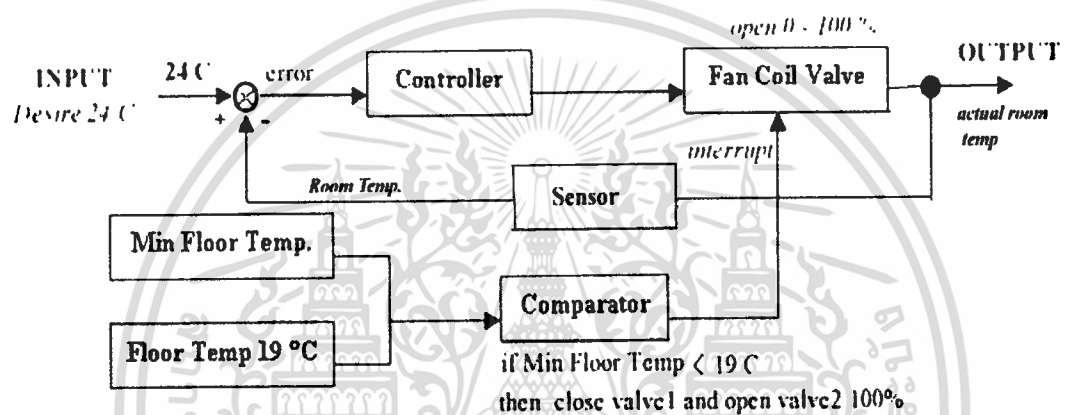
รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงการทำงานของระบบ RFC

ระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้ เป็นระบบที่ทำความเย็นโดยมีระบบ water chiller เป็นตัวผลิตน้ำเย็น แล้วทำการส่งต่อไปตามท่อ โดยแบ่งการส่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกจะทำการส่งน้ำเย็นไปยัง fancoil โดยผ่านทาง 2-way valve และอีกส่วนจะส่งไปยัง heat exchanger โดยผ่าน 2-way valve เช่นกัน ซึ่ง 2-way valve นี้จะมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

โดยน้ำเย็นที่ถูกส่งไปยัง fancoil นั้น ซึ่ง fancoil จะมีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศ และความชื้นภายในห้อง น้ำเย็นจะผ่าน 2-way valve ก่อนเข้า fancoil เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของ fancoil โดยการปรับอัตราการไหลของน้ำเย็นที่จะเข้ามา ซึ่งถ้า 2-way valve เปิดเต็มที่ จะทำให้อุณหภูมิของ fancoil เย็นจัดทำให้ดึงเอาอากาศภายในห้อง ไปควบแน่นที่หลังของ fancoil ในทำนองเดียวกัน น้ำเย็นอีกส่วนที่ถูกส่งมายัง heat exchanger ก็จะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่จะไหลเข้าสู่พื้นที่ต่อไป



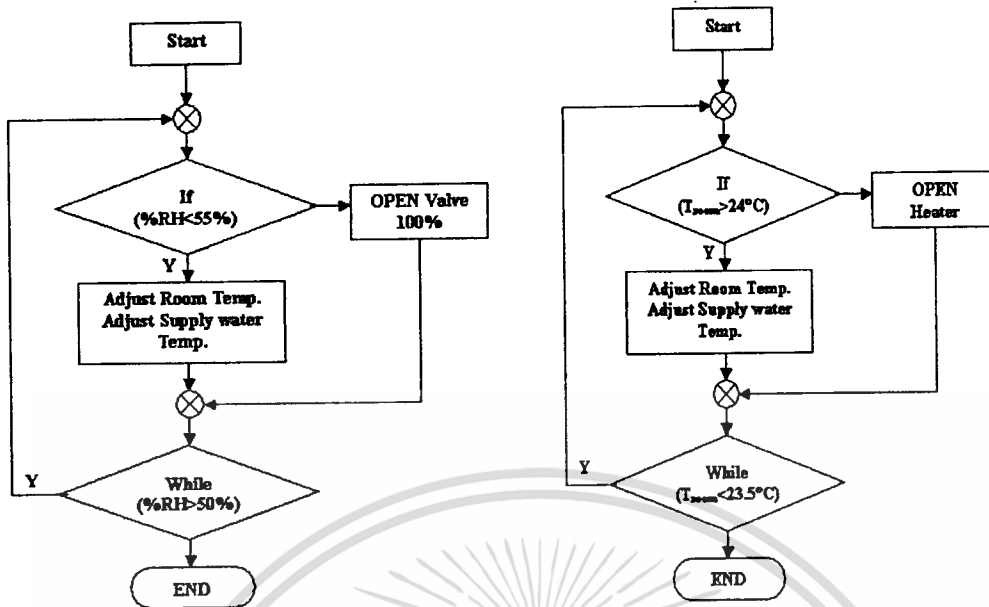
รูปที่ 4.7 แผนผังแสดงระบบควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่ส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.8 แผนผังแสดงระบบควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่ส่งไปยัง fan coil

ระบบพื้นที่ทำความเย็นแบบแผ่รังสีนี้ จะใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุม โดยที่ระบบควบคุมจะแบ่งออกเป็นสองชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ชุดที่หนึ่งสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่จะเข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอีกชุดหนึ่งสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็น ที่จะเข้าสู่ชุด fancoil ลักษณะการควบคุมจะเป็นแบบ Proportional Control โดยจะมีการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการ จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าในขั้นต้นนั้นเราจะใช้อุณหภูมิน้ำเข้าที่ระบบพื้นที่ทำความเย็นนั้นเป็นตัวกำหนดการเปิด-ปิดของ วาล์วน้ำที่พื้น (water valve) และใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของห้องเป็นตัวกำหนดการเปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่ fancoil

ซึ่งจะมีเงื่อนไขการควบคุม พื้นฐานดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิต่ำสุดของพื้นมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างเมื่อไหลระบบจะสั่งงานให้วาล์วที่ควบคุมน้ำที่เข้าสู่พื้นปิด (เปิด 0%) ในทำนองเดียวกัน ก็จะสั่งให้วาล์วที่ควบคุมน้ำที่เข้าสู่ fancoil เปิดเต็มที่ (100%) ทำการดึงความชื้นในระบบออกเพื่อทำการลดอุณหภูมิจุดน้ำค้างให้ต่ำลง จนกว่าระบบจะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ



ก) แผนผังการทำงานของ fancoil

ข) แผนผังการทำงานของขดลวดความร้อน

รูปที่ 4.9 แสดงแผนผังการทำงานของระบบ RFC

จากรูปที่ 4.9 ก) และ 4.9 ข) แสดงการควบคุมความชื้นและอุณหภูมิภายในห้อง ซึ่งจากรูปเมื่อความชื้นมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ ระบบจะสั่งงานให้วาล์วที่ใช้ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่จะเข้าสู่ fancoil เปิดเต็มที่เพื่อทำการดึงเอาความชื้นออกไปจากระบบ ในขณะเดียวกันถ้าอุณหภูมิห้องมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ระบบจะสั่งงานให้ขดลวดความร้อนที่ติดตั้งอยู่ ณ บริเวณ ทางออกของลมที่ fancoil ทำงาน โดยจะทำงานในลักษณะนี้จนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะปกติ

4.2 วิธีดำเนินการวิจัย

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดสอบในห้องทดสอบระบบการทำความเย็นแบบแฟรงสิ โดยจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ต้องใช้งานร่วมกันในการทดสอบดังต่อไปนี้ (รายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถดูได้จากภาคผนวก)

1. กล้องดิจิทัล (Canon EOS 300D)
2. วงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นบนแผ่นทดสอบ
3. วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง

4. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ
5. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)
6. พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง
7. เครื่องเพิ่มความชื้นในระบบ (Humidifier)
8. จนวน ความหนาประมาณ 1 นิ้ว
9. วัสดุปูพื้นที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.1
 - แผ่นกระเบื้องปูพื้น เซรามิก
 - แผ่นหินอ่อน
 - แผ่นหินกาบ
 - แผ่นหินแกรนิต



รูปที่ 4.10 แสดงวัสดุที่ถูกนำมาทดสอบการเกิดการควบแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองการเกิดการควบแน่นบนวัสดุผิวพื้นในระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสีครั้งนี้ โดยจะมีเงื่อนไขการทดลองดังต่อไปนี้

- ควบคุมอุณหภูมิห้องให้คงที่ที่ 24 °C และ 26 °C แปรเปลี่ยนอุณหภูมิพื้น และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ไม่มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ)

ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อให้อุณหภูมิห้องคงที่ที่ 24 °C และ 26 °C

อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิพื้น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง (%RH)
24	19	85,90 และ 95
	18	80,85,90 และ 95
	17	75,80,85,90 และ 95
	16	70,75,80,85,90 และ 95
	15	พิจารณาจากการทดลอง
26	19	75,80,85,90 และ 95
	18	70,75,80,85,90 และ 95

- ทดสอบอิทธิพลของลมต่อการเกิดการควบแน่น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อแปรเปลี่ยนความเร็วลม (ไม่มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ)

อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิพื้น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง (%RH)	ความเร็วลม (m/s)
24	19	90	0.5
			1.0
			1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.0

- ทดสอบโดยมี Load จากแสงมากระทำบนผิววัสดุทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อแปรเปลี่ยนภาระจากแสงที่มากระทำยังผิวสอบ

อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิพื้น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง (%RH)	Load จากแสง (W/m ²)
24	19	95	5 10 15 20

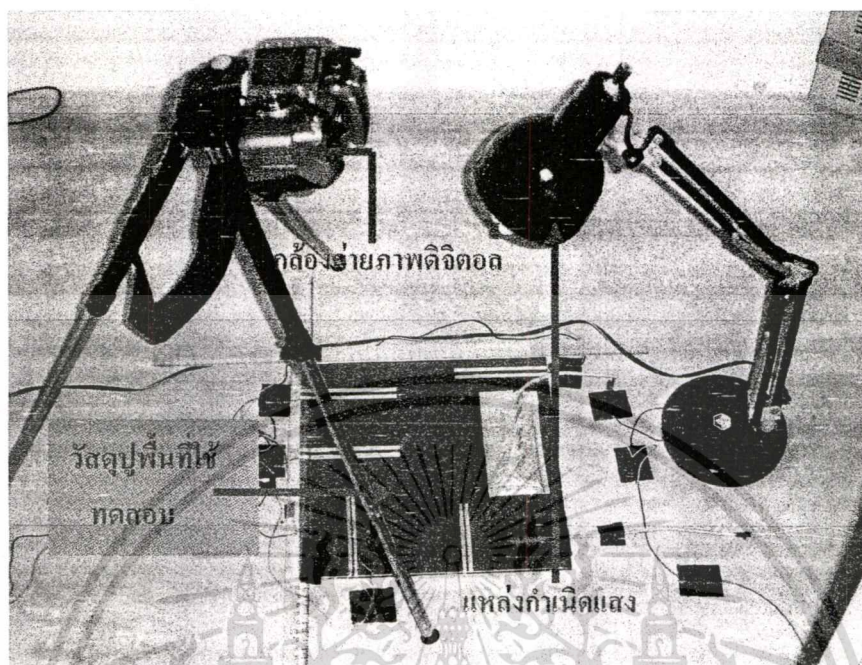
- ทดสอบโดยมี Load จากแสงมากระทำ และมีเงามาบังพื้นผิวทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3
- ทดสอบโดยทำการเปลี่ยนแปลงวัสดุพื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงเงื่อนไขการควบคุม เมื่อแปรเปลี่ยนชนิดของวัสดุพื้น

อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิพื้น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง (%RH)	ชนิดวัสดุพื้น
24	19	95	หินอ่อน หินแกรนิต หินกาบ

4.2.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะทำการจัดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ในการทดสอบ



รูปที่ 4.12 แสดงเซ็นเซอร์ต่างๆ ที่ถูกติดตั้งบนวัสดุทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองจัดอุปกรณ์ทดสอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยจะทำการปรับค่าต่าง ๆ ตามเงื่อนไขการทดลอง โดยก่อนการทดสอบจะมีการนำแผ่นฉนวน ความหนาประมาณ 1 นิ้ว ปิดปกคลุมแผ่นวัสดุทดสอบ เพื่อป้องกันปัญหาการเกิดการควบแน่นก่อน จะถึงเงื่อนไขที่กำหนด โดยการทดสอบที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์สูง ๆ นั้นจำเป็นต้องใช้ตัวช่วยเพิ่มความชื้น หรือเรียกว่า humidifier

ซึ่งการตรวจสอบการเกิดการควบแน่นนั้น จะใช้เซ็นเซอร์ 2 ชนิดด้วยกัน คือเซ็นเซอร์ตัวแรกที่ใช้จะใช้สำหรับวัดความเปียกชื้นบนพื้นผิวทดสอบ โดยจะใช้หลักการทางไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพื้นผิววัสดุทดสอบเกิดการเปียกชื้นแล้ว เซ็นเซอร์ตัวนี้จะส่งสัญญาณออกมาเป็นความถี่ของเสียงและแสง ถ้าบนพื้นผิวมีความเปียกชื้นมาก ความถี่ของเสียงที่ส่งออกมาจะถี่มาก ส่วนเซ็นเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่ใช้จะเป็นตัวเตือนเมื่อพื้นผิวเกิดการควบแน่นขึ้น คือ จะมีลักษณะเป็นแผ่นวัสดุใสบาง ๆ ซึ่งจะนำมาติดกับแผ่นวัสดุที่ใช้ทดสอบ เพื่อใช้ตรวจสอบดูการเริ่มเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว

ส่วนการทดสอบที่ต้องใช้ความเร็วลม เราจะทำการติดตั้งชุดพัดลมไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับตั้งความเร็วของพัดลมได้ ไว้บริเวณขอบของแผ่นวัสดุทดสอบดังแสดงในรูป 4.13 โดยการวัดความเร็วลม จะใช้เครื่องมือวัดลิจิตอล โดยจะทำการวัดในหลาย ๆ จุดด้วยกัน แล้วนำค่าที่ได้ไปเฉลี่ยเพื่อหาความเร็วของลมที่มาสัมผัสกับแผ่นวัสดุทดสอบ

พัดลมที่ใช้ในการทดสอบ



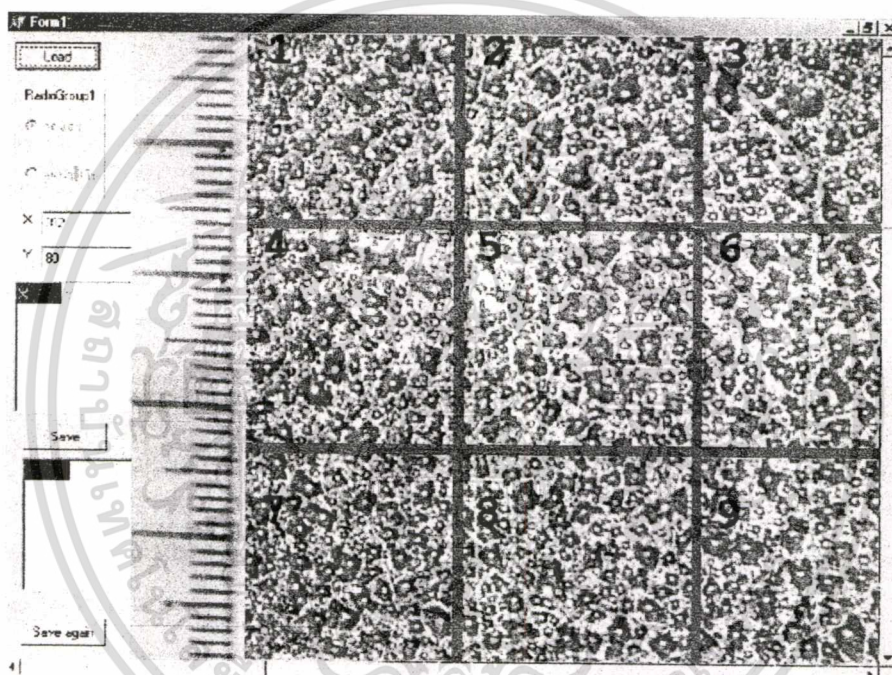
รูปที่ 4.13 แสดงการจัดวางทดสอบเมื่อมีความเร็วลมมาเกี่ยวข้อง

การทดลองในครั้งนี้ เราจะทำการบันทึกภาพเริ่มต้น ทุก ๆ 1 นาที พอเกิดการควบแน่นบนผิววัสดุแล้วระยะเวลาในการบันทึกภาพจะห่างออกไป เป็นทุก ๆ 2 นาที 5 นาที 10 นาที เป็นต้นเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการเกิดการควบแน่นที่เกิดขึ้น และการวัดหาขนาดของเม็คน้ำที่เกิดขึ้นนั้น จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.2.4 การวัดขนาดของเม็ดน้ำ

หลังจากทำการทดลองเสร็จแล้วก็มาถึงขั้นตอนการหาขนาดของเม็ดน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งในการหาขนาดของเม็ดน้ำนั้นจะใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ โดยลักษณะของโปรแกรมที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะบอกพิกัดเป็น pixels

ภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์จะถูก load ลงในโปรแกรมและทำการกำหนดจุดที่ต้องการเพื่อนำไปหาขนาดของเม็ดน้ำต่อไป โดยความละเอียดของขนาดของเม็ดน้ำที่หาได้ จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดจุดลงบนภาพที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยแต่ละจุดที่กำหนดลงไป โปรแกรมจะอ่านค่าพิกัดออกมาเป็น pixels แล้วนำมาเอาค่าพิกัดที่ได้นั้นไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณต่อไป เช่น โปรแกรม Excel เป็นต้น



รูปที่ 4.14 แสดงโปรแกรมการหาขนาดของเม็ดน้ำ

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดสอบการเกิดการควบแน่นบนวัสดุพื้นในครั้งนี้จะแยกผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลตามเงื่อนไขที่ได้กล่าวมาแล้วไว้เป็นกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

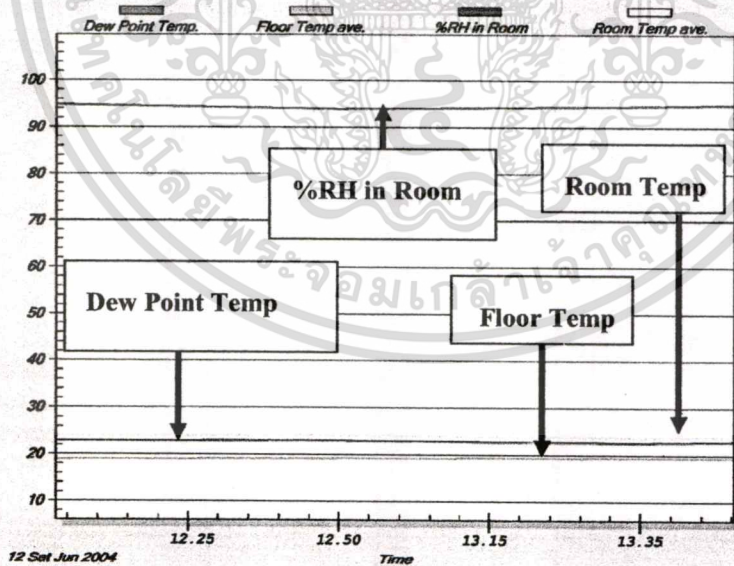
5.1 อุณหภูมิห้องที่ 24 °C (แผ่นวัสดุทดสอบ : กระเบื้องเซรามิก)

การทดสอบจะทำการปรับค่าของอุณหภูมิห้องให้เป็นไปตามค่าที่กำหนด โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า setpoint ของอุณหภูมิในการเปิดปิดวาล์วน้ำที่เข้าสู่ fancoil ให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ การทดลองกรณีนี้จะกระทำโดยปราศจากภาวะความร้อนจากแสง

5.1.1 อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19 °C

อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ การปรับตั้งจะทำการปรับค่า setpoint การเปิดปิดวาล์วน้ำที่เข้าสู่พื้น โดยให้ทำการเปิดปิดตามเงื่อนไขอุณหภูมิที่กำหนด

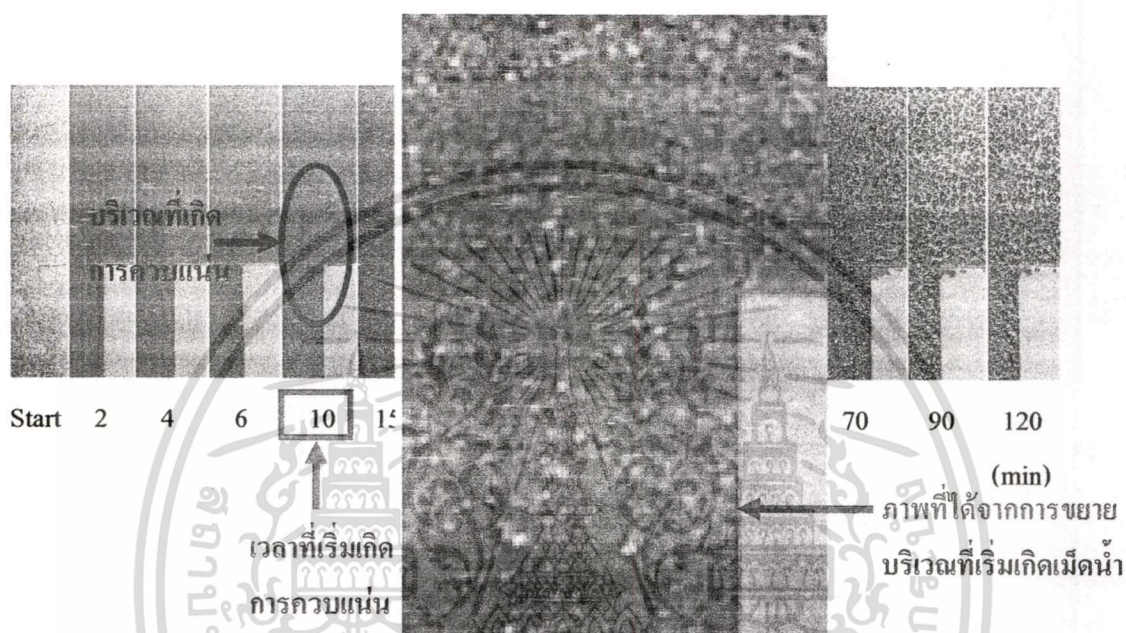
- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการปรับตั้งระบบที่ 95%RH พบว่าเส้นสีน้ำเงินจะแสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ เส้น สีเทาจะแสดงค่าของอุณหภูมิห้อง เส้นสีแดงจะแสดงค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างภายในห้อง และเส้นสีเขียวจะ แสดงค่าของอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ (รูปที่ 5.1) โดยกราฟแสดงการปรับตั้งระบบจะใช้สัญลักษณ์สีที่ เหมือนกันในทุก ๆ กรณีที่ทดสอบ จากกราฟพบว่าเมื่ออุณหภูมิห้องเป็น 24 °C อุณหภูมิพื้นผิว ทดสอบเป็น 19 °C ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C ผลที่ได้ จะแสดงในรูปที่ 5.2

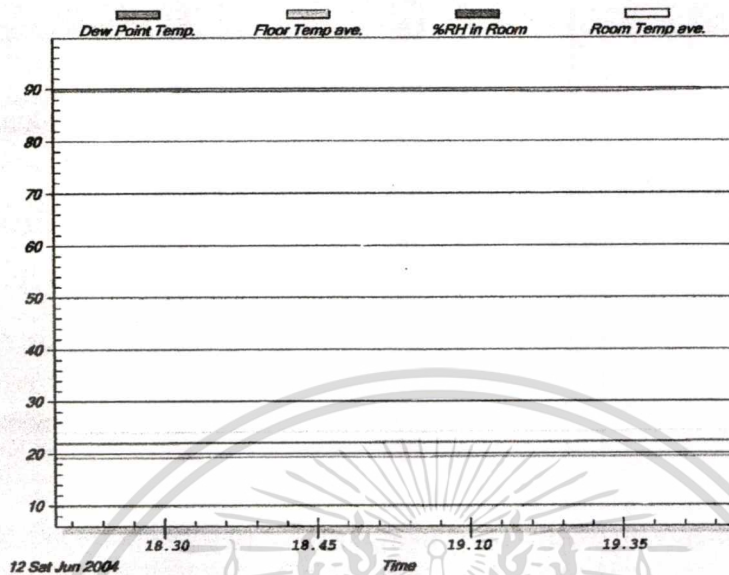


รูปที่ 5.2 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

จากรูปที่ 5.2 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% โดยในรูปจะแสดง ถึงเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นมีหน่วยเป็นนาที บริเวณที่เริ่มเกิดการควบแน่น และภาพขยายของ บริเวณที่เริ่มเกิดการควบแน่น โดยภาพแสดงผลการทดสอบสำหรับทุก ๆ กรณีจะเป็นไปในลักษณะ เดียวกัน ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีพื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดของเม็ดน้ำที่วัดได้ นั้นจะมีขนาดประมาณ 0.24 มิลลิเมตร

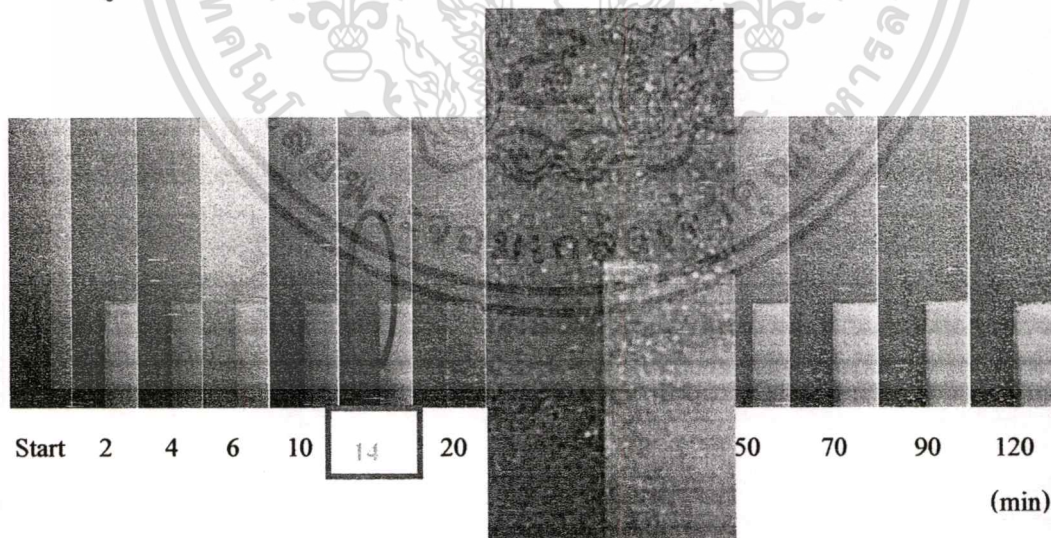
(หมายเหตุ : การทดสอบจะทำการเก็บภาพทุก ๆ 1 นาที และการปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องจะ เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด คือจะมีการปรับเพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละ 5% สำหรับทุก ๆ กรณีการ ทดสอบ)

- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เมื่อมีการลดความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19 °C จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกัน 3°C (รูปที่ 5.3) โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.4

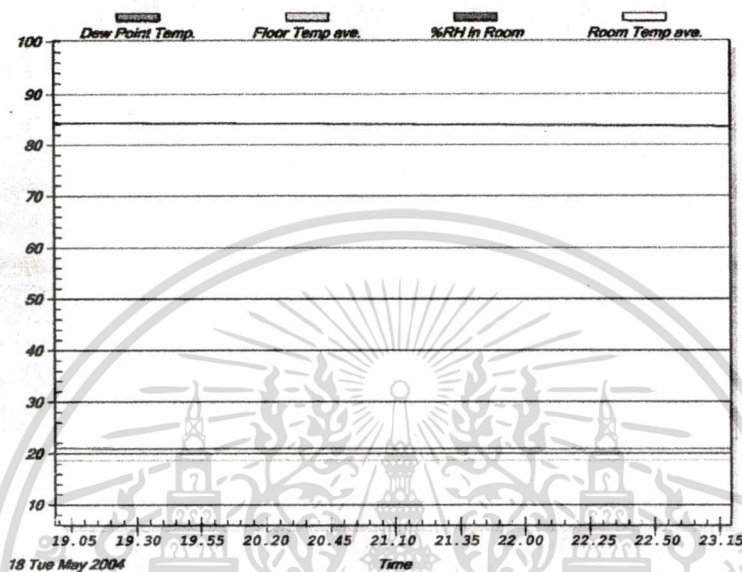


รูปที่ 5.4 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

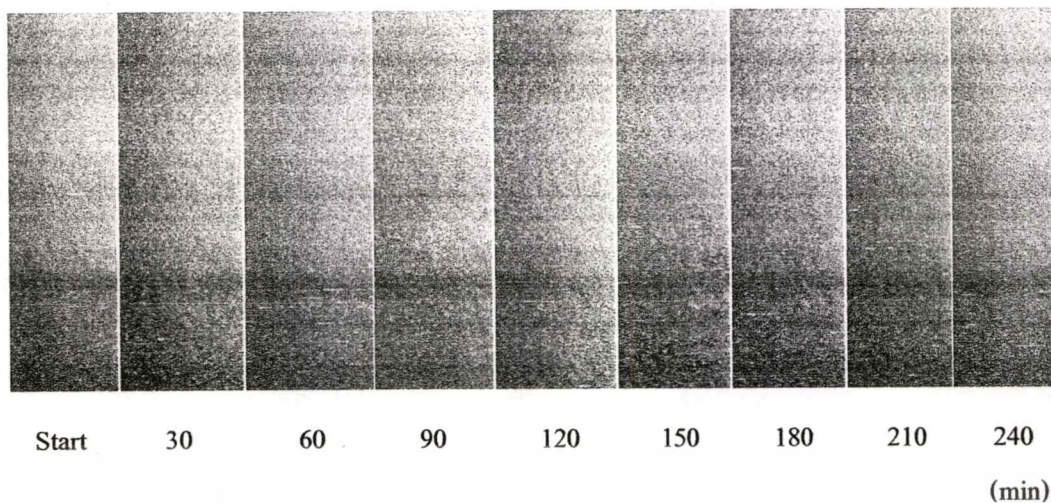
เมื่อเวลาผ่านไป 14 นาที ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% (รูปที่ 5.4) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็คน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.24 มิลลิเมตร

- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 85% (รูปที่ 5.5) อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19 °C จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 2 °C

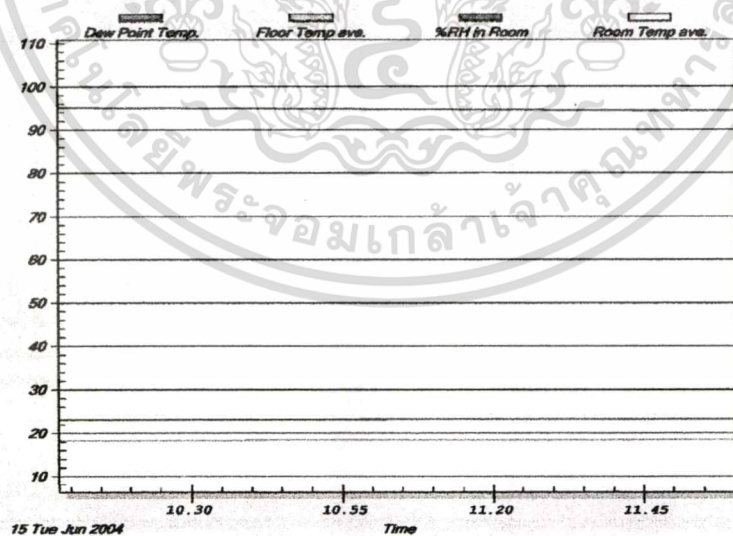


รูปที่ 5.6 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

รูปที่ 5.6 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% เมื่อทำการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง พื้นผิวทดสอบไม่มีการเกิดขึ้นของเม็ดน้ำ (อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถจับภาพและสัญญาณการเกิดการควบแน่นได้)

5.1.2 อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 18°C

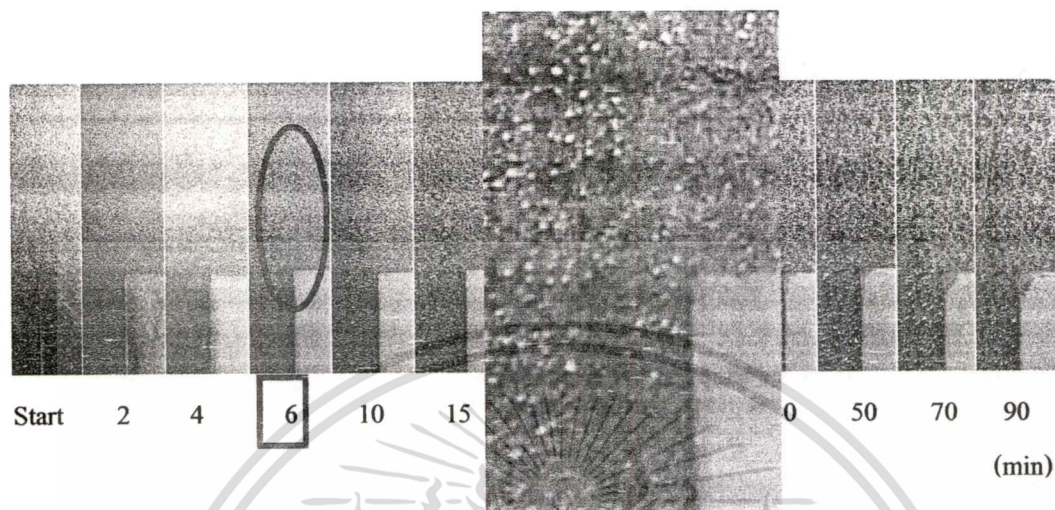
- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

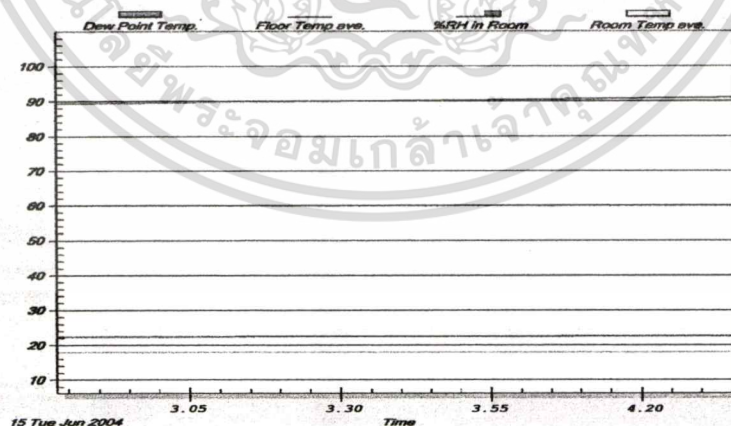
เมื่อมีการปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C (รูปที่ 5.7) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 5 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% (รูปที่ 5.8) เมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.24 มิลลิเมตร

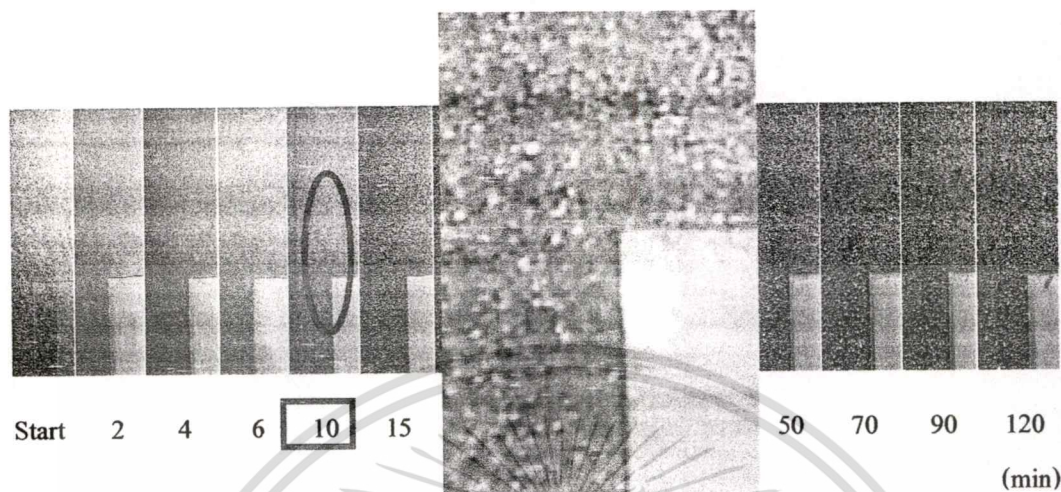
- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

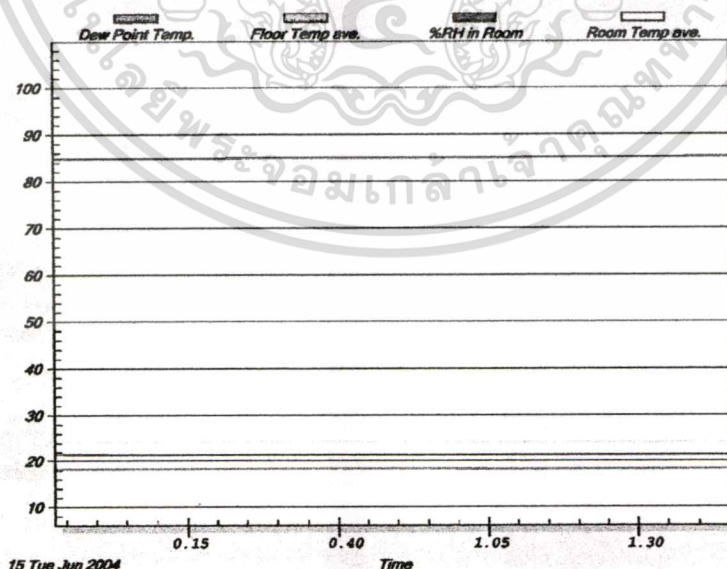
เมื่อลดความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C (รูปที่ 5.9) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% (รูปที่ 5.10) เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

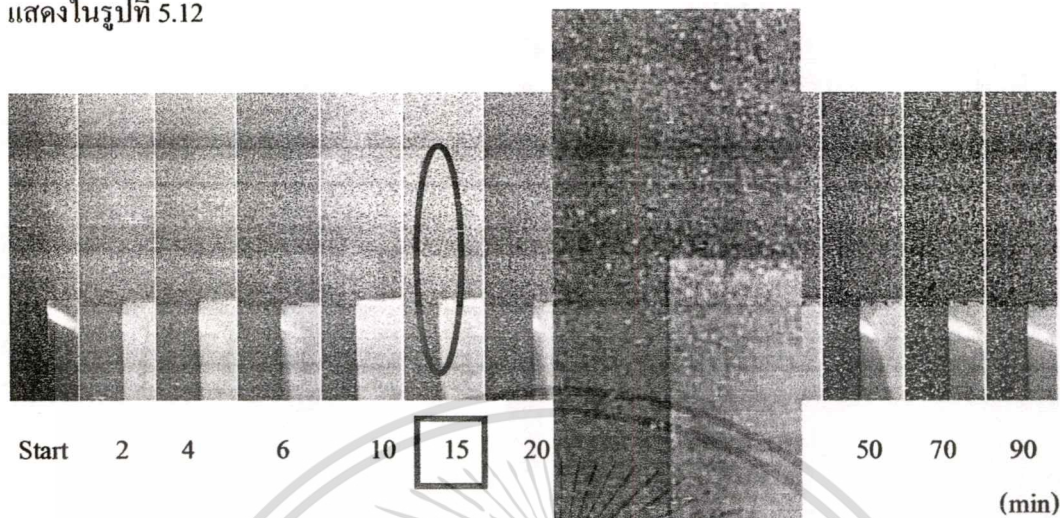
- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

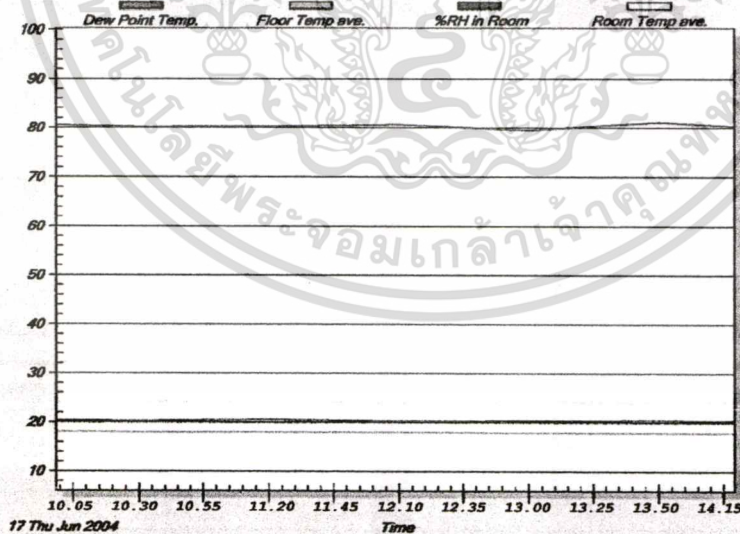
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C (รูปที่ 5.11) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที (รูปที่ 5.12) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

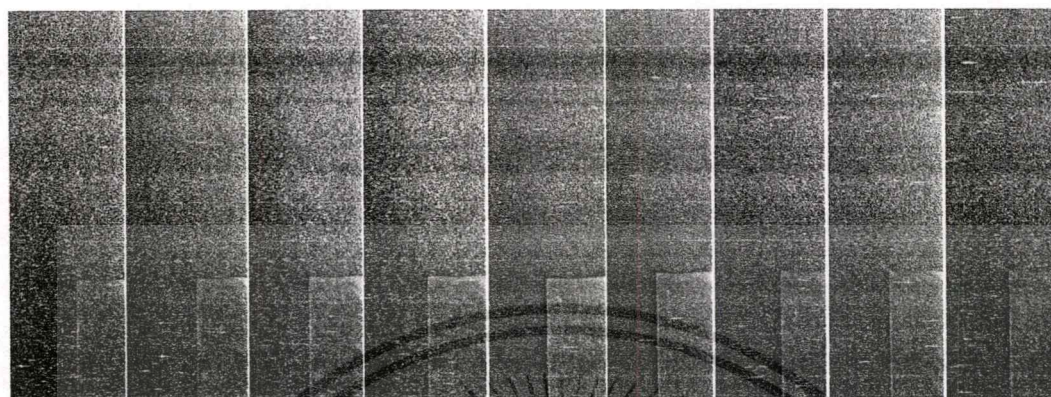
- ความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 2 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.14



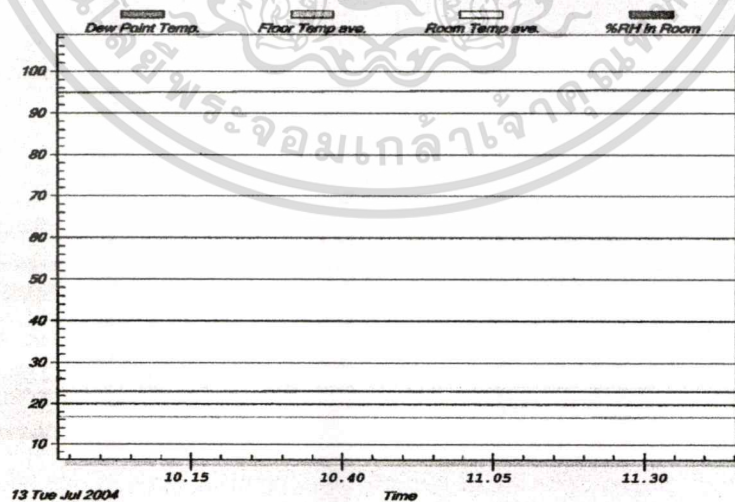
Start 30 60 90 120 150 180 210 240 (min)

รูปที่ 5.14 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 80%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% (รูปที่ 5.14) เมื่อทำการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง พบว่าบนพื้นผิวทดสอบไม่มีเม็ดน้ำที่เกิดจากการควบแน่นเกิดขึ้น

6.1.3 อุณหภูมิที่พื้นผิวทดสอบ 17 °C

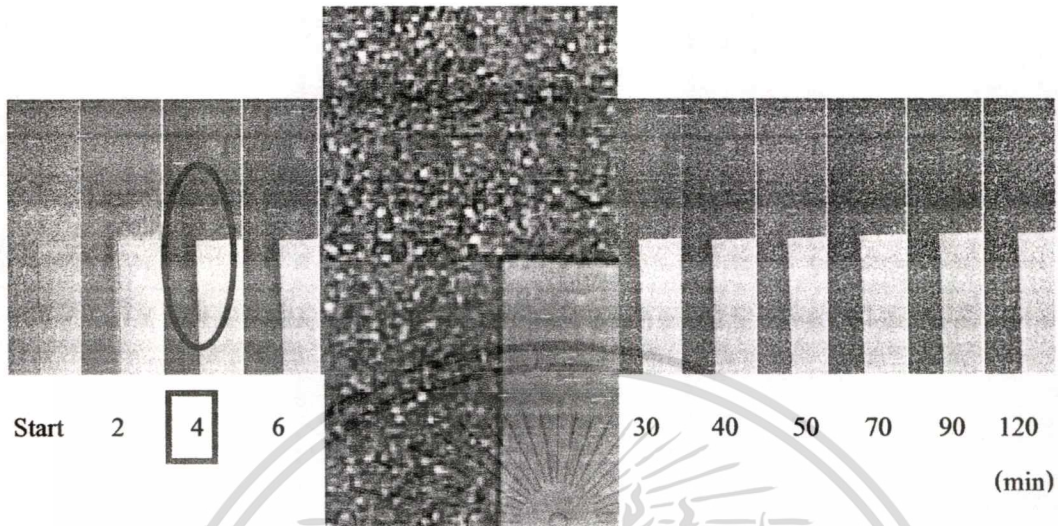
- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

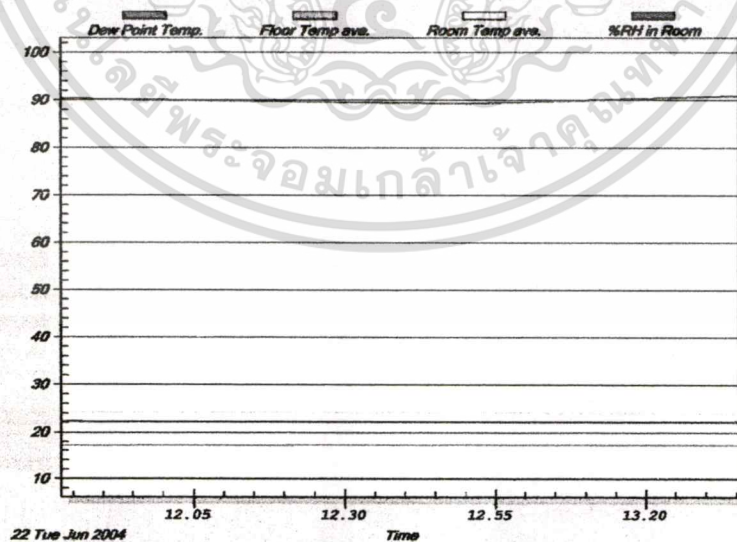
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 17 °C (รูปที่ 5.15) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 6 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% (รูปที่ 5.16) เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

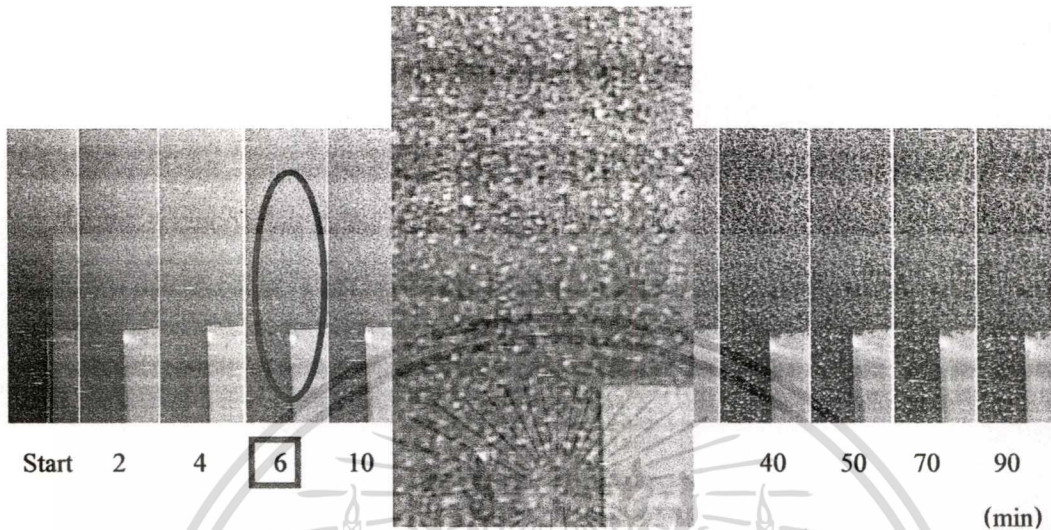
- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

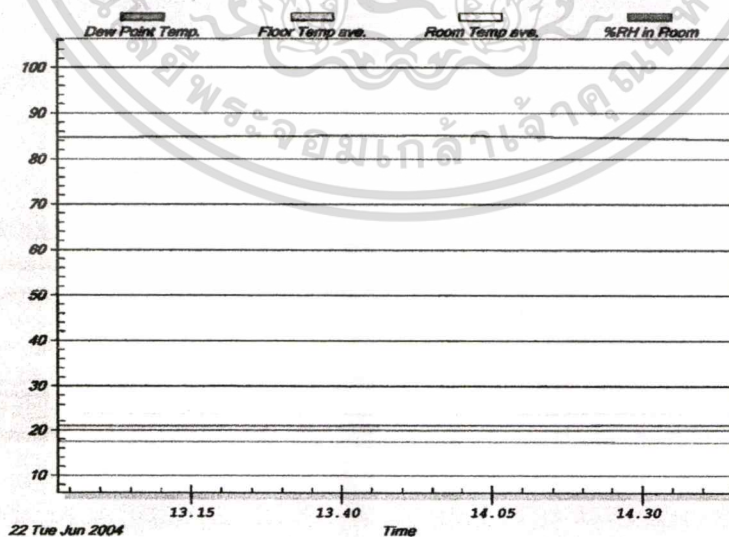
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 17 °C (รูปที่ 5.17) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 5 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% (รูปที่ 5.18) เมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

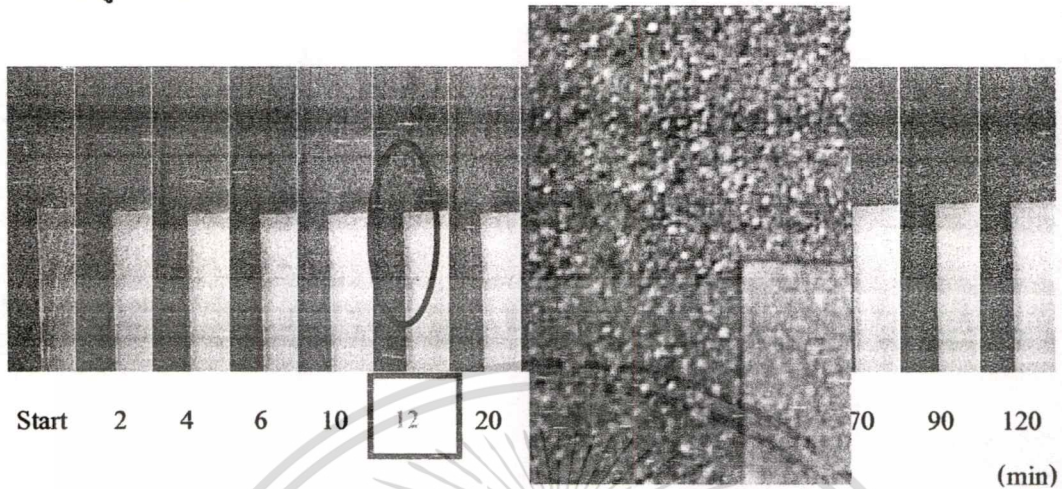
- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

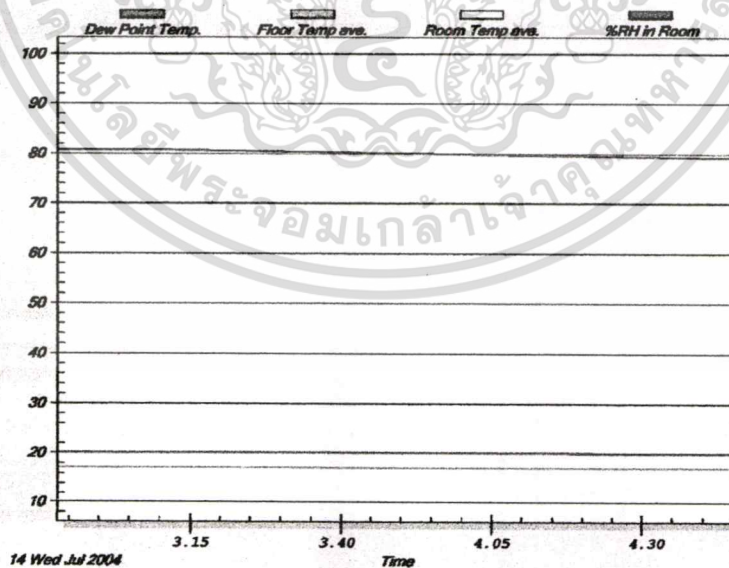
ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 17 °C (รูปที่ 5.19) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4°C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% (รูปที่ 5.20) เมื่อเวลาผ่านไป 12 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

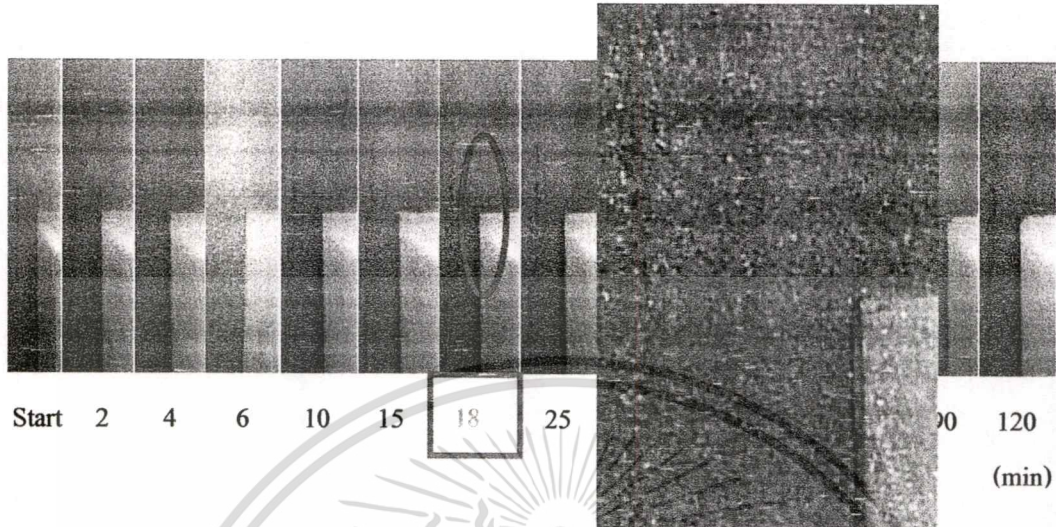
- ความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

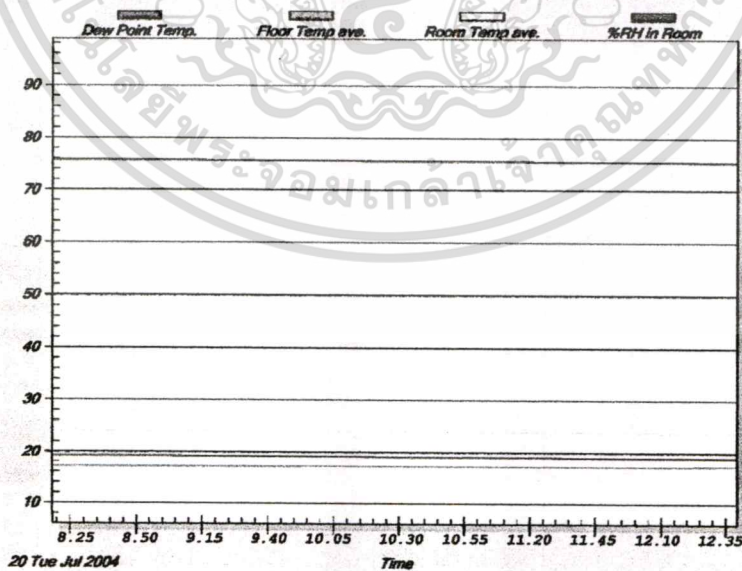
ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 17 °C (รูปที่ 5.21) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3°C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 80%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% (รูปที่ 5.22) เมื่อเวลาผ่านไป 18 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

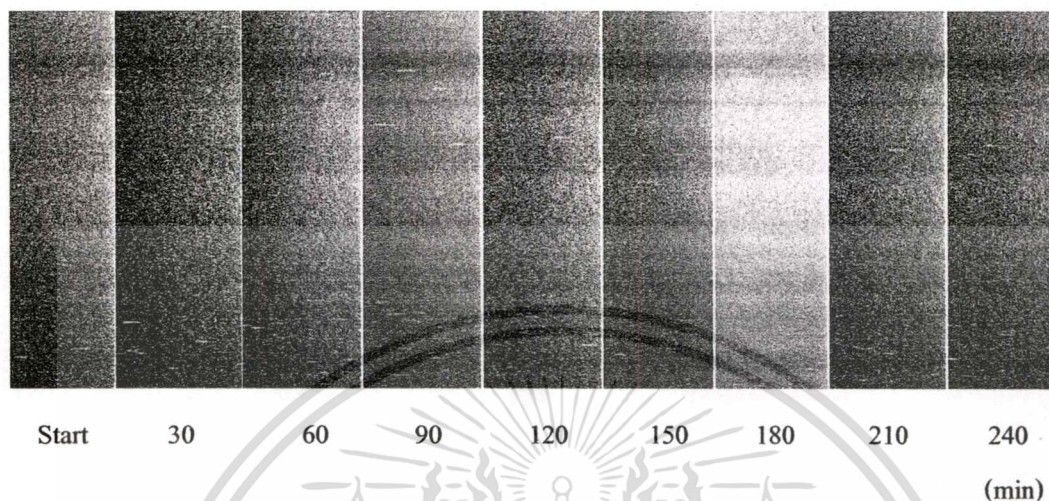
- ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า .
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 17 °C (รูปที่ 5.23) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 2 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.24

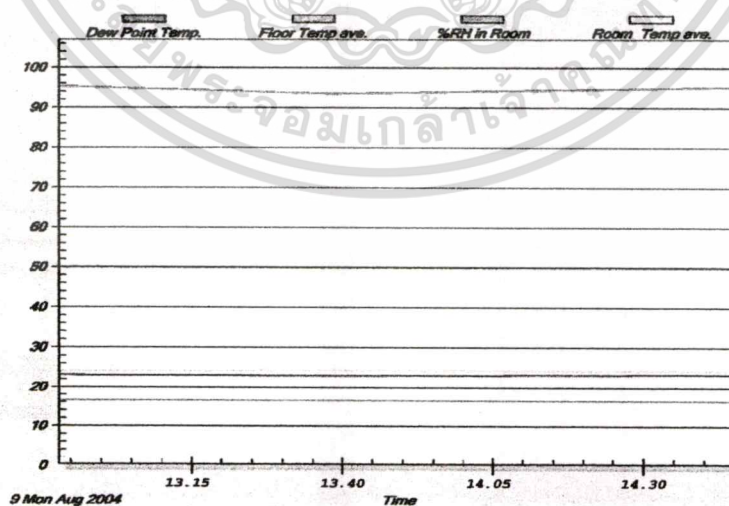


รูปที่ 5.24 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 75%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% (รูปที่ 5.24) เมื่อทำการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง พบว่าบนพื้นผิวทดสอบไม่มีเมื่อน้ำที่เกิดจากการควบแน่นเกิดขึ้น

5.1.4 อุณหภูมิที่พื้นผิวทดสอบ 16 °C

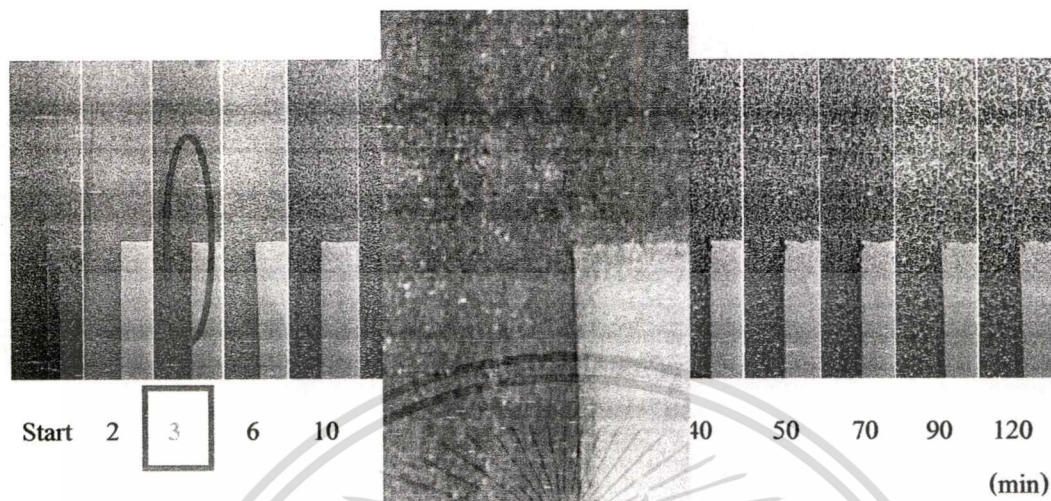
- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

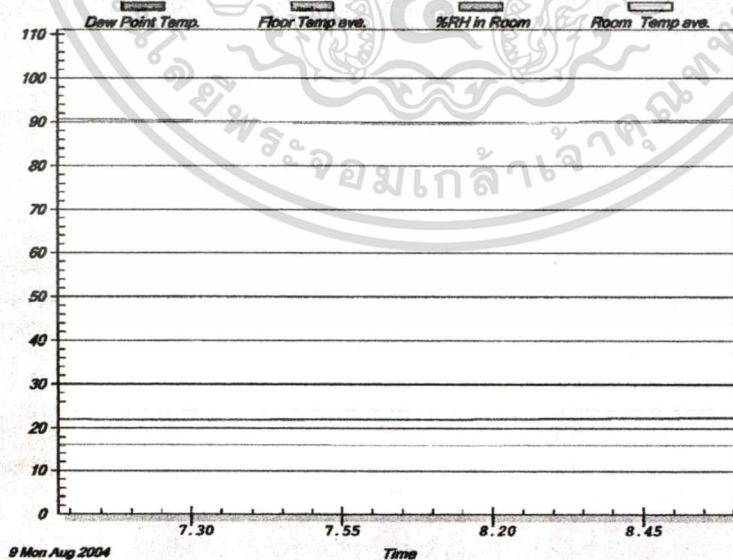
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16 °C (รูปที่ 5.25) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 7 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% (รูปที่ 5.26) เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

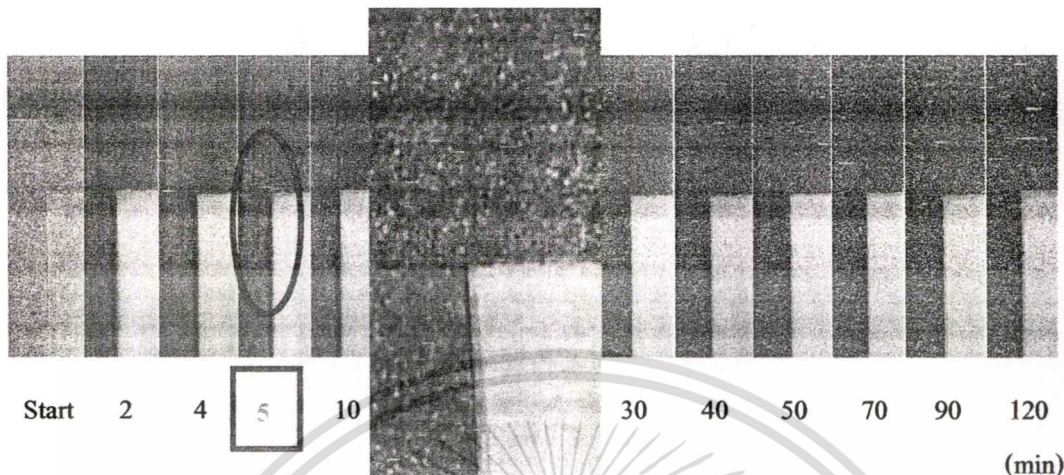
- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

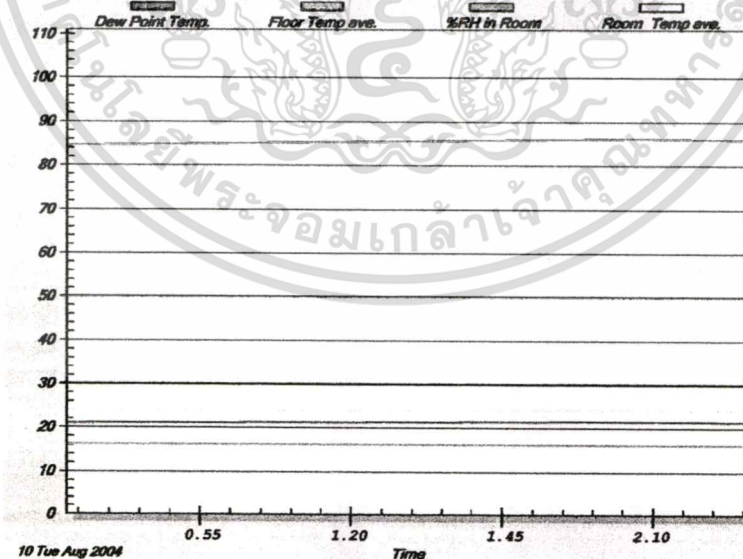
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16 °C (รูปที่ 5.27) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 6 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% (รูปที่ 5.28) เมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

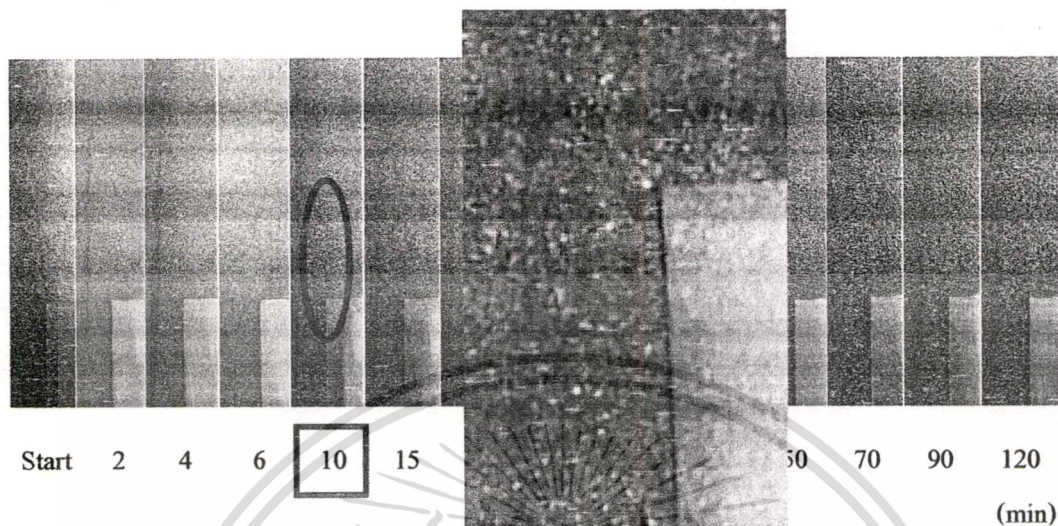
- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

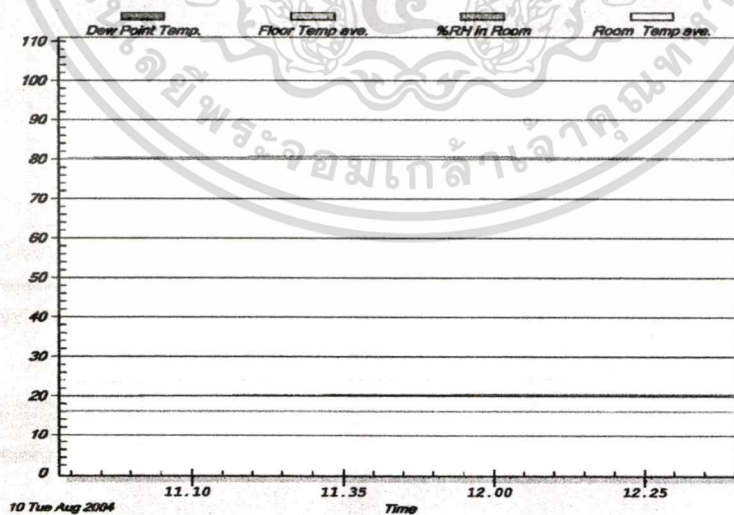
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16°C (รูปที่ 5.29) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 5°C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% (รูปที่ 5.30) เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.24 มิลลิเมตร

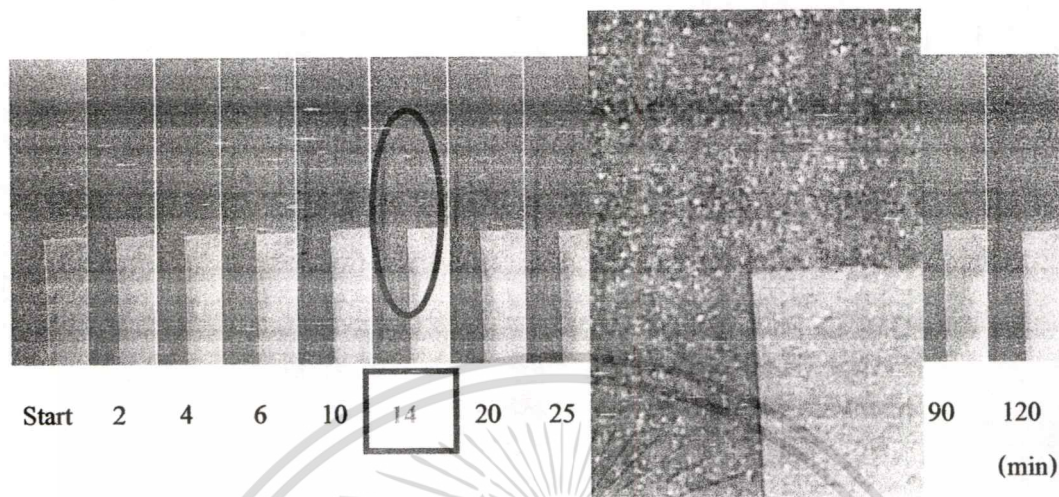
- ความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

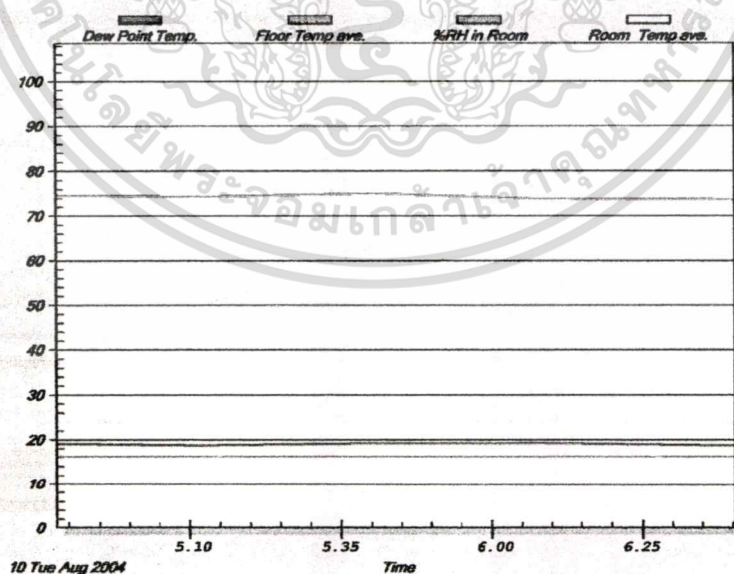
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16 °C (รูปที่ 5.31) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 80%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% (รูปที่ 5.32) เมื่อเวลาผ่านไป 14 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

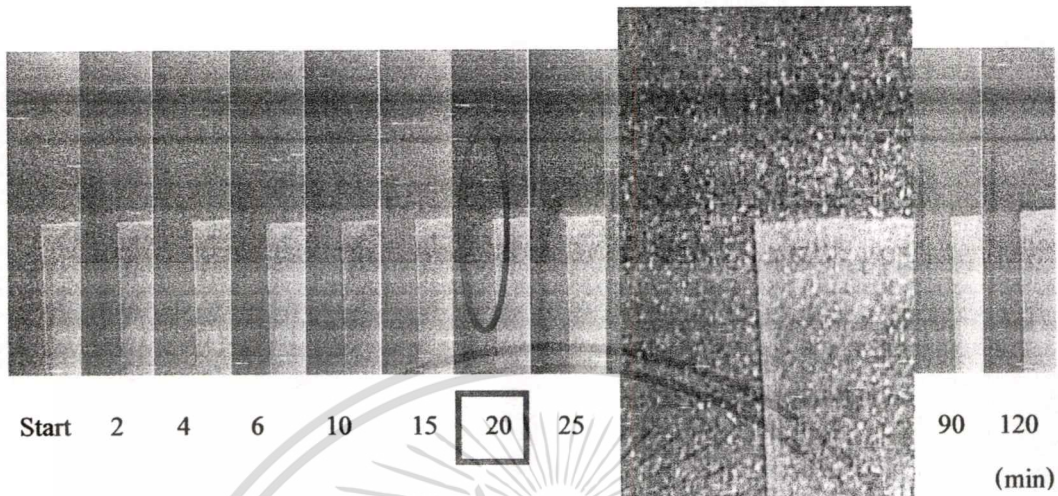
- ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

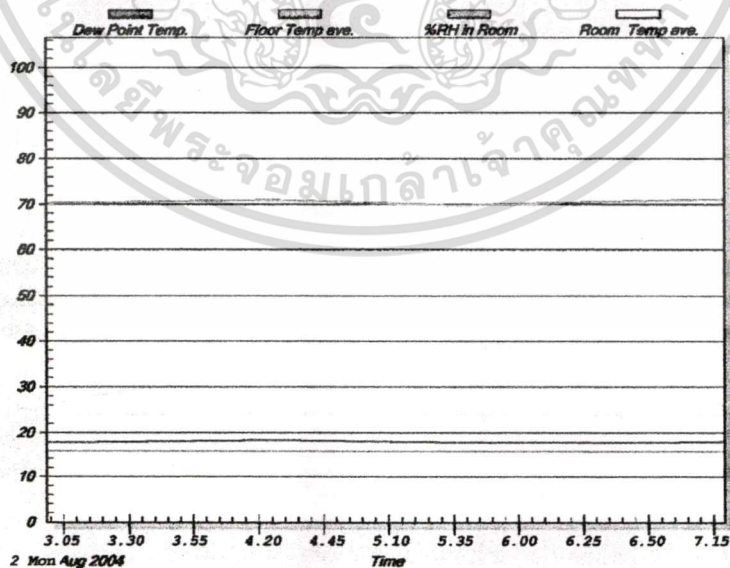
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16 °C (รูปที่ 5.33) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 75%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% (รูปที่ 5.34) เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

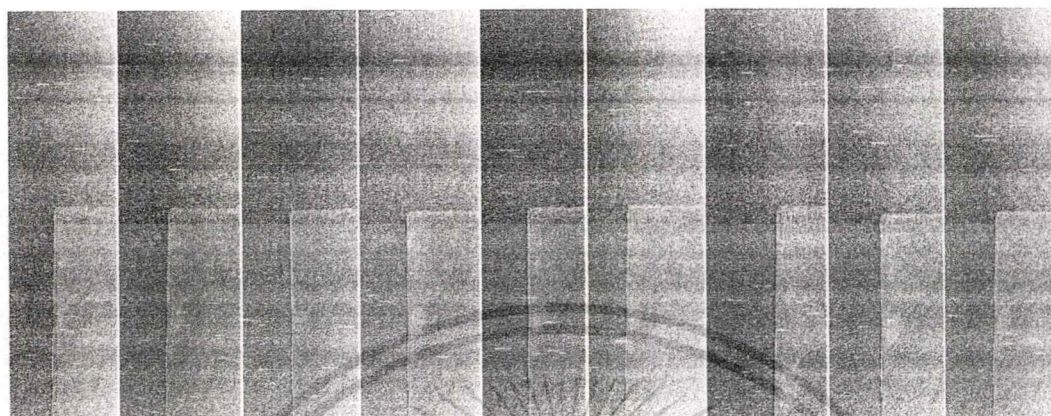
- ความชื้นสัมพัทธ์ 70%



รูปที่ 5.35 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16 °C (รูปที่ 5.35) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 2 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.36



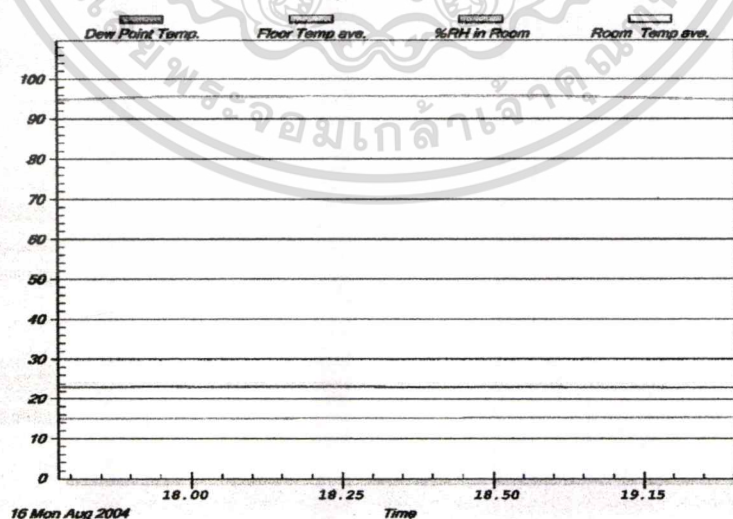
Start 30 60 90 120 150 180 210 240
(min)

รูปที่ 5.36 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 70%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70% (รูปที่ 5.36) เมื่อทำการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง พบว่าบนพื้นผิวทดสอบไม่มีเมื่อน้ำที่เกิดจากการควบแน่นเกิดขึ้น

5.1.5 อุณหภูมิที่พื้นผิวทดสอบ 15 °C

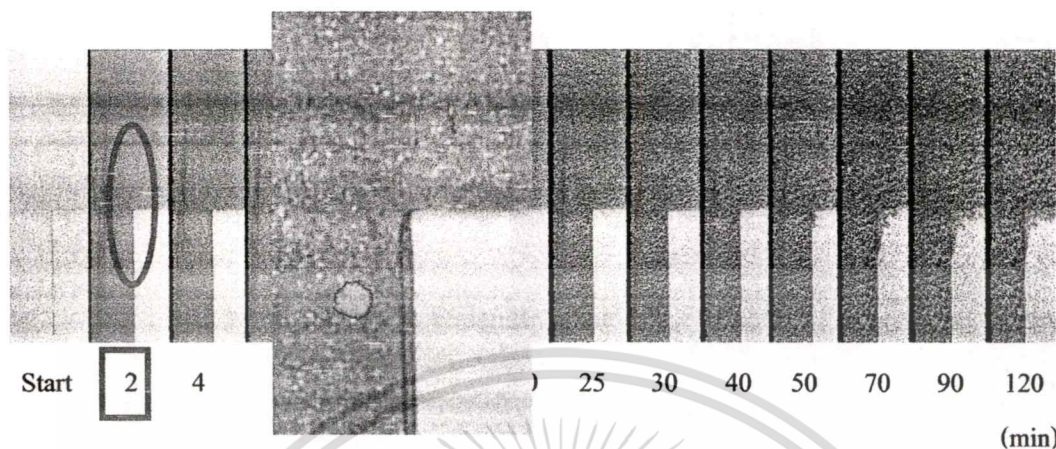
- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.37 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

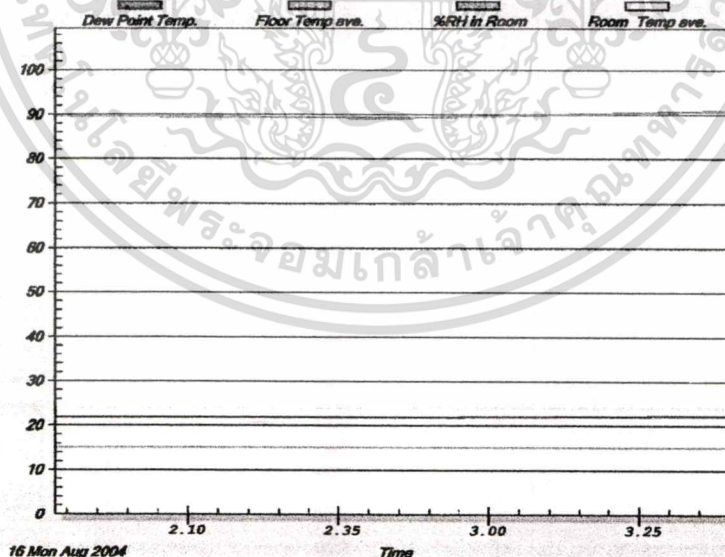
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 15 °C (รูปที่ 5.37) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 8 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% (รูปที่ 5.38) เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

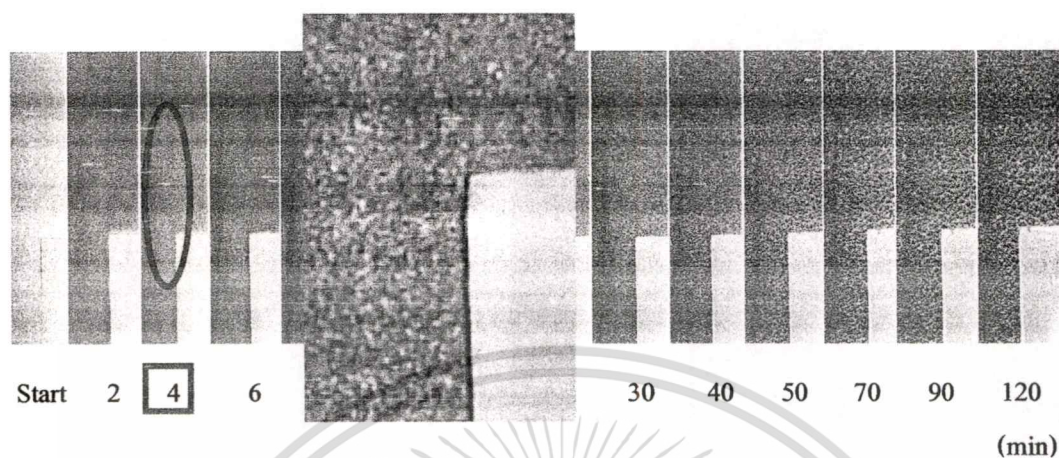
- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.39 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

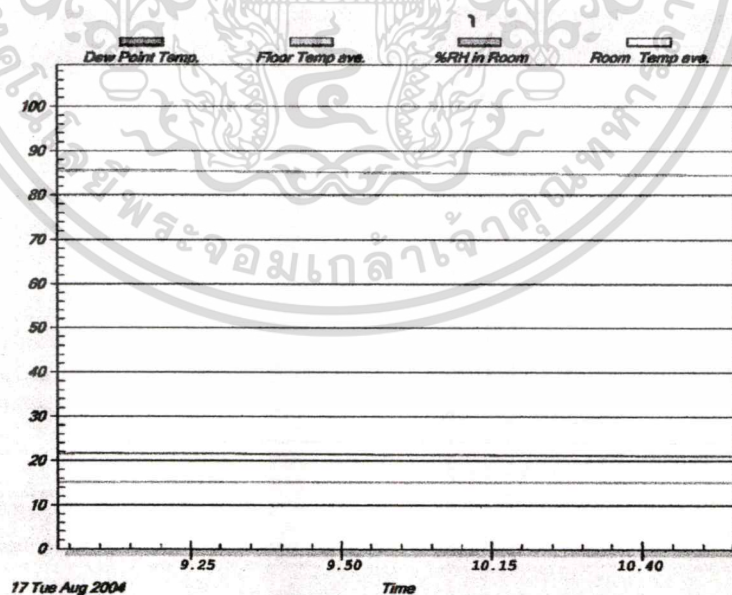
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 15 °C (รูปที่ 5.39) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 7 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% (รูปที่ 5.40) เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

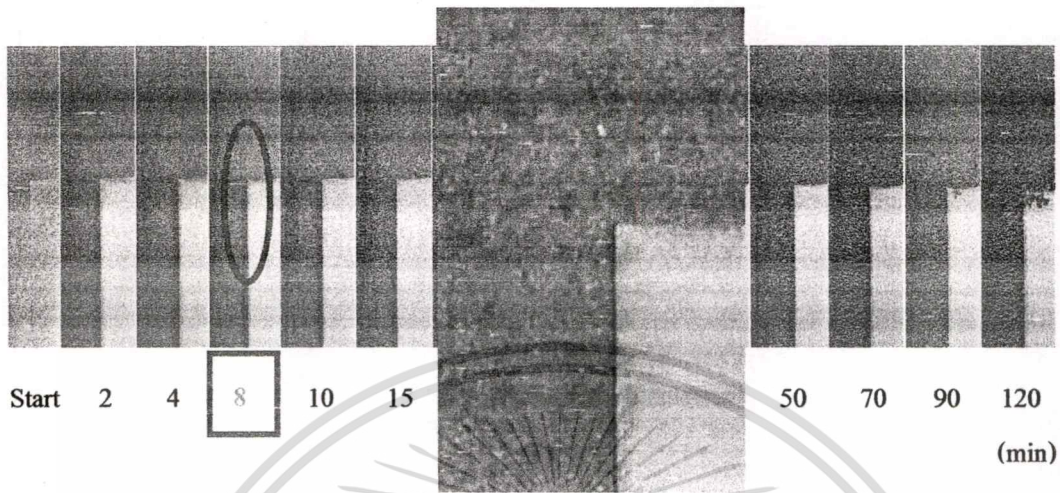
- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

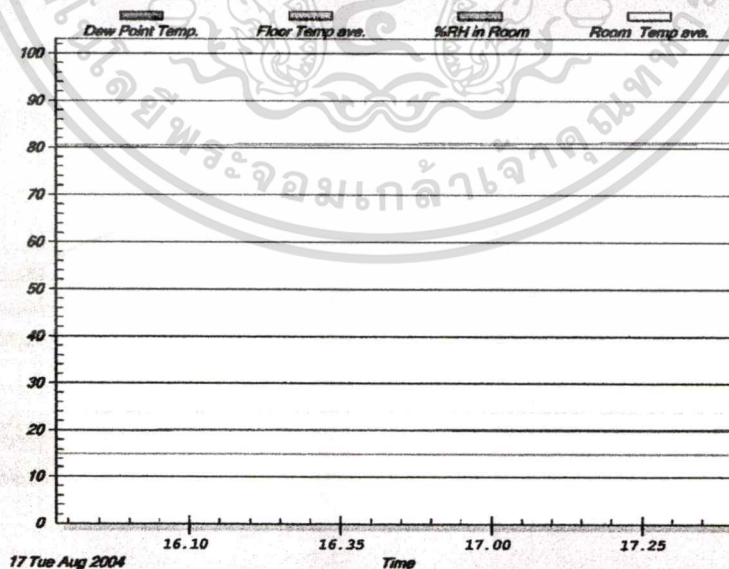
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 15 °C (รูปที่ 5.41) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 6 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.42 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% (รูปที่ 5.42) เมื่อเวลาผ่านไป 8 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

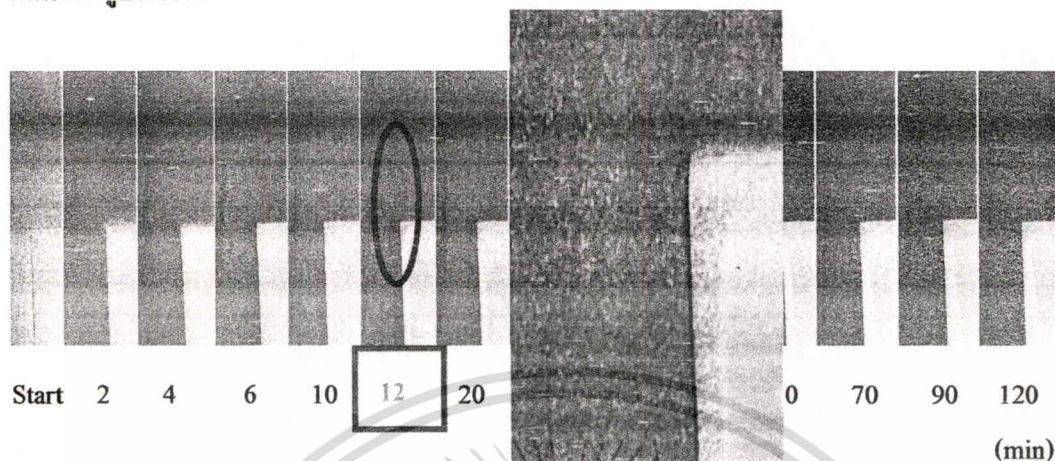
- ความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 5.43 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

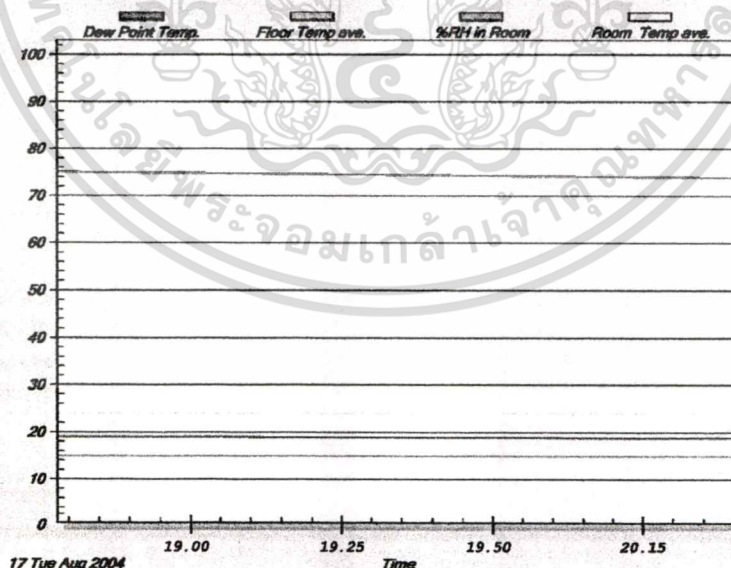
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 15 °C (รูปที่ 5.43) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 5 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.44



รูปที่ 5.44 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 80%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% (รูปที่ 5.44) เมื่อเวลาผ่านไป 12 นาที พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

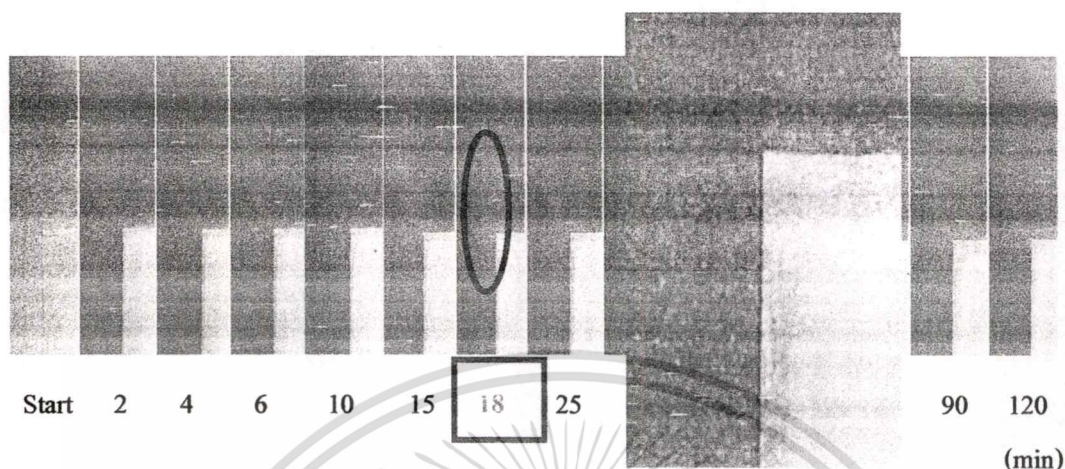
- ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 5.45 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

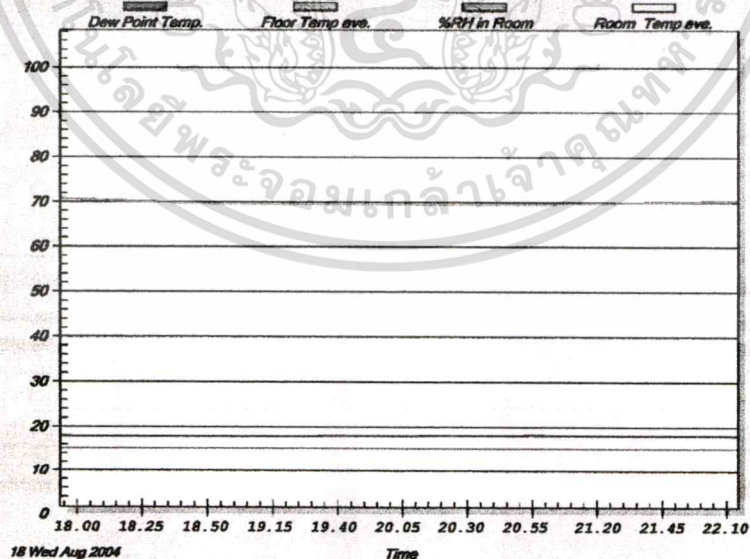
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 15 °C (รูปที่ 5.45) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C โดยผลที่จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.46 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 75%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% เมื่อเวลาผ่านไป 18 นาที (รูปที่ 5.46) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

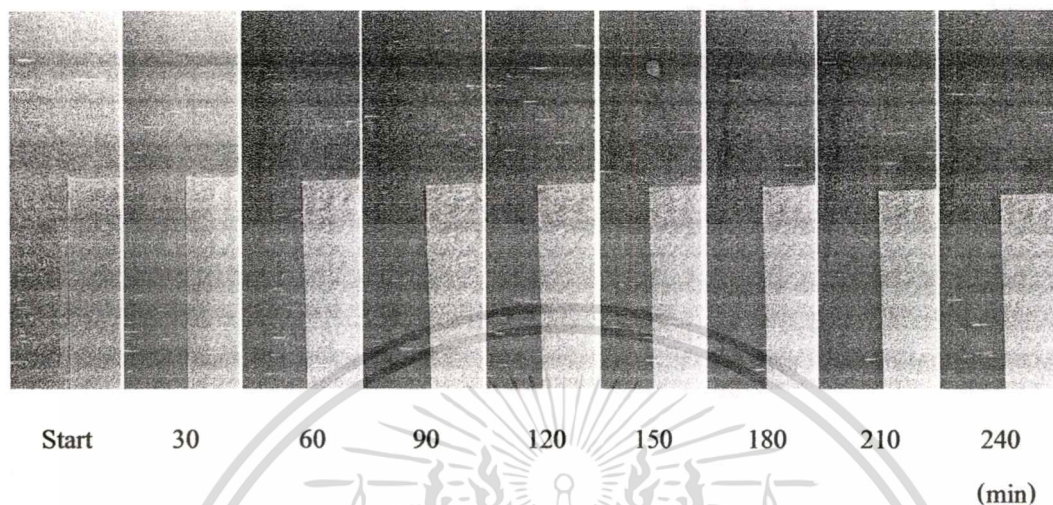
- ความชื้นสัมพัทธ์ 70%



รูปที่ 5.47 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 15°C (รูปที่ 5.47) จากกราฟพบว่า ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3°C โดยผลที่ได้จากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 5.48



รูปที่ 5.48 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 70%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70% (รูปที่ 5.48) พบว่าในช่วงแรกนั้นพื้นผิวทดสอบจะมีเม็ดน้ำเกิดขึ้นซึ่งมีขนาดเล็กมาก ๆ และยังคงจัดอยู่ในบริเวณขอบเขตแคบ ๆ แต่จะเกิดในระยะเวลาสั้น ๆ หลังจากนั้นก็จะหายไปอย่างรวดเร็ว โดยเมื่อทำการทดสอบไปนาน 4 ชั่วโมง จะไม่สามารถที่จะจับภาพการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวได้

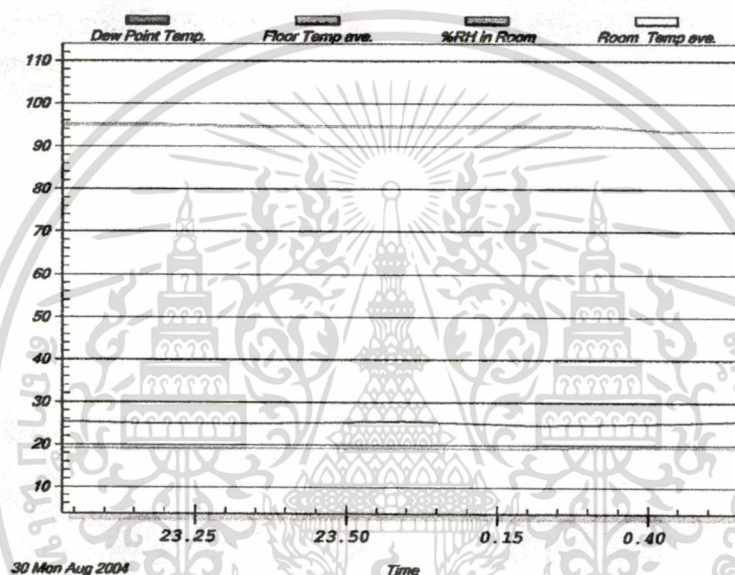
จากการทดสอบที่ผ่านมาเมื่อปรับอุณหภูมิพื้นผิวจาก 19°C ไปจนถึง 15°C พบว่าที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ๆ การกระจายตัวของเม็ดน้ำที่เกิดจากการควบแน่นจะเกิดขึ้นไม่ทั่วพื้นผิวทดสอบ และพบว่าเมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเท่ากัน โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่เท่ากันนั้น ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นไม่จำเป็นต้องเท่ากัน เช่น ที่อุณหภูมิพื้นผิวเป็น 19°C ความชื้นสัมพัทธ์ 90% ผลต่างของอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 3°C โดยจะเท่ากับกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% อุณหภูมิพื้นผิว 16°C พบว่าระยะเวลาการเริ่มเกิดการควบแน่นนั้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าจะเกิดการควบแน่นได้เร็วกว่า คือ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% จะใช้เวลาการเริ่มต้นเกิดการควบแน่น 14 นาที เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% เวลาในการเริ่มต้นเกิดการควบแน่นจะนานขึ้นเป็น 20 นาที ทั้งนี้เนื่องมาจาก ที่ความชื้นสูงปริมาณไอน้ำในอากาศจะมีมากกว่าที่ความชื้นต่ำ แต่อัตราการระเหยจะเท่ากันเพราะอยู่ในสภาวะที่รับภาระจากแสงเท่ากัน

5.2 อุณหภูมิห้องที่ 26 °C (แผ่นวัสดุทดสอบ : กระเบื้องเซรามิค)

สำหรับการทดสอบกรณีนี้ จะทำการเพิ่มอุณหภูมิห้องจากเดิม 24 °C ไปเป็น 26 °C เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการเกิดการควบแน่น โดยการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิพื้น และค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง (ไม่มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ)

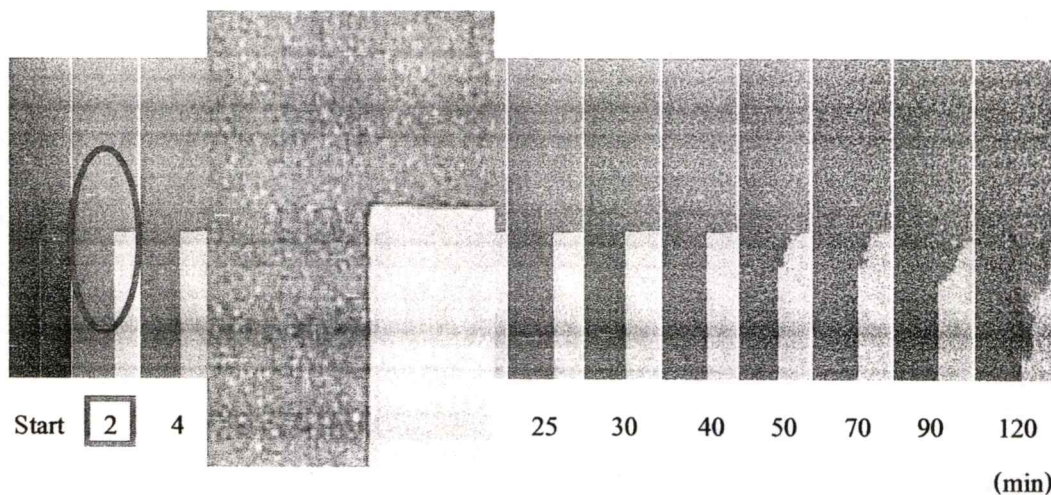
5.2.1 อุณหภูมิที่พื้นผิวทดสอบ 19 °C

- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.49 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

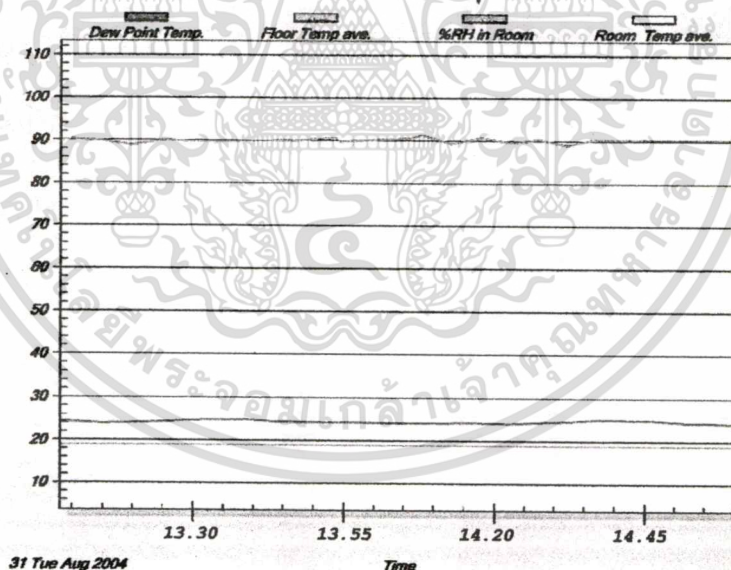
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.49) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 6 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที (รูปที่ 5.50) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

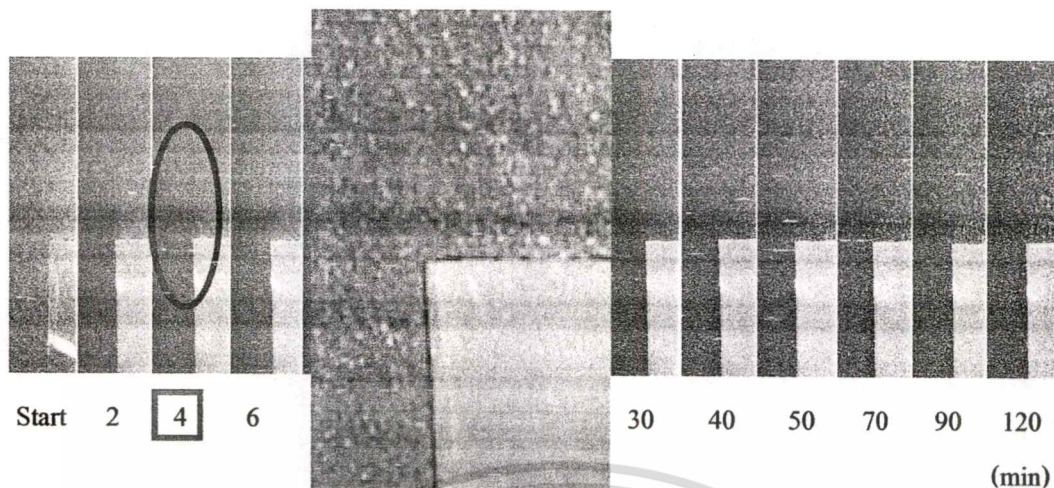
- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.51 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C (รูปที่ 5.51) และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 5 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.52

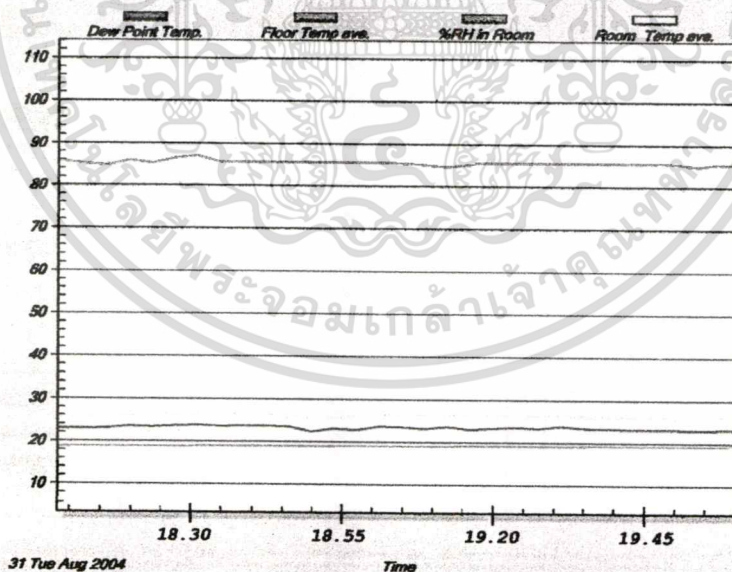
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.52 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที (รูปที่ 5.52) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็คน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

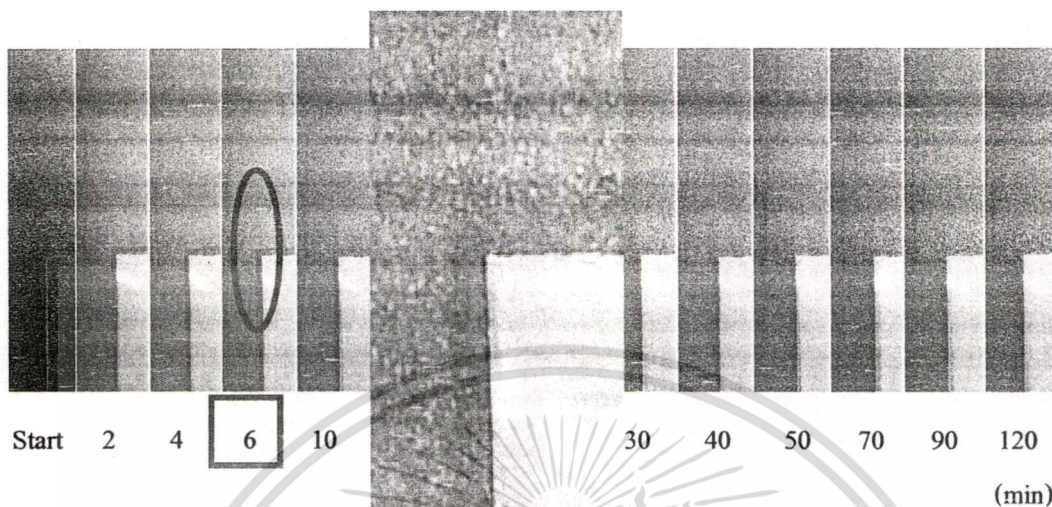
- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.53 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

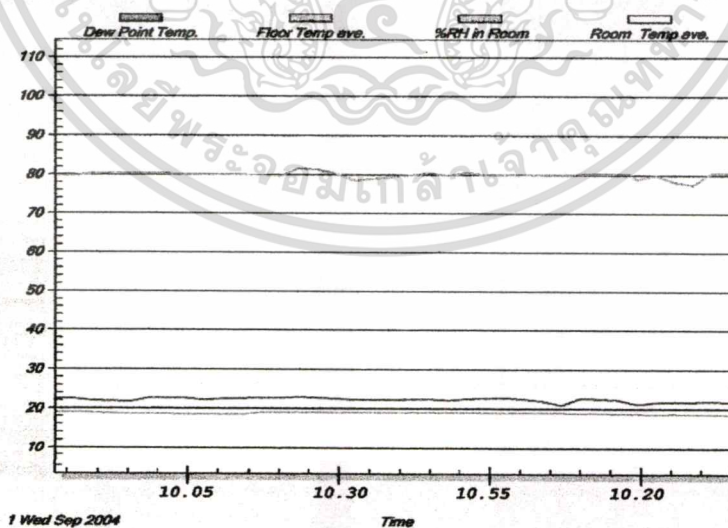
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.53) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.54



รูปที่ 5.54 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% เมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที (รูปที่ 5.54) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

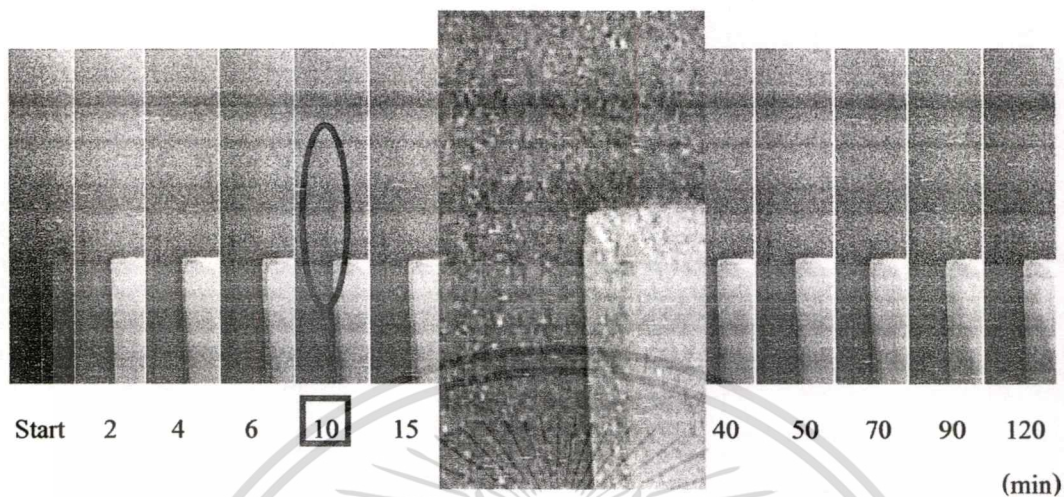
- ความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 5.55 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

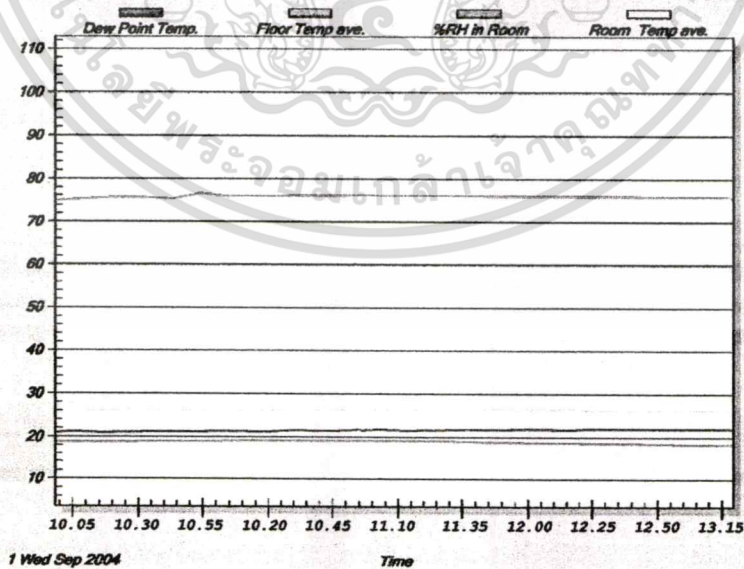
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.55) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.56



รูปที่ 5.56 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 80%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที (รูปที่ 5.56) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

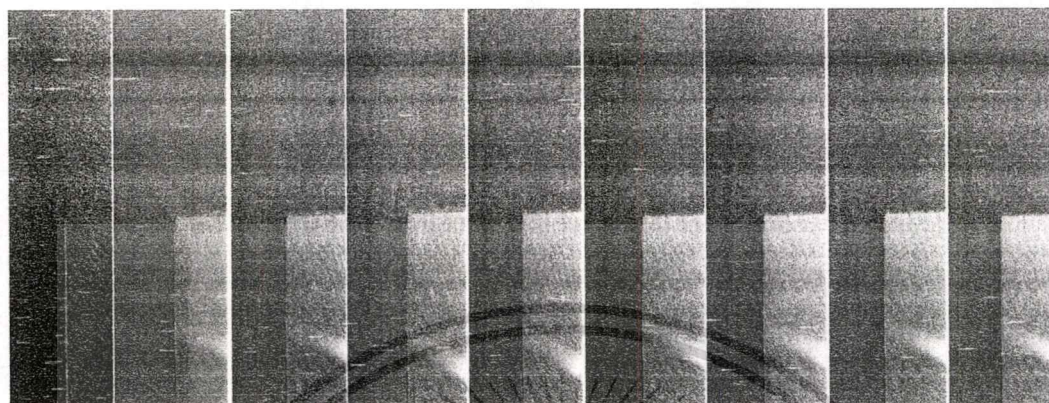
- ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 5.57 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.57) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 2 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.58



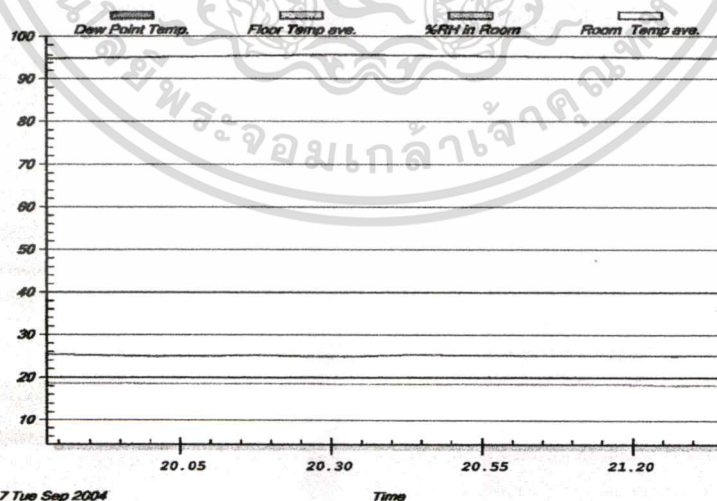
Start 30 60 90 120 150 180 210 240
(min)

รูปที่ 5.58 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 75%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% เมื่อทำการทดลองผ่านไป 4 ชั่วโมง (รูปที่ 5.58) พบว่าบนพื้นผิวทดสอบไม่มีเม็ดน้ำที่เกิดจากการควบแน่นเกิดขึ้น

6.2.2 อุณหภูมิที่พื้นผิวทดสอบ 18 °C

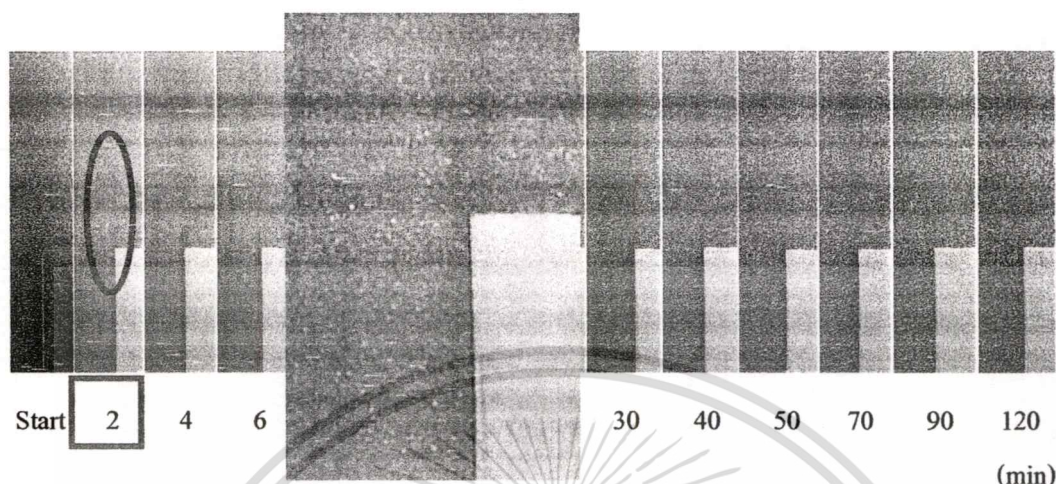
- ความชื้นสัมพัทธ์ 95%



รูปที่ 5.59 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

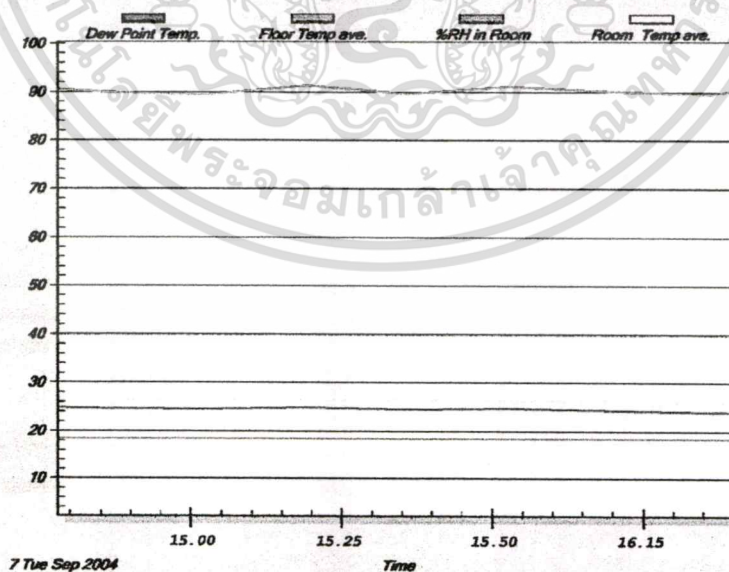
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.59) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 7 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.60



รูปที่ 5.60 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 95%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที (รูปที่ 5.60) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

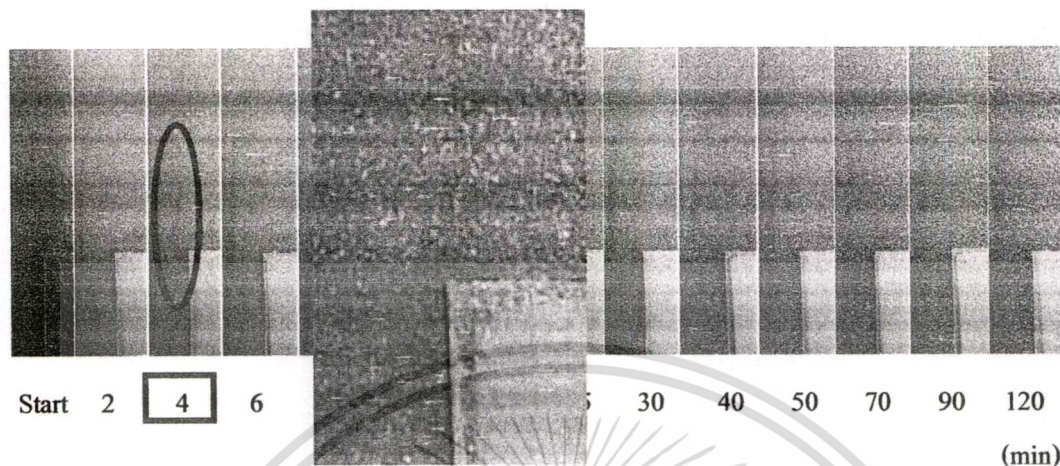
- ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.61 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

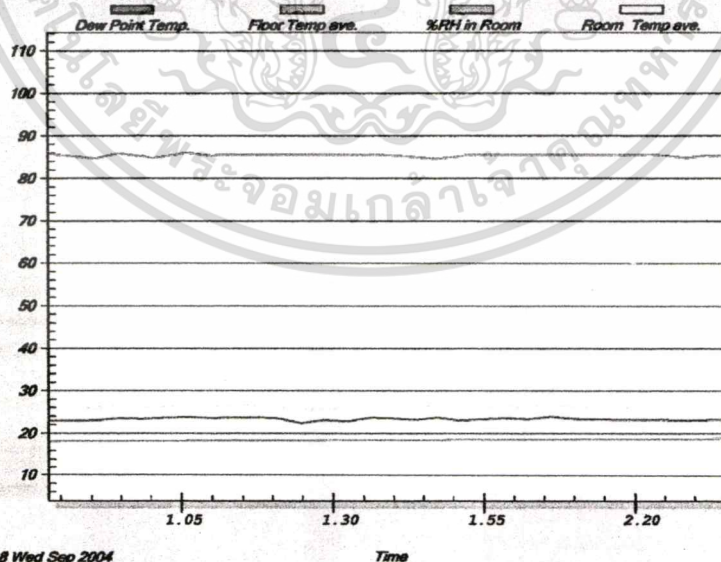
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.61) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 6 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.62



รูปที่ 6.62 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% เมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที (รูปที่ 6.62) พื้นผิว ทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาด ประมาณ 0.24 มิลลิเมตร

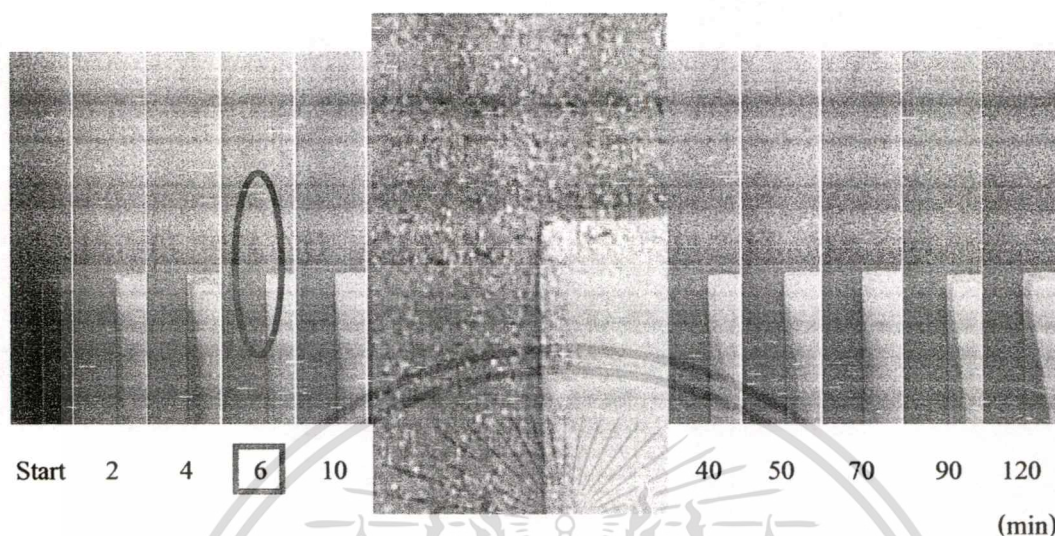
- ความชื้นสัมพัทธ์ 85%



รูปที่ 5.63 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

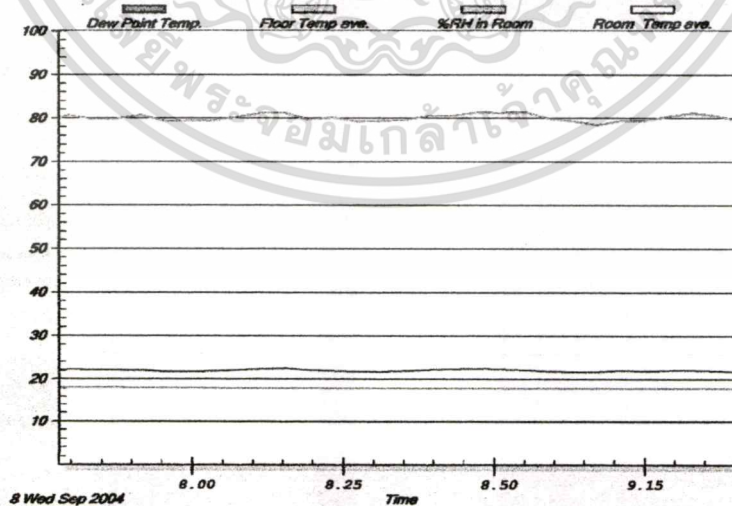
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.63) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 5 °C โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.64



รูปที่ 5.64 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 85%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% เมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที (รูปที่ 5.64) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

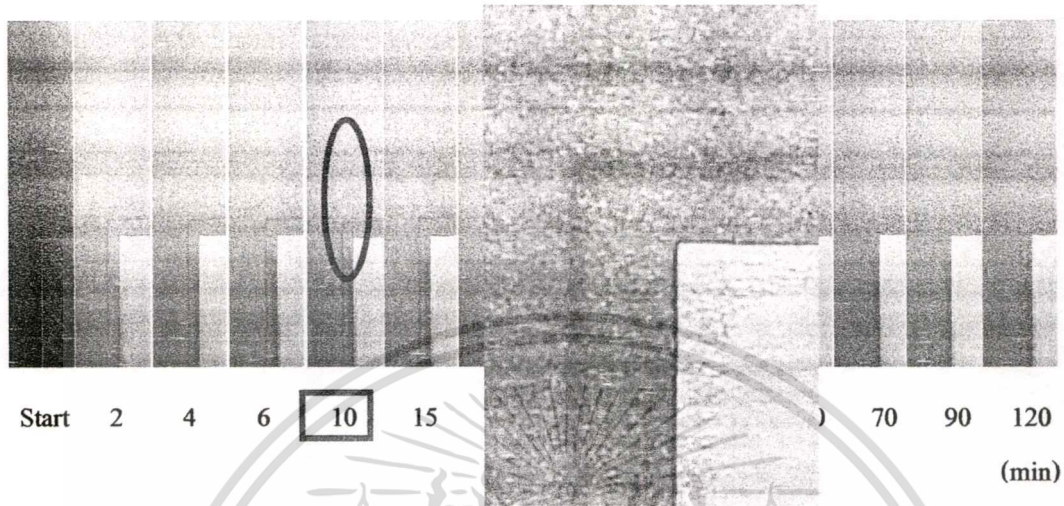
- ความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 5.65 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

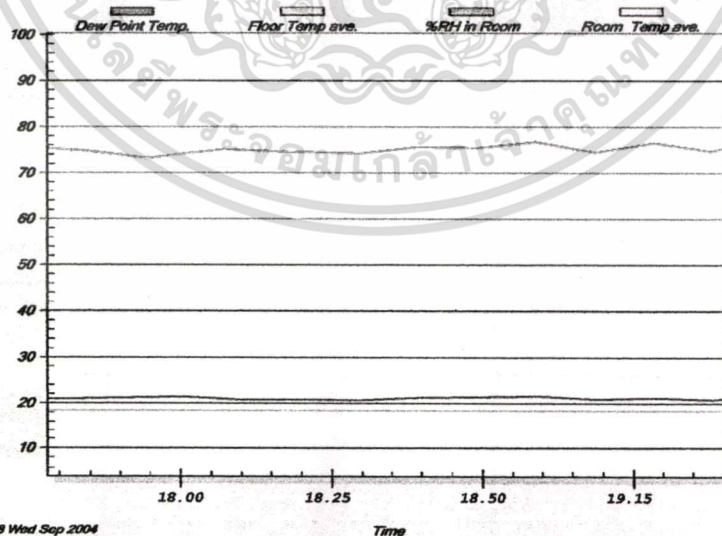
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.65) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.66



รูปที่ 5.66 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 80%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที (รูปที่ 5.66) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.23 มิลลิเมตร

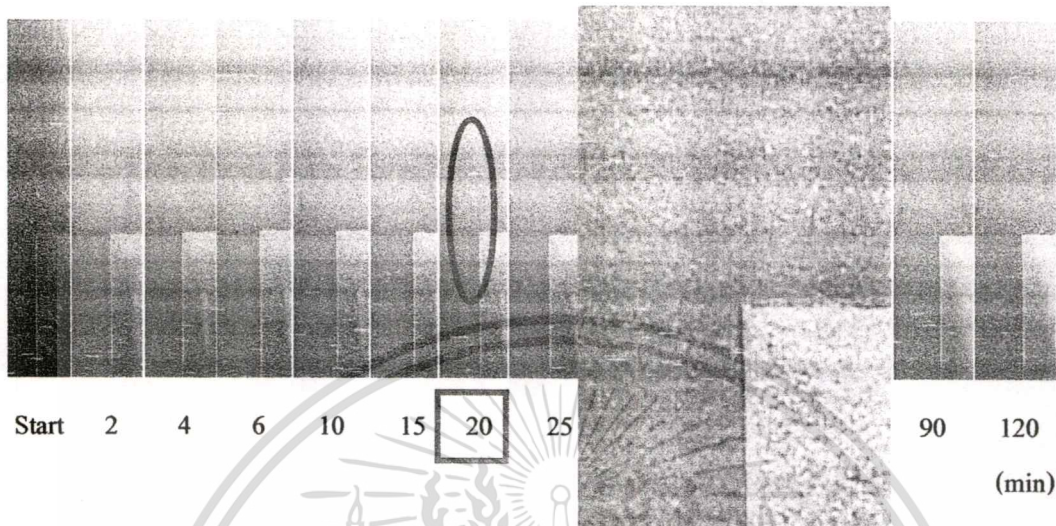
- ความชื้นสัมพัทธ์ 75%



รูปที่ 5.67 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

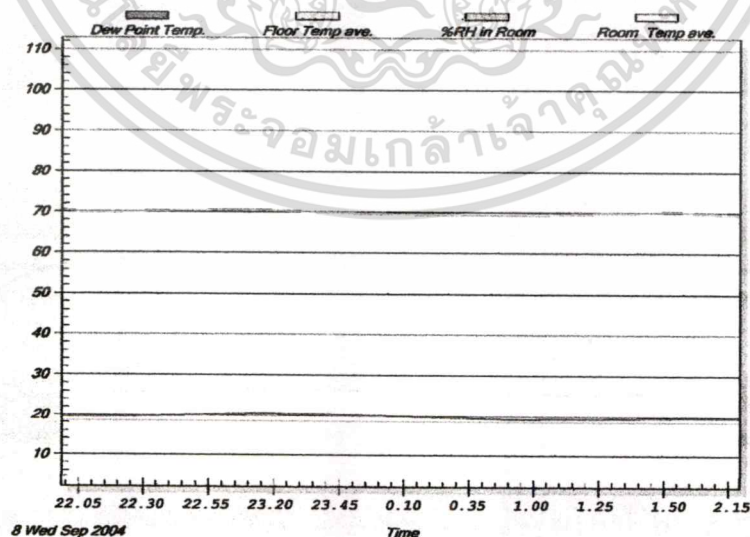
เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C (รูปที่ 5.67) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3 °C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.68



รูปที่ 5.68 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 75%

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75% เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที (รูปที่ 5.68) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้เมื่อเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นมีขนาดประมาณ 0.22 มิลลิเมตร

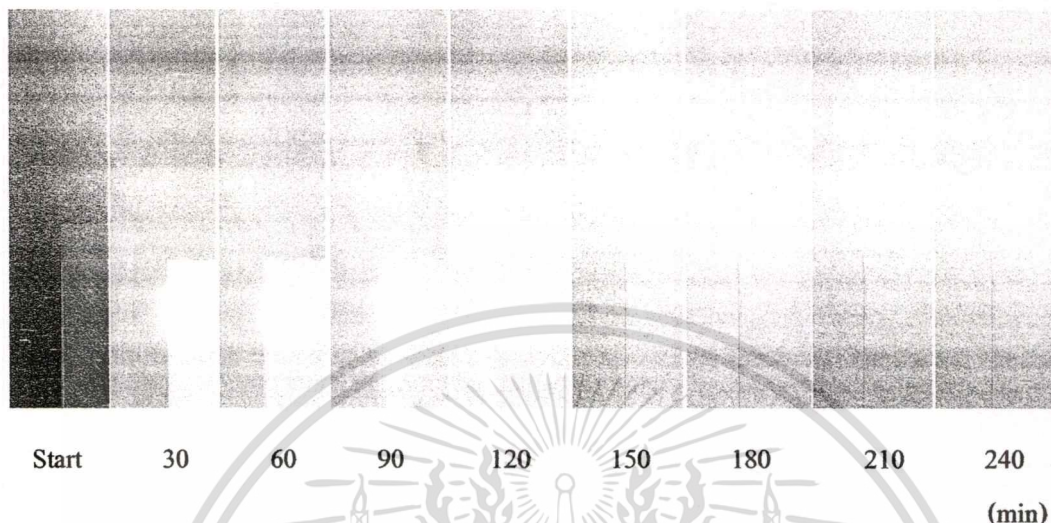
- ความชื้นสัมพัทธ์ 70%



รูปที่ 5.69 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18°C และอุณหภูมิห้องเป็น 26°C (รูปที่ 5.69) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 2°C โดยผลที่จากการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.70



รูปที่ 5.70 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 70%

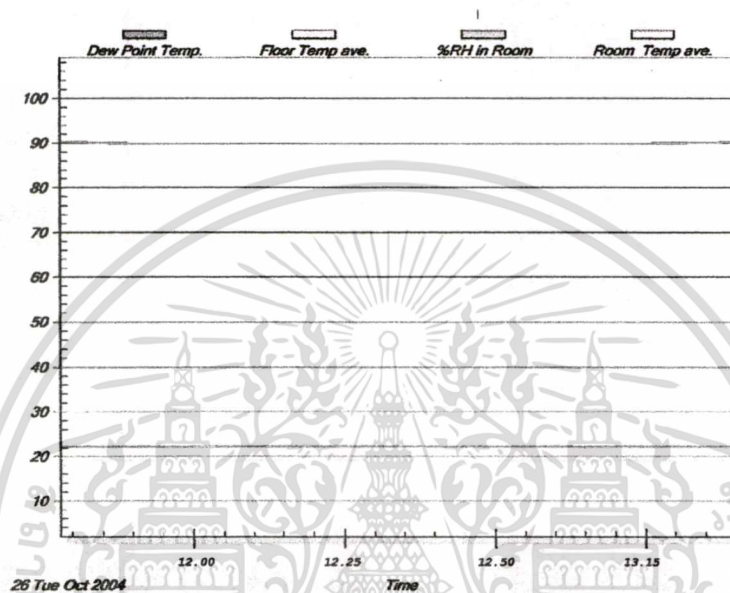
ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70 % (รูปที่ 5.70) โดยเมื่อทำการทดสอบไปนานกว่า 4 ชั่วโมง พบว่าไม่สามารถที่จะจับภาพการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบได้

จากการทดลองที่ผ่านมาเมื่ออุณหภูมิห้องเป็น 26°C อุณหภูมิพื้นผิวเป็น 19°C และ 18°C พบว่าเวลาที่เริ่มเกิดการควบแน่นนั้นจะรวดเร็วกว่ากรณีที่อุณหภูมิห้องเป็น 24°C โดยพบว่าเมื่อผลต่างของอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวเท่ากัน เช่นอุณหภูมิห้อง 26°C อุณหภูมิพื้นผิว 19°C ความชื้นสัมพัทธ์ 80% ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 3°C จะใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น 10 นาที ส่วนกรณีที่อุณหภูมิห้องเป็น 24°C อุณหภูมิพื้นผิว 18°C ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% จะใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นเป็น 14 นาที โดยทั้งสองกรณีนี้มีผลต่างของอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิพื้นผิวที่เท่ากัน

ที่เป็นอย่างนี้เนื่องมาจาก เมื่ออุณหภูมิห้องสูงขึ้น ในห้องทดสอบสามารถที่จะรับไอน้ำได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาการเกิดการควบแน่นเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่อุณหภูมิห้องทดสอบเป็น 26°C อุณหภูมิพื้นผิวเป็น 19°C และ 18°C เวลาที่เริ่มเกิดการควบแน่นจะเป็นระยะเวลาเดียวกัน แต่ในกรณีที่อุณหภูมิพื้นผิวเป็น 18°C ขนาดของเม็คน้ำที่วัดได้ตอนเริ่มต้นเกิดการควบแน่นจะมีขนาดใหญ่กว่ากรณีที่อุณหภูมิพื้นผิวเป็น 19°C

5.3 ทดสอบโดยพิจารณาถึงความเร็วลม

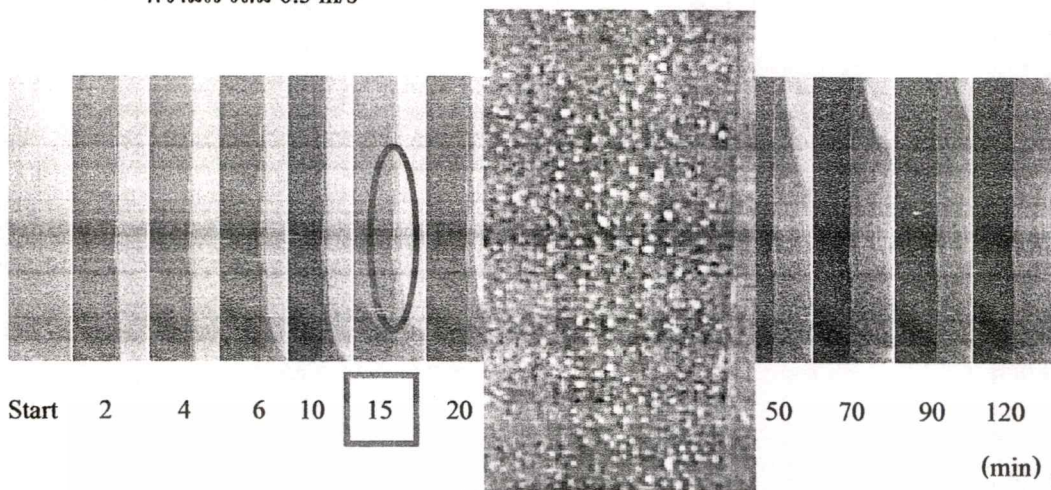
ในการทดสอบความเร็วลมได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 24°C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19°C รวมถึงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องเป็น 90% โดยจะทำการเปลี่ยนความเร็วลมไปเป็นค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.5 m/s ถึง 2.0 m/s (ไม่มีภาระความร้อนจากแสง) โดยเพิ่มความเร็วลมขึ้นครั้งละ 0.5 m/s กราฟที่ได้จากการปรับสภาวะตามเงื่อนไข จะแสดงดังรูปที่ 5.71



รูปที่ 5.71 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90%

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 90% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19°C และอุณหภูมิห้องเป็น 24°C (รูปที่ 5.71) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 3°C

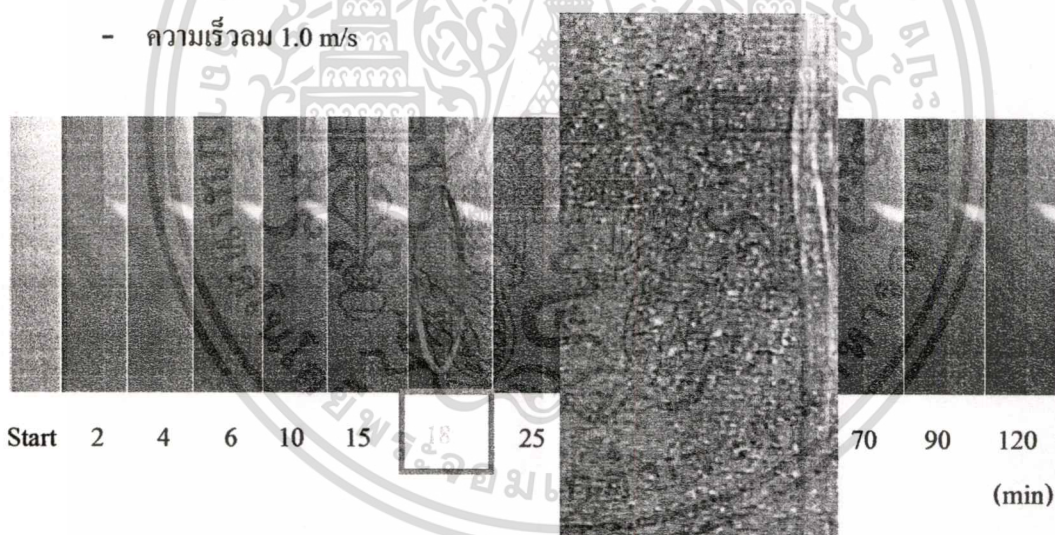
- ความเร็วลม 0.5 m/s



รูปที่ 5.72 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 0.5 m/s

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 0.5 m/s หลังจากการทดสอบผ่านไป 15 นาที (รูปที่ 5.72) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น

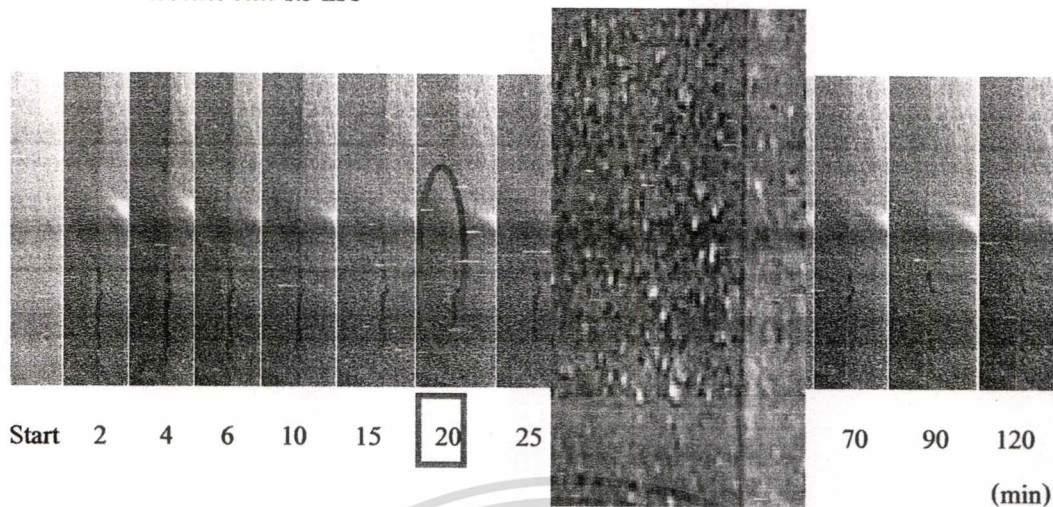
- ความเร็วลม 1.0 m/s



รูปที่ 5.73 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 1.0 m/s

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 1.0 m/s หลังจากการทดสอบผ่านไป 18 นาที (รูปที่ 5.73) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น

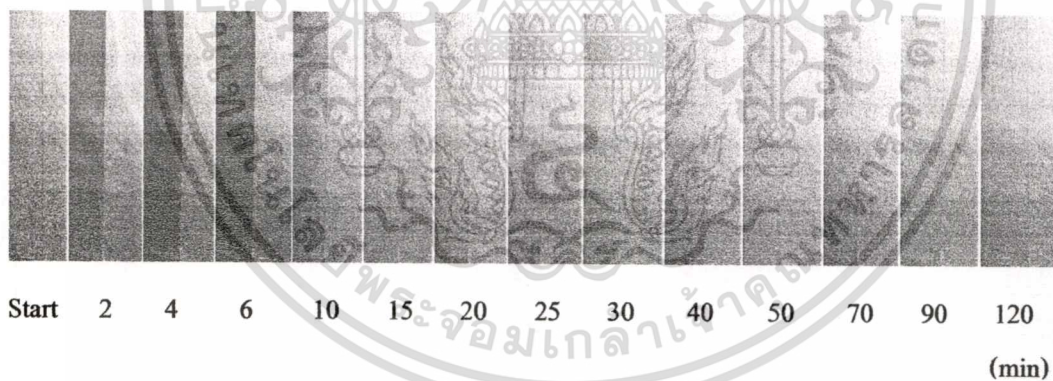
- ความเร็วลม 1.5 m/s



รูปที่ 5.74 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 1.5 m/s

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 1.5 m/s หลังจากการทดสอบผ่านไป 20 นาที (รูปที่ 5.74) พื้นผิวทดสอบจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้น

- ความเร็วลม 2.0 m/s



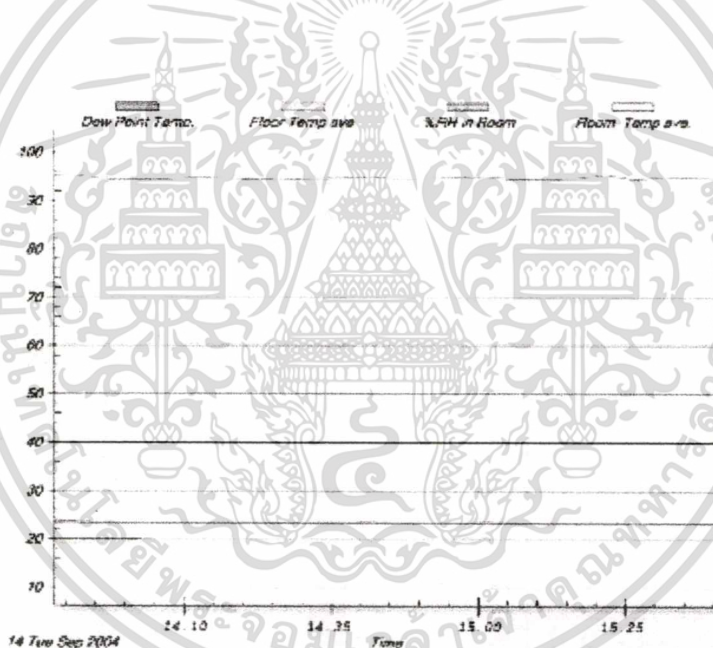
รูปที่ 5.75 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 2.0 m/s

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อความเร็วลมเป็น 1.5 m/s หลังจากการทดสอบผ่านไป 120 นาที (รูปที่ 5.75) พื้นผิวทดสอบคงยังไม่เกิดการควบแน่นขึ้น

จากการทดสอบอิทธิพลของความเร็วม ที่เห็นได้ชัดเจนคือจะมีผลต่อการเกิดการระเหยของน้ำ ที่เกิดการควบแน่นบนผิววัสดุ โดยถ้าความเร็วมสูงจะมีการพัดพาเอาไอน้ำที่ปกคลุมอยู่เหนือพื้นผิว วัสดุไปได้ดีกว่ากรณีที่มีความเร็วมต่ำ ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวหน้าของวัสดุ กับสิ่งแวดล้อม เช่น ที่ความเร็วม 0.5 m/s การเกิดการควบแน่นบนพื้นผิววัสดุจะเกิดในอัตราที่ ใกล้เคียงกับเงื่อนไขปกติที่ไม่พิจารณาความเร็วมมาเกี่ยวข้อง ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป เม็ดน้ำที่เกิดขึ้น สามารถที่จะรวมตัวกัน ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะต่างจากการทดสอบที่ความเร็วมสูงขึ้นเป็น 2.0 m/s จะเห็นได้ว่า บนพื้นผิวทดสอบจะไม่เกิดการควบแน่น และแห้งสนิท

5.4 ทดสอบโดยมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ โดยปราศจากเงาบังพื้นผิวทดสอบ

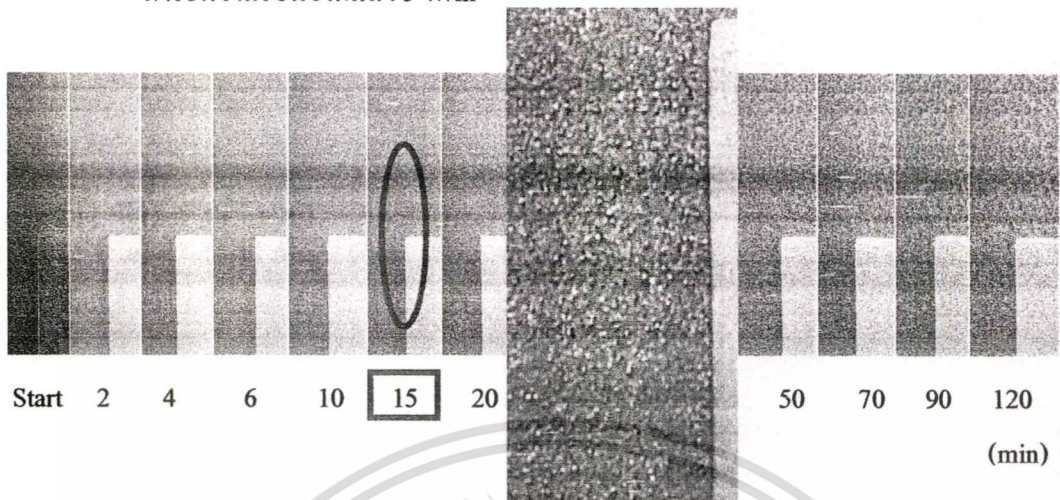
การทดสอบจะทำที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง 24 °C อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุ 19 °C ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบเป็น 95% โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าภาระความร้อนจากแสงที่มากระทำ ตั้งแต่ 5W/m² ถึง 20W/m² โดยได้ทำการเพิ่มขึ้นครั้งละ 5W/m²



รูปที่ 5.76 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C และอุณหภูมิห้องเป็น 24 °C (รูปที่ 5.76) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4 °C

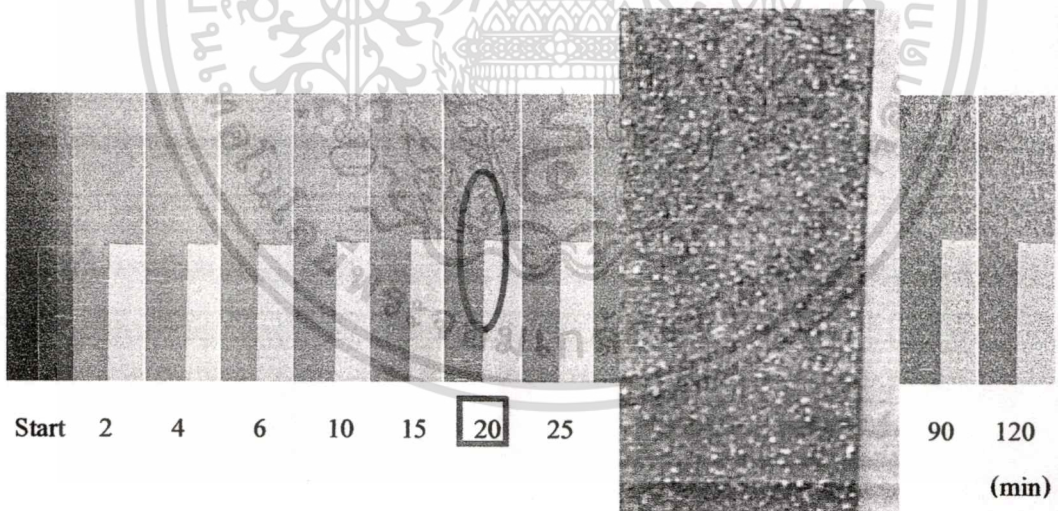
- ภาวะความร้อนจากแสง 5 W/m²



รูปที่ 5.77 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาวะความร้อนจากแสงมากระทำ 5 W/m²

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาวะความร้อนจากแสงมากระทำ 5 W/m² หลังจากการทดสอบผ่านไป 15 นาที (รูปที่ 5.77) จึงจะเริ่มเกิดการควมแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุ

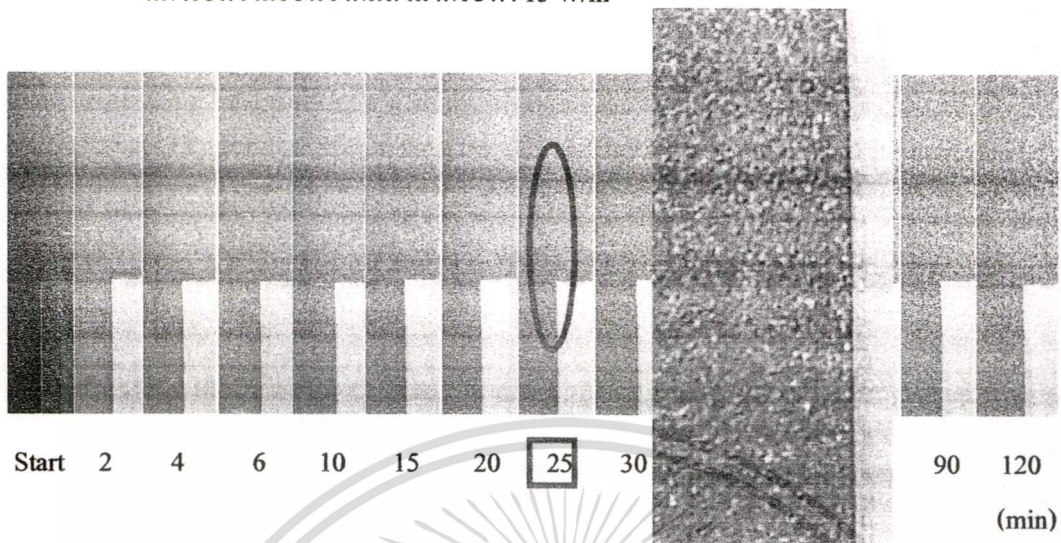
- มีภาวะความร้อนจากแสงมากระทำ 10 W/m²



รูปที่ 5.78 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาวะความร้อนจากแสงมากระทำ 10 W/m²

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาวะความร้อนจากแสงมากระทำ 10 W/m² หลังจากการทดสอบผ่านไป 20 นาที (รูปที่ 5.78) จึงจะเริ่มเกิดการควมแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

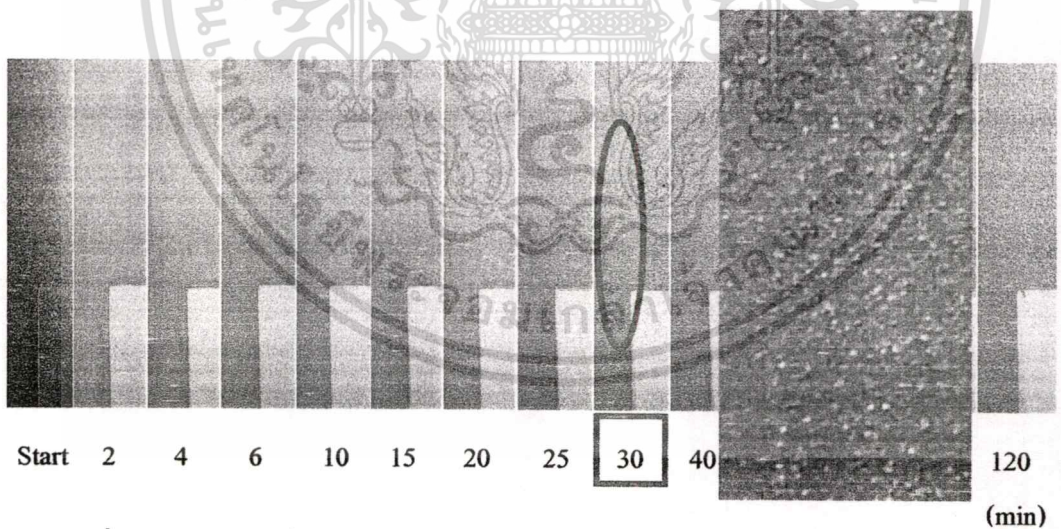
- มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 15 W/m^2



รูปที่ 5.79 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 15 W/m^2

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 15 W/m^2 หลังจากการทดสอบผ่านไป 25 นาที (รูปที่ 5.79) จึงจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

- มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 20 W/m^2



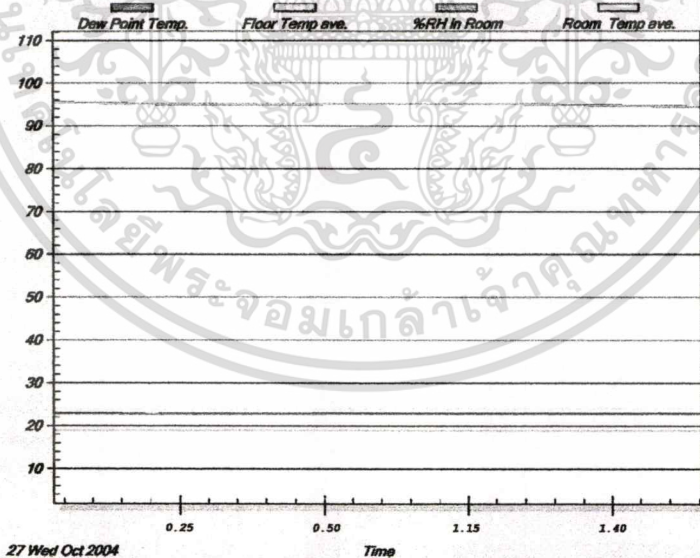
รูปที่ 5.80 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 20 W/m^2

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 20 W/m^2 หลังจากการทดสอบผ่านไป 30 นาที (รูปที่ 5.80) จึงจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

เมื่อห้องทดสอบได้รับภาระความร้อนจากแสงมากระทำจะทำให้อุณหภูมิของห้องสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้น จะทำน้ำระเหยตัวได้ง่าย และพบว่าพื้นผิวที่ทำการทดสอบจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะมากหรือน้อยนั้น จะขึ้นอยู่กับระดับภาระจากแสงที่มากระทำ โดยจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มภาระความร้อนจากแสงมากระทำให้สูงขึ้น ระยะเวลาในการเริ่มต้นเกิดการควบแน่นจะนานขึ้น เช่น ที่ ภาระความร้อนจากแสง 5 W/m^2 การเกิดควบแน่นของน้ำบนพื้นผิวทดสอบจะดำเนินต่อไป ใกล้เคียงกับสภาวะปกติ เมื่อไม่มีภาระความร้อนมาเกี่ยวข้อง เมื่อเวลาผ่านไปเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นจะมีการรวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ โดยที่สภาวะนี้การระเหยตัวของน้ำจะยังคงต่ำอยู่ และอิทธิพลของรังสีความร้อนที่มีผลต่อการระเหยของน้ำยังมีน้อย ในทำนองเดียวกัน เมื่อให้ภาระความร้อนจากแสงเพิ่มขึ้นเป็น 20 W/m^2 พบว่าระยะเวลาการเริ่มเกิดการควบแน่นจะนานขึ้น การเกิดเมื่อน้ำบนพื้นผิวทดสอบจะเป็นไปอย่างช้า ๆ และการกระจายตัวของเมื่อน้ำที่เกิดจากการควบแน่นจะยังไม่ปกคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวของวัสดุทดสอบ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปขนาดเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นยังมีขนาดไม่ใหญ่มาก เมื่อเทียบกับสภาวะที่มีภาระจากแสงต่ำ ๆ อันนี้เป็นเพราะการระเหยของน้ำบนผิววัสดุทดสอบเป็นไปได้ดีกว่ากรณีที่มีภาระความร้อนจากแสงต่ำ

5.5 ทดสอบโดยมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ และมีเงาบังพื้นผิวทดสอบ

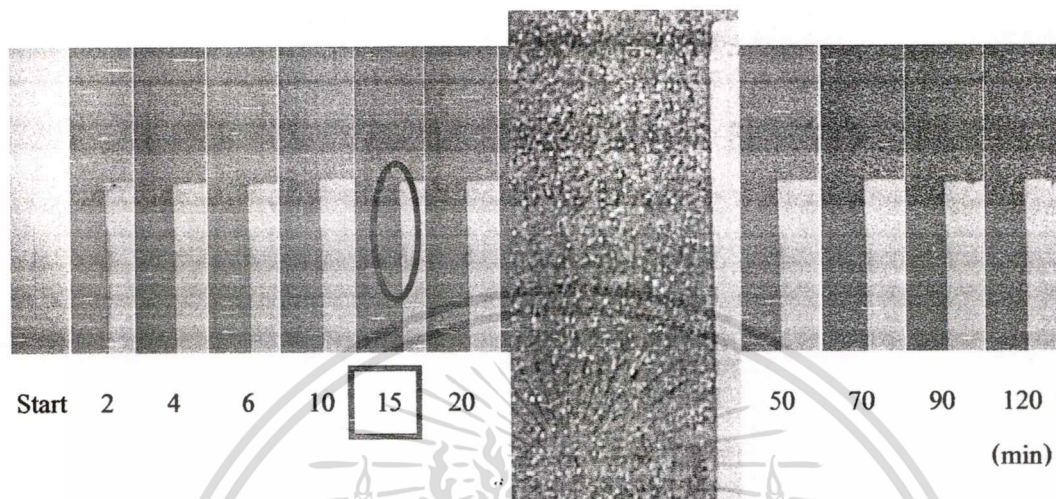
การทดสอบในกรณีนี้ จะทำการทดสอบโดยมีเงื่อนไขแบบเดียวกันกับการทดสอบที่มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำโดยปราศจากเงาบังพื้นผิวทดสอบ ในการทดสอบจะใช้แผ่นวัสดุทึบแสงมาวางไว้ที่ตำแหน่งเหนือแผ่นวัสดุทดสอบ 30 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดเงาปกคลุมพื้นผิววัสดุทดสอบ



รูปที่ 5.81 กราฟแสดงการปรับตั้งระบบเมื่อมีภาระจากแสงมากระทำ 5 W/m^2

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19°C และอุณหภูมิห้องเป็น 24°C (รูปที่ 5.81) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4°C

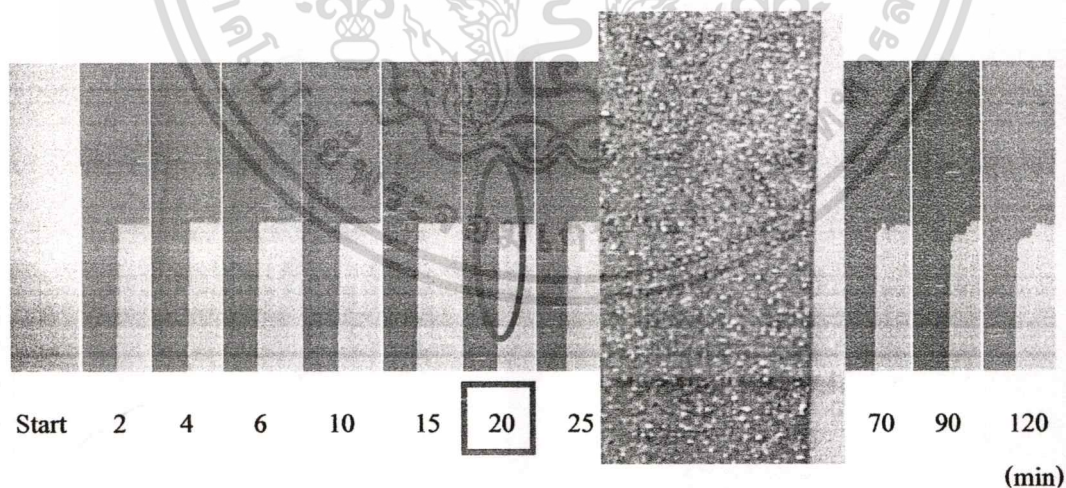
- มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 5 W/m^2



รูปที่ 5.82 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 5 W/m^2

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 5 W/m^2 หลังจากการทดสอบผ่านไป 15 นาที (รูปที่ 5.82) จึงจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

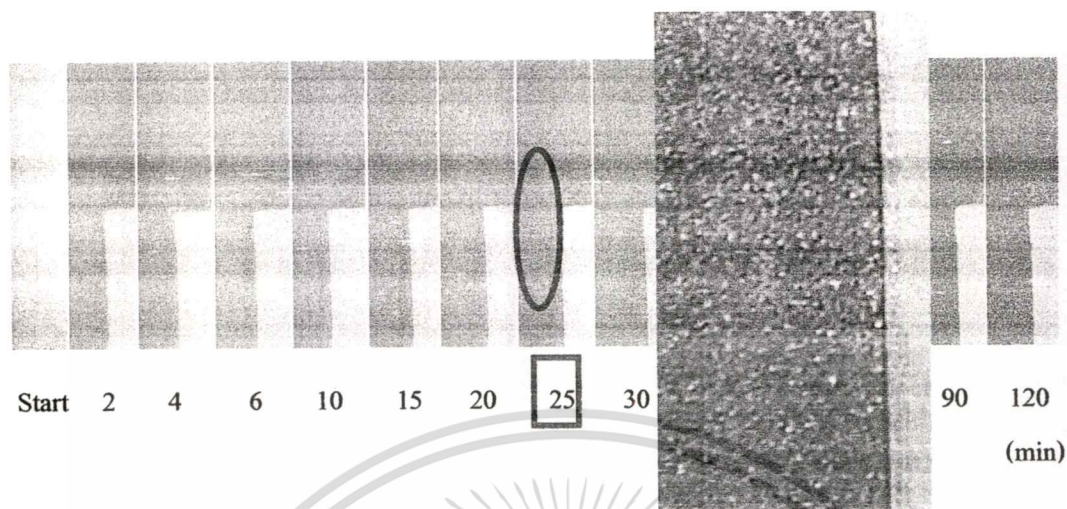
- มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 10 W/m^2



รูปที่ 5.83 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 10 W/m^2

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 10 W/m^2 หลังจากการทดสอบผ่านไป 20 นาที (รูปที่ 5.83) จึงจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

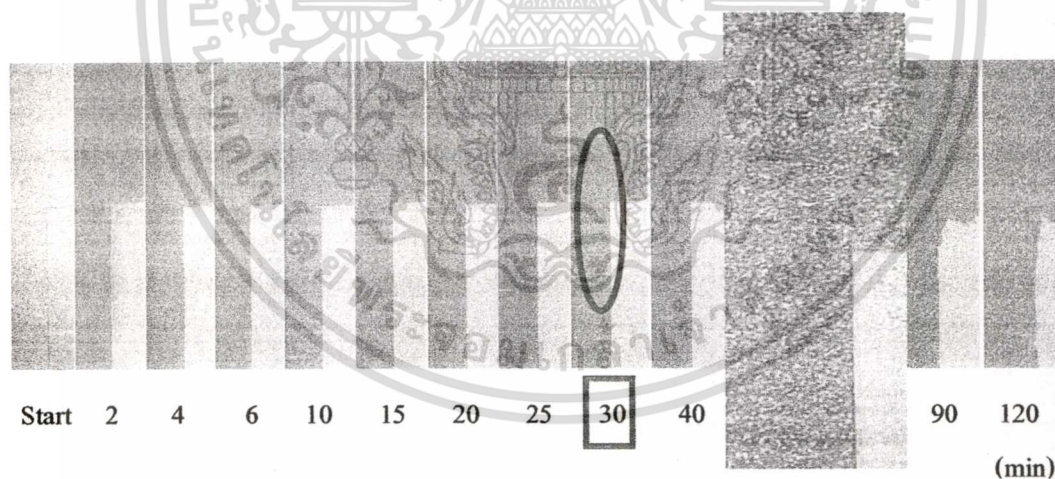
- มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 15 W/m^2



รูปที่ 5.84 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 15 W/m^2

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 15 W/m^2 หลังจากการทดสอบผ่านไป 25 นาที (รูปที่ 5.84) จึงจะเริ่มเกิดการควมแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

- มีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 20 W/m^2



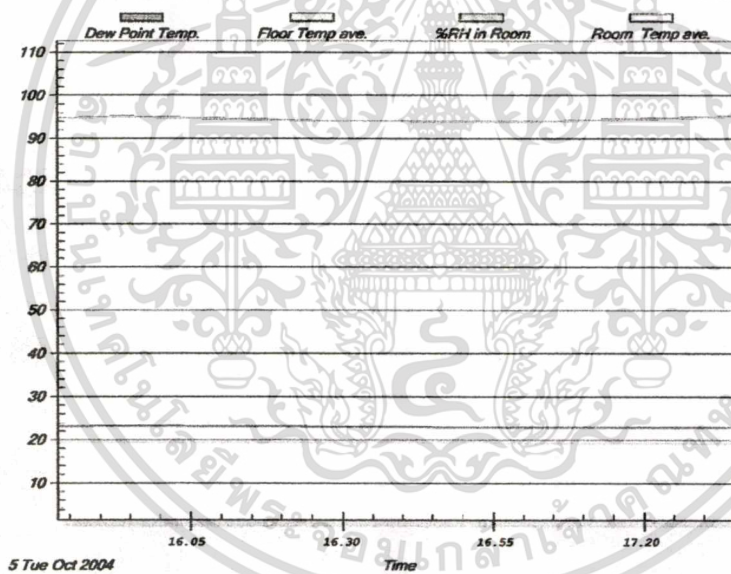
รูปที่ 5.85 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 20 W/m^2

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อมีภาระความร้อนจากแสงมากระทำ 20 W/m^2 หลังจากการทดสอบผ่านไป 30 นาที (รูปที่ 5.85) จึงจะเริ่มเกิดการควมแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

การทดสอบสำหรับกรณีที่มีเงามบังพื้นผิวทดสอบ พบว่าระยะเวลาการเริ่มเกิดการควบแน่นจะเท่ากับกรณีที่ไม่มีเงามบังวัสดุทดสอบ สิ่งที่แตกต่างกันคือเมื่อมีเงามบังพื้นผิวทดสอบ การรวมตัวกันของเม็ดน้ำที่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวจะเป็นไปได้ดีกว่า และมีขนาดใหญ่กว่ากรณีแรกที่ไม่มีเงามบังพื้นผิวทดสอบ โดยการที่มีวัสดุมาปกคลุมทำให้เกิดเงามบังพื้นผิวทดสอบนั้นจะช่วยให้ลดรังสีความร้อนที่แผ่มากระทบกับพื้นผิวทดสอบได้ส่วนหนึ่ง ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่ผิวหน้าของวัสดุทดสอบกับสิ่งแวดล้อม โดยจะมีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำที่เกิดขึ้น

5.6 ทดสอบโดยทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุปูพื้น

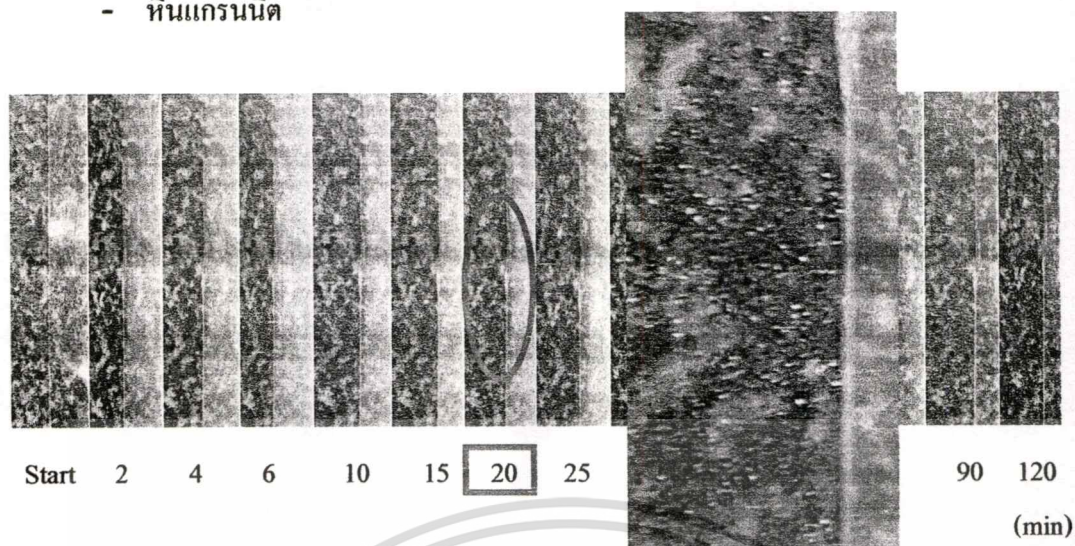
การทดสอบในครั้งนี้ จะทำการทดสอบภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิห้องเป็น 24°C อุณหภูมิพื้นเป็น 19°C และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบเป็น 95 % โดยทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุทดสอบเป็นดังต่อไปนี้คือ หินแกรนิต หินอ่อน และหินกาบ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของวัสดุต่อการเกิดการควบแน่น (ไม่มีภาวะความร้อนจากแสงมากระทำ)



รูปที่ 5.86 กราฟแสดงการปรับเงื่อนไขการทดสอบเมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุ

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19°C และอุณหภูมิห้องเป็น 24°C (รูปที่ 5.86) จากกราฟพบว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบต่างกันอยู่ 4°C

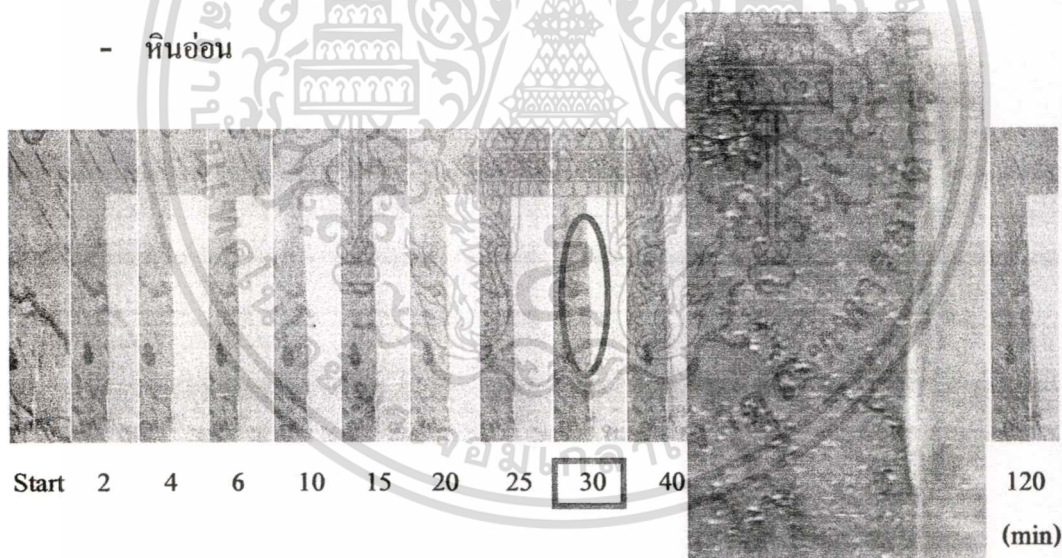
- หินแกรนิต



รูปที่ 5.87 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบบนพื้นหินแกรนิต

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อวัสดุทดสอบเป็นหินแกรนิต หลังจากการทดสอบผ่านไป 20 นาที (รูปที่ 5.87) จึงจะเริ่มเกิดการควมแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

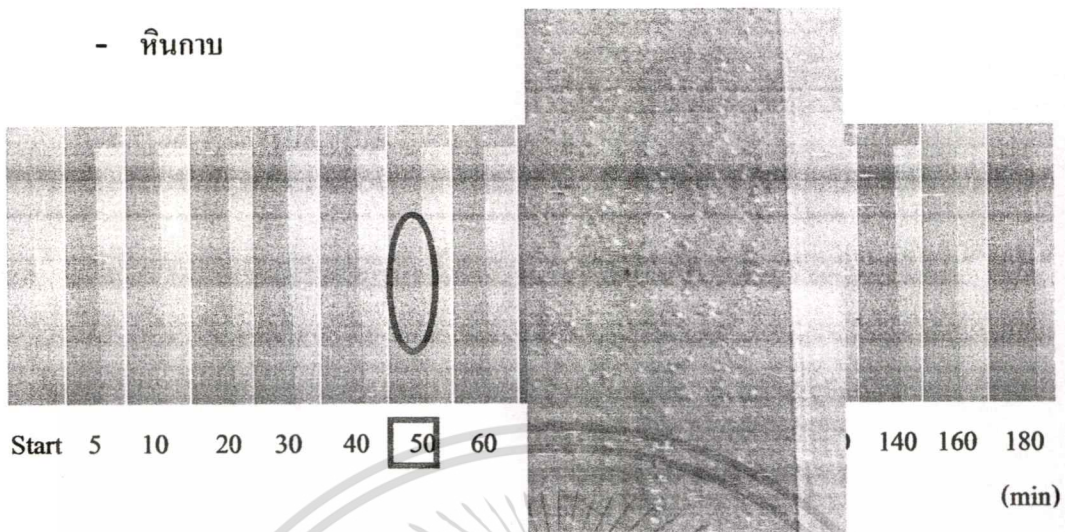
- หินอ่อน



รูปที่ 5.88 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบบนพื้นหินอ่อน

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อวัสดุทดสอบเป็นหินอ่อน หลังจากการทดสอบผ่านไป 30 นาที (รูปที่ 5.88) จึงจะเริ่มเกิดการควมแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

- หินกาบ



รูปที่ 5.89 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบบนพื้นหินกาบ

ผลที่ได้จากการทดสอบเมื่อวัสดุทดสอบเป็นหินกาบ หลังจากการทดสอบผ่านไป 50 นาที (รูปที่ 5.89) จึงจะเริ่มเกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิววัสดุทดสอบ

จากการทดลองเปลี่ยนชนิดของวัสดุปูพื้น ดังแสดงในรูปที่ 5.87 ถึงรูปที่ 5.89 พบว่า เมื่อใช้วัสดุทดสอบเป็น หินแกรนิต จะใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวนั้นเป็น 20 นาที ซึ่ง เมื่อเปลี่ยนวัสดุทดสอบมาเป็น หินอ่อน เวลาที่ใช้ในการเริ่มเกิดการควบแน่นนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็น 30 นาที ส่วนในกรณีของหินกาบนั้น เวลาที่สามารถวัดขนาดของเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นได้จะใช้เวลาถึง 50 นาที ซึ่งสาเหตุที่ใช้เวลาแตกต่างกันนั้นเนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าคุณสมบัติการนำความร้อนที่ต่างกัน รวมถึงความพรุนภายในวัสดุด้วย โดยพบว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, K) สูง นั้น จะมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำ (Thermal Resistance, R) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นบนผิวหน้าของวัสดุเร็วกว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ รวมไปถึงคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวกับความพรุนภายในเนื้อวัสดุนั้น พบว่า วัสดุที่มีความพรุนมาก เนื้อของวัสดุจะสามารถรับน้ำได้ดีกว่าวัสดุที่มีความพรุนน้อย ซึ่งจะมีผลให้การเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวเป็นไปได้ไม่ดี เท่ากับวัสดุที่มีความพรุนของโครงสร้างน้อยกว่า

ผลการทดลองทั้งหมดที่ได้สามารถนำมาสรุปในรูปแบบของตารางและกราฟดังจะแสดงในตารางและรูปภาพต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 24 °C

อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ (°C)	RH ในห้องทดสอบ (%)	เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น (นาที)
19	95	10
	90	14
	85	-
18	95	6
	90	10
	85	15
	80	-
17	95	4
	90	6
	85	12
	80	18
	75	-
16	95	3
	90	5
	85	10
	80	14
	75	20
	70	-
	15	95
90		4
85		8
80		12
75		18
70		-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นที่อุณหภูมิห้องทดสอบ 26 °C

อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ (°C)	RH ในห้องทดสอบ (%)	เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น (นาที)
19	95	2
	90	4
	85	6
	80	10
	75	-
18	95	2
	90	4
	85	6
	80	10
	75	20
	70	-

ตารางที่ 5.3 แสดงเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของความเร็วม

อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	RH ในห้องทดสอบ (%)	ความเร็วม (m/s)	เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น (นาที)
19	90	0.5	15
		1.0	18
		1.5	20
		2.0	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

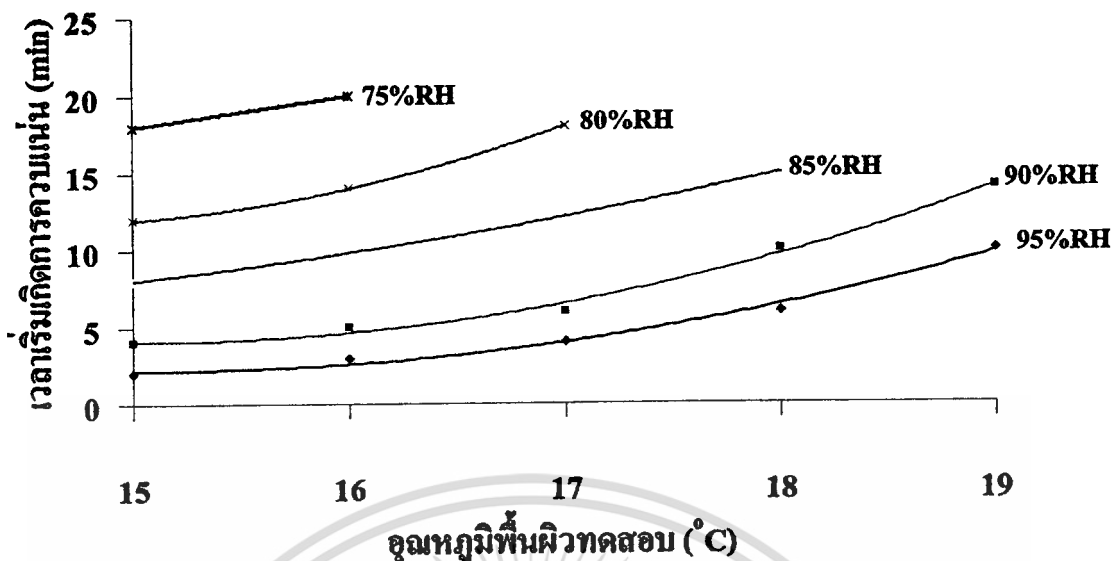
ตารางที่ 5.4 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่นเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของแสงที่มากกระทำบนผิวของวัสดุ

อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	RH ในห้องทดสอบ (%)	ความเร็วลม (m/s)	เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น (นาที)
19	95	5	15
		10	20
		15	25
		20	30

ตารางที่ 5.5 แสดงเวลาในการเกิดการควบแน่น เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดของวัสดุ

ชนิดของวัสดุทดสอบ	เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น (นาที)
หินแกรนิต	20
หินแกรนิตอ่อน	30
หินกาบ	50

(หมายเหตุ : ในการทดลองนี้ sensor ที่ใช้ในการตรวจจับการเกิดการควบแน่น มีความสามารถจับขนาดของเม็ดน้ำที่เกิดจากการควบแน่นได้ เมื่อเม็ดน้ำมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.22 mm ขึ้นไป แต่ความเป็นจริงการเกิดการควบแน่นจะเกิดขึ้นก่อนที่เม็ดน้ำจะมีขนาดเป็น 0.22 mm และการวัดขนาดของเม็ดน้ำนั้น จะมีค่า error ของการวัดอยู่เล็กน้อย แต่เป็นค่าที่สามารถยอมรับได้)



รูปที่ 5.90 แสดงกราฟระหว่างเวลาและอุณหภูมิพื้นผิว เมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบเป็น 24 °C

ผลที่ได้จากการทดลองเมื่ออุณหภูมิห้องทดสอบเป็น 24 °C และได้ลดอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ ตั้งแต่ 19 °C จนถึง 15 °C ข้อมูลที่ได้นำมาแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 5.90 ซึ่งแกน x แสดงค่าของอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ แกน y แสดงเวลาที่เริ่มเกิดการควบแน่น

เส้นกราฟที่ได้ (รูปที่ 5.90) เป็นเส้นแนวโน้มของข้อมูล โดยได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ช่วยในการหาเส้นแนวโน้มและสมการ จะแสดงดังต่อไปนี้

$$95\%RH \quad t = 0.5T^2 - 11.5T + 116.2 \quad (5.1)$$

$$R^2 = 0.99$$

$$90\%RH \quad t = 0.64T^2 - 19.37T + 149.8 \quad (5.2)$$

$$R^2 = 0.99$$

$$85\%RH \quad t = 0.25T^2 - 5.95T + 46.05 \quad (5.3)$$

$$R^2 = 0.99$$

$$80\%RH \quad t = T^2 - 29T + 222 \quad (5.4)$$

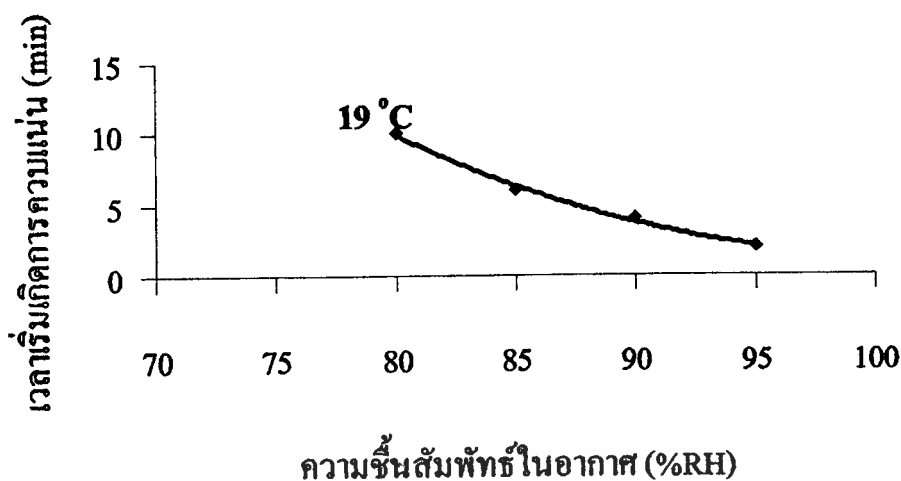
$$R^2 = 1$$

ให้ t คือ เวลาเริ่มเกิดการควบแน่น (min)

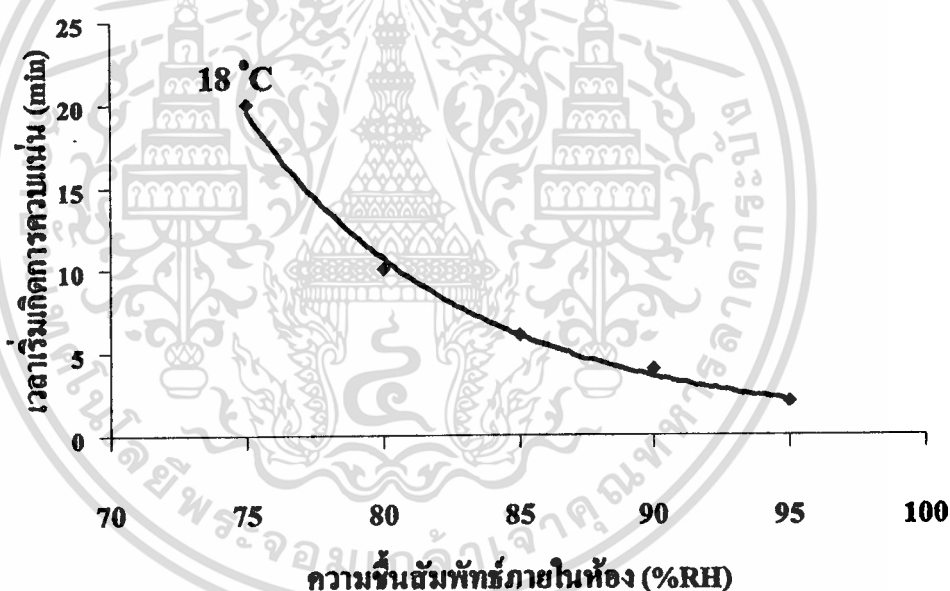
T คือ อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ (°C)

R^2 คือ ค่าความเชื่อมั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.91 แสดงกราฟระหว่างเวลาและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C



รูปที่ 5.92 แสดงกราฟระหว่างเวลาและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 °C

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิห้องเป็น 26 °C ผลที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงเป็นกราฟ ได้ดังรูปที่ 5.91 และรูปที่ 5.92 แกน x แสดงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายในห้องทดสอบ แกน y แสดงเวลาเริ่มเกิดการควบแน่น ในการทดลองจะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 2 ค่าด้วยกันคือ 19 °C และ 18 °C ซึ่งผลการที่ได้จะเป็นดังต่อไปนี้

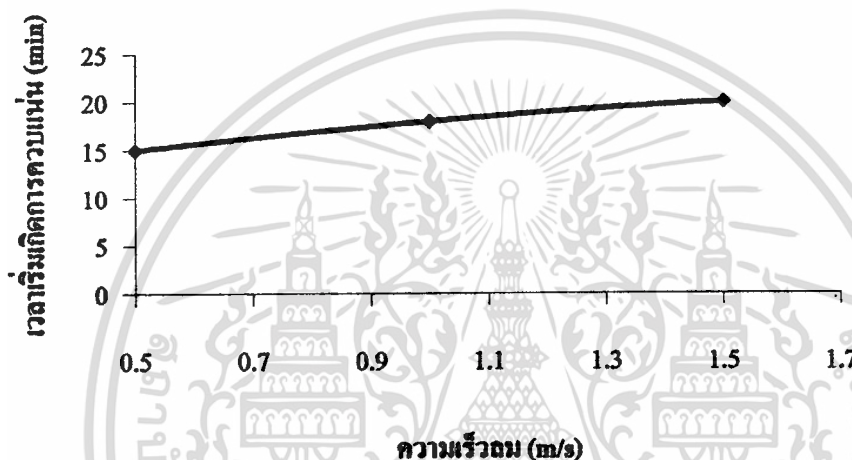
$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ } 19^\circ\text{C} \quad t &= 0.02W^2 - 4.02W + 203.5 & (5.5) \\ R^2 &= 0.99 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ } 18^\circ\text{C} \quad t &= 0.05W^2 - 9.58W + 448.8 & (5.6) \\ R^2 &= 0.99 \end{aligned}$$

ให้ t คือ เวลาเริ่มเกิดการควบแน่น (min)

W คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบ (%RH)

R^2 คือ ค่าความเชื่อมั่น



รูปที่ 5.93 แสดงกราฟระหว่างเวลาเริ่มเกิดการควบแน่นและความเร็วลม

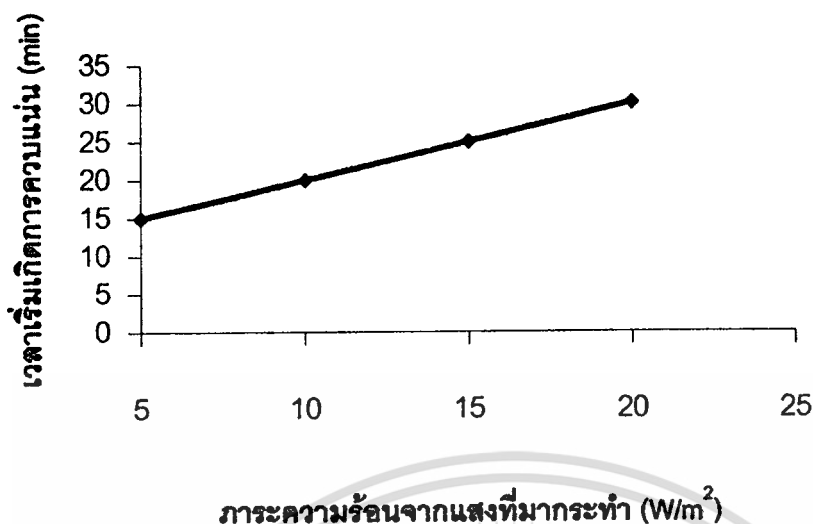
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มเกิดการควบแน่นกับความเร็วลมที่พัดผ่านพื้นผิววัสดุทดสอบ (รูปที่ 5.93) โดยที่อุณหภูมิห้องทดสอบเป็น 24°C อุณหภูมิพื้นผิว 19°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% สมการของเส้นแนวโน้มที่ได้จะเป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} t &= -2v^2 + 9v + 11 & (5.7) \\ R^2 &= 1 \end{aligned}$$

ให้ t คือ เวลาเริ่มเกิดการควบแน่น (min)

v คือ ความเร็วลมที่พัดผ่านพื้นผิววัสดุ (m/s)

R^2 คือ ค่าความเชื่อมั่น



รูปที่ 5.94 แสดงกราฟระหว่างเวลาเริ่มเกิดการควบแน่นและภาระจากแสงที่มากกระทำ

รูปที่ 5.94 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มเกิดการควบแน่นกับภาระจากแสงที่มากกระทำ โดยได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง $24^{\circ}C$ อุณหภูมิพื้นผิว $19^{\circ}C$ และ ความชื้นสัมพัทธ์ 95% สมการของเส้นแนวโน้มที่ได้จะแสดงดังต่อไปนี้

$$t = \frac{-4E - 16q^2 + q}{1} + 10 \quad (5.8)$$

$$R^2 = 1$$

ให้ t คือ เวลาเริ่มเกิดการควบแน่น (min)
 q คือ ภาระความร้อนจากแสงที่มากกระทำบนพื้นผิววัสดุ (W/m^2)
 R^2 คือ ค่าความเชื่อมั่น

(หมายเหตุ : กราฟทั้งหมดที่ได้จะเป็นเส้นแนวโน้มโดยเกิดจากการใช้สมการโพลีโนเมียล หรือ สมการกำลังสองในการประมาณค่า โดยได้ใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ช่วย ในการสร้างสมการและเส้นแนวโน้มขึ้นมา ซึ่งค่า R^2 คือค่าความเชื่อมั่นของเส้นแนวโน้มกับข้อมูลจริงเมื่อใช้สมการโพลีโนเมียลในการสร้างเส้นกราฟ)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงลักษณะการเกิดการควบแน่นบนวัสดุพื้น ซึ่งได้ทำการทดลองในหลายกรณีด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพื้นผิว อุณหภูมิห้อง ภาระจากแสง ความเร็วลม รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุ ซึ่งจากผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลสามารถสรุปออกมาเป็นประเด็นที่สำคัญที่ได้จากการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ชีตจำกัดของระบบการทำความเย็นโดยการฝังท่อน้ำไว้ใต้พื้น ในกรณีต่าง ๆ โดยปราศจากปัญหาพื้นควบแน่นเป็นดังนี้
 - กรณีที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16, 17, 18 และ 19 °C โดยที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 24 °C พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70, 75, 80 และ 85 % นั้นจะไม่เกิดการควบแน่นขึ้นบนพื้นผิวทดสอบ ส่วนกรณีของอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 15 °C พบว่า ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ในช่วงแรกนั้นเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นจะขนาดเล็กมาก ๆ ไม่สามารถวัดขนาดได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปผ่านเมื่อน้ำที่อยู่บนพื้นผิวจะระเหยไปอย่างรวดเร็วพื้นผิวทดสอบจะแห้ง
 - การที่เพิ่มอุณหภูมิห้องทดลองไปเป็น 26 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18 และ 19 °C พบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 และ 75% จะไม่มีเมื่อน้ำเกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบ
 - เมื่อมีการปรับความเร็วลม พบว่าที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C อุณหภูมิห้อง 24 °C ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลอง 90 % ที่ความเร็วลม 2.0 m/s พื้นผิวทดสอบจะแห้งสนิท ไม่มีเมื่อน้ำเกิดขึ้น
2. ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่น จะแตกต่างกันไปซึ่งจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง โดยจะแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
 - กรณีที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 16, 17, 18 และ 19 °C โดยที่อุณหภูมิห้องทดลองเป็น 24 °C จะพบว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน ระยะเวลาการเกิดการควบแน่นจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ ถ้าผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองมาก ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นจะเร็วขึ้น เช่นในกรณีที่ ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 19 °C และ 18 °C พบว่าผลต่างของอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อุณหภูมิพื้นผิวเป็น 4°C และ 5°C ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18°C จะใช้เวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นน้อยกว่า
- การที่เพิ่มอุณหภูมิห้องทดสอบไปเป็น 26°C เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวทดสอบเป็น 18°C และ 19°C ระยะเวลาการเกิดการควบแน่นต่างกันน้อยมาก
 - ในการปรับความเร็วลม พบว่าเวลาที่เริ่มเกิดการควบแน่นจะขึ้นอยู่กับกระแสลมที่พัดผ่าน โดยถ้ากระแสลมที่พัดผ่านพื้นผิวมีค่าสูงระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นจะเพิ่มขึ้น จนถึงไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิว เมื่อความเร็วลมสูง จะสามารถพัดพาเอาน้ำที่อยู่เหนือพื้นผิวทดสอบไปได้อย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการระเหยมากกว่าอัตราการควบแน่น พื้นผิวทดสอบจะแห้งสนิท
 - เมื่อทำการเปลี่ยนวัสดุทดสอบ พบว่าระยะเวลาการเกิดการควบแน่นบนผิวหน้าของวัสดุ นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุซึ่งถ้าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อน (k) ที่สูงจะมีผลทำให้ระยะเวลาในการเริ่มเกิดการควบแน่นเร็วกว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ
 - กรณีที่มีภาระจากแสงมากกระทำ ระยะเวลาในการควบแน่นจะขึ้นอยู่กับระดับภาระจากแสง ที่มากกระทำ ซึ่งถ้าภาระจากแสงมาก ระยะเวลาที่จะเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบจะเกิดได้ช้ากว่ากรณีที่มีภาระจากแสงต่ำกว่า เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนทำให้อัตราการระเหยเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งถ้าอัตราการระเหยต่ำกว่าอัตราการควบแน่น จึงจะมีเมื่อน้ำเกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบ
 - ส่วนกรณีที่มีเงาบบังวัสดุทดสอบ ระยะเวลาที่เริ่มเกิดการควบแน่น มีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีที่ไม่มีการบับัง โดยเงาจะช่วยลดผลจากการแผ่รังสีลงได้บางส่วน โดยจะทำให้อัตราการระเหยของน้ำที่เกิดจากการควบแน่นลดลงมากกว่ากรณีที่ไม่มีเงาบบัง ดังนั้น การสะสมกันของเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นจึงมีมากกว่า

3. อิทธิพลของความเร็วลม ภาระจากแสง และชนิดของวัสดุที่มีผลต่อการเกิดการควบแน่นจะเป็นดังต่อไปนี้

- กรณีที่พิจารณาอิทธิพลของความเร็วลม พบว่ากระแสลมมีผลต่อการพัดพาเอาน้ำ ที่อยู่บนพื้นผิวทดสอบ โดยเกิดจากการควบแน่น ไป ซึ่งถ้ากระแสลมแรง เมื่อเวลาผ่านไปบนพื้นผิวทดสอบจะเริ่มแห้ง และการเกิดการควบแน่นจะน้อยลงเรื่อย ๆ เช่น ในกรณีที่ความเร็วลมเป็น 2.0 m/s การควบแน่นของหยดน้ำจะเกิดขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวทดสอบจะเริ่มแห้ง และอัตราการควบแน่นจะต่ำ เนื่องจากน้ำสามารถระเหยได้ดี ซึ่งจะต่างกับกรณีที่ความเร็วลมเป็น 0.5 m/s ที่เมื่อเวลาผ่านไปเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบยังมีกระจายในบริเวณกว้าง และบางส่วนก็มีการรวมตัวกัน ซึ่งจะทำให้เมื่อน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น

- กัน ซึ่งจะทำให้เมื่อน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น
- กรณีที่มีภาระจากแสงมากระทำบนพื้นผิวทดสอบพบว่า จะมีผลทำให้การเกิดการควบแน่นเป็นไปได้อย่าง ช้า ๆ ซึ่งเมื่อภาระจากแสงที่มากระทำมีค่าสูง จะทำให้น้ำที่เกิดจากการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบและไอน้ำที่อยู่เหนือพื้นผิวทดสอบ ระเหยได้ดีขึ้น เช่น ในกรณีที่ภาระจากแสง 20 W/m^2 มากระทำพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปขนาดของเมื่อน้ำที่เกิดขึ้นยังมี ขนาดเล็กอยู่ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่มีภาระจากแสง 5 W/m^2 มากระทำ
 - เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของวัสดุ พบว่าคุณสมบัติของวัสดุมีผลต่อการเกิดการควบแน่น โดยวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกัน พบว่าวัสดุมีค่าการนำความร้อนสูง จะทำให้มีค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุต่ำ ซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งการควบแน่นที่ผิวหน้าของวัสดุ จะเกิดได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองการเกิดการควบแน่นในครั้งนี้ จะเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาการเกิดการควบแน่น ซึ่งสามารถนำเอาข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบ และคัดแปลงวิธีการทดลอง สำหรับผู้ที่สนใจงานทางด้านนี้ให้ผลที่ได้มีความเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น

1. ในการทดลอง ได้ใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ทั่วไป ซึ่งคุณภาพความเที่ยงตรงของอุปกรณ์คืออยู่ในระดับหนึ่ง แต่ถ้าต้องการความแม่นยำมากขึ้น ควรจะมีการเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่าง เช่น เตนส์ของกล้องที่ถ่ายภาพเมื่อน้ำขณะเกิดการควบแน่นควรเป็นแบบที่ใช้ถ่ายระยะใกล้ที่มีกำลังขยายสูง
2. การถ่ายภาพได้ใช้กล้องดิจิทัล โดยการถ่ายนั้นจะถ่ายเป็นช่วงเวลา การใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดมากขึ้นและสามารถถ่ายต่อเนื่องได้ เช่น กล้องวิดีโอ จะทำให้การเก็บข้อมูลที่ได้ดียิ่งขึ้น
3. ในการวิเคราะห์ผลการหาขนาดของเมื่อน้ำนั้น ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการวัดได้ตั้งแต่ขนาด 0.2 มิลลิเมตร ขึ้นไป ยังคงสามารถใช้โปรแกรมที่มีความสามารถสูงขึ้น ทำให้งานที่ได้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น
4. ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะอ้างอิงตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น การสร้างเงื่อนไขการทดลองที่มีความละเอียดจะทำให้ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดตามไปด้วย
5. ในการทำวิจัยนี้ ไม่ได้พิจารณาผลทางด้าน cooling capacity ถ้ามีการทำวิจัยทางด้านนี้ต่อไป ให้นำค่านี้มาพิจารณาด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASHRAE. ASHRAE Systems and Equipment Handbooks (SI) 1992. Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc,1992.
- [2] Dale, J.D. The Thermal Performance of a Radiant Panel Floor-Heating System. ASHRAE Transactions 99(1993) : 24-34.
- [3] Incropera, F.P., and Dewitt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4th ed. New York : John Wiley & Sons, 1996.
- [4] Jiang, Z. Indoor Airflow with Cooling Panel and Radiative / Convective Heat Source. ASHRAE Transactions 98(1) :33-42.
- [5] Lstiburek, Joseph. Moisture control Handbook. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993
- [6] Richard D. Watson . Radiant Heating & Cooling Handbook. McGraw-Hill, 2002.
- [7] Stanley A. Mumma. Chilled Ceilings in Parallel with Dedicated Outdoor Air Systems. ASHRAE Transactions:220-231.
- [8] Simmonds, P. Practical Applications of Radiant Heating and Cooling to Maintain Comfort Conditions. ASHRAE Transactions 102(1996) :659-666.
- [9] Stoecker, W.F. Design of Thermal Systems. 3rd ed. Malaysia. McGraw-Hill, 1989.
- [10] กตัญญูลี เวชวิมล. อิทธิพลความชื้นและแสงแดดต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนผนังในวัด. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [11] จัญญาดา บุญยเกียรติ. การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารทางหลังคา. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2537
- [12] จิราภรณ์ อรัณยชนาค. 2535. บทบาทของเกลือและความชื้นบนโบราณสถาน. กรุงเทพฯ. กรมศิลปากร. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

- [13] ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์. การทำความเย็นและการปรับอากาศ. กรุงเทพฯ: ก.วิวรรณ.
- [14] ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, 2004
- [15] สุริย นศิริธรรมปิติ. ปัจจัยที่มีผลต่อการควมแน่นในโบราณสถาน. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [16] อัครเดช ตินธุภัก. การทำความเย็น. ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [17] आयुส วัฒนวณิชการ. การศึกษาสมรรถนะของฝ้าเพดานทำความเย็น. วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

ข. รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ค. ตารางค่าคุณสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<http://www.me-nett.com>



การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ ๑๗

The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand

๑๕-๑๗ ตุลาคม ๒๕๕๖

October 15-17, 2013

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพฯ - ปราจีนบุรี
KMITNB Bangkok Prachinburi

บทคัดย่อ Abstract

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น Control Strategy of Radiant Floor Cooling System

เกียรติยศ คีรเดช¹ ชโลธร ธรรมแท้² อุณัติ พินโสภณ¹ จินดา เจริญพรพาณิชย์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: kchchind@kmitl.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

โทร 02-321-6930-9 ต่อ 212 โทรสาร 02-321-4444 E-mail ch_thumt@kbu.ac.th

Kiettiyod Deerod¹, Chalothorn Thumthae², Unnat Pinsophon¹, Chinda Charoenphonphanich¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: kchchind@kmitl.ac.th

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University,

Suanluang Bangkok 10250 Thailand, Tel: +66-2-321-6930-9 Ext.212 Fax: +66-2-321-4444 E-mail ch_thumt@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบการแผ่รังสีความเย็นจากพื้น โดยทำการทดลองในห้องทดสอบหลักการคือให้ระบบสามารถทำความเย็นในระดับที่ต้องการโดยไม่มีปัญหาพื้นเย็นเกินไปทำให้รู้สึกไม่สบายหรือเกิดการควบแน่นที่พื้น การควบคุมทำได้โดยการปรับอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ป้อนเข้าไปในพื้น ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมคือ อุณหภูมิที่พื้น อุณหภูมิน้ำเข้า อุณหภูมิน้ำออก ค่าความชื้นภายในห้อง จากผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมให้ระบบทำงานได้โดยไม่เกิดปัญหาใดๆ

Abstract

The aim of this study is to find out the suitable control strategy for radiant floor cooling system. The experiment was done in the radiant floor cooling test room. The parameters used for controlling the system are floor surface temperature, supply-return water temperature and room humidity. The final target of this study is to obtain the maximum capacity without problems of condensation and thermal comfort.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานในการปรับอากาศมากขึ้นในเมืองหนาวและเมืองร้อน มีความพยายามที่จะลดการใช้พลังงานลงด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในการทำความเย็น การออกแบบอาคารให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยลง อย่างไรก็ตามระบบปรับอากาศที่

ผ่านมาใช้ระบบการทำความร้อนด้วยอากาศซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องประสิทธิภาพ จึงมีการคิดค้นการปรับอากาศโดยใช้การแผ่รังสีจากผนังหรือพื้นโดยฝังท่อน้ำไว้ใต้ผนังหรือพื้น ระบบดังกล่าวมีข้อดีคือประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวดีกว่าก๊าซ การปรับอากาศทำได้สม่ำเสมอว่าการเป่าอากาศออกมาเป็นจุดเพราะการแผ่รังสีจะเกิดขึ้นพร้อมกันทั่วพื้นหรือผนังที่มีการฝังท่อเอาไว้ข้างใต้ อย่างไรก็ตามการปรับอากาศโดยการแผ่รังสีนี้ไม่สามารถจัดการกับความชื้นในอากาศได้ จึงมักต้องใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศเคมีที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางช่วยดูดซับความชื้นภายในอาคาร ระบบปรับอากาศแบบนี้เริ่มมีใช้มากขึ้นในต่างประเทศโดยเฉพาะในเมืองหนาว โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบทำความร้อน ในเมืองไทยยังไม่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จัก อาคารที่จะนำระบบนี้มาใช้แห่งแรกคือสนามบินสุวรรณภูมิ ระบบการทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีนี้มีข้อจำกัดมากกว่าการทำความร้อนเนื่องจากผลของการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ

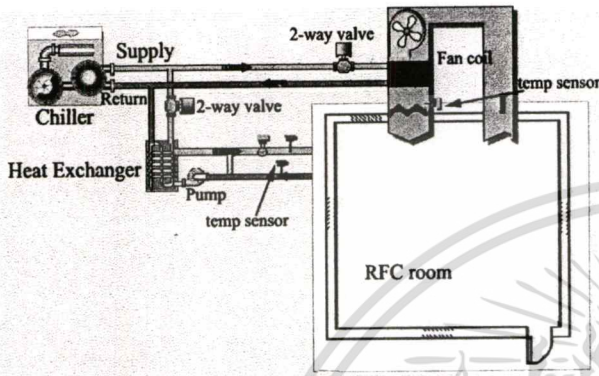
มีงานวิจัยที่ศึกษาระบบนี้ในต่างประเทศซึ่งศึกษาถึงข้อจำกัดและสมรรถนะการทำความเย็นของระบบนี้[1-3] แต่ในกรณีสนามบินสุวรรณภูมิเป็นการทำความเย็นซึ่งมีแสงแดดตกกระทบพื้นโดยตรงในพื้นที่บางส่วนซึ่งการควบคุมการทำความเย็นจะแตกต่างจากกรณีที่ใช้ในประเทศอื่นๆ[4] งานวิจัยนี้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมการทำความเย็นแบบการแผ่รังสีให้ทำความเย็นได้มากที่สุดโดยหลีกเลี่ยงการเกิดการควบแน่นและความรู้สึกไม่สบายซึ่งเกิดจากพื้นเย็นเกินไป

เอ็กสโปสิโตนเป็นเอ็กสโปสิโตนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

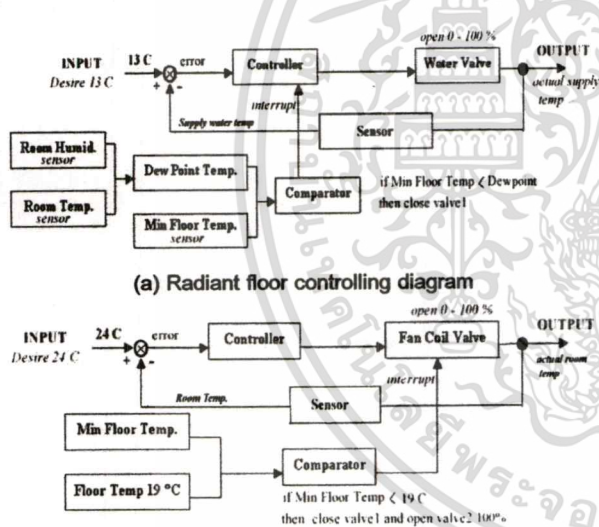
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ห้องทดสอบและวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงการทำงานของระบบการทำความเย็นในห้องทดสอบ ประกอบด้วยสองส่วนคือน้ำเย็นที่ป้อนจากซิลเลอร์ไปยังพื้นและไปยัง fan coil โดยมีทิวเวียวาล์วในการปรับปริมาณน้ำที่จะส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อส่งพลังงานไปยังพื้นและไปยัง fan coil พื้นเย็นจะทำหน้าที่แผ่รังสีความเย็นเข้าไปในห้องในขณะที่ fan coil จะควบคุมอุณหภูมิของอากาศและความชื้นภายในห้อง



รูปที่ 1. แผนผังแสดงการทำงานของระบบในห้องทดสอบ



(a) Radiant floor controlling diagram

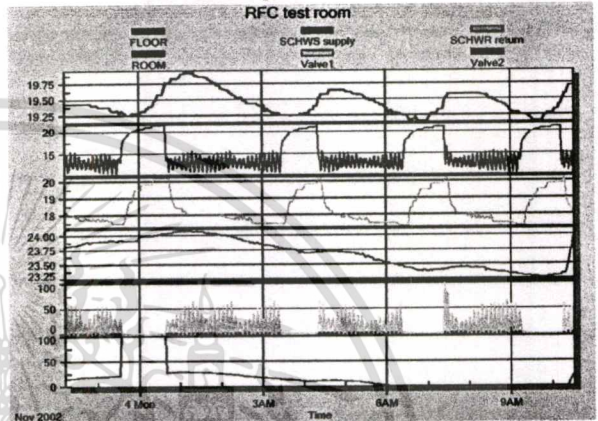
(b) Fan coil controlling diagram

รูปที่ 2. แผนผังการควบคุมระบบของพื้นและแฟนคอยล์

ระบบควบคุมจะแบ่งออกเป็นสองชุด ชุดที่หนึ่งสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่จะเข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอีกชุดสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็น ที่จะเข้าที่ชุด fan coil ลักษณะการควบคุมเป็นแบบ Proportional Control โดยจะมีการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งสำหรับในขั้นต้นนี้ใช้อุณหภูมิที่เข้าระบบการทำความเย็นโดยการแผ่รังสีที่พื้น (RFC) เป็นตัวกำหนดการ เปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่พื้น(water valve) และ ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของห้อง เป็นตัวกำหนดการ เปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่ fan coil

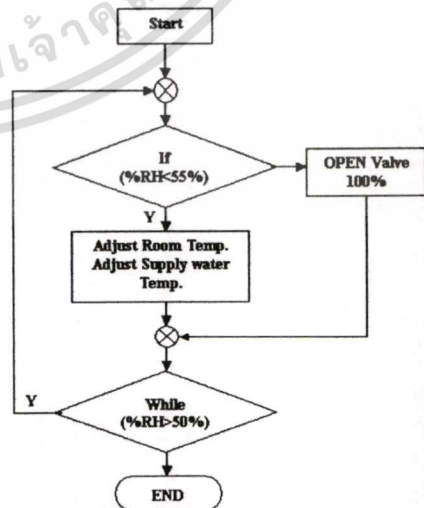
เนื่องจากการควบคุมระบบนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ด้วย เช่น การควบแน่นเป็นหยดน้ำ ค่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ ที่จุดอื่น ๆ จึงต้องมีเงื่อนไขเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไขในการควบคุมระบบเพิ่มขึ้น เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ เงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นมากก็คือ จะต้องไม่ให้อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นต่ำกว่าอุณหภูมิการควบแน่นเป็นหยดน้ำ (อุณหภูมิจุดน้ำค้างหรือ Dew Point Temperature) หากเงื่อนไขนี้เกิดขึ้นจะให้ตัวควบคุมไปสั่งการให้ปิดวาล์วน้ำที่พื้นทันที และรอจนกว่าอุณหภูมิที่พื้นจะสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.5 °C จึงเริ่มให้วาล์วเปิดทำงานอีกครั้ง และหากพื้นมีอุณหภูมิเย็นลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ออกแบบที่ 19 °C จะทำการปิดวาล์วที่พื้น และจะให้เปิดวาล์วที่ fan coil เต็มที่ เพื่อรักษาอุณหภูมิที่พื้นไม่ให้ต่ำเกินไป และดึงเอาความชื้นออกจากระบบเพื่อให้ระบบกลับสู่สภาวะทำงาน

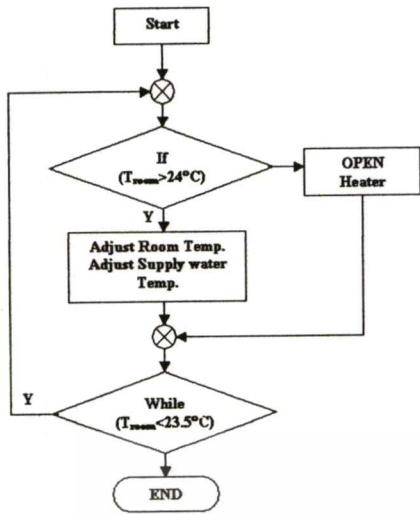


รูปที่ 3. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและสถานะของวาล์วที่เวลาต่าง ๆ

ผลที่ได้จากการควบคุมในขั้นต้นได้แสดงดังรูปที่ 3 เมื่ออุณหภูมิของพื้นลดต่ำลงจนถึงค่าวิกฤติที่ตั้งไว้ วาล์วน้ำของพื้นจะปิดเพื่อไม่ให้น้ำที่เข้าสู่ระบบ RFC เย็นเกินไป เมื่อปิดวาล์วอุณหภูมิน้ำเข้าจะสูงกว่าอุณหภูมิที่พื้น ความร้อนจากน้ำจึงถ่ายเทสู่พื้นทำให้น้ำออกมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำเข้าและพื้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันวาล์วที่ fan coil ก็เปิดเต็มที่เพื่อให้อุณหภูมิคอยล์เย็นเย็นจัดเพื่อดึงเอาความชื้นออกจากระบบ และจะทำให้อุณหภูมิจุดน้ำค้างลดต่ำลง สภาวะนี้จะคงอยู่จนกว่าค่าต่าง ๆ จะกลับสู่ปกติ วาล์วทั้งสองตัวจึงจะทำงานตามปกติอีกครั้ง



รูปที่ 4 การทำงานของแฟนคอยล์เพื่อควบคุมความชื้น



รูปที่ 5. แผนผังการทำงานของขดลวดทำความร้อน

รูปที่ 4 และ 5 แสดงการควบคุมความชื้นโดยแฟนคอยล์วาล์วจะเปิดเต็มที่เมื่อความชื้นเกินค่าที่กำหนดเพื่อลดความชื้นออกจากระบบ ในขณะที่ฮีตเตอร์ซึ่งติดไว้ที่หัวจ่ายจะถูกเปิดให้ทำงานเพิ่มคมไม่ให้ห้องมีอุณหภูมิต่ำเกินไป

การทดลองทำที่สภาวะเหมือนจริงของสภาพการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ตลอด 24 ชั่วโมง เปิดไฟให้รังสีความร้อนลงที่พื้นให้คล้ายกับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดวัน

การศึกษาเพื่อหาวิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้การทำงานระบบเป็นไปอย่างราบเรียบยิ่งขึ้นจึงต้องทำการทดลองการควบคุมแบบต่างๆที่สนใจ ซึ่งจะสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการควบคุมเป็น 4 กรณีดังนี้

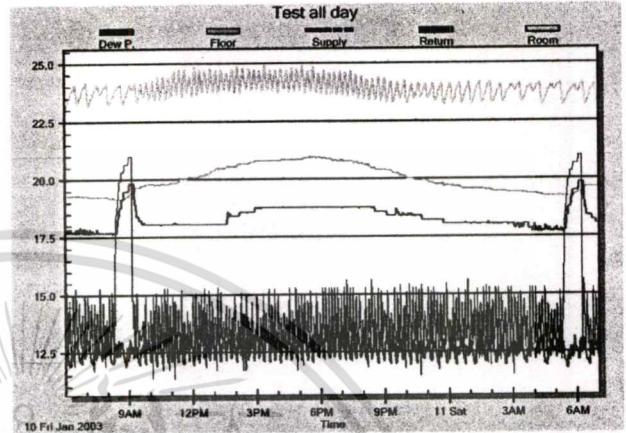
1. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่
2. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามอุณหภูมิพื้น
3. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก (return-supply)
4. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก

3.ผลการทดลอง

3.1 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่

การทดลองเปิดไฟให้รังสีความร้อนลงที่พื้นให้คล้ายกับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดวัน และคุมความชื้นที่ 50-55 %RH อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 24° C อุณหภูมิพื้นคุมไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 19 ° C เพื่อไม่ให้พื้นเย็นเกินไป อุณหภูมิน้ำเข้าตั้งไว้ให้คงที่อยู่ที่ 13.5 ° C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวพื้นมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการควบคุมความชื้น ปัญหาการเกิดหยดน้ำที่ผิวหน้าของพื้นจะหมดไปอย่างแน่นอน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง เฉลี่ยต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเข้า โดยเฉลี่ย แต่ก็มีส่วนที่คาบเกี่ยวกันอยู่ด้วยซึ่งอาจจะยังคงเกิดฟิล์มของน้ำบางๆที่ผิวหน้าเข้า อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เมื่อลองสังเกตด้วยตาเปล่าและสัมผัสด้วยมือ พบว่าผิวหน้าเข้าไม่มีน้ำเกาะอยู่เลย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่หน้าเย็นอยู่ใกล้กับ fan coil ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์บริเวณจุดนั้นต่ำกว่าความชื้นของห้องจึงทำให้อุณหภูมิจุดน้ำค้างของหน้าเย็นต่ำลงไปอีกจึงไม่มีน้ำเกาะ และอาจจะเป็น

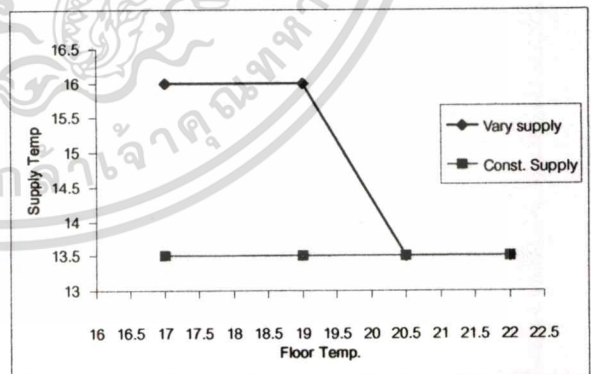
เพราะการแกว่งขึ้นลงที่ค่อนข้างรวดเร็วของอุณหภูมิจุดน้ำค้างเองที่ช่วยให้ไม่เกิดน้ำเกาะที่ท่อ ในขณะที่ภาวะการทำความเย็นต่างๆ จะมีการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิที่ผิวของพื้นไม่ให้ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้โดยการปิดวาล์วสนิท ซึ่งจะมีสูญเสียความร้อนจากพื้นคืนให้กับน้ำเพื่อให้พื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ระบบจึงจะกลับมาทำงานตามปกติ ซึ่งในจุดนี้อาจจะเป็นการสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์



รูปที่ 6. ผลการทดลองเมื่อทำการควบคุมให้อุณหภูมิน้ำเข้ามีค่าคงที่วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยอุณหภูมิพื้น

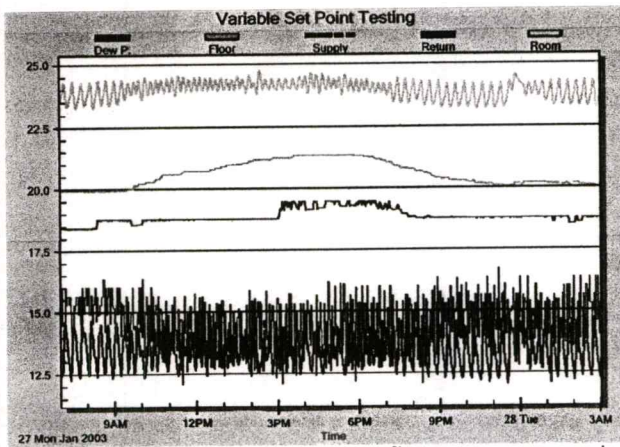
ปรับค่า set point เป็นค่าอุณหภูมิน้ำเข้าโดยให้ขึ้นกับอุณหภูมิของพื้น โดยถ้าผิวพื้นมีค่าต่ำกว่า 19 ° C ให้น้ำเข้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 16 ° C และถ้าผิวพื้นมีค่าสูงกว่า 20.5 ° C ให้น้ำเข้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 13.5 ° C และถ้าผิวพื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 19-20.5 ° C ให้น้ำเข้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 16 - 13.5 ° C (กำหนดการควบคุมดังกล่าวต่อไปนี้)



รูปที่ 7 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามอุณหภูมิที่ผิวของพื้น

จากผลการทดลองในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำเข้ามีค่าไม่คงที่ โดยที่เมื่ออุณหภูมิพื้นมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิน้ำเข้าจะลดลงเพื่อการทำความเย็น แต่เมื่ออุณหภูมิพื้นมีค่าลดลง อุณหภูมิน้ำเข้าจะมีค่าสูงขึ้นเพื่อรักษาไม่ให้อุณหภูมิที่พื้นต่ำเกินไป และไม่เกิดการปิดวาล์วที่พื้นซึ่งแสดงถึงการควบคุมที่ดีและราบเรียบยิ่งขึ้น

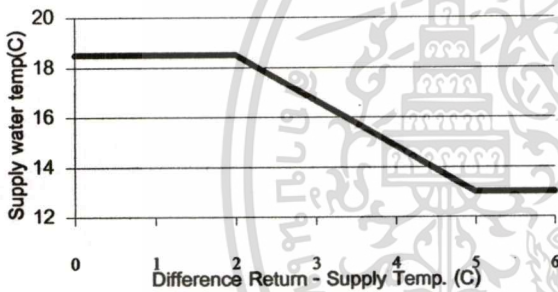
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



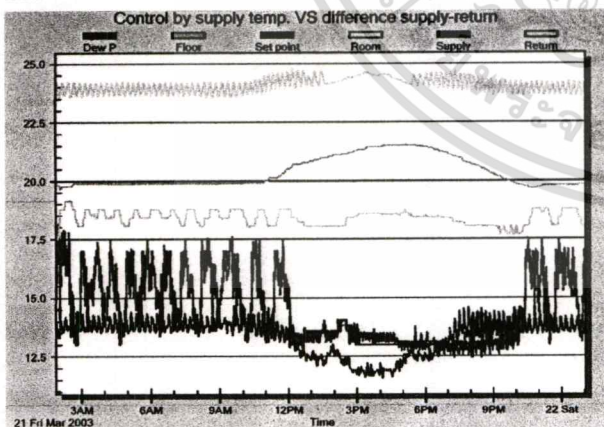
รูปที่ 8. ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามอุณหภูมิที่ผิวของพื้น

3.3 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกแบบต่อเนื่อง

ปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำเข้า ตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออก ตามกราฟการควบคุมต่อไปนี้



รูปที่ 9 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก

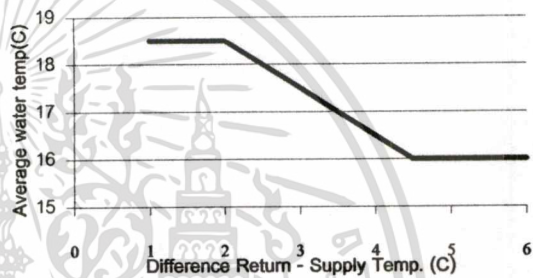


รูปที่ 10. ผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-น้ำออก

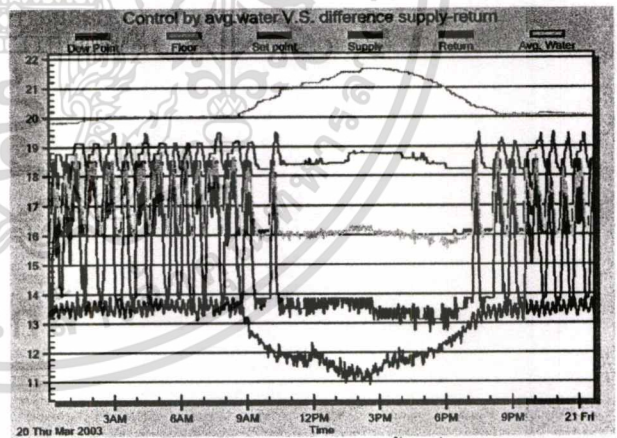
จากผลการทดลองในรูปที่ 10 พบว่าค่า set point มีค่าแกว่งตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่แกว่งอย่างมาก แม้ว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับค่า set point แต่ผลที่ได้ก็ยังไม่ค่อยดีนักเนื่องจาก set point ที่มีค่าแกว่งนั่นเอง อุณหภูมิผิวพื้นห้องเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าอุณหภูมิต่างๆจะแกว่งอย่างมาก การปรับ

ปรุครั้งนี้จะพบว่าในช่วงที่ระบบมีภาระจากแสง ค่าอุณหภูมิที่ได้จะค่อนข้างนิ่ง เนื่องจากในช่วงนี้จะเข้าเงื่อนไขการควบคุมที่ทำให้ค่า set point มีค่าคงที่ (7AM - 8PM) ถึงแม้ว่าระบบควบคุม สามารถทำให้ค่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับ set point การปรับปรุงการควบคุมยังคงต้องมีต่อไป จากกราฟพวาระบบ RFC สามารถที่จะรับพลังงานจากแสงในช่วงของค่าที่ต้องการได้ และอุณหภูมิผิวพื้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วถึงแม้ว่า อุณหภูมิน้ำเย็นจะแกว่งอย่างมากก็ตาม อุณหภูมิน้ำเย็นค่อนข้างอยู่ห่างจากอุณหภูมิจุดน้ำค้าง พอสมควร ทำให้ไม่เกิดน้ำเกาะที่ท่อ

3.4 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก ปรับให้ set point เป็นค่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ย โดยเปลี่ยนแปลงตามผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก (Return-Supply) และกำหนดการควบคุมตามกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 11 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก



รูปที่ 12. ผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก

จากผลการทดลองตามรูปที่ 12 ค่า set point ยังคงแกว่งอยู่ตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่แกว่งอย่างมาก อย่างไรก็ตามมีบางช่วงที่ไม่แกว่งมากนัก พบว่าในช่วงที่ระบบมีภาระจากแสง ค่าที่ได้จะค่อนข้างนิ่ง เนื่องจากในช่วงนี้จะเข้าเงื่อนไขการควบคุมที่ทำให้ค่า จากกราฟพวาระบบ RFC สามารถที่จะรับพลังงานจากแสงในช่วงของค่าที่ต้องการได้ และอุณหภูมิผิวพื้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วถึงแม้ว่า อุณหภูมิน้ำเย็นจะแกว่งอย่างมากก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบกรณีที่สองคือคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าออกแล้วการแกว่งของอุณหภูมิน้ำเข้าจะมีมากกว่า

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จากวิธีการควบคุมแบบต่างๆซึ่งนำเสนอไปข้างต้น พบว่าการควบคุมการทำงานของระบบ RFC ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและราบเรียบทั้ง 4 วิธี เมื่อเปรียบเทียบแล้ววิธีการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่จะมีปัญหาในเวลากลางคืนซึ่งจะมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิที่ผิวพื้นเย็นเกินไป วิธีที่จะควบคุมให้ได้ผลดีคือการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้แปรตามอุณหภูมิที่พื้นหรือควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออก ทั้งสองวิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของพื้นได้เป็นอย่างดีแต่วิธีหลังจะเกิดการแกว่งตัวของอุณหภูมิน้ำเข้า สำหรับวิธีสุดท้ายคือควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าและออกตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าออกจะทำให้การแกว่งของอุณหภูมิน้ำเข้ามากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Olesen, B.W. "Possibilities and Limitations of Radiant Floor Cooling" ASHRAE Transactions P.103 (1): 1997
- [2] Olesen, B.W. and Michel E. "Heat exchange coefficient between floor surface and space by floor cooling theory or a question of definition" ASHRAE Transactions P.684: 2000
- [3] Richard D. Watson and Kirby S. Chapman, "Radiant Heating&Cooling Handbook", McGrawHill, 2002
- [4] Peter Simmonds, "Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions" ASHRAE Transactions P.695: 2000

บทคัดย่อ

Abstract



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
จังหวัดขอนแก่น



Proceedings of the 18th Thai Engineering Network of Thailand
October 18-20, 2004
Khon Kaen University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดการควบแน่นบนวัสดุปูพื้นในระบบพื้นทำความเย็นแบบการแผ่รังสี

Condensation on Floor Covering in Radiant Floor Cooling System

เกียรติยศ ตีรอต¹ จินดา เจริญพรพาณิชย์¹ มนต์ศักดิ์ พิมสาร¹ จักรกริช จึงศิริวัฒนา¹
¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: kchchind@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบพื้นทำความเย็นแบบการแผ่รังสีเป็นหลักการใหม่ที่ได้นำมาใช้สำหรับระบบปรับอากาศ โดยจะใช้การทำให้พื้นเย็นแทนการเป่าลมเย็นออกมาเฉพาะจุดเหมือนระบบปรับอากาศที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป ซึ่งระบบนี้ จะใช้การฝังท่อน้ำเย็นไว้ภายใต้โครงสร้างของอาคารเช่น พื้น ผนัง เพดาน เป็นต้น ส่วนห้องทดสอบที่ได้ทำการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้จะใช้การฝังท่อน้ำเย็นไว้ภายใต้โครงสร้างของพื้น โดยปัญหาที่สำคัญและต้องหลีกเลี่ยงมิให้เกิดขึ้นสำหรับระบบการพื้นทำความเย็นนี้คือ การเกิดการควบแน่นบนวัสดุที่ปูพื้น เนื่องจากปัญหาทางด้านความไม่ปลอดภัย และประสิทธิภาพของระบบ

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ ก็เพื่อที่จะทำการศึกษาพฤติกรรมการเกิดการควบแน่นบนวัสดุที่ปูพื้นในกรณีที่แตกต่างกัน โดยได้ทำการทดลองในห้องทดสอบ ที่ได้จำลองระบบพื้นทำความเย็นแบบการแผ่รังสีมา ซึ่งอุณหภูมิของพื้น อุณหภูมิห้อง และความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์โดยการควบคุมอุณหภูมิจะควบคุมโดยทำการปรับอัตราการไหลของน้ำ และอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิห้องและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง ซึ่งทราบว่าเมื่ออุณหภูมิจุดน้ำค้างสูงกว่าอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทดสอบก็จะเกิดการควบแน่นขึ้นบนวัสดุนั้นๆ ในการทดลองครั้งนี้พบว่าจะต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งหลังจากที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ใช้ทดสอบ ก็จะเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ และในการทดลองได้ทำการวัดขนาดของเม็ดน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบ ในแต่ละช่วงเวลาด้วย ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในการออกแบบและป้องกันปัญหาการเกิดการควบแน่นที่จะเกิดขึ้นกับระบบนี้ รวมทั้งรัฐจัดจำกัดในการทำความเย็นของพื้นผิว โดยปราศจากปัญหาการเกิดการควบแน่นที่พื้น

Abstract

Radiant cooling system is the new concept for air conditioning using radiation heat transfer instead of convection in conventional system. In the radiant floor cooling system, the cooling water pipes were embedded in the floor structure. The floor surface temperature will be lower than the air temperature that effects to lower the operative temperature. The condensation on the floor covering is the one of critical problems in radiant floor cooling system that should be avoided. The objective of this paper is to study the condensation phenomena on floor covering in radiant floor cooling system (RFC). The experiment was done in the radiant floor cooling test room. The dew point temperature was controlled by room temperature and relative humidity in test room. The time consumption for forming the water droplet on the floor surface and the size of water droplet at various conditions was measured. The results data will be useful for designing the system or developing the control strategy.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

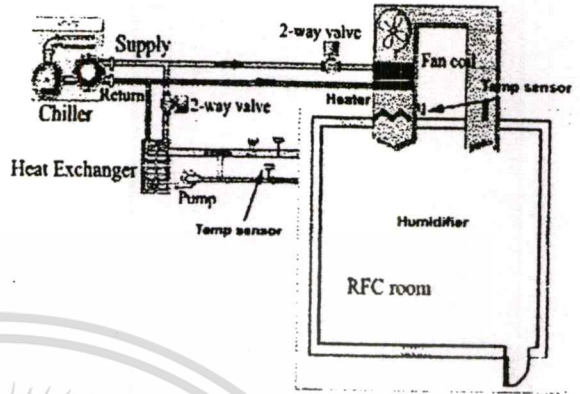
ระบบพื้นทำความเย็นแบบแผ่รังสี เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ถูกนำมาใช้ในการปรับอากาศ โดยประเทศไทยได้มีการติดตั้งระบบนี้ครั้งแรกที่สนามบินสุวรรณภูมิ

การทำงานของระบบก็โดยการฝังท่อน้ำไว้ภายใต้โครงสร้างของพื้น ซึ่งความเย็นที่ได้จะเกิดจากการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำ การทำความเย็นจะเกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวที่มีการฝังท่อเอาไว้ซึ่งต่างจากระบบปรับอากาศทั่วไปที่ใช้การเป่าลมเย็นออกมาเฉพาะจุด ส่วนข้อจำกัดของระบบการทำความเย็นแบบนี้ คือไม่สามารถที่จะจัดการกับความชื้นที่อยู่ภายในระบบได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับระบบปรับอากาศแบบปกติทั่วไปที่ใช้แฟนคอยล์

ปัญหาที่ต้องป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นกับระบบพื้นทำความเย็นแบบการแผ่รังสี คือ ความเสี่ยงต่อการเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว ถ้าในกรณีพื้นผิวเกิดการควบแน่น ผลกระทบแรกที่เกิดขึ้นคือ จะเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานในสถานที่ที่มีการวางระบบนี้ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษา พฤติกรรมการเกิดการควบแน่นบนวัสดุที่ใช้ปูพื้น โดยจากการทดลองพบว่า การเกิดการควบแน่นบนพื้นผิวนั้น จะไม่เกิดในทันทีทันใดที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างเท่ากันหรือสูงกว่าอุณหภูมิพื้นผิว แต่จะเกิดขึ้นที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิพื้นผิวมีค่าเท่าหนึ่ง รวมทั้งระยะเวลาในการเกิดการควบแน่นที่เราสามารถทำการวัดขนาดของเม็ดน้ำได้นั้น จะมีระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะแตกต่างกันตามเงื่อนไขของอากาศทดลอง

3. ห้องทดสอบ

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองการทำงานของระบบการทำความเย็นแบบการแผ่รังสีจากพื้น ซึ่งจากรูปน้ำเย็นที่ได้จาก chiller จะถูกจ่ายไปยัง 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกจะถูกส่งจ่ายไปยัง fan coil โดยผ่าน 2-way valve กับอีกส่วนจะถูกจ่ายไปยัง heat exchanger ซึ่งจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่ไหลเข้าสู่พื้น



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบในห้องทดสอบ

2. ทฤษฎี

การควบแน่น เกิดขึ้นเมื่อไอของของไหล เคลื่อนที่มาสัมผัสกับผิวของผนังที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิมืดตัวของไอ โดยไอจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว ซึ่งในกรณีนี้ความร้อนแฝงจะถูกถ่ายออกจากไอและส่งถ่ายไปยังพื้นผิว ทำให้ไอควบแน่นเป็นของเหลว ซึ่งอัตราการควบแน่นของไอจะขึ้นอยู่กับ ความร้อนจะถูกระบายออกจากพื้นผิวได้รวดเร็วแค่ไหน การควบแน่นจะแบ่งได้ตามลักษณะเป็น 2 อย่างคือ

- Homogeneous condensation

คือไอจะควบแน่นเป็นหยดน้ำลอยอยู่ในอากาศทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายหมอกหรือคือการเกิดเป็นหมอกเนื่องจากการขยายตัวโดยฉับพลัน

- Direct contact condensation

คือการที่ไอไปสัมผัสกับของเหลวที่เย็นกว่าโดยตรง

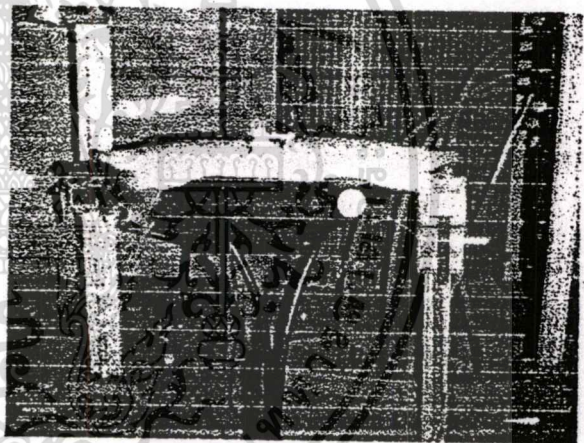
ถ้าแบ่งตามสภาพพื้นผิวจะแบ่งได้อีก 2 แบบ

- Film condensation

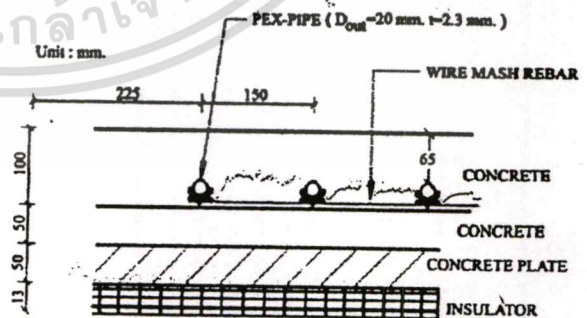
แบบที่เกิดการควบแน่นเป็นชั้นของเหลวคลุมพื้นผิวทั้งหมด มักจะเกิดกับพื้นผิวที่สะอาด

- Dropwise condensation

การควบแน่นแบบนี้จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่เคลือบด้วยวัสดุป้องกันไม่ให้น้ำมันหรือพื้นผิวที่สกปรกหรือมีรอยแตก โดยหยดของเหลวจะก่อตัวขึ้นที่รอยแตก เมื่อการควบแน่นนานขึ้น หยดของเหลวก็จะขยายตัวและรวมตัวกัน เป็นเม็ดน้ำซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 100 มม ขึ้นไป



รูปที่ 2 เครื่องเพิ่มความชื้นภายในห้องทดสอบ



รูปที่ 3 โครงสร้างของพื้นในระบบการทำความเย็นแบบการแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

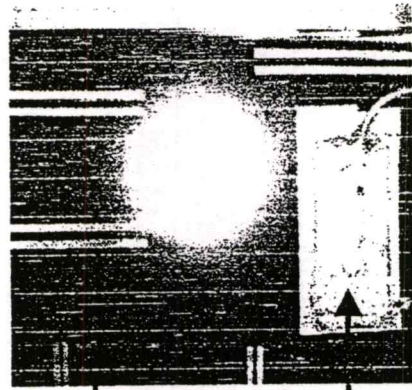
รูปที่ 2 แสดงเครื่องเพิ่มความชื้นภายในห้องทดสอบ
ใช้ในการนี้ที่เงื่อนไขของการทดสอบต้องการความชื้นที่สูงมาก ๆ

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของพื้นของระบบการทำความเย็นแบบการ
แผ่รังสีโดยการวางท่อใต้พื้นนั้นจะให้อยู่ต่ำกว่าพื้นผิวประมาณ 65 mm
และต่อหน้าแต่ละอันจะวางห่างกัน 150 mm

4. วิธีการทดลอง

ในการทดลอง จะใช้วัสดุทดสอบ คือใช้แผ่นกระเบื้องเซรามิก ซึ่งเป็นวัสดุปูพื้น โดยการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลองจะทำดัง รูปที่ 4 ซึ่งจะประกอบไปด้วย กล้องดิจิทัล, แหล่งกำเนิดแสง, แผ่นวัสดุทดสอบ และ เซ็นเซอร์ต่าง ๆ บนพื้นผิวทดสอบ

ในการทำการทดสอบการเกิดการควบแน่นในครั้งนี้ การจับเวลา การเกิดการควบแน่น เราจะใช้วิธีการจับการเกิดการควบแน่นอยู่คงวิธีด้วยกัน วิธีแรกที่เราใช้คือ จะใช้วิธีการทางไฟฟ้า ซึ่งแบบนี้จะใช้ เซ็นเซอร์เป็นพี มงบอกกว่าบนพื้นผิวทดสอบมีความชื้นเกิดขึ้นหรือไม่ การทำงานของวิธีการนี้คือ เมื่อมีความชื้นหรือฟิล์มของน้ำมาเกาะบนพื้นผิวทดสอบจะทำให้เซ็นเซอร์ที่อยู่บนพื้นทดสอบ เกิดการต่อเชื่อมถึงกัน ดังนั้นจึงทำให้ระบบครบวงจร ส่งสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณเสียง โดยความถี่ของเสียงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว ส่วนวิธีที่สองนั้น จะใช้แผ่นวัสดุใด บาง ๆ จำพวก แผ่นฟิล์ม หรือ แผ่นกระจกใส มาวางสัมผัสกับแผ่นวัสดุที่ใช้ทดสอบ เหตุที่ต้องใช้วัสดุที่มีความบางเนื่องจากต้องการให้อุณหภูมิบนผิวของวัสดุทดสอบกับอุณหภูมิของแผ่นวัสดุใส มีค่าเท่ากัน ซึ่งการใช้วิธีการนี้จะสามารถบ่งบอกได้ว่า การเริ่มเกิดการควบแน่นจะเริ่มเกิดที่ระยะเวลาใด โดยการดูจากการเกิดฝ้า เมื่อมีไอน้ำมาเกาะบนแผ่นวัสดุใส ซึ่งจะทำให้รู้ว่าไอน้ำที่เกิดการควบแน่นนั้นอยู่ห่างจากพื้นผิวทดสอบเรามากน้อยเท่าไร แต่วิธีการนี้จะไม่สามารถบอกได้ว่า วัสดุที่ทดสอบจะมีเม็ดน้ำเกิดขึ้นหรือไม่ ซึ่งการเกิดขึ้นของเม็ดน้ำนั้นจะเกิดจากการที่ อัตราการควบแน่นของไอน้ำในอากาศจะต้องมากกว่าอัตราการระเหย โดยมีระยะเวลาผ่านไปขนาดเม็ดน้ำที่ได้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการสะสมตัวของเม็ดน้ำที่เกิด



Surface temperature sensor

Sensor วัดความชื้นบนแผ่นทดสอบ

รูปที่ 5 แผ่นวัสดุทดสอบและ sensor ต่าง ๆ



Sensor วัดความชื้นบนแผ่นทดสอบ

รูปที่ 6 sensor และแผ่นวัสดุที่ใช้ในการจับการเกิดการควบแน่น

การทดลอง จะทำการทดสอบในห้องปรับอากาศที่มีการจำลองระบบการทำความเย็นแบบการแผ่รังสีจากพื้น ซึ่งเงื่อนไขในการทดลองจะเป็นดังนี้

- ความคุมอุณหภูมิห้องให้คงที่ ที่ 24 °C
- ปรับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบไปเป็นค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 17 - 19 °C
- เปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง ดังตารางข้างล่างนี้

Light source



อุปกรณ์วัดความชื้นบนแผ่น

รูปที่ 4 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับทดลอง

Floor temp (°C)	%RH in room
18	80 ,85 ,90 and 95
19	85 ,90 and 95

- บันทึกภาพทุก ๆ 5 นาที

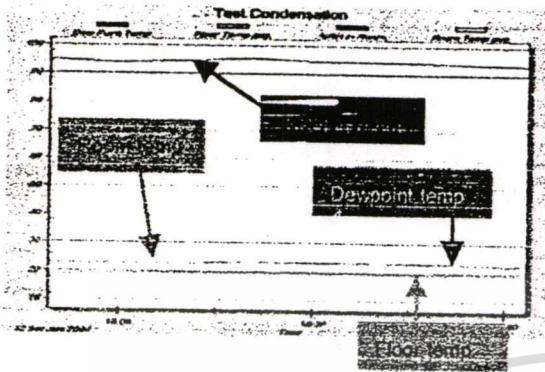
5. ผลการทดลอง

5.1 อุณหภูมิพื้นคงที่ 19 °C

- 95%RH

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 23.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19.0 °C

ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 4.0 °C



รูปที่ 7 ผลการปรับค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95%

พื้นผิวทดสอบ



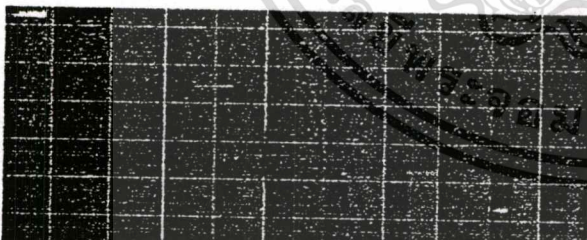
แผ่นวัสดุใส

รูปที่ 8 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 95%RH

- 90%RH

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 22.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19.0 °C

ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 3.0 °C



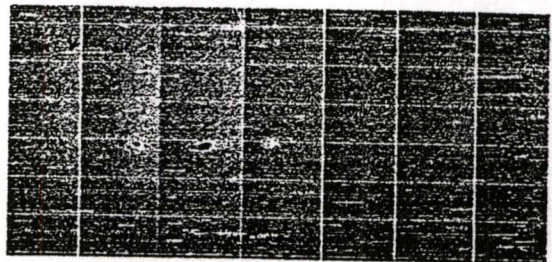
start 5 min 10 min 15 min 20 min 30 min 40 min 50 min 1 hr 1hr30min 1hr45min

รูปที่ 9 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 90%RH

- 85%RH

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 21.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 19.0 °C

ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 2.0 °C



start 30 min 1 hr 1hr 30 min 2 hr 2hr 30 min 3 hr

รูปที่ 10 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 85%RH

จากรูปที่ 8, 9 และ 10 เป็นผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นบนแผ่นกระเบื้องเซรามิกที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95, 90 และ 85% ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไปเป็น 95% ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างและอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบมีค่า 4.0 °C จะสามารถทำการวัดขนาดของเม็ดน้ำได้ใช้เวลาผ่านไป 15 นาที หลังจากเริ่มทดสอบ โดยขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้มีขนาดเป็น 0.24 mm ในทำนองเดียวกันที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90% สามารถวัดขนาดของเม็ดน้ำได้หลังจากเวลาผ่านไป 30 นาที โดยขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้มีค่า 0.23 mm ส่วนในกรณีที่ปรับระบบให้มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% พบว่าจากการทดลองไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

5.2 อุณหภูมิพื้นคงที่ 18 °C

- 95%RH

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 23.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 18.0 °C

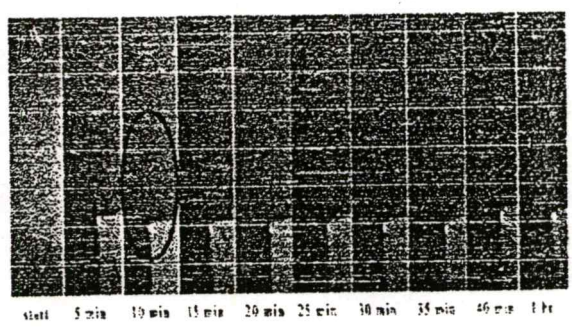
ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 5.0 °C



start 5 min 10 min 15 min 20 min 25 min 30 min 40 min 50 min 1 hr

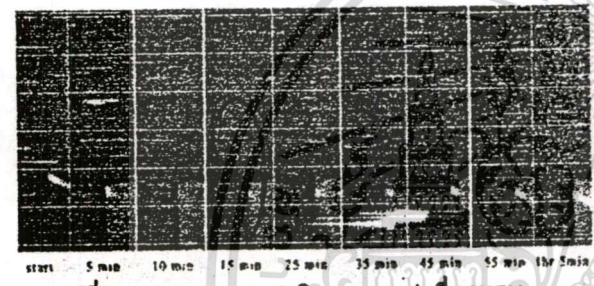
รูปที่ 11 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 95%RH

- 90%RH
 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 22.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 18.0 °C
 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 4.0 °C



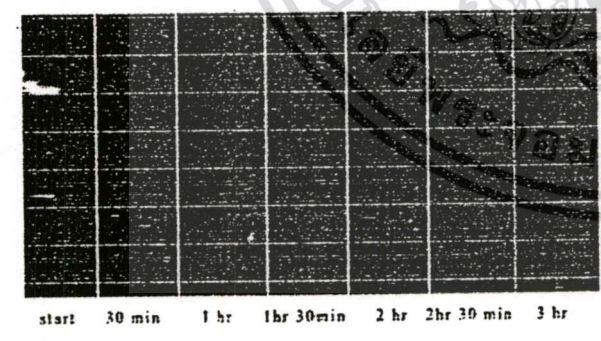
รูปที่ 12 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 90%RH

- 85%RH
 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 21.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 18.0 °C
 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 3.0 °C



รูปที่ 13 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 85%RH

- 80%RH
 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 20.0 °C อุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ 18.0 °C
 ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิว 2.0 °C



รูปที่ 14 ผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นที่ 80%RH

จากรูปที่ 11 ,12 ,13 และ 14 เป็นผลการทดสอบการเกิดการควบแน่นบนแผ่นกระเบื้องเซรามิกที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95, 90 ,85 และ 80% ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่อทำการปรับความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องไปเป็น 95% ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิ

จุดน้ำค้างและอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบมีค่า 5.0 °C จะสามารถทำกักรัดขนาดของเม็ดน้ำได้ใช้เวลาผ่านไป 5 นาที หลังจากเริ่มทดสอบ โดยขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้มีขนาดเป็น 0.23 mm ในห่านองเดียวกันที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90 และ 85% สามารถวัดขนาดของเม็ดน้ำได้หลังจากเวลาผ่านไป 10 และ 15 นาที โดยขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้มีค่า 0.24 mm และ 0.22 mm ตามลำดับ ส่วนในกรณีที่ปรับระบบให้มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เป็น 80% พบว่าจากการทดลองไม่เกิดการควบแน่นบนพื้นผิวทดสอบ

T _{floor} (°C)	%RH	T _{dp} (°C)	T _{dp} -T _{floor} (°C)	ระยะเวลา กาลเกิด(min)	ขนาดเม็ดน้ำ (mm)
19	95	23.0	4	15	0.24
	90	22.0	3	30	0.23
	85	21.0	2	-	-
18	95	23.0	5	5	0.23
	90	22.0	4	10	0.24
	85	21.0	3	15	0.22
	80	20.0	2	-	-

6. สรุป

- จากการทดลองพบว่า
- ขนาดเม็ดน้ำที่วัดได้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.2 mm ขึ้นไป ซึ่งจะเป็นขนาดที่เราไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า
 - ระยะเวลาในการเกิดการควบแน่นจะมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการทดลอง เช่นที่อุณหภูมิพื้น 19.0 °C ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 95% และ 90 % จะใช้ระยะเวลาในการเกิดการควบแน่นเป็น 15 และ 30 นาทีตามลำดับ
 - การควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวทดสอบ ต่างกันอยู่ค่าหนึ่ง ถึงจะเกิดการควบแน่นบนพื้นผิว พบว่าที่อุณหภูมิพื้นเป็น 19.0 °C, 85%RH กับที่อุณหภูมิพื้นเป็น 18.0 °C ,80%RH ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิพื้นผิวจะเป็น 2.0 °C จะไม่เกิดการควบแน่น
 - ในการเกิดการควบแน่นนั้นการสะสมตัวกันของเม็ดน้ำจะเกิดขึ้นได้เมื่ออัตราการควบแน่นมากกว่าอัตราการระเหย
 - อุณหภูมิพื้นผิวมีผลต่อผลต่อการเกิดการควบแน่น ซึ่งจะทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับอุณหภูมิผิวทดสอบเปลี่ยนแปลง โดยจากการทดลอง ในกรณีที่ T_{floor} เป็น 19 °C และ 18 °C ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 85% พบว่า กรณีที่ T_{floor} 19 °C จะไม่เกิดการควบแน่นขึ้น

(หมายเหตุ: ค่าของอุณหภูมิต่างๆ และ ความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้ จะอ่านจากเครื่องมือวัดภายในห้องทดสอบ)

เอกสารอ้างอิง

1. Olesen. B.W. "Possibility and limitations of Radiant Floor Cooling", ASHRAE Transactions, 1997, pp.103
2. Olesen, B.W. and Michel E. "Heat Exchange Coefficient Between Floor Surface and Space by Floor Cooling Theory of a Question of Definition" ASHRAE Transaction, 2000, pp. 684
3. Peter Simmonds; "Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions" ASHRAE Transactions, 2000, pp.695
4. Richard D. Watson and Kirby S. chapman, "Radiant Heating&Cooling Handbook", McGrawHill, 2002



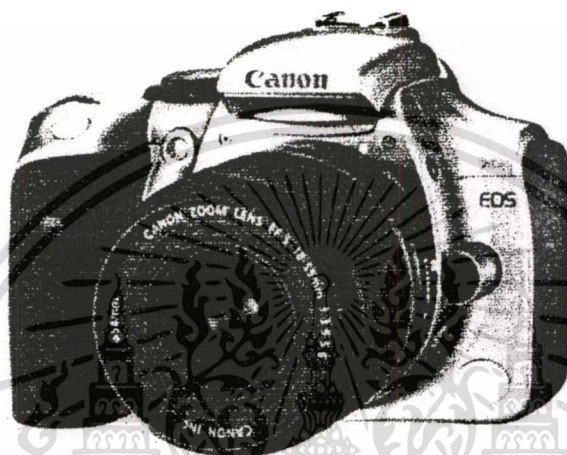
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กล้องดิจิทัล (Canon EOS 300D)

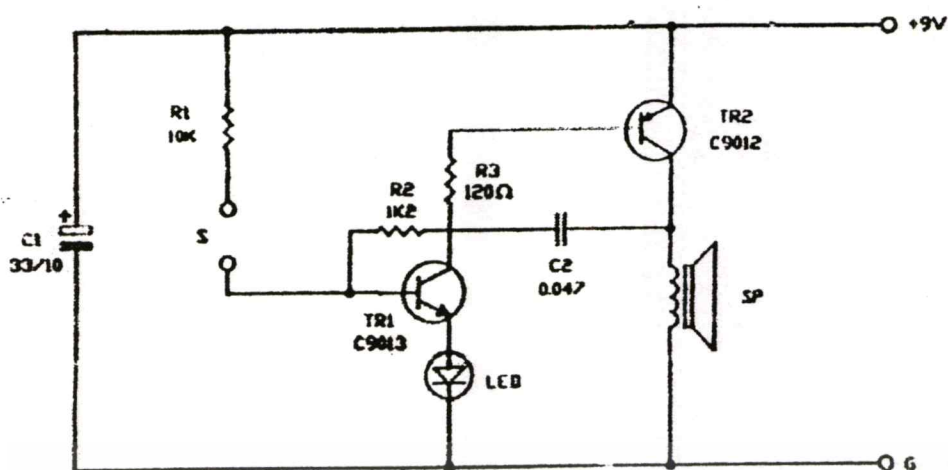
- EF-S 18-55 mm f/3.5-5.6 lens
- Filter size 58mm
- Min. focusing distance 0.28 m
- Minimum aperture f/22-36
- Total pixels 6.5 megapixels (3152x2068)



รูปที่ ข-1 แสดงกล้องดิจิทัล Canon EOS300D

2. วงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นบนแผ่นทดสอบ

วงจรเซ็นเซอร์ตัวนี้จะใช้ในการตรวจจับการเกิดการควบแน่นบนแผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งการนำไปใช้งาน จะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ไว้บนพื้นผิวของแผ่นทดสอบ ในหลาย ๆ จุด แล้วทำการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์เหล่านั้นมายังจุดต่อ S ของวงจร ดังแสดงในรูป ข-2 ซึ่งเมื่อแผ่นทดสอบเริ่มมีความเปียกชื้นขึ้น จะทำให้วงจรทำงานและส่งเสียงสัญญาณเตือนออกมา โดยความถี่ของสัญญาณจะขึ้นอยู่กับความเปียกชื้นบนพื้นผิวทดสอบ ขณะเดียวกันก็จะมีสัญญาณไฟ LED ส่องสว่างขึ้นและจังหวะการ ทิค-ดับ จะตามสัญญาณความถี่ที่ส่งออกมา

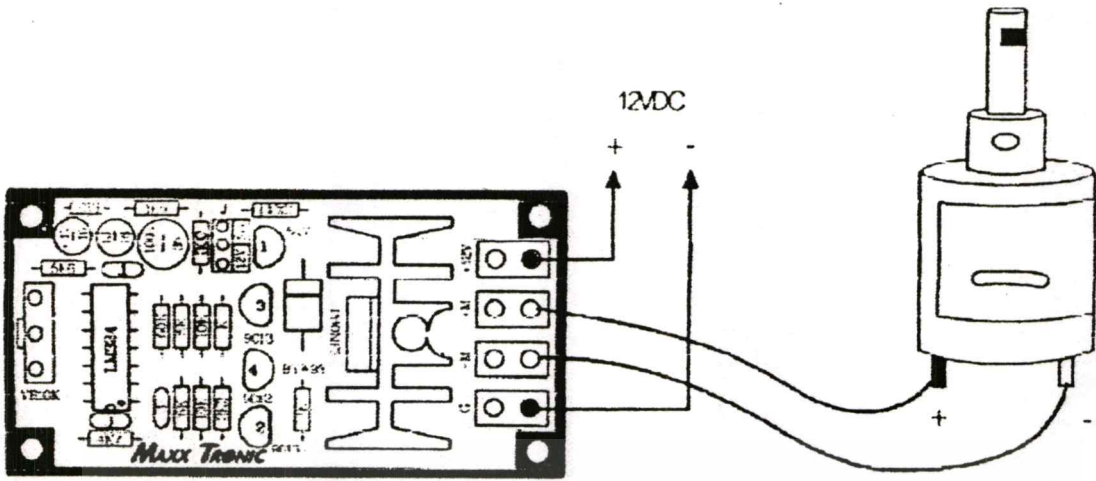


รูปที่ ข-2 แสดงวงจรเซ็นเซอร์ตรวจจับความชื้นบนแผ่นทดสอบ

ลักษณะการทำงาน คือ ตัว TR1 และ TR2 จะเป็นตัวกำเนิดความถี่ โดยความถี่ที่จะได้จากการทำงานของถ่านไฟฉายมาเข้าขา B ของ TR1 โดยผ่านตัว R 1K2 และ C.047 เป็นตัวกำเนิดความถี่ที่ขา B ของ TR1 โดยธรรมชาติจะต้องมีกระแสไฟจ่ายให้ แต่ถ้าไม่มีไฟจ่ายให้ ชุดกำเนิดความถี่จะไม่สามารถทำงานได้โดยที่ขา B จะต่อผ่านจุด S มาเข้ายังเซ็นเซอร์ โดยเซ็นเซอร์นี้จะไม่ต่อถึงกัน แต่เมื่อใดที่เซ็นเซอร์โดนความเปียกชื้น หรือน้ำ ซึ่งจะเป็นตัวนำทางไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟไหลผ่านตัว R 10K ผ่านเซ็นเซอร์ที่เปียกชื้น มาเข้าทางขา B ของ TR1 ทำงาน ชุดกำเนิดความถี่และสัญญาณไฟ LED ก็จะทำงน

3. วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง

- ใช้ไฟเลี้ยงวงจร 12/24 โวลต์ดีซี
- สามารถควบคุมมอเตอร์ DC ขนาด 12/24 โวลต์ และสามารถรับกระแสสูงสุดได้ 15 แอมป์
- ใช้หลักการ PWM (Pulse With Modulation) ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์
- สามารถปรับความเร็วมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 0 – 100%

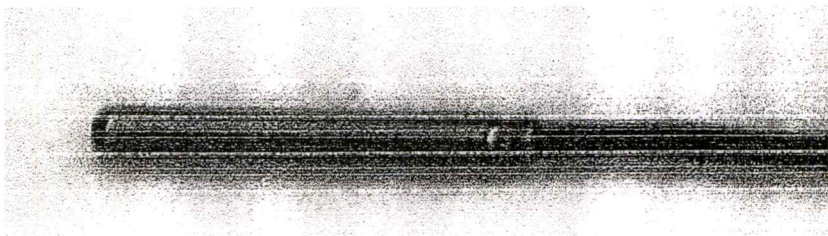


รูปที่ ข-3 แสดงวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ DC

การนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ ข-3 โดยจะทำการต่อไฟฟ้ากระแสตรงจากหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12V โดยขั้วบวกจะต่อเข้ากับจุด +12V ที่วงจร และขั้วไฟลบจะต่อกับจุด G ที่วงจร โดยจุด +M ที่วงจรจะเป็นจุดที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์กระแสตรงที่ขั้วบวก และจุด -M ที่วงจรจะเป็นจุดเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ขั้วลบ ซึ่งการปรับความเร็วของมอเตอร์นั้นจะทำการปรับที่ตัว VR10K นอกจากนี้กรณีที่ใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 24 V สามารถ select jumper ได้ที่ตัว J1

4. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ

- Johnson Controls TE-6300 Series
- Nickel sensor
- Temperature Coefficient : Approximately 3 ohms/F^o (5.4 ohm/C^o)
- Reference Resistance : 1k ohms at 32 F^o (0^oC)
- Accuracy : ± 3.0 F^o at 70 F^o



รูปที่ ข-4 แสดง เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิบนพื้นผิวทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิของเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิดต่าง ๆ

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

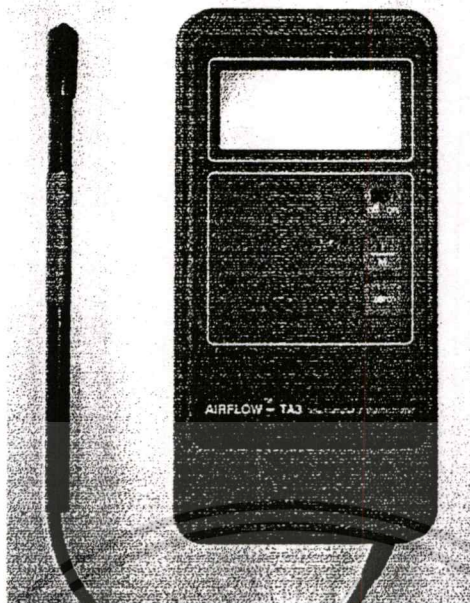
Temperature		Resistance (Ohms)		
°F	°C	Nickel	Platinum	Thermistor
-40	-40	699	843	75466
-30	-34	725	665	52571
-20	-29	751	887	37116
-10	-23	777	908	26539
0	-18	803	930	19208
10	-12	830	952	14062
20	-7	858	974	10408
30	-1	885	996	7784
40	4	914	1017	5880
50	10	942	1039	4484
60	16	971	1061	3450
70	21	1000	1082	2678
80	27	1030	1104	2095

Temperature		Resistance (Ohms)		
°F	°C	Nickel	Platinum	Thermistor
100	38	1090	1147	1313
110	43	1121	1168	1051
120	49	1152	1190	847
130	54	1184	1211	687
140	60	1216	1232	561
150	66	1248	1254	461
160	71	1281	1257	380
170	77	1314	1296	316
180	82	1348	1317	264
190	88	1382	1339	221
200	93	1417	1360	187
210	99	1452	1381	158
220	104	1487	1402	135

5. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

- STEMSHIRE Moter and Drives Limited TA3
- Velocity rang : 0.2 to 30 m/sec
- Telescopic handel – optional 35 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 แสดงเครื่องวัดความเร็วลม TA3

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าที่ได้จากการวัดความเร็วจากเครื่อง TA3 กับความเร็วจริง

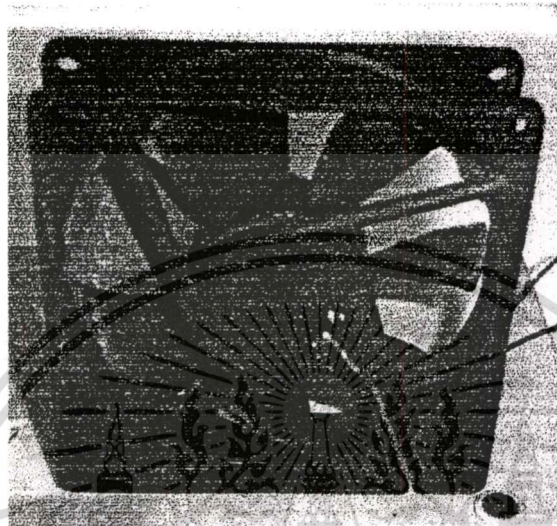
Metric m/s			Imperial ft/min		
Range	Instrument Reading	True Reading	Range	Instrument Reading	True Reading
0 - 20	20.00	20.03	0 - 4000	3937	3944
0 - 20	5.00	5.02	0 - 4000	984	987
0 - 20	0.00	0.00	0 - 4000	0	0

Calibration temperature 20.5°C/ 68.9°F Barometric pressure 1007.6mb./ 29.8"Hg.
 Instrument temperature 20.2°C/ 68.4°F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

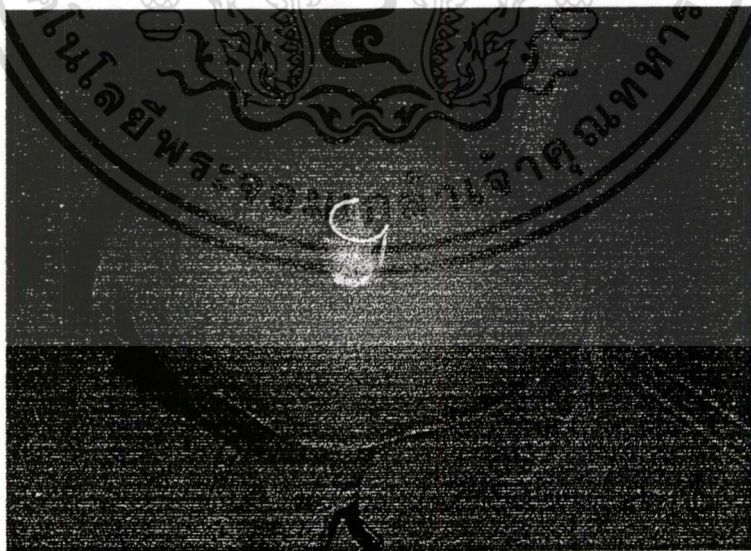
6. พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง

- 12 V DC
- 5200 RPM
- 3 in diameter



รูปที่ ข-6 แสดงพัดลมไฟฟ้ากระแสตรง

7. เครื่องเพิ่มความชื้นในระบบ (Humidifier)



รูปที่ ข-7 แสดงเครื่องเพิ่มความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการทำงานคือ ภายในเครื่องเพิ่มความถี่จะมีวงจรกำเนิดความถี่ระดับ อัลตราโซนิก ซึ่งเป็นคลื่นเสียงที่อยู่เหนือขีดความสามารถที่มนุษย์ได้ยินหรือรับฟังได้ โดยปกติมนุษย์สามารถรับฟังได้ที่ย่านความถี่ประมาณ 20 เฮิรต์ จนถึง 20 กิโลเฮิรต์ ดังนั้นคลื่นอัลตราโซนิก จึงหมายถึงคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิรต์ จนถึง 10^4 จิกะเฮิรต์ ซึ่งคลื่นที่มีความถี่มากกว่า 10^4 จิกะเฮิรต์ และมีแอมพลิจูด (Amplitude) สูง ๆ จะเรียกว่า “ไฮเปอร์ซาวด์”

เมื่อตัวกำเนิดสัญญาณเสียงความถี่สูงทำงาน คลื่นเสียงจะเดินทางผ่านตัวกลางเช่น น้ำหรือของเหลวทั่วไป จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่แอมพลิจูด หรือความดังของเสียงนั้นต่ำ ซึ่งในขณะที่แอมพลิจูดของเสียงเพิ่มขึ้นนั้น ขนาดของความดันที่เป็นลบ (Negative Pressure) ในบริเวณที่คลื่นขยายตัว (Rarefaction) จะเป็นสาเหตุที่จะทำให้ของเหลวแตกตัวออกในที่สุด ซึ่งจะเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์ “คาวิเทชัน” (Cavitation)

ขณะที่คลื่นเสียงเดินทางไปข้างหน้า คาวิเทชัน (Cavitation) จะแกว่ง (Oscillate) ภายใต้อิทธิพลของความดันที่เป็นบวก และจะโคจรมีขนาดที่ไม่มีเสถียรภาพ ในที่สุดจะเกิดการยุบตัวลงอย่างรุนแรงของ Cavitation เป็นผลให้เกิดการ Implosion ซึ่งจะทำให้คลื่น Shock Wave แผ่กระจายออกไปจากบริเวณที่ยุบตัว (Collapse) การยุบตัว (Collapse) และการ Implosion ของคาวิเทชัน ที่เกิดขึ้นจำนวนมากนี้ภายในของเหลว เป็นผลที่เกี่ยวข้องมาจากการกระตุ้น ของคลื่น Ultrasonic นั้นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ

สสาร	อุณหภูมิ °C	k W/m ² °C	ρ kg/m ³	c kJ/kg ² °C	α × 10 ⁵ m ² /s
อะลูมิเนียมออกไซด์, สนิมเงินแดง	30	46	3970	0.76	150
อะลูมิเนียมออกไซด์, เหล็กจำนวนมาก	30	36	3970	0.76	120
แมกนีไซต์	20-55	0.74-0.76			
อิฐ:					
อิฐย่นสร้างอาคาร, ธรรมดา	20	0.69	1600	0.84	5.2
ผิวหน้า		1.32	2000		
อิฐคาร์ไบด์แข็ง	600 1400	18.5 11.1			
อิฐโครม	200 550 900	2.32 2.47 1.99	3000	0.84	9.2 9.8 7.9
ดินโคลนคอกหมกเซนต์, ดินและการสตีไฟ	200 870	0.24 0.31			
อิฐกรไฟ โด่งที่ 2426°F	500 800 1100	1.04 1.07 1.09	2000	0.96	5.4
ไฟที่ 2642°F	500 800 1100	1.28 1.37 1.40	2300	0.96	5.8
ศิลา (Missouri)	200 600 1400	1.00 1.47 1.77	2600	0.96	4.0
แมกนีไซต์	200 650 1200	3.81 2.77 1.90		1.13	
ซีเมนต์, ปอร์ซเลน		0.29	1500		
ฮอร์ตาร์	23	1.16			
ดานดินแอนทราไซด์	30	0.26	1300	1.25	1.6
คอนกรีต, ซีเมนต์	23	0.76			
ดิน, มอลงในสัดส่วน 1-2-4	20	1.37	1900-2300	0.88	8.2-6.8
กระจก, หน้าต่าง	20	0.78 (avg)	2700	0.84	3.4
โครซิติก	30-75	1.09	2200		
แกรไฟต์, ไทโรลิติก แต่ละชั้นขนานกัน	30	1900	2200	0.71	12,200
คังดากกับหิน	30	5.6	2200	0.71	36
พาร์ติคิเลอไรต์					
ควอทซ์หนักต่ำ	30	0.079	590	1.3	1.0
ควอทซ์หนักสูง	30	0.17	1000	1.3	1.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ (ต่อ)

สสาร	อุณหภูมิ °C	k W/m ² °C	ρ kg/m ³	c kJ/kg ² °C	α × 10 ⁷ m ² /s
ปูนปลาสเตอร์, ผนัง	20	0.48	1440	0.84	4.0
แผ่นโลหะเหล็ก ๆ	20	0.47			
แผ่นไม้ซีเมนต์	20	0.28			
พอลิเอทิลีน	30	0.33	960	2.1	1.64
พอลิโพรพิลีน	30	0.16	1150	1.9	0.73
พอลิไวนิลคลอไรด์	30	0.09	1700	1.1	0.48
ยาง, ยาง	30	0.15	1200	2.0	0.62
ซิลิกอนคาร์ไบด์	30	490	3150	0.68	2290
หิน :					
กรานิต	100-300	1.73-3.98	2640	0.82	8-18
หินปูน		1.26-1.33	2500	0.90	5.6-5.9
Marble	40	2.07-2.94	2500-2700	0.80	10-13.6
หินทราย		1.83	2160-2300	0.71	11.2-11.9
เหล็กอ่อน	30	0.35	2200	1.05	1.5
โพลีเอทิลีนไฮดรอกไซด์	30	8.4	4150	0.7	29
ไม้ (ทิศทางขวางกับแกน) :					
บดสว, 8.8 lb/ft ²	30	0.855	140		
ไม้สน (Cypress)	30	0.097	460		
ต้นสน (Fir)	23	0.11	420	2.72	0.96
ผานไม้เนื้ออ่อน (Maple or oak)	30	0.166	540	2.4	1.28
ต้นสน (Yellow pine)	23	0.147	640	2.8	0.82
ต้นสน (White pine)	30	0.112	430		
Acoustic tile :	30	0.06	290	1.3	1.6
โกลิน :					
ยัดหลวม ๆ (Loosely pecked)	-45	0.149			
	0	0.154	470-570	0.816	3.3-4
	100	0.161			
โกลิน-ยัดแน่น	20	0.74			
แผ่นวัสดุ	51	0.166			
Felt, 40 laminations/in	38	0.057			
	150	0.068			
	260	0.083			
20 laminations/in	38	0.078			
	150	0.095			
	260	0.112			
สอ, 4 piles/in	38	0.087			
	93	0.100			
	150	0.119			
ซิลิกอนโกลิน	-	2.08			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ (ต่อ)

สสาร	อุณหภูมิ °C	k W/m·°C	ρ kg/m ³	c kJ/kg·°C	$\alpha \times 10^7$ m ² /s
ไม้บัลซ่า, 2.2 lb/ft ³	32	0.04	35		
การ์คบอร์ด, ขึ้นลอน	-	0.064			
ซีเมนต์เท็กซ์	32	0.048			
กอร์คบอร์ด, 2.2 lb/ft ³	30	0.043	160		
กอร์ค, regranulated	32	0.045	45-120	1.88	2-5.3
Ground	32	0.043	150		
เพชร, ประเภท IIa					
ฉนวน	30	2300	3500	0.509	12,900
ดินโคลนตอมทะเลสาบ (Diatomaceous earth)					
(sil-o-cel)	0	0.061	320		
สักหลาด, หม	30	0.036	130-200		
หนังสือ	30	0.052	330		
โฟมเบอร์, บอร์ดฉนวน	20	0.048	240		
โอสิน, 1.5 lb/ft ³	23	0.038	24	0.7	22.6
ใยแก้ว, บุหุ้มฉนวน	30	0.038	32	0.84	14.1
ใยแก้ว, เป่าหุ้มฉนวน	30	0.043	16	0.84	32
น้ำแข็ง	0	2.22	910	1.93	12.6
อินซูลเน็กซ์, แห้ง	32	0.064			
		0.144			
ปูน	30	0.035			
แมกนีเซียม, 85%	38	0.067	270		
	93	0.071			
	150	0.074			
	204	0.080			
โอสิน, 10 lb/ft ³	32	0.040	160		
เนื้อหุ้มฉนวน	150	0.067	64		
	260	0.087			
ซีเมนต์	23	0.059			
ซิลิกา แอร์โรเจล	32	0.024	140		
สไฟโรโตน	32	0.033			
ไม้ที่ชุบ (ซีเมนต์)	23	0.059			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

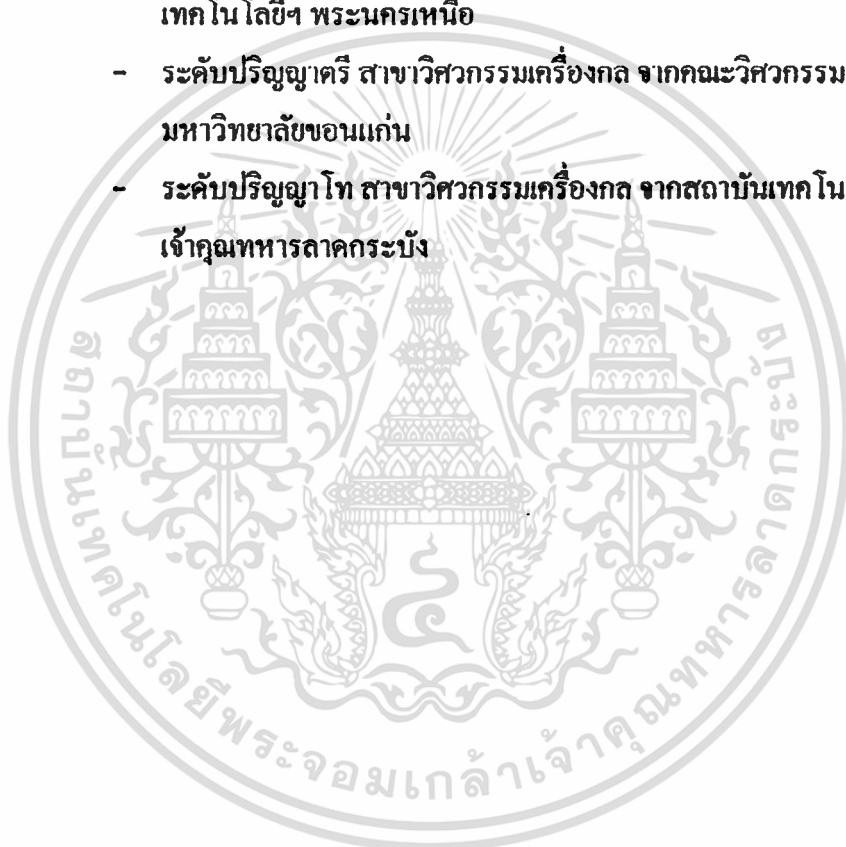
ตาราง ก-2 แสดงค่าการปล่อยออกของวัสดุ

ผิว	T, °F	ค่าการปล่อยออก, g
โลหะอะลูมิเนียม		
อะลูมิเนียม :		
Highly polished plate, 99.3% pure	440-1070	0.039-0.057
แผ่นโลหะชุบสังกะสี	212	0.09
Heavily oxidized	299-940	0.20-0.31
Al-surfaced roofing	100	0.216
ทองเหลือง		
Highly polished	476-674	0.028-0.031
73.2% Cu, 26.7% Zn	494.710	0.033-0.037
62.4% Cu, 36.8% Zn, 0.4% Pb, 0.3% Al	530	0.030
82.9% Cu, 17.0% Zn	70	0.038
Mild-rolled, polished, but direction of polishing visible	120-680	0.22
แผ่นรีดเย็น	100-2000	0.08-0.36
โลหะนิกเกิล		
ผิวขัดมัน	242	0.023
	212	0.052
แผ่นรีดเย็น, ให้ความร้อนก่อน, ปกติความหนาของชั้นออกไซด์	77	0.78
ทอง, บริสุทธิ์, ขัดมัน	440-1160	0.018-0.035
เหล็กและเหล็กกล้า (ไม่รวมสนทนสน)		
เหล็กกล้า, ผิวขัดมัน	212	0.088
เหล็ก, ผิวขัดมัน	900-1880	0.14-0.38
เหล็กหล่อ, newly turned	72	0.44
turned and heated	1620-1880	0.60-0.70
Mild steel	450-1950	0.20-0.32
เหล็กออกไซด์ :		
Iron plate, pickled, then rusted red	68	0.61
เหล็ก, ผิวสีน้ำตาล	212	0.31
Rough ingot iron	1700-2040	0.87-0.95
แผ่นเหล็กกล้ารีดเย็น, มีชั้นออกไซด์หนา	75	0.80
ตะกั่ว :		
ไม่ผ่านการออกไซด์, 99.96% บริสุทธิ์	240-440	0.057-0.075
ออกไซด์สีเทา	75	0.28
ออกไซด์, 300°F	390	0.63
แผ่นรีดเย็น, แผ่นรีดเย็นออกไซด์	530-1520	0.55-0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

- ชื่อ นายเกียรติยศ คีรชค
- วัน-เดือน-ปี เกิด 26 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520
- ประวัติการศึกษา
- มัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนปทุมวารภุมณ์ กรุงเทพฯ
 - ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างยนต์ จากสถาบันเทคโนโลยีฯ พระนครเหนือ
 - ระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 - ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้