

## การควบคุมสภาพอากาศอัตโนมัติในโรงเรือนเพาะปลูกด้วยระบบฟันมอก



นายเฉลิมชาติ เสาวรัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

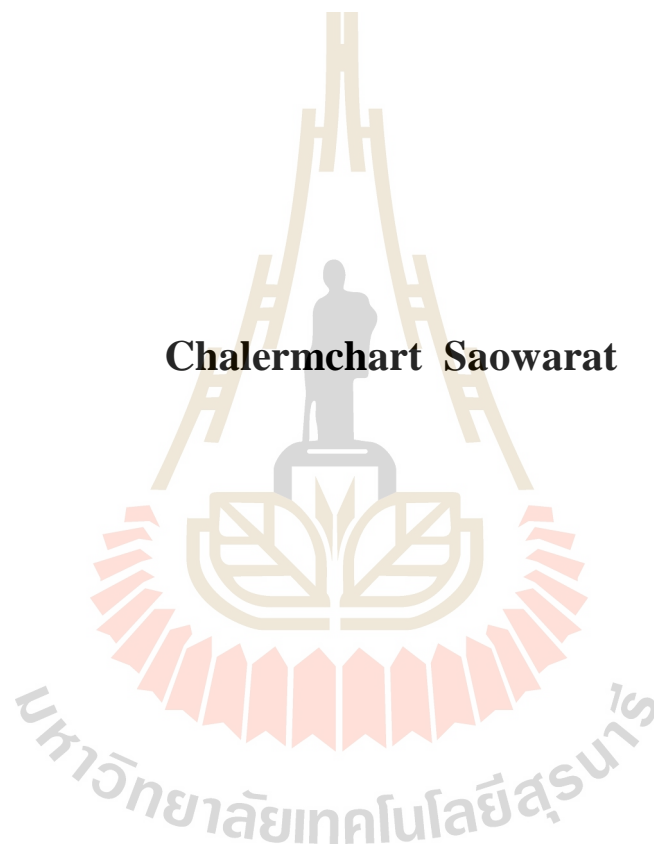
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2560

**AUTOMATIC CLIMATE CONTROL IN GREENHOUSE  
BY FOGGING SYSTEM**

**Chalermchart Saowarat**

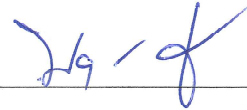


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical and  
Process System Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2017**

## การควบคุมสถานะอากาศอัตโนมัติในโรงเรือนเพาะปลูกด้วยระบบฟันทมออก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



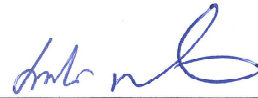
(ผศ. ดร. พงศ์ศักดิ์ จิตยุเสนา)

ประธานกรรมการ



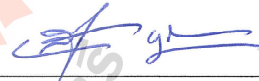
(ผศ. ดร. กระวี ตรีอำรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ



(อ. ดร. สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ



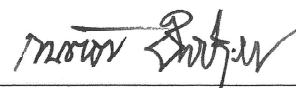
(ผศ. ดร. ปริดา ปราบกวม)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เฉลิมชาติ เสาวรัง : การควบคุมสภาวะอากาศอัตโนมัติในโรงเรือนเพาะปลูกด้วยระบบพ่นหมอก (AUTOMATIC CLIMATE CONTROL IN GREENHOUSE BY FOGGING SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนแบบพ่นหมอกและทดสอบหาค่าสมรรถนะของโรงเรือนต้นแบบที่สร้างขึ้น การลดอุณหภูมิในโรงเรือนอาศัยการพ่นหมอกเพื่อทำให้เกิดกระบวนการระเหยน้ำด้วยความร้อนแฝงและใช้พัดลมช่วยในการระบายอากาศขึ้นออกจากโรงเรือนพร้อมก็นำอากาศใหม่เข้ามาแทนที่ ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) ที่โปรแกรมการทำงานด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศที่พัฒนาขึ้นในการควบคุมการทำงานของหัวพ่นหมอกร่วมกับการระบายอากาศด้วยพัดลม โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT22) ภายในและภายนอกโรงเรือน ต้นแบบโรงเรือนมีขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 8 เมตรและสูง 3 เมตร ติดตั้งปั้มน้ำความดันสูงขนาด 12 บาร์ และหัวพ่นหมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร จำนวน 18 หัว พัดลมหมุนเวียนอากาศในโรงเรือน 2 ตัว และพัดลมระบายอากาศออกจากโรงเรือน 4 ตัว ศึกษาระบบที่พัฒนาขึ้นในกรณีดังต่อไปนี้ 1) การพ่นหมอกด้วยน้ำอุณหภูมิปกติและน้ำเย็นอุณหภูมิตั้งที่ประมาณ  $15^{\circ}\text{C}$  2) การใช้และไม่ใช้ม่านพรางแสงบนหลังคาโรงเรือน ผลการทดสอบระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นพบว่าโรงเรือนที่ไม่ได้ติดม่านพรางแสงมีอุณหภูมิภายในโรงเรือนมากกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  และการติดตั้งม่านพรางแสงช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยให้ต่ำกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  ได้ การพ่นหมอกด้วยน้ำอุณหภูมิตั้งที่ร่วมกับม่านพรางแสงจะมีค่า COP สูงที่สุด 5.64 การไม่ใช้ม่านพรางแสงจะทำให้ระบบมีความสามารถในการระเหยน้ำเฉลี่ยสูงที่สุด 99.36% และการใช้น้ำเย็นในระบบพ่นหมอกเป็นผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย  $0.72\text{ kWh}$  ต่อวัน

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา เฉลิมชาติ เสาวรัง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กระวี ตรีอำนาจ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. นว



CHALERMCHART SAOWARAT : AUTOMATIC CLIMATE CONTROL  
IN GREENHOUSE BY FOGGING SYSTEM. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. KRAWEE TREEAMNUK, D.Eng., 127 PP.

CONTROL/FOGGING SYSTEM/GREENHOUSE

The objective of this research was to develop and test the performance of temperature and humidity control system for fogging greenhouse prototype. The cooling process in greenhouse is a water evaporative process. The heat of air is removed in term of latent heat by water evaporative process and the ambient air is flow into greenhouse during the moist air is ventilated by electric fans. The modified humidity equilibrium equation of air was programed with micro controller board ( Arduino Mega 2560) to control the co-operation of fogging nozzles and ventilation fans. The controller uses DHT22 to receive temperature and humidity inside and outside the greenhouse. The greenhouse prototype is 4 m x 8 m x 3 m in W x L x H and the 12 Bar high pressure water pump and 8 fogging nozzles with hole of 0.1 mm diameter/ piece were installed in the fogging greenhouse system. 2 circulation fans and 4 ventilation fans were installed for circulate the air in greenhouse and vent out the moist air in the operation, respectively. Study the control system in case of 1) the using of room temperature and cool water (approximately 15°C) in the fogging process and 2) the using of plastic screen light shading on greenhouse roof. The results showed that the non-shaded light greenhouse has inside temperature more than 40°C. The shaded light can assists the system to control the greenhouse temperature below 40°C. Fogging the room temperature water with shading the light gives highest COP at 5.64. The highest evaporative efficiency 99.36% resulted by the system without light

shading and the using of cool water in fogging system cause the highest electric energy consumption at 0.72 kWh per day.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Chalermchart S.

Advisor's Signature Kralee Treeamnuk

Co-Advisor's Signature T. Treeamnuk

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดีทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่เมตตาให้โอกาสทางการศึกษา อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัย รวมทั้งอดทนต่อผู้วิจัยจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสน ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องโดยสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริดา ปรากฏมาก กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้เชี่ยวชาญในด้านโรงเรือนเพาะปลูกพืช ซึ่งตรงกับงานวิจัยนี้ ที่ได้ให้คำชี้แนะเกี่ยวกับการทำวิจัยเพื่อให้ได้ผลการวิจัยออกมาสมบูรณ์ตามที่ต้องการ รวมทั้งตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ และแนะนำส่วนที่ผิดพลาด ทำให้เนื้อหาสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

นายเกียรติศักดิ์ ใจโต และนายเกรียงไกร ราชณะสุข นักศึกษาบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือขณะสร้างและทดสอบงานวิจัย รวมทั้งรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อนบัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้มอบทุนอุดหนุนการทำวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษาและทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัยและขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เลี้ยงดูอบรม เป็นกำลังใจและส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาที่ดีตลอดมา

เฉลิมชาติ เสาวรัง

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 หลักการ.....	3
2.2 ผักปลอดภัยจากสารพิษ .....	3
2.3 โรงเรือนเพาะปลูก .....	4
2.4 ทัศนั้วรรณกรรม .....	5
2.5 ระบบพ่นหมอก .....	7
2.6 คุณสมบัติของอากาศ .....	8
2.6.1 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำ .....	8
2.6.2 Psychrometric chart.....	9

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7	กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น .....	12
2.8	Adiabatic Mixing of two Stream of Moist air.....	14
2.9	การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้พ่นหมอก.....	15
2.10	การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนความร้อนที่อากาศคายออกมา.....	15
2.11	การคำนวณหาสมรรถนะการทำความเย็น .....	16
2.12	การคำนวณหาความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก.....	16
2.13	Arduino .....	16
2.14	Sensor วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT22.....	17
2.15	อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์ Tenmars TM-206 .....	18
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>19</b>
3.1	บทนำ.....	19
3.2	การออกแบบกระบวนการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก.....	20
3.3	การออกแบบและสร้างโรงเรือน .....	22
3.4	การออกแบบระบบควบคุม การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก .....	24
3.5	การทดสอบหาอัตราการไหลของหัวพ่นหมอก .....	25
3.5.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	25
3.5.2	ขั้นตอนการทดสอบ .....	26
3.6	การทดสอบระบบ.....	27
3.7	การประเมินระบบ .....	27
<b>4</b>	<b>ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล .....</b>	<b>28</b>
4.1	ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา.....	30
4.1.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	30
4.1.2	ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก.....	33
4.1.3	ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้.....	34

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือน ไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา.....	35
4.2.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	35
4.2.2	ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก .....	38
4.2.3	ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ .....	39
4.3	ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีกรพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา.....	40
4.3.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	40
4.4	ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา.....	43
4.4.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	43
4.4.2	ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก .....	46
4.4.3	ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ .....	47
4.5	ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา.....	48
4.5.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	48
4.5.2	ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก .....	51
4.5.3	ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ .....	52
4.6	ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีกรพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา.....	53
4.6.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	53
4.7	การเปรียบเทียบผลการทดลอง .....	56
4.7.1	ความสามารถในการลดอุณหภูมิ.....	56
4.7.2	สมรรถนะการทำความเย็น .....	59

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5 บทสรุป .....	62
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดสอบ .....	65
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ .....	92
ภาคผนวก ค รูปขณะทำการทดสอบ .....	97
ภาคผนวก ง บทความที่ตีพิมพ์ .....	103
ประวัติผู้เขียน .....	127



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหาอัตราการไหลหัวพ่นหมอก .....26
4.1	อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....31
4.2	ความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....32
4.3	อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....35
4.4	อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....37
4.5	ความชื้นของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....37
4.6	อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....40
4.7	อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....42
4.8	ความชื้นของผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....43
4.9	อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรียนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....44
4.10	ความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรียนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคาคลุม .....45

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11	48
อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	
4.12	50
อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
4.13	51
ความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
4.14	53
อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
4.15	55
อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	
4.16	56
ความชื้นของผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
ก.1	66
แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
ก.2	69
แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอก และ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
ก.3	70
แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นใน การพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
ก.4	74
แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิ จากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	
ก.5	75
แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.6 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยเปิดพัคลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	78
ก.7 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	79
ก.8 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องใน การพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	82
ก.9 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจาก เครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม .....	83
ก.10 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอก และโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	85
ก.11 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัคลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	87
ก.12 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยเปิดพัคลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคาคลุม.....	91

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการทำงานของระบบควบคุม.....3
2.2	การปลูกแบบ NFT ในโรงเรือนแบบปิด.....4
2.3	หัวพ่นหมอก (Fogger) .....4
2.4	ทรงโรงเรือนแบบ โค้ง .....5
2.5	การกระจายตัวของอุณหภูมิแบบหลังคา โค้ง .....5
2.6	หัวพ่นหมอก.....8
2.7	ค่าสมบัติของอากาศชื้นแผนภูมิไซโครเมตริก.....9
2.8	Cooling and humidification process..... 12
2.9	Path of psychrometric chart..... 12
2.10	Mixing of air steam process ..... 14
2.11	Path of psychrometric chart ..... 14
2.12	Arduino Mega 2560 R3 ..... 17
2.13	DHT 22 ..... 17
2.14	Tenmars TM-206 Solar Power Meter..... 18
3.1	กระบวนการคำนวณบนไซโครเมตริก ..... 20
3.2	Flow chart process ..... 21
3.3	แบบของโรงเรือนที่ใช้ในการทดลอง..... 23
3.4	โรงเรือนต้นแบบที่สร้างขึ้น..... 24
3.5	แผนผังของระบบ ..... 25
3.6	กล่องควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ ..... 26
3.7	การทดสอบหาอัตราการไหลของหัวพ่นหมอก ..... 27
3.8	การชั่งขวดชมพูบนเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล..... 27
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ..... 31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	32
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา.....	33
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา.....	34
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	35
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	36
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	37
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา.....	38
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา.....	39
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	40
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	41
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	42
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา.....	43
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	44
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	45
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา.....	46
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา.....	47
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	48
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	49
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	50
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา.....	51
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา.....	52
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	53
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา.....	54
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา.....	55
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา.....	56
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับวิธีการทดสอบ.....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับวิธีการทดสอบ .....	58
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้กับวิธีการทดสอบ .....	58
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับวิธีการทดสอบ .....	59
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์กับวิธีการทดสอบ .....	59
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานกับวิธีการทดลอง .....	61
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการทำความเย็นกับวิธีการทดลอง .....	62
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh) กับวิธีการทดลอง .....	62
ค.1 ทำน้ำเย็นสำหรับลดอุณหภูมิน้ำและปั้มน้ำสำหรับพ่นหมอก .....	98
ค.2 กล้องควบคุมและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นภายนอกโรงเรียน .....	98
ค.3 โรงเรียนที่ใช้ในการทดสอบ .....	99
ค.4 โรงเรียนแบบไม่มีม่านพรางแสง .....	99
ค.5 โรงเรียนแบบมีม่านพรางแสง .....	100
ค.6 การวางเซนเซอร์ภายในโรงเรียน .....	100
ค.7 การวางเซนเซอร์ภายในโรงเรียน .....	101
ค.8 หัวพ่นหมอกที่ใช้ในการทดสอบ .....	101
ค.9 การวัดพลังงานแสงอาทิตย์ .....	102

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	=	ค่าคงที่
ln	=	ลอการิทึมธรรมชาติ
$p_{ws}$	=	ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa)
$T_{dry}$	=	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°C)
$T_{wet}$	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียก (°C)
$\phi$	=	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ไม่มีหน่วย)
x	=	ความชื้นจำเพาะหรืออัตราส่วนความชื้น ( $kg_w/kg_{dry}$ )
$p_w$	=	ความดันไอน้ำจริงในอากาศ (Pa)
p	=	ความดันบรรยากาศ (Pa)
Z	=	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (m)
h	=	เอนทาลปี ( $kJ/kg_{dry}$ )
v	=	ปริมาตรจำเพาะของอากาศ ( $m^3/kg_{dry}$ )
$\dot{m}_w$	=	อัตราการไหลของน้ำ ( $kg_w/s$ )
$\dot{m}_a$	=	อัตราการไหลของอากาศ ( $kg_{dry}/s$ )
$m_w$	=	น้ำหนักที่ใช้ในการน้ำพ่นหมอก ( $kg_w$ )
$v_a$	=	ปริมาตรอากาศในโรงเรือน ( $m^3$ )
$v_u$	=	ปริมาตรจำเพาะของอากาศก่อนพ่นหมอกในโรงเรือน ( $m^3/kg_{dry}$ )
$Q_{cool}$	=	ปริมาณพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมา (kJ)
$c_{p,a}$	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ( $kJ/kg\ K$ )
$T_u$	=	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก (°C)
$T_{di}$	=	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอก (°C)
$T_{wi}$	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียกหลังพ่นหมอกของอากาศในโรงเรือน (°C)
COP	=	สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ Fogging system (ไม่มีหน่วย)
$W_{electrical}$	=	ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kJ)
$\eta_{evap}$	=	ความสามารถการระเหยของน้ำ (%)
NFT	=	Nutrient Film Technique



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผักปลอดภัยจากสารพิษเป็นสินค้าชนิดหนึ่งที่มีนิคมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในการส่งออกเชิงพาณิชย์ และการจำหน่ายเพื่อการบริโภคทั่วไป เนื่องจากเป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่มีความปลอดภัย คุณภาพของผักปลอดภัยจากสารพิษเป็นเรื่องสำคัญมากในการกำหนดราคาและปริมาณการจำหน่าย ในปัจจุบันผักปลอดภัยจากสารพิษมีการปลูกในที่โล่งแจ้งทำให้ได้รับผลกระทบหลายปัจจัยคือ ภูมิอากาศ ซึ่งภูมิอากาศแต่ละที่มีความแตกต่างกันและในปัจจุบันได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญา ทำให้ฝนตกมากกว่าปกติในบางพื้นที่และอาจจะก่อให้เกิดภาวะอุทกภัย การชะล้างธาตุอาหารบนหน้าดิน เกิดปัญหาสวนขาดธาตุอาหาร จึงทำให้ต้องใส่ปุ๋ยเพิ่มส่งผลให้ต้นทุนในการปลูกสูงขึ้น แมลงและศัตรูพืชซึ่งเป็นศัตรูของการปลูกผักปลอดภัยจากสารพิษเข้ากัดกินและทำลายผลผลิตโดยตรง เช่น เพลี้ยไฟ จะเข้าทำลายน้ำเลี้ยงในใบอ่อนหรือยอดอ่อน ทำให้พืชเกิดสภาวะชะงักการเจริญเติบโตและแห้งตายในที่สุด ซึ่งการแก้ไขปัญหาได้โดยการใช้สารเคมี โรคของพืชเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของผักปลอดภัยจากสารพิษต่ำลงและสามารถทำลายผลผลิตได้ทั้งสวนเนื่องจากสามารถแพร่ระบาดได้ เช่น เชื้อรา เชื้อแบคทีเรีย เชื้อไวรัส ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นปัจจัยที่ทำให้ทั้งคุณภาพและปริมาณของผักปลอดสารพิษต่ำลง วิธีการหนึ่งที่จะทำให้คุณภาพและผลผลิตสูงขึ้นคือการนำเทคโนโลยีที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้ในการปลูกผักปลอดสารพิษ ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมได้นำระบบโรงเรือนเพาะปลูกมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้แต่ทว่ายังเป็นการลงทุนที่สูงซึ่งไม่เหมาะสมกับเกษตรกรรายย่อย

ระบบโรงเรือนเพาะปลูกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปลูกพืช ซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น สามารถควบคุมสารละลายธาตุอาหาร สามารถลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรค แมลงศัตรูพืชและอีกทั้งยังสามารถควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะพัฒนาโรงเรือนเพาะปลูกที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมและทดสอบหาค่าสมรรถนะของโรงเรือนที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้เหมาะสมสำหรับเกษตรกรรายย่อยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับสวนของเกษตรกรได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาโรงเรียนเพาะปลูกควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในระดับห้องปฏิบัติการ
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรียนที่พัฒนาขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. โรงเรียนเพาะปลูกระดับห้องปฏิบัติการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยการพ่นหมอกละอองน้ำ
2. ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในการควบคุม
3. สถานที่ทำการทดลอง ณ อาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา (Latitude 14.89 N , Longitude 102.00 E, Altitude, 252m)
4. คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
5. คุณสมบัติทางความร้อนของอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้น
6. ไม่มีฝุ่นและคราบสกปรกบนหลังคาและผนัง
7. ผนังมีความบางมากไม่มีการนำความร้อนในผนัง
8. การรั่วของอากาศเข้าโรงเรียนมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการระบายอากาศด้วยพัดลม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

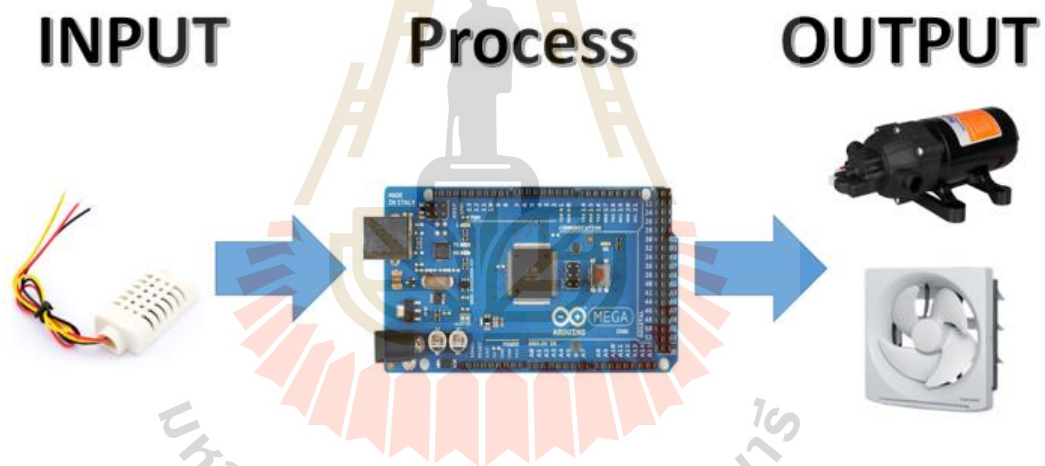
1. ได้โรงเรียนควบคุมอุณหภูมิและความชื้นต้นแบบสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ
2. ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่
3. ช่วยเพิ่มผลผลิตพืชที่ต้องการอุณหภูมิต่ำ ความชื้นสูงให้สามารถปลูกในพื้นที่ต่างๆ ได้
4. สามารถส่งเสริมให้เกิดการสร้างงานในชุมชนเกษตรกรในชนบท ลดการทิ้งถิ่นฐานเพื่อเข้าไปหางานทำในเมือง

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโรงเรือนควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้บอร์ด Arduino เป็นตัวควบคุม โดยระบบจะรับค่าจาก Sensor เข้ามาประมวลผลในบอร์ด Arduino ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งทำการเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมอุปกรณ์ในระบบและคำนวณปริมาณน้ำในการพ่นหมอกในโรงเรือน โดยการคำนวณจะใช้กฎอนุรักษพลังงานเพื่อคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอกน้อยที่สุดและให้สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้ได้มากที่สุด



รูปที่ 2.1 กระบวนการทำงานของระบบควบคุม

#### 2.2 ผักปลอดภัยจากสารพิษ

ผักปลอดภัยจากสารพิษ หมายถึง ผลผลิตพืชผักที่ไม่มีสารเคมีป้องกันและกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ หรือมีตกค้างอยู่ไม่เกินระดับมาตรฐานที่กระทรวงสาธารณสุขกำหนดไว้ (วิไลภรณ์ ชนกนำชัย และ ปญวีดี วงศ์รัตนธรรม, 2551) โดยทั่วไปแล้วสารเคมีที่ป้องกันจะมีไว้ป้องกันแมลงกัดกินผักและทำลายศัตรูพืชที่อยู่ในแปลง โดยสามารถแก้ไขปัญหาดังนี้ได้โดยใช้โรงเรือนเพาะปลูกในการป้องกันแมลงและศัตรูพืช

ผักไฮโดรโปนิกส์ คือ การปลูกพืชในน้ำที่มีธาตุอาหารพืชละลายอยู่ หรือการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารพืช ทดแทนการปลูกพืชในดินที่ใช้ในการปลูกพืชในการเกษตร ไม่ใช่สารเคมีกำจัดศัตรูพืช ไม่ก่อให้เกิดสารเคมีตกสู่ร่างกาย (วารินี ธรรมชาติไพศาล, 2555)

ในการปลูกพืชไร้ดินหรือระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ Nutrient Film Technique (NFT) ในโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดดังรูปที่ 2.2 จะต้องควบคุมให้มีอุณหภูมิ 25 – 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 – 80 เปอร์เซ็นต์ (ดิเรก ทองอร่าม, 2550; นกมล เรียบเลิศหิรัญ, 2553) ซึ่งวิธีการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ที่นิยมใช้อย่างหนึ่งคือ การพ่นหมอก (Fogging system) ดังรูปที่ 2.3



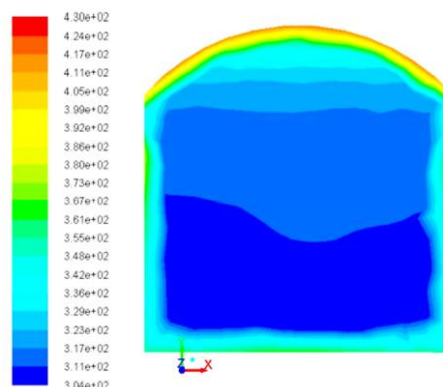
รูปที่ 2.2 การปลูกแบบ NFT ในโรงเรือนแบบปิด  
(ดิเรก ทองอร่าม, 2550)

รูปที่ 2.3 หัวพ่นหมอก (Fogger)  
(วันชัย คุปวานิชพงษ์, 2555)

### 2.3 โรงเรือนเพาะปลูก

โรงเรือนหมายถึง โครงสร้างที่ประกอบขึ้นด้วยวัสดุหลายประเภท พร้อมทั้งมีวัสดุ โปร่งแสงทำหน้าที่หลังคาปกคลุม ซึ่งยินยอมให้แสงแดดส่องผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้ ซึ่งจุดเด่นของโรงเรือนเพาะปลูกคือในพื้นที่บางแห่งเกษตรกรไม่สามารถปลูกพืชภายนอกโรงเรือนได้เพราะอุณหภูมิและความเข้มแสงเป็นอันตรายต่อพืช (พูลศักดิ์ ทองดอนเจ็ง และ ช้อนนาง ยอดสง่า, 2546) และมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น สามารถควบคุมสารละลายธาตุอาหาร สามารถลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรคแมลง ศัตรูพืชและอีกทั้งยังสามารถควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้

อุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญส่วนหนึ่งในการเจริญเติบโตของพืช โดยการออกแบบเพื่อลดอุณหภูมิสามารถทำได้โดยออกแบบโครงสร้างหลังคาแบบโค้ง เนื่องจากลักษณะของความโค้งของหลังคาที่ทำให้สามารถกระจายอุณหภูมิได้สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 (ประพันธ์พงษ์ สมศิลา, อำไพศักดิ์ ทิบุญมา, ประทีป ตุ่มทอง, สุริยา อุดด้วง และ มานะ วิชางาม, 2555)



รูปที่ 2.4 ทรงโรงเรือนแบบโค้ง  
(ประพันธ์พงษ์และคณะ, 2555)

รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของอุณหภูมิแบบหลังคาโค้ง  
(ประพันธ์พงษ์และคณะ, 2555)

สามารถใช้ตาข่ายพรางแสงบนหลังคา 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดความเข้มแสง สำหรับพืชผักและใช้ระบบพ่นหมอกซึ่งระบบนี้เป็นวิธีการลดอุณหภูมิในโรงเรือนที่สามารถช่วยลดอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี (ASAE, 2002) ความชื้นสัมพัทธ์จะถูกควบคุมโดยใช้ระบบพ่นหมอกในการลดและเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ (วันชัย คุปวานิชพงษ์, 2555)

## 2.4 ปรัชษฐ์นวัตกรรม

ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เป็นส่วนหนึ่งหนึ่งในโรงเรือนเพาะปลูก ซึ่งช่วยในการควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ได้มีนักวิจัยที่พัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในหลายรูปแบบ

ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์ (2557) ได้ทำการทดสอบในโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดใช้การทำความเย็นแบบผสมระหว่างการระเหยน้ำ (Evaporative system) และระบบพ่นหมอก (Fogging system) โดยตั้งเงื่อนไขการทำงานคือรักษาอุณหภูมิภายในโรงเรือนไม่ให้เกิน 30 องศาเซลเซียส พบว่า สามารถรักษาอุณหภูมิในโรงเรือนเฉลี่ย 30.45 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 80.54 เปอร์เซ็นต์

ศุภวุฒิ ผลกา, สันติ วงศ์ใหญ่ และ อติสร ถมยา (2557) ได้พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดในโรงเพาะเห็ดบ้านทุ่งบ่อเป็น ตำบลปลงยางค อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง โดยออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้น้ำจ่ายหัวสปริงเกอร์เพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถควบคุมไม่ให้อุณหภูมิเกิน 35 องศาเซลเซียสได้และได้ผล



ผลิตเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.13 เท่าเมื่อเทียบกับผลผลิตเห็ดที่ไม่มีควบคุมอุณหภูมิและความชื้น อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำในการสปริงเกอร์ลดลงจาก 110 ลิตร เป็น 40 ลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเปิดปิดโดยใช้คน

บุญยฤทธิ์ เพื่อทดสอบ, ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์ และ บัญญัติ เศรษฐฐิติ (2557) ได้ประยุกต์ใช้หอทำน้ำเย็นในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตพืช โดยใช้หอทำน้ำเย็นลดอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในสารละลายธาตุอาหารและระบบพ่นหมอกในการลดอุณหภูมิภายในโรงเรือน การทดสอบโดยเปรียบเทียบและนำมาใช้ร่วมกัน 4 กรรมวิธี ได้แก่ (1) ไม่ติดตั้งระบบทำความเย็น (2) ติดตั้งเฉพาะหอทำน้ำเย็น (3) ติดตั้งเฉพาะระบบพ่นหมอก (4) ติดตั้งทั้งหอทำน้ำเย็นและระบบพ่นหมอก พบว่า ระบบทำความเย็นทั้ง 2 ระบบ มีความสามารถในการเพิ่มผลผลิตกรีนโอ๊คที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ระบบพ่นหมอกมีความสามารถในการเพิ่มผลผลิตเรดโอ๊คมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่มีผลทำให้ผลผลิตบัตเตอร์เฮดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นิติรงค์ พงษ์พานิช, วัชรพล ชยประเสริฐ, ภัทรพร สัตตชาติเจดน์, อธิติเดช มูลมั่งมี และ กฤษฎา แสงเพ็ชรส่อง (2558) ได้ทดสอบโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดที่ใช้ระบบ Evaporative cooling โดยใช้ MATLAB Simulink สำหรับเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของระบบ ณ จังหวัดนครปฐม พบว่า ประสิทธิภาพของโรงเรือนสูงสุดอยู่ที่ 58% และสามารถลดอุณหภูมิลงได้  $4^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$  จากอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน และปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของโรงเรือน คือ สถานที่ทำการทดลองและช่วงเวลาการทดลอง ซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกัน

บุญยัง สิ่งเจริญ และ สันติ สาแก้ว (2559) ได้ออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสำหรับโรงเรือนเพาะเห็ดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้น้ำในการพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นโดยทดสอบส่วนของระบบควบคุมและทดสอบผลผลิตที่ได้จากก้อนเห็ดจำนวน 100 ก้อน พบว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ระหว่าง  $25^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 80 – 85% และได้ผลผลิตเฉลี่ยมากกว่าแบบโรงเรือนทั่วไป ซึ่งผลการทดสอบยืนยันว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของเห็ด

Montero, Anton, Beil, and Franquet (1994) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้ระบบพ่นหมอกในโรงเรือน โดยใช้ระบบพ่นหมอกทำความเย็นในโรงเรือนร่วมกันม่านพรางแสง 45 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดระหว่างวันได้  $5^{\circ}\text{C}$  และสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 85% ได้

Arbel, Yekutieli, and Barak (1999) ได้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกสำหรับลดอุณหภูมิอากาศในโรงเรือน ณ หมู่บ้านอวารา ประเทศอิสราเอล ขนาดละอองพ่นหมอก 2 – 60 ไมโครเมตร ในโรงเรือนขนาดความกว้าง 16 เมตร ความยาว 24 เมตร โดยใช้วิธีการคำนวณ

อัตราการไหลของน้ำสำหรับพ่นหมอกและอัตราการไหลของอากาศสำหรับระบายอากาศแล้วเปรียบเทียบกับระบบ Evaporative pad จากการทดลองพบว่า ระบบพ่นหมอกมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอนุภาคและความชื้นในโรงเรือนได้สม่่าเสมอมากกว่าระบบ Evaporative pad

Abdel-Ghany and Kozai (2006) ได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบพ่นหมอกด้วยน้ำในโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดโดยคำนวณจากการสมดุลพลังงานและสมดุลมวล ทำการพ่นหมอกที่อัตราการไหล 10 กรัมต่อวินาทีโดยพ่นหมอกเป็นเวลา 30 60 และ 90 วินาที ในคาบเวลา 90 180 และ 270 วินาที พบว่าการพ่นหมอกเป็นเวลา 60 วินาที ในคาบเวลา 180 วินาที ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

Lihan, Alper, Bahadir, and Mustafa (2016) ได้ทดสอบโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดที่ใช้การทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (Evaporative system) โดยใช้พื้นดินในการลดอุณหภูมิของน้ำที่จะใช้ใน ระบบ Evaporative cooling ณ เมือง Karabuk, Turkey โดยทำการทดสอบความเร็วลมขาเข้าและขาออกที่แตกต่างกันกรณีแรกความเร็วลมขาเข้า 1.3 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมขาออก 1 เมตรต่อวินาที และกรณีที่สองความเร็วลมขาเข้า 2.3 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมขาออก 2 เมตรต่อวินาที พบว่าประสิทธิภาพของโรงเรือนที่ได้ในกรณีแรกมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่างประมาณ 45 – 70 เปอร์เซ็นต์และกรณีที่สองประสิทธิภาพอยู่ระหว่างประมาณ 65 – 85 เปอร์เซ็นต์และพบว่าปริมาณ Air Change rate ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของโรงเรือนสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

## 2.5 ระบบพ่นหมอก

ระบบพ่นหมอกเป็นรูปแบบหนึ่งของการทำความเย็นจากการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling) ระบบประกอบด้วยปั้มน้ำแรงดันสูง (ประมาณ 1000 PSI หรือ 6.9 MPa) ท่อน้ำทนแรงดันสูง และหัวพ่นหมอก (Fogging Nozzle) (รูปที่ 2.6) หมอกซึ่งเป็นละอองน้ำเล็กมาก ขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางละอองประมาณ 2 – 60 ไมโครเมตร ถูกพ่นให้กระจายทั่วทั้งโรงเรือน ขณะละอองหมอกระเหยจะดึงความร้อนจากอากาศภายในโรงเรือน ส่งผลให้โรงเรือนอุณหภูมิลดลงและค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ข้อควรระวังของระบบพ่นหมอกคือ คุณภาพของน้ำ เนื่องจากสิ่งสกปรก สามารถทำให้หัวพ่นหมอกอุดตัน จึงจำเป็นต้องใช้ชุดกรอง (Multiple Filters) ในระบบเสมอ





รูปที่ 2.6 หัวพัดหมอก

(วารากร สังข์กระเสร์, ธรรมชาติ กลิ่นเกสร และ เสกสรร มธุลาภรังสรรค์, 2558)

## 2.6 คุณสมบัติของอากาศ

### 2.6.1 สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของน้ำ

ความดันไออิ่มตัวของไอน้ำจำเป็นต้องใช้เพื่อกำหนดคุณสมบัติของอากาศชื้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ โดยความดันไออิ่มตัวของน้ำในช่วงอุณหภูมิ 0 – 200 องศาเซลเซียสสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 (ASHRAE, 2001)

$$\ln p_{ws} = C_1 / T_{dry} + C_2 + C_3 T_{dry} + C_4 T_{dry}^2 + C_5 T_{dry}^3 + C_6 \ln T_{dry} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $C_1 = -5.8002206e+03$

$C_2 = 1.3914993e+00$

$C_3 = -4.8640239e-02$

$C_4 = 4.1764768e-05$

$C_5 = -1.4452093e-08$

$C_6 = 6.5459673e+00$

$\ln$  = ลอการิทึมฐานธรรมชาติ

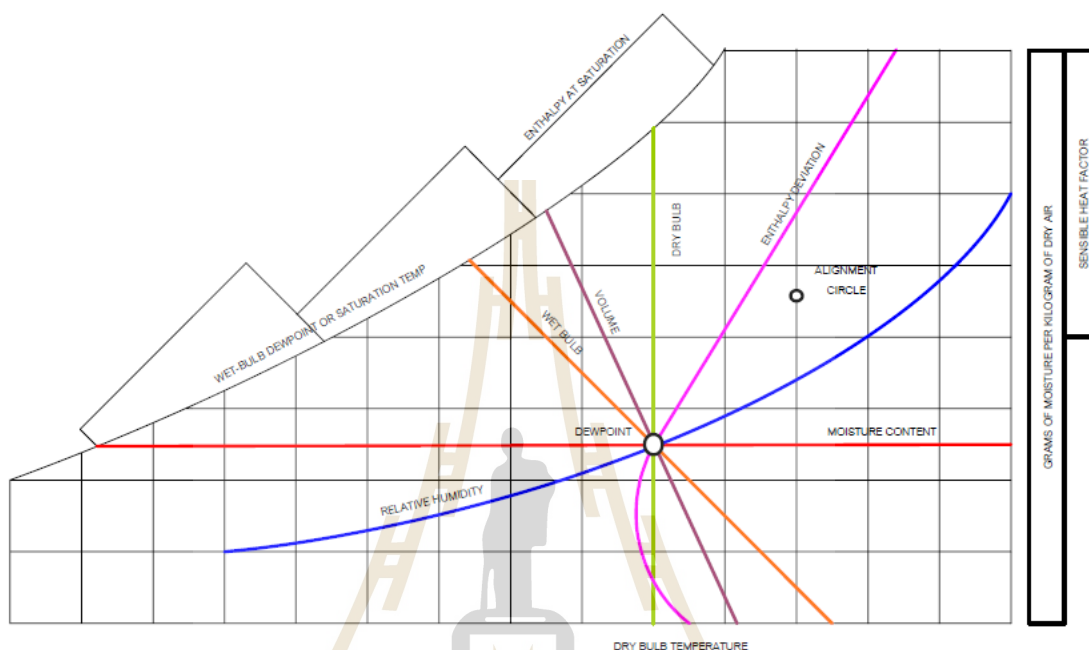
$p_{ws}$  = ความดันไอน้ำอิ่มตัว, Pa

$T_{dry}$  = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง,  $K = ^\circ C + 273.15$

## 2.6.2 Psychrometric chart

แผนภูมิไซโครเมตริก คือแผนภูมิที่แสดงค่าคุณสมบัติของอากาศที่สภาวะต่าง ๆ

ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ค่าสมบัติของอากาศขึ้นแผนภูมิไซโครเมตริก  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553)

แผนภูมิไซโครเมตริกเป็นแผนภูมิเพื่อแสดงสภาวะของอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการปรับอากาศต่างๆ และสามารถใช้ในการประเมินภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ของระบบปรับอากาศ โดยแผนภูมิไซโครเมตริกแสดงค่าสมบัติที่สำคัญของอากาศขึ้นได้ดังนี้

- 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry-bulb Temperature) แสดงบนแกนนอนของแผนภูมิ อุณหภูมิกระเปาะแห้งสามารถวัดและอ่านได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบธรรมดา
- 2) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-bulb Temperature) แสดงบนเส้นแนวทแยงของแผนภูมิ อุณหภูมิกระเปาะเปียกสามารถวัดและอ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีผ้าหรือสำลีชุบน้ำชุ่มอยู่ที่กระเปาะและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 (Stull, 2011)

$$T_{\text{wet}} = T_{\text{dry}} \operatorname{atan}[0.151977(\phi + 8.313659)^{1/2}] + \operatorname{atan}(T_{\text{dry}} + \phi) - \operatorname{atan}(\phi - 1.676331) + 0.00391838(\phi)^{3/2} \operatorname{atan}(0.023101\phi) - 4.686035 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $T_{\text{wet}}$  = อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C  
 $\phi$  = ความชื้นสัมพัทธ์, ไม่มีหน่วย

3) อุณหภูมิจุดกลั่นตัว (Dew-point Temperature) คือ ค่าของอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำเริ่มกลั่นตัว อุณหภูมิจุดกลั่นตัวที่ภาวะหนึ่งๆ อ่านได้โดยการลากเส้นแนวนอนจากสภาวะนั้นๆ ไปทางซ้ายของแผนภูมิจนตัดเส้นโค้งความชื้นสัมพัทธ์ 100% และค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่อ่านได้ ณ จุดนั้นคืออุณหภูมิจุดกลั่นตัว

4) ความชื้น

4.1) ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) หมายถึง มวลของไอน้ำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรอากาศ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

4.2) ความชื้นจำเพาะหรืออัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) หมายถึง มวลของไอน้ำต่อมวลของอากาศแห้งหนึ่งหน่วย ( $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dry}}$ ) แสดงบนแกนตั้งของแผนภูมิและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 (ASHRAE, 2001)

$$x = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $x$  = ความชื้นจำเพาะหรืออัตราส่วนความชื้น,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dry}}$

$p_w$  = ความดันไอน้ำจริงในอากาศ, Pa

$p$  = ความดันบรรยากาศ ณ จังหวัดนครราชสีมา, Pa

4.2.1) ความดันบรรยากาศ คือแรงที่มวลของอากาศกระทำต่อหน่วยพื้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนโลก มีหน่วยเป็น Pascal ระดับความดันที่ใช้เป็นมาตรฐานคือความดันที่ระดับน้ำทะเลซึ่งมีค่าเท่ากับ 101.325 Pa โดยสามารถคำนวณหาความดันบรรยากาศที่ความสูงต่างๆ ได้จากสมการที่ 2.4 (ASHRAE, 2001)

$$p = 101.325(1 - 2.25577 \times 10^{-5} Z)^{5.2559} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $Z$  = ความสูงจากระดับน้ำทะเล, m  
 $p$  = ความดันบรรยากาศ, Pa

4.3) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) หมายถึง อัตราส่วนของความดันไอที่ปริมาณไอน้ำจริงในอากาศต่อความดันไอที่ปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความชื้นสัมพัทธ์แสดงบนเส้นโค้งของแผนภูมิและสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 (ASHRAE, 2001)

$$\phi = \frac{p_w}{p_{ws}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\phi$  = ความชื้นสัมพัทธ์, ไม่มีหน่วย

5) เอนทัลปี (Enthalpy) คือปริมาณพลังงานความร้อนในอากาศ ซึ่งสามารถอ่านได้จากเส้นทแยงในแผนภูมิที่มีความชันใกล้เคียงกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียก ค่าความร้อนภายในของอากาศประกอบด้วย 2 ส่วน

5.1) ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่ความชื้นจำเพาะคงที่

5.2) ความร้อนแฝง (Latent Heat) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในอากาศที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งคงที่

สามารถคำนวณเอนทัลปีได้จากสมการที่ 2.6 (ASHRAE, 2001)

$$h = 1.006T_{dry} + x(2501 + 1.805T_{dry}) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $h$  = เอนทัลปี, kJ/kg<sub>dry</sub>

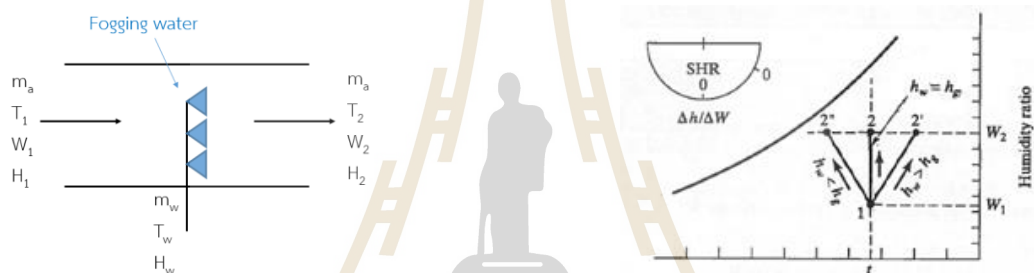
6) ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (Specific Volume) คือปริมาตรของอากาศขณะนั้นต่ออากาศแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 (ASHRAE, 2001)

$$v = 0.2871(T_{\text{dry}} + 273.15)(1 + 1.6078x)/p \quad (2.7)$$

เมื่อ  $v$  = ปริมาตรจำเพาะของอากาศ,  $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{dry}}$

## 2.7 กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น

เป็นกระบวนการที่ใช้ในการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นเรียกว่า Cooling and humidification process จะเป็นการพ่นละอองน้ำเย็นผ่านไปในอากาศเปรียบเสมือนการพ่นหมอกและอากาศที่ออกจากระบบจะมีอุณหภูมิลดลงและมีความชื้นเพิ่มขึ้นโดยเส้นกราฟบน Psychrometric chart จะขนานกับเส้น Wet Bulb ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.8 Cooling and humidification process

รูปที่ 2.9 Path of psychrometric chart

จากสมการการสมดุลมวล จะได้ดังสมการที่ 2.8 และจากการสมดุลพลังงานจะได้ดังสมการที่ 2.9

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (x_2 - x_1) \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_w h_w = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\dot{m}_w$  = อัตราการไหลของหัวพ่นหมอก,  $\text{kg}_w/\text{s}$

$\dot{m}_a$  = อัตราการไหลของอากาศ,  $\text{kg}_{\text{dry}}/\text{s}$

$x_1$  = อัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้า,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dry}}$

$x_2$  = อัตราส่วนความชื้นของอากาศขาออก,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dry}}$

$h_w$  = เอนทาลปีของน้ำ, kJ/kg<sub>dry</sub>

$h_1$  = เอนทาลปีของอากาศขาเข้า, kJ/kg<sub>dry</sub>

$h_2$  = เอนทาลปีของอากาศขาเข้า, kJ/kg<sub>dry</sub>

เมื่อนำสมการ 2.8 และ 2.9 มาหารกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.10

$$h_w = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} \quad (2.10)$$

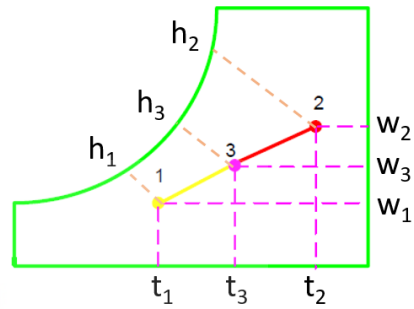
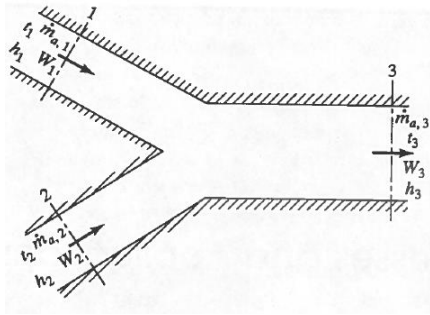
ในกระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น จะเห็นได้ว่าการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมระหว่างอากาศกับน้ำและการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่อากาศ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ ถ้าอุณหภูมิของน้ำที่ใช้พื้นหมอกเท่ากับอุณหภูมิของกระเปาะเปียกของอากาศ อัตราการถ่ายเทสุทธิจะเป็นศูนย์ เนื่องจากน้ำไม่สามารถระเหยได้

ในกรณีที่  $h_w > h_a$  อากาศจะเป็นตัวรับความร้อนสัมผัสจากน้ำทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นในทางกลับกันถ้า  $h_w < h_a$  อากาศจะเย็นลงและความชื้นสัมพัทธ์จะสูงขึ้นตามกระบวนการ Cooling and humidification process

จะเห็นว่ายิ่งอุณหภูมิของน้ำมีค่าที่ต่ำ ยิ่งสามารถลดอุณหภูมิของอากาศได้มาก ได้มีการทดลองเกี่ยวกับแหล่งลดอุณหภูมิของน้ำ โดย Lihan et.al. (2016) ได้กล่าวว่า อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในกระบวนการทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (Evaporative system) สามารถลดลงโดยใช้พื้นดินเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ในงานวิจัยนี้ได้สนใจเกี่ยวกับการใช้ระบบทำความเย็นแบบอัดไอมาใช้ในการลดอุณหภูมิของน้ำก่อนที่จะใช้ในระบบพื้นหมอก (Fogging system)

**2.8 Adiabatic Mixing of two Stream of Moist air**

ในโรงเรือนเพาะปลูกจะมีการดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่โรงเรือนและมีการผสมกันของอากาศตามกระบวนการ Mixing of air steam ดังรูปที่ 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.10 Mixing of air steam process

รูปที่ 2.11 Path of psychrometric chart

โดยสามารถคำนวณค่า  $m_{a,3}$  ได้จากสมการที่ 2.11

$$\dot{m}_{a,3} = \dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2} \tag{2.11}$$

เมื่อกำจัดตัวแปร  $m_{a,3}$  จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.12

$$\frac{\dot{m}_{a,1}}{\dot{m}_{a,2}} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} \tag{2.12}$$



## 2.9 การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้พ่นหมอก

กำหนดให้การคำนวณน้ำหนักน้ำพ่นหมอกเป็นแบบสภาวะคงตัว (Steady-state condition) โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์และเป็นไปตามกฎทรงมวล โดยการคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.13

$$m_w = \frac{v_a (x_i - x_u)}{v_u} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $m_w$  = น้ำหนักที่ใช้ในการน้ำพ่นหมอก,  $kg_w$   
 $v_a$  = ปริมาตรอากาศในโรงเรือน,  $m^3$   
 $v_u$  = ปริมาตรจำเพาะของอากาศก่อนพ่นหมอกในโรงเรือน,  $m^3/kg_{dry}$   
 $x_i$  = อัตราส่วนความชื้นที่สภาวะควบคุม,  $kg_w/kg_{dry}$   
 $x_u$  = อัตราส่วนความชื้นที่ภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก,  $kg_w/kg_{dry}$

## 2.10 การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมา

เมื่อทำการพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิแล้ว จะทำการวัดอุณหภูมิอากาศที่เข้าและออกของโรงเรือนเพื่อคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ออกจากโรงเรือนจากสมการที่ 2.14

$$Q_{cool} = \frac{v_a c_{p,a} (T_u - T_{di})}{v_u} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $Q_{cool}$  = ปริมาณพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมา,  $kJ$   
 $v_a$  = ปริมาตรอากาศภายในโรงเรือน,  $m^3$   
 $c_{p,a}$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ มีค่า  $1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$ ,  $kJ/kg^\circ\text{K}$   
 $T_u$  = อุณหภูมิกระเปาะแห้งก่อนการพ่นหมอกภายในโรงเรือน,  $^\circ\text{C}$   
 $T_{di}$  = อุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือน,  $^\circ\text{C}$

## 2.11 การคำนวณหาสมรรถนะการทำความเย็น

การคำนวณหาสมรรถนะการทำความเย็นของระบบพ่นหมอก (Coefficient of Performance) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{cool}}}{W_{\text{Electrical}}} \quad (2.15)$$

เมื่อ COP = สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ Fogging system  
 $W_{\text{electrical}}$  = ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า, kJ

## 2.12 การคำนวณหาความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก

การคำนวณความสามารถการระเหยน้ำของระบบพ่นหมอก (Evaporative Fogging Efficiency) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

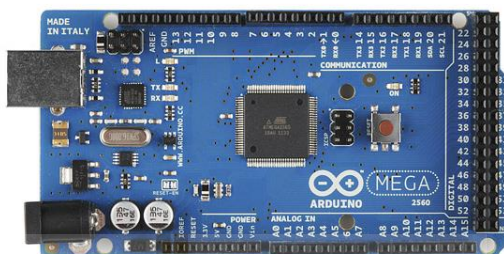
$$\eta_{\text{evap}} = \frac{x_f}{x_i} \times 100 \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\eta_{\text{evap}}$  = ความสามารถในการระเหยของน้ำ  
 $x_f$  = อัตราส่วนความชื้นหลังการพ่นหมอก,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dry}}$   
 $x_i$  = อัตราส่วนความชื้นที่สภาวะควบคุม,  $\text{kg}_w/\text{kg}_{\text{dry}}$

## 2.13 Arduino

Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM ของบริษัท ATMEL ข้อดีของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นี้คือการเปิดเผยรหัสโปรแกรมที่สามารถพัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์อื่นๆ ได้ และความสามารถในการเพิ่ม Boot Loader เข้าไปที่ตัว ARM จึงทำให้ Upload Code เข้าตัวบอร์ดได้ง่ายขึ้น และมีโปรแกรมสำหรับพัฒนา Software สำหรับ Arduino โดยเฉพาะ เช่น Arduino IDE มีลักษณะเป็นภาษา C โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้บอร์ด Arduino รุ่น Mega 2560 R3 (รูปที่ 2.12) เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบ เนื่องจากสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ Input / Output ได้ทั้งแบบ Digital และ Analog เช่น การรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจจับ การควบคุม LED หลอดไฟ มอเตอร์ รีเลย์ เป็นต้น

ในบอร์ดรุ่นนี้มีจำนวนช่องเชื่อมต่อถึง 54 ช่อง และมีพื้นที่ในการเขียน โปรแกรมขนาด 256 KB ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งาน



รูปที่ 2.12 Arduino Mega 2560 R3

#### 2.14 Sensor วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT22

DHT 22 (รูปที่ 2.13) เป็นเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้น (Temperature and Relative humidity sensor) ผลิตโดยบริษัท Aosong Electronics สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองได้หลากหลาย เช่น การวัดเพื่อควบคุมการทำงานและบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นในพื้นที่ที่สนใจ โดยความแม่นยำในการวัดความชื้น  $\pm 2\%$  (สูงสุด  $\pm 5\%$ ) ช่วงความชื้นที่สามารถวัดได้ 0 – 100 %RH และความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ช่วงอุณหภูมิที่สามารถวัดได้  $-40 - 80^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.13 DHT 22

## 2.15 อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์ Tenmars TM-206

Tenmars TM206 Solar Power Meter (รูปที่ 2.14) เป็นอุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถวัดได้ในหน่วย  $W/m^2$  มีช่วงการวัดสูงสุดที่  $2,000 W/m^2$  ความละเอียด  $0.1 W/m^2$  ความแม่นยำ  $\pm 10 W/m^2$  หรือ  $\pm 5\%$  มี Sampling time 0.25 วินาที แหล่งพลังงานใช้ถ่าน 9 V 1 ก้อน



รูปที่ 2.14 Tenmars TM-206 Solar Power Meter

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อทดสอบโรงเรือนเพาะปลูกแบบปิดโดยใช้ระบบพ่นหมอก (Fogging system) ที่สร้างขึ้น โดยการออกแบบกระบวนการคำนวณเพื่อให้ใช้ปริมาณน้ำและพลังงานให้น้อยที่สุด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นระหว่างการใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องและน้ำเย็นที่ได้จากเครื่องทำน้ำเย็น

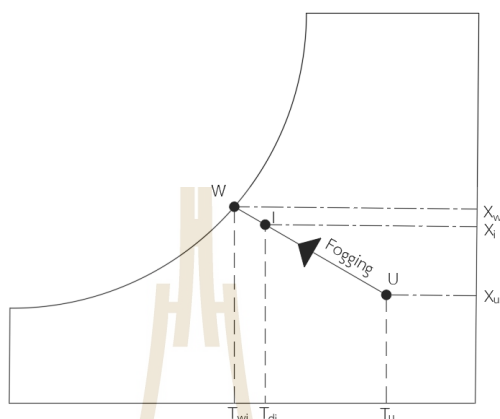
โดยกระบวนการทำวิจัยมีอยู่ 6 ส่วน คือ

1. การออกแบบกระบวนการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก
2. การออกแบบและสร้างโรงเรือน
3. การออกแบบระบบควบคุม การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก
4. การทดสอบหาอัตราการไหลของหัวพ่นหมอก
5. การทดสอบระบบการทำงาน
6. การประเมินระบบการทำงาน

สถานที่การทดลอง ณ อาคารปฏิบัติการจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

### 3.2 การออกแบบกระบวนการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก

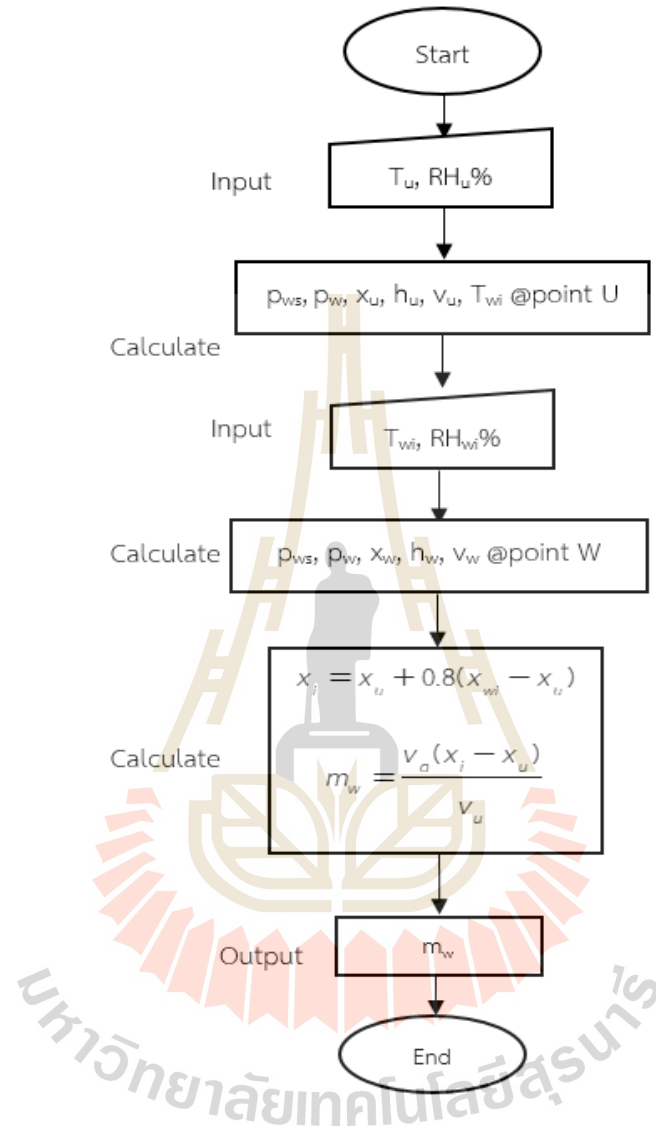
การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอกสามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติของอากาศและกฎสมดุควมวล



รูปที่ 3.1 กระบวนการคำนวณบนไซโครเมตริก

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นของระบบเมื่อใช้วิธีการพ่นหมอก โดยจุด U คืออากาศภายในโรงเรือนก่อนทำการพ่นหมอก จุด I คืออากาศภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอกตามสภาวะที่ต้องการควบคุม ที่จุด W คือจุดที่อากาศอิ่มตัวไปด้วยความชื้น กระบวนการลดอุณหภูมิจะดำเนินจากจุด U ไปตามเส้นกระเปาะเปียกคงที่จนถึงเส้นความชื้นอิ่มตัวที่จุด W ซึ่งเราอาจหยุดกระบวนการก่อนถึงจุด W ไว้ที่จุด I ตามสภาวะอากาศที่ต้องการควบคุมในโรงเรือน  $T_u$  คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก ( $^{\circ}\text{C}$ )  $T_{di}$  คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอก ( $^{\circ}\text{C}$ )  $T_{wi}$  คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก ( $^{\circ}\text{C}$ )  $x_u$ ,  $x_{wi}$ ,  $x_i$  คืออัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก หลังการพ่นหมอกที่สภาวะอากาศอิ่มตัวและหลังการพ่นหมอกตามสภาวะควบคุมในหน่วย  $\text{kg}_w/\text{kg}_{dry}$  ตามลำดับ

โดยลำดับการคำนวณจะเป็นไปตาม Flow chart (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 Flow chart process

การคำนวณอัตราการไหลของระบบพ่นหมอก โดยระบบเริ่มคำนวณเมื่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนแล้วส่งค่ามาที่บอร์ดควบคุมเพื่อทำการคำนวณหาความดันไอน้ำอิ่มตัวจากสมการที่ 2.1 ความดันไอน้ำจริงจากสมการที่ 2.5 อัตราส่วนความชื้น  $x_u$  จากสมการที่ 2.3 เอนทาลปีจากสมการที่ 2.6 ปริมาตรจำเพาะของอากาศ  $v_u$  จากสมการที่ 2.7 และอุณหภูมิกระเปาะเปียก  $T_{wi}$  จากสมการที่ 2.2

จากนั้นใช้อุณหภูมิ  $T_{wi}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH กำหนดหาอัตราส่วนความชื้น  $x_{wi}$  (ใช้สมการที่ 2.1 2.3 และ 2.5) กำหนดให้ระบบพ่นหมอกเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับอากาศจนถึงจุด I โดยเพิ่มปริมาณน้ำให้กับอากาศเป็น 80% ของปริมาณน้ำในอากาศเมื่ออึดตัวไปด้วยความชื้น (เท่ากับค่า  $x_{wi}$  ณ ขณะนั้น) ซึ่งจะทำได้ค่าอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ  $x_i$

ทั้งนี้การกำหนดตำแหน่งของจุด I ที่ 80% ของ  $x_{wi}$  ทำเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในโรงเรือนเพิ่มขึ้นจนใกล้จุดอึดตัวมากเกินไป (100%) เพราะละอองน้ำจากการพ่นหมอกอาจจะแห้งเป็นไอได้ไม่หมดกลายเป็นหยดน้ำสะสมในระบบซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองน้ำและอาจทำให้พืชบางชนิดได้รับความชื้นมากเกินไปจนเกิดความเสียหายได้

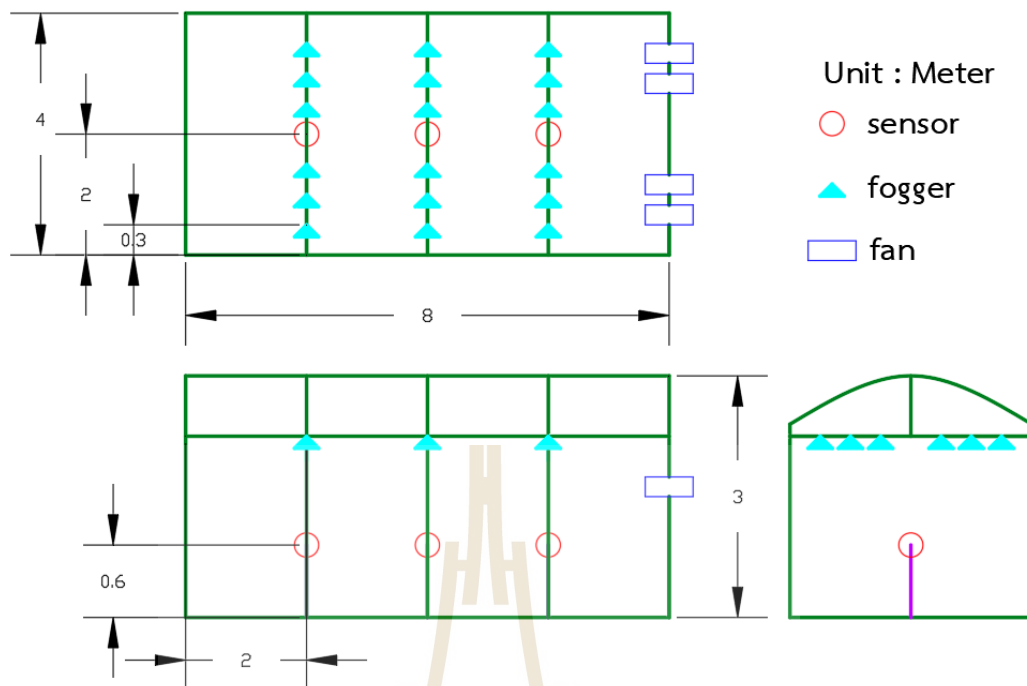
จากนั้นคำนวณหาปริมาณน้ำพ่นหมอกจากสมการที่ 2.13 และใช้ค่าอัตราการไหลของปั้มน้ำที่ทราบค่าช่วยในการคำนวณหาระยะเวลาการทำงานของปั้มน้ำได้

สมการและขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดถูกโปรแกรมไว้ในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ โดยการควบคุมการพ่นหมอกใช้การสั่งเปิดและปิดปั้มน้ำความดันสูงตามระยะเวลาการทำงานของปั้มน้ำที่คำนวณได้ ในระหว่างการพ่นหมอกพัฒนาพยากรณ์อากาศจะถูกสั่งให้หยุดการทำงาน จากนั้นเมื่อเสร็จสิ้นการพ่นหมอกแล้ว พัฒมจึงถูกสั่งให้ทำงาน 60 วินาที เพื่อดูดอากาศร้อนออกมาจากโรงเรือนก่อนเริ่มกระบวนการทำงานในรอบถัดไป

### 3.3 การออกแบบและสร้างโรงเรือน

โรงเรือนเพาะปลูกมีขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3 เมตร โดยใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นโครงสร้างและคลุมด้วยพลาสติก Polyethylene ประกอบด้วยระบบควบคุมและการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในโรงเรือน โดยวางตำแหน่งเซนเซอร์ระยะห่างเท่ากันเพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ทั่วถึง ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก โดยวางตำแหน่งของหัวพ่นหมอกเป็นระยะห่างที่เท่ากันเพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิได้อย่างทั่วถึง โดยตัวแปรที่พิจารณาในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นคืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกโรงเรือน เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในระบบพ่นหมอก ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะในหน่วยเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 และ โรงเรือนจริงที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.4





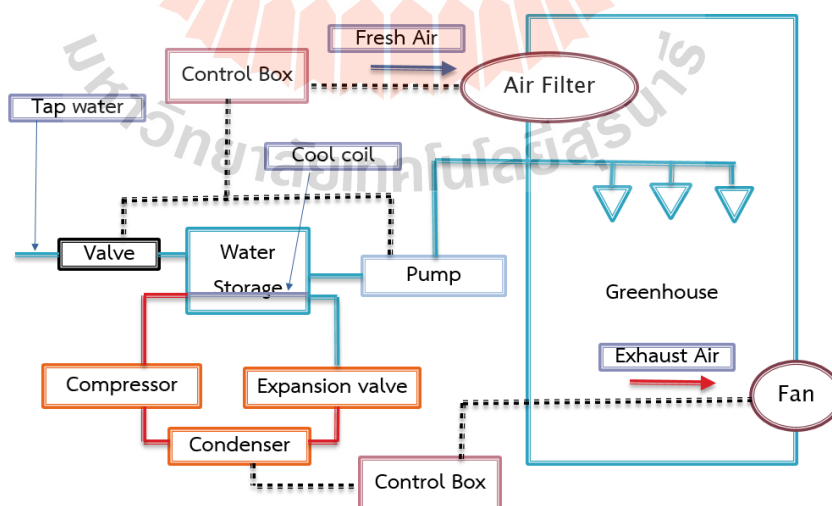
รูปที่ 3.3 แบบของ โรงเรือนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.4 โรงเรือนต้นแบบที่สร้างขึ้น

### 3.4 การออกแบบระบบควบคุม การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ระบบระบายอากาศ และระบบพ่นหมอก

ระบบควบคุมใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 ในการควบคุมระบบ เนื่องจากมีข้อดีคือมีพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตเพียงพอในการต่อใช้งาน ติดตั้งเซนเซอร์ รุ่น DHT22 ของบริษัท Aosong Electronics สำหรับวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ภายในโรงเรือน โดยติดตั้งสูงจากพื้น 0.6 เมตร จำนวน 3 จุด ซึ่งเท่ากับความสูงของโถ้เพาะปลูกทั่วไปและติดตั้งโมดูลนาฬิกา Real Time Clock รุ่น DS3231 จำนวน 1 ตัว ใช้สำหรับบอกเวลาให้กับ Arduino และโมดูล Micro SD card จำนวน 1 ตัว สำหรับเป็น Data logger ในการเก็บข้อมูล และโมดูล Relay จำนวน 3 ตัว เพื่อควบคุมพัดลมและปั๊ม ของบริษัท Arduinoall ระบบหมุนเวียนอากาศ ใช้พัดลม รุ่น APC20-3 ขนาด 8 นิ้ว อัตราการไหล 7 m<sup>3</sup>/min ของบริษัท LONB จำนวน 2 ตัว 25 W และระบบระบายอากาศใช้พัดลมดูดอากาศ รุ่น HF-VM30M3(N) ของบริษัท Hatari ขนาด 12 นิ้ว อัตราการไหล 15 m<sup>3</sup>/min จำนวน 4 ตัว 27 W และระบบพ่นหมอกใช้ปั๊มที่ความดัน 12 Bar 5 Lpm หัวพ่นหมอกแรงดันสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 mm ชนิด 1 รู จำนวน 18 หัว ของบริษัท Fogeasy และเครื่องทำน้ำเย็น ขนาด 86 W มีปริมาตรถังเก็บน้ำในเครื่อง 3.5 ลิตร ของบริษัท Victorthai โดยบันทึกค่าที่ทุกคาบเวลา 15 min และนำข้อมูลบันทึกไว้ที่ Data logger ของระบบ ควบคุม โดยรูปที่ 3.5 แสดงแผนผังของระบบควบคุมทั้งหมดในการทดสอบนี้และรูปที่ 3.6 แสดงกล่องควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.5 แผนผังของระบบ



รูปที่ 3.6 ตู้ควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.5 การทดสอบหาอัตราการไหลของหัวพ่นหมอก

ในการออกแบบระบบลดอุณหภูมิและความชื้นนี้จำเป็นที่จะต้องทราบข้อมูลของอัตราการไหลของหัวพ่นหมอกที่ใช้ในระบบดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบดังนี้

#### 3.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

ตารางที่ 3.1 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบหาอัตราการไหลหัวพ่นหมอก

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	หัวพ่นหมอก ขนาด 0.1 มิลลิเมตร	1	หัว
2	ปั้มน้ำ ขนาด 12 บาร์	1	ตัว
3	ขวดทรงชมพู	1	ใบ
4	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล	1	เครื่อง
5	นาฬิกาจับเวลา	1	เรือน

### 3.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) นำหัวฟันทมอกที่ต่อกับระบบฟันทมอกแล้วใส่ลงในขวดทรงชมพู (รูปที่ 3.7)
- 2) เปิดปั้มน้ำและจับเวลาเป็นเวลา 60 วินาที
- 3) นำขวดชมพูไปชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลเพื่อหาปริมาณน้ำหนักของน้ำที่หัวฟันทมอกได้ใน 60 วินาที (รูปที่ 3.8)
- 4) ทำตามขั้นตอนที่ 1) - 3) อีก 2 ครั้ง



รูปที่ 3.7 การทดสอบหาอัตราการไหลของหัวฟันทมอก



รูปที่ 3.8 การชั่งขวดชมพูบนเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

### 3.6 การทดสอบระบบ

การทดสอบระบบจะเริ่มตั้งแต่วันที่ 9.00 น. – 17.00 น. โดยแบ่งเป็น 6 การทดสอบดังนี้

1. ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
2. ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
3. ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
4. ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
5. ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
6. ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

### 3.7 การประเมินระบบ

1. พฤติกรรมการลดอุณหภูมิของอากาศและเพิ่มความชื้นภายในโรงเรือน
2. อัตราการสิ้นเปลืองน้ำของระบบเพื่อเปรียบเทียบกับโรงเรือนพ่นหมอกแบบปัจจุบัน
3. ปริมาณความร้อนที่สามารถดึงออกจากโรงเรือน
4. ปริมาณความสิ้นเปลืองพลังงานในการทำงานของระบบ
5. ค่าสมรรถนะการทำความเย็นของระบบและประสิทธิภาพการทำความเย็น

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

บทนี้เป็นการนำเสนอผลวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย ซึ่งสามารถแบ่งได้แต่ละการทดสอบซึ่งมีหัวข้อดังนี้

1. ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
  - 1.1. ความสามารถในการลดอุณหภูมิ
  - 1.2. ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก
  - 1.3. ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้
2. ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
  - 2.1. ความสามารถในการลดอุณหภูมิ
  - 2.2. ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก
  - 2.3. ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้
3. ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
  - 3.1. ความสามารถในการลดอุณหภูมิ
4. ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา
  - 4.1. ความสามารถในการลดอุณหภูมิ
  - 4.2. ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก
  - 4.3. ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้
5. ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

- 5.1. ความสามารถในการลดอุณหภูมิ
  - 5.2. ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก
  - 5.3. ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้
  6. ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา
    - 6.1. ความสามารถในการลดอุณหภูมิ
  7. เปรียบเทียบผลการทดลอง
    - 7.1. ด้านการลดอุณหภูมิ
    - 7.2. ด้านสมรรถนะการทำความเย็น
- โดยมีผลวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

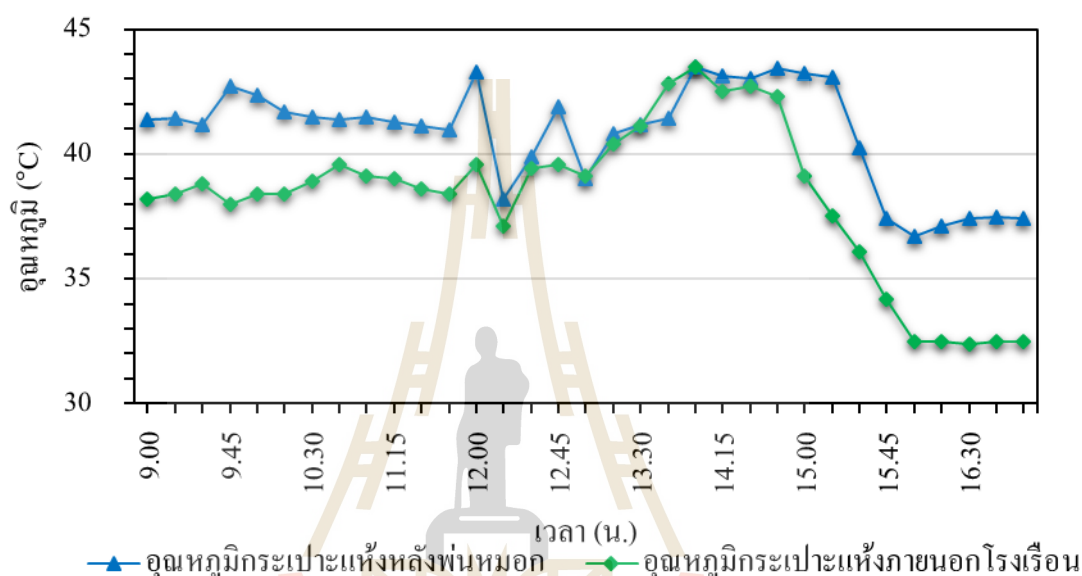




#### 4.1 ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในวันที่ 8 พฤษภาคม 2561 ระหว่างเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

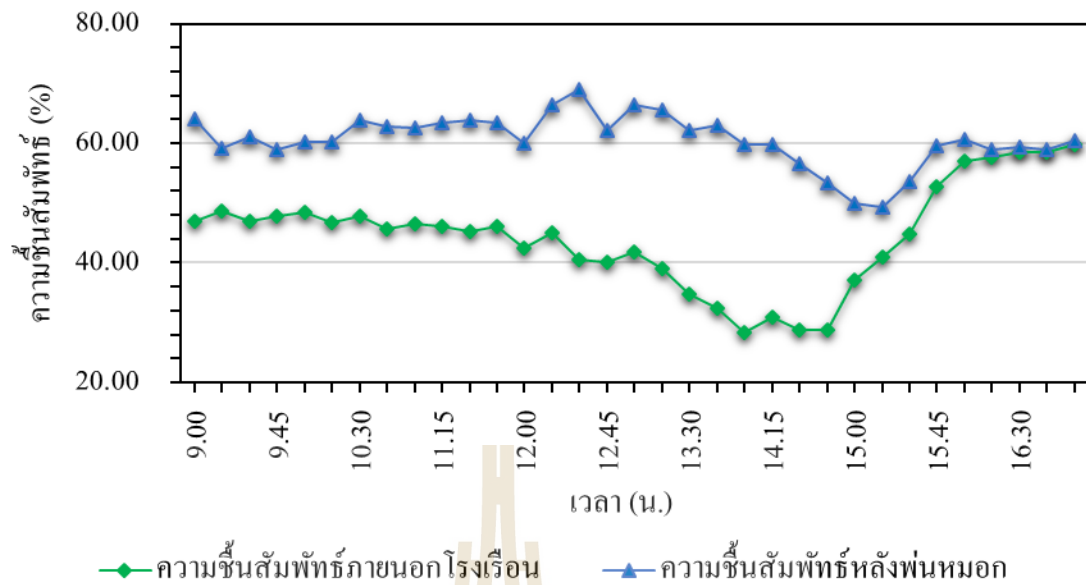
##### 4.1.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

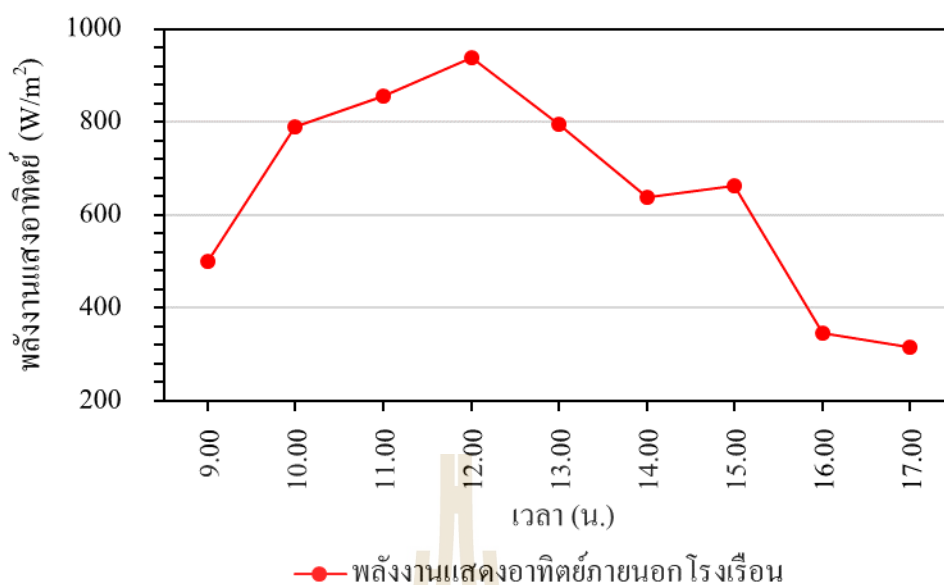
อุณหภูมิ	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน
ค่าต่ำสุด	38.20	37.10	36.70	32.40
ค่าสูงสุด	43.27	39.60	43.50	43.50
ค่าเฉลี่ย	41.22	38.74	40.41	37.79



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 4.2 ความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดสอบ โดยใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง ในการพื่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรแสง 50% คลุมบนหลังคา

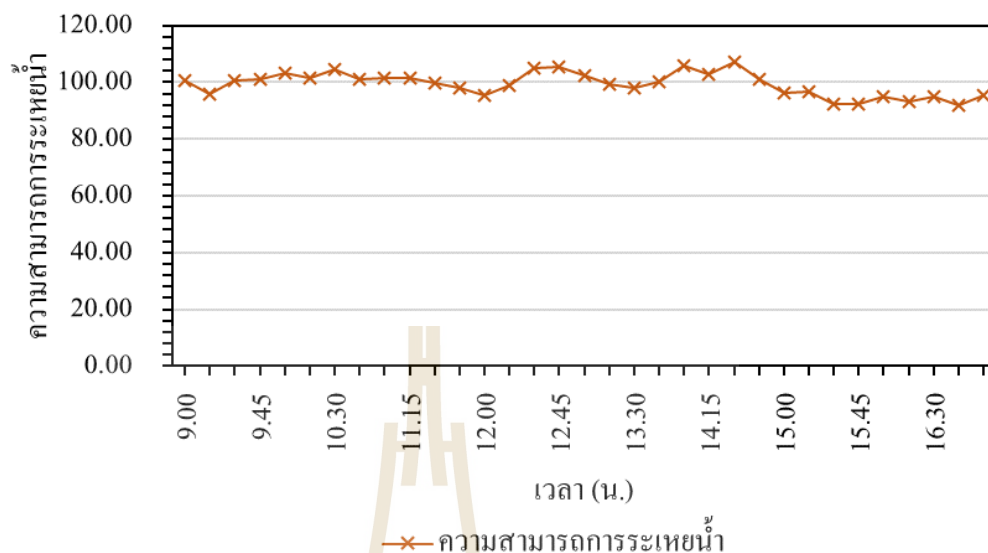
ความชื้นสัมพัทธ์	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพื่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน	หลังพื่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน
ค่าต่ำสุด	59.00	40.20	49.40	28.40
ค่าสูงสุด	69.00	48.70	65.47	59.70
ค่าเฉลี่ย	62.82	45.46	58.17	43.14



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 ในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-4.70^{\circ}\text{C}$  –  $0.07^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-2.48^{\circ}\text{C}$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-5.57^{\circ}\text{C}$  –  $1.37^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-2.62^{\circ}\text{C}$  และจากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง 10.43% – 28.40% ค่าเฉลี่ย 17.35% และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง 0.60% – 31.33% ค่าเฉลี่ย 15.04% พบว่าค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากอุณหภูมิภายในโรงเรียนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรียนและโรงเรียนเป็นระบบปิดทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4.3) ส่งผลให้อากาศภายในโรงเรียนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างอิสระเหมือนระบบเปิด จึงเกิดเป็นสภาวะเรือนกระจกและทำให้พลังงานความร้อนถูกสะสมภายในโรงเรียนและพบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้นหลังการพ่นหมอกซึ่งแสดงให้เห็นถึงน้ำได้ระเหยเป็นไอส่งผลให้สามารถลดอุณหภูมิได้เพียงเล็กน้อย

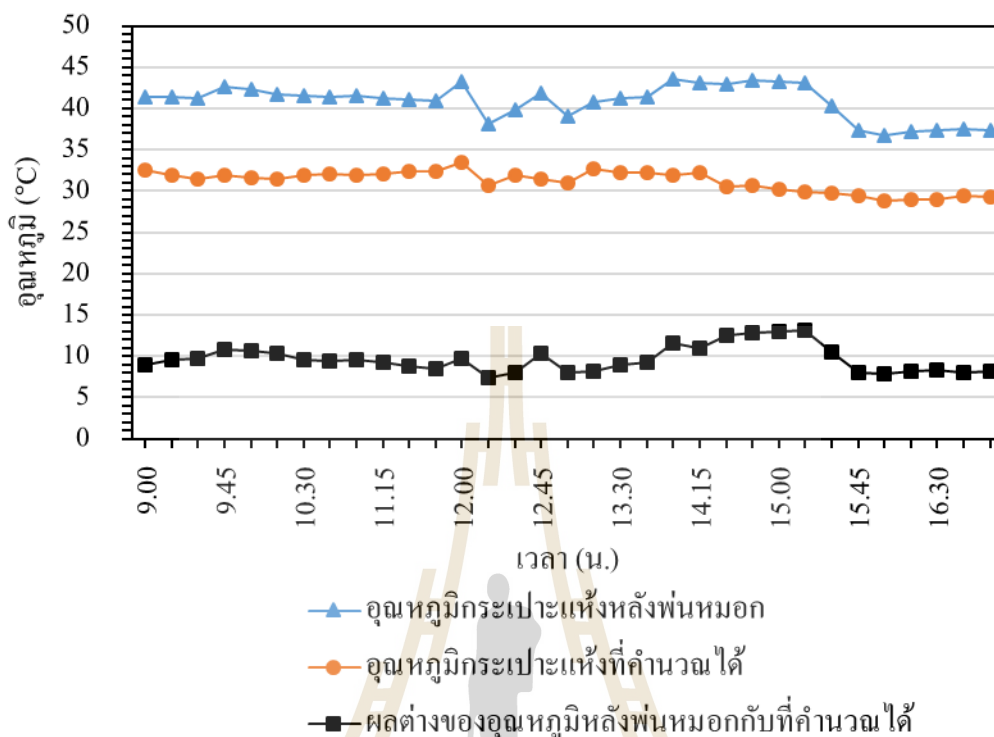
#### 4.1.2 ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา

จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความสามารถการระเหยมีค่าระหว่าง 91.84% – 107.18% มีค่าเฉลี่ย 99.36% เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นหลังการพ่นหมอกมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่สถานะควบคุมซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการคำนวณสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำได้อย่างแม่นยำและหัวพ่นหมอกในระบบพ่นหมอกสามารถทำให้ละอองน้ำระเหยได้เกือบหมด

#### 4.1.3 ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของผลการทดสอบ โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

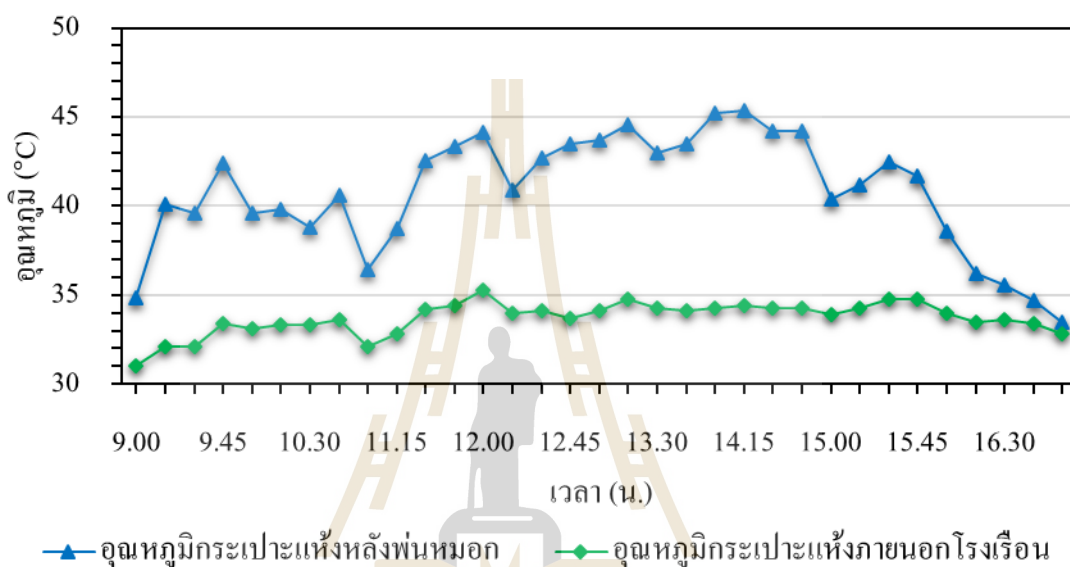
	อุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังพ่นหมอก	อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่คำนวณได้	ผลต่าง
ค่าต่ำสุด	36.70	28.85	7.46
ค่าสูงสุด	43.50	33.54	13.18
ค่าเฉลี่ย	40.83	31.19	9.63

จากรูปที่ 4.5 พบว่าถึงแม้ละอองหมอกที่พ่นสู่อากาศสามารถระเหยเป็นไอได้เฉลี่ยใกล้เคียง 100% (รูปที่ 4.9) แต่ไม่สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ใกล้เคียงกับกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ซึ่งแสดงค่าผลต่างในตารางที่ 4.3 เนื่องจากความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะสมภายในโรงเรือนไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างรวดเร็วเพียงพอ

## 4.2 ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในวันที่ 6 มิถุนายน 2561 ระหว่างเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

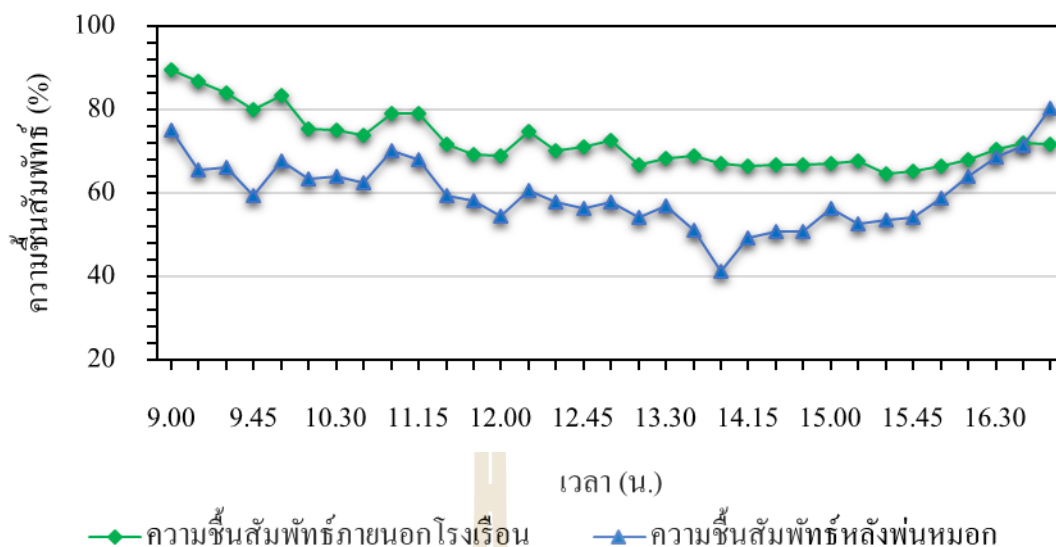
### 4.2.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือน ไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

อุณหภูมิ	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน
ค่าต่ำสุด	34.87	31.00	33.50	32.80
ค่าสูงสุด	44.13	35.30	45.37	34.80
ค่าเฉลี่ย	40.68	33.33	40.89	34.10

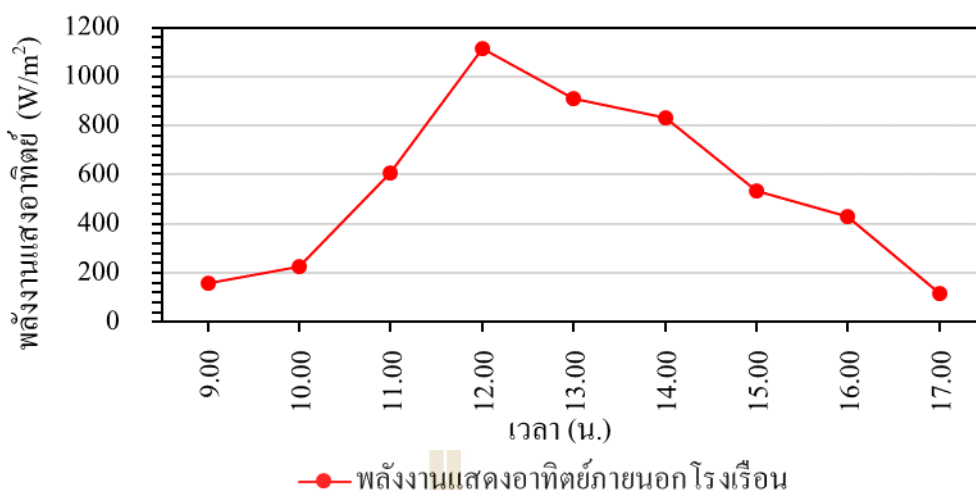


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 4.5 ความชื้นของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

ความชื้นสัมพัทธ์	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน
ค่าต่ำสุด	54.40	68.90	41.27	64.70
ค่าสูงสุด	75.07	89.50	80.27	72.00
ค่าเฉลี่ย	62.71	76.71	57.08	67.73

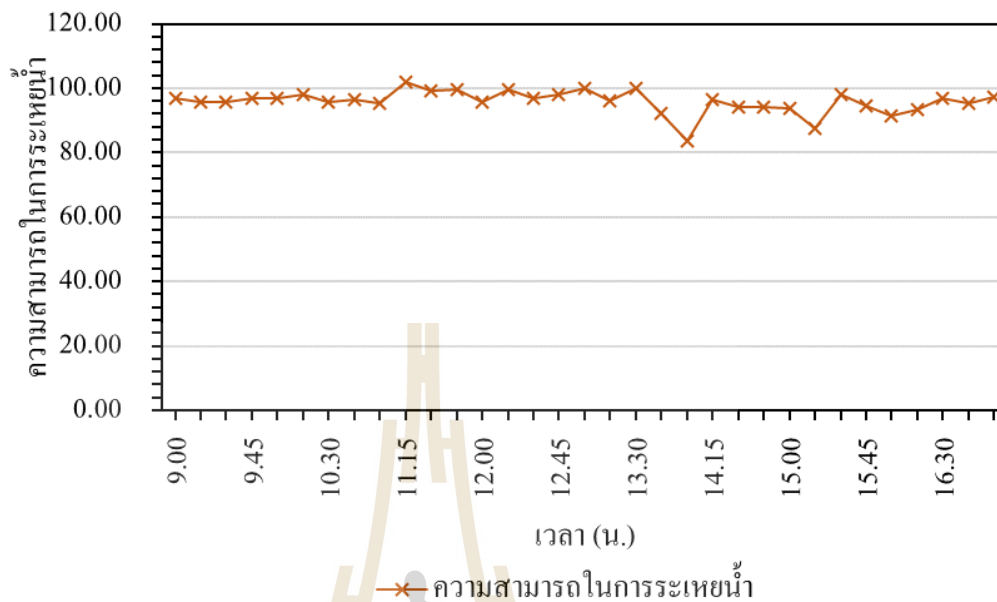




รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.4 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-9.80^{\circ}\text{C}$  –  $-3.87^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-7.35^{\circ}\text{C}$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-10.97^{\circ}\text{C}$  –  $-0.70^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-6.79^{\circ}\text{C}$  และจากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.5 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-21.30\%$  –  $-8.83\%$  ค่าเฉลี่ย  $-14.00\%$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-25.83\%$  –  $8.57\%$  ค่าเฉลี่ย  $-10.65\%$  มีค่าผลต่างที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศภายนอกโรงเรียนยังมีค่าสูง (รูปที่ 4.7) ประกอบกับอากาศมีอุณหภูมิต่ำ เมื่ออากาศถูกนำเข้าสู่โรงเรียนจึงสามารถรับไอน้ำที่ระเหยจากละอองหมอกเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยและโรงเรียนเป็นระบบปิดทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4.8) ส่งผลให้เกิดสภาวะเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศในโรงเรียนสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก

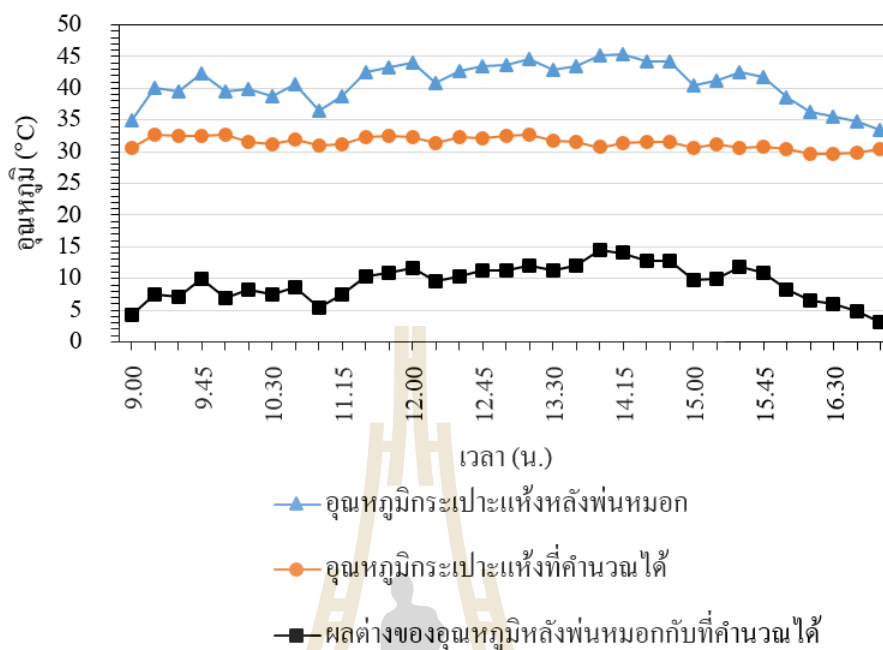
#### 4.2.2 ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา

จากรูปที่ 4.9 พบว่าค่าความสามารถการระเหยมีค่าระหว่าง 83.81% – 102.07% มีค่าเฉลี่ย 95.80% เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นหลังการพ่นหมอกมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่สถานะควบคุมซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการคำนวณสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำได้อย่างแม่นยำและหัวพ่นหมอกในระบบพ่นหมอกสามารถทำให้ละอองน้ำระเหยได้เกือบหมด

### 4.2.3 ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

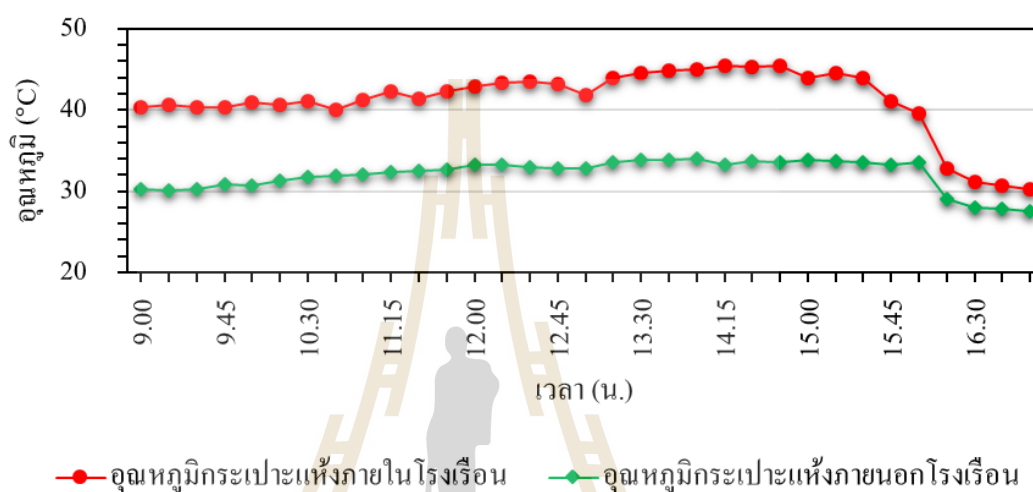
	อุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังพ่นหมอก	อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่คำนวณได้	ผลต่าง
ค่าต่ำสุด	33.50	29.61	3.08
ค่าสูงสุด	45.37	32.70	14.51
ค่าเฉลี่ย	40.78	31.42	9.37

จากรูปที่ 4.10 พบว่าถึงแม้ละอองหมอกที่พ่นสู่อากาศสามารถระเหยเป็นไอได้เฉลี่ยใกล้เคียง 100% (รูปที่ 4.9) แต่ไม่สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ใกล้เคียงกับกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ซึ่งแสดงค่าผลต่างในตารางที่ 4.6 เนื่องจากความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะสมภายในโรงเรือนไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างรวดเร็วเพียงพอ

### 4.3 ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในวันที่ 25 พฤษภาคม 2561 ระหว่างเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

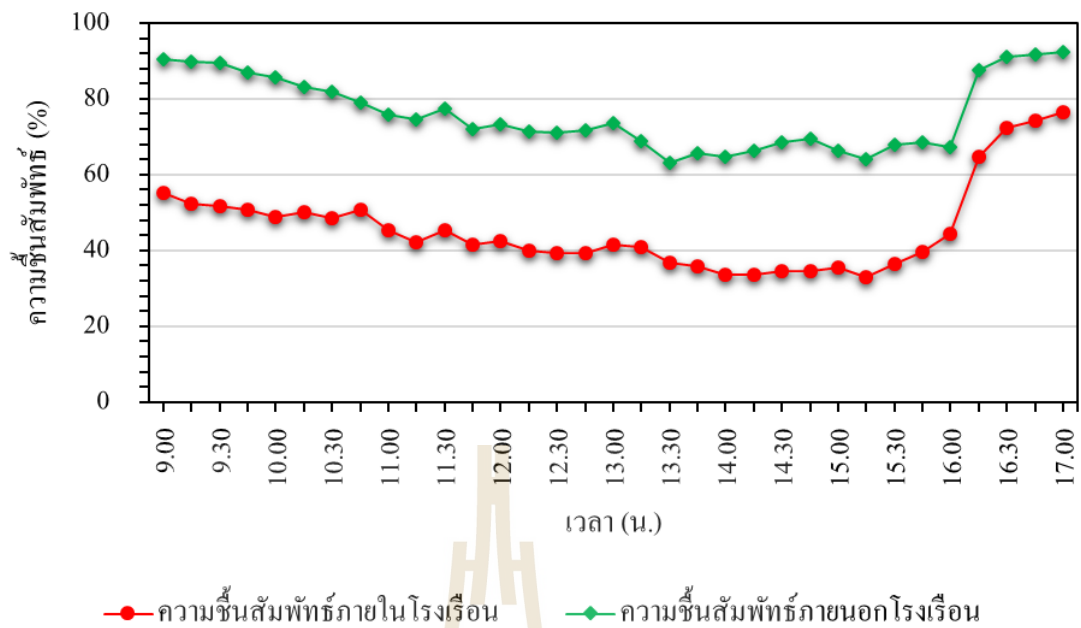
#### 4.3.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

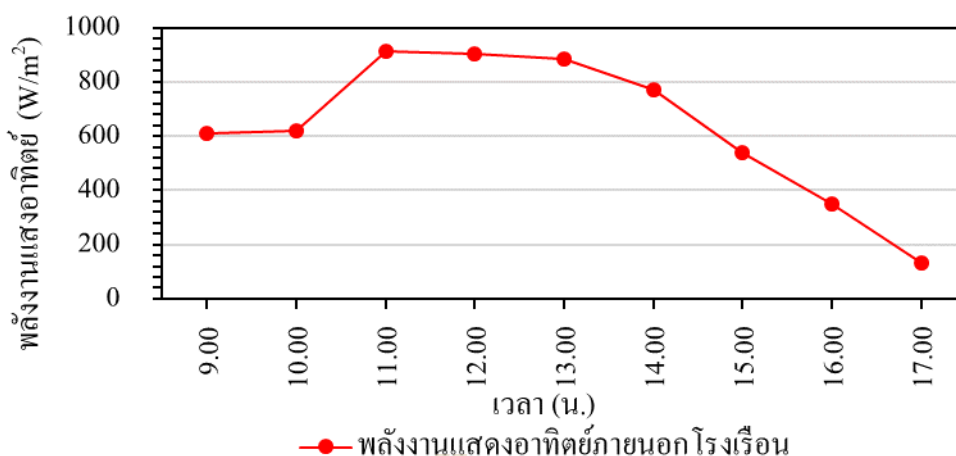
อุณหภูมิ	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	ภายในโรงเรือน	ภายนอกโรงเรือน	ภายในโรงเรือน	ภายนอกโรงเรือน
ค่าต่ำสุด	40.07	30.10	30.30	27.60
ค่าสูงสุด	43.57	33.30	45.53	34.00
ค่าเฉลี่ย	41.56	31.86	40.78	32.26



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 4.8 ความชื้นของผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

ความชื้นสัมพัทธ์	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	ภายในโรงเรียน	ภายนอกโรงเรียน	ภายในโรงเรียน	ภายนอกโรงเรียน
ค่าต่ำสุด	39.17	71.10	33.10	63.00
ค่าสูงสุด	55.17	90.50	76.37	92.30
ค่าเฉลี่ย	46.15	79.25	45.39	72.71



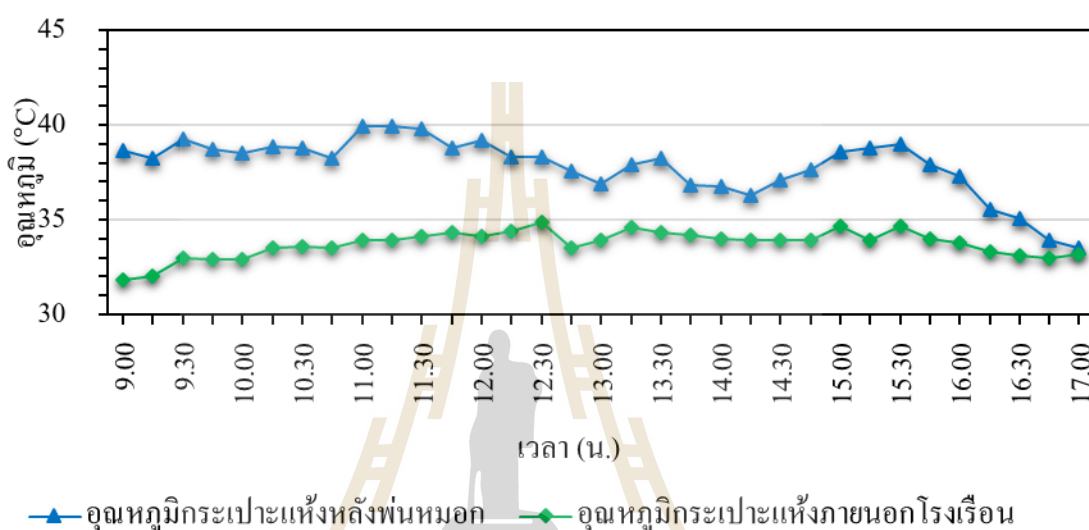
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

จากรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.7 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในและภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $8.17^{\circ}\text{C}$  –  $10.67^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $9.70^{\circ}\text{C}$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในและภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $2.70^{\circ}\text{C}$  –  $12.13^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $8.53^{\circ}\text{C}$  และจากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.8 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-37.87\%$  –  $-28.17\%$  ค่าเฉลี่ย  $-33.10\%$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-34.83\%$  –  $-15.93\%$  ค่าเฉลี่ย  $-27.32\%$  จะเห็นว่าตลอดทั้งวัน อุณหภูมิภายในโรงเรียนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรียนและความชื้นภายในโรงเรียนมีค่าต่ำกว่าความชื้นภายนอกโรงเรียนเนื่องจากไม่มีระบบทำความเย็นให้กับระบบอีกทั้งโรงเรียนเป็นระบบปิดทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4.13) และทำให้พลังงานความร้อนถูกสะสมภายในโรงเรียนจึงส่งผลให้อากาศภายในโรงเรียนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและความชื้นภายในโรงเรียนมีค่าลดลงอีกทั้งอากาศภายในโรงเรียนไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างอิสระเหมือนระบบเปิด จึงเกิดเป็นสภาวะเรือนกระจก

#### 4.4 ทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในวันที่ 22 มิถุนายน 2561 ระหว่างเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

##### 4.4.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ

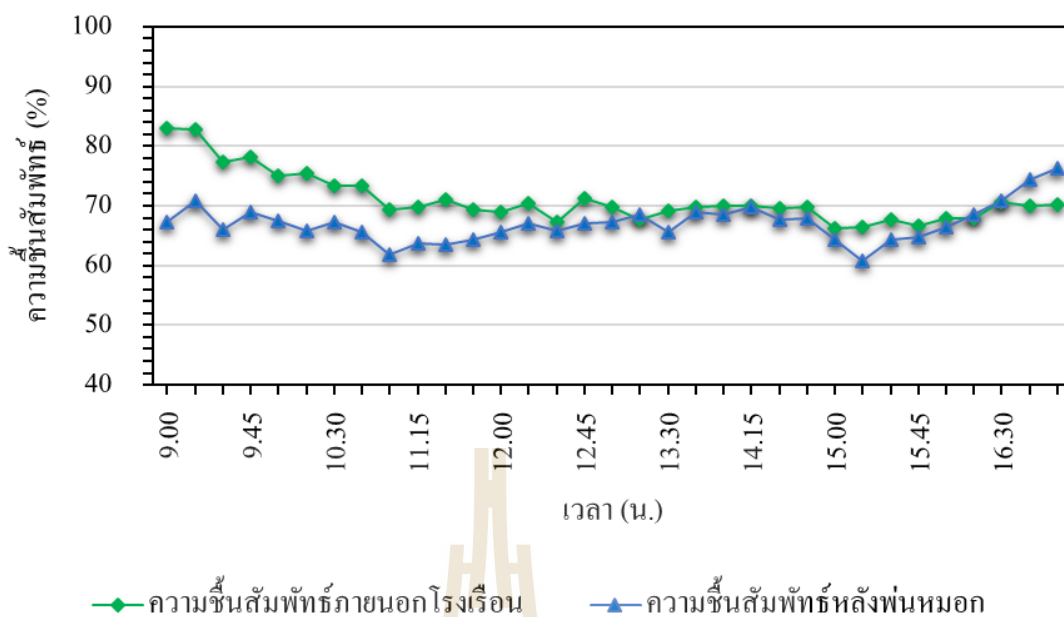


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

อุณหภูมิ	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน
ค่าต่ำสุด	36.93	31.80	33.50	33.00
ค่าสูงสุด	39.97	34.90	38.97	34.70
ค่าเฉลี่ย	38.72	33.54	36.89	33.91

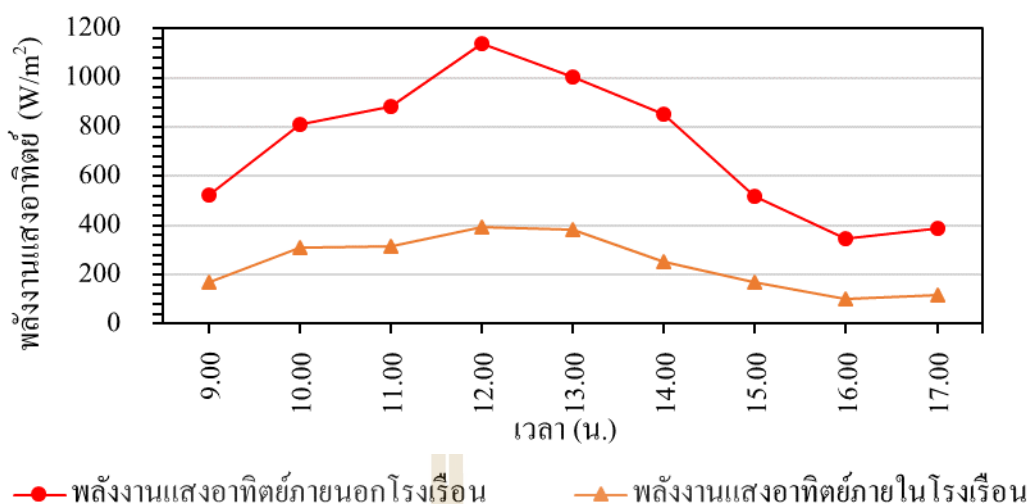




รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 4.10 ความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรียนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

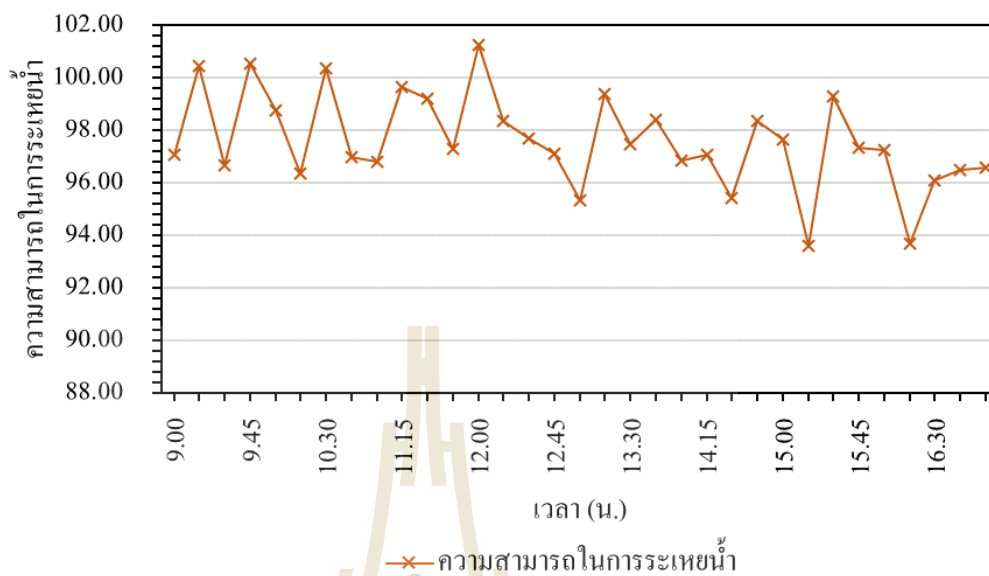
ความชื้นสัมพัทธ์	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน
ค่าต่ำสุด	61.90	67.30	60.67	66.20
ค่าสูงสุด	70.90	83.10	76.23	70.60
ค่าเฉลี่ย	66.21	73.25	67.99	68.73



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

จากรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.9 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-6.83^{\circ}\text{C}$  –  $-3.03^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-5.18^{\circ}\text{C}$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-4.87^{\circ}\text{C}$  –  $-0.30^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-2.99^{\circ}\text{C}$  และจากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.5 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-15.80\%$  –  $-1.60\%$  ค่าเฉลี่ย  $-7.04\%$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-5.83\%$  –  $-6.03\%$  ค่าเฉลี่ย  $-0.73\%$  มีค่าผลต่างที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศภายนอกโรงเรียนยังมีค่าสูง (รูปที่ 4.15) ประกอบกับอากาศมีอุณหภูมิต่ำ เมื่ออากาศถูกนำเข้าสู่โรงเรียนจึงสามารถรับไอน้ำที่ระเหยจากละอองหมอกเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยและโรงเรียนเป็นระบบปิดทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4.16) ส่งผลให้เกิดสภาวะเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศในโรงเรียนสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก จะเห็นว่าเมื่อมีตาข่ายพรางแสง พลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าไปภายในโรงเรียนจะมีค่าต่ำทำให้พลังงานความร้อนสะสมภายในโรงเรียนน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศสูงสุดไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$

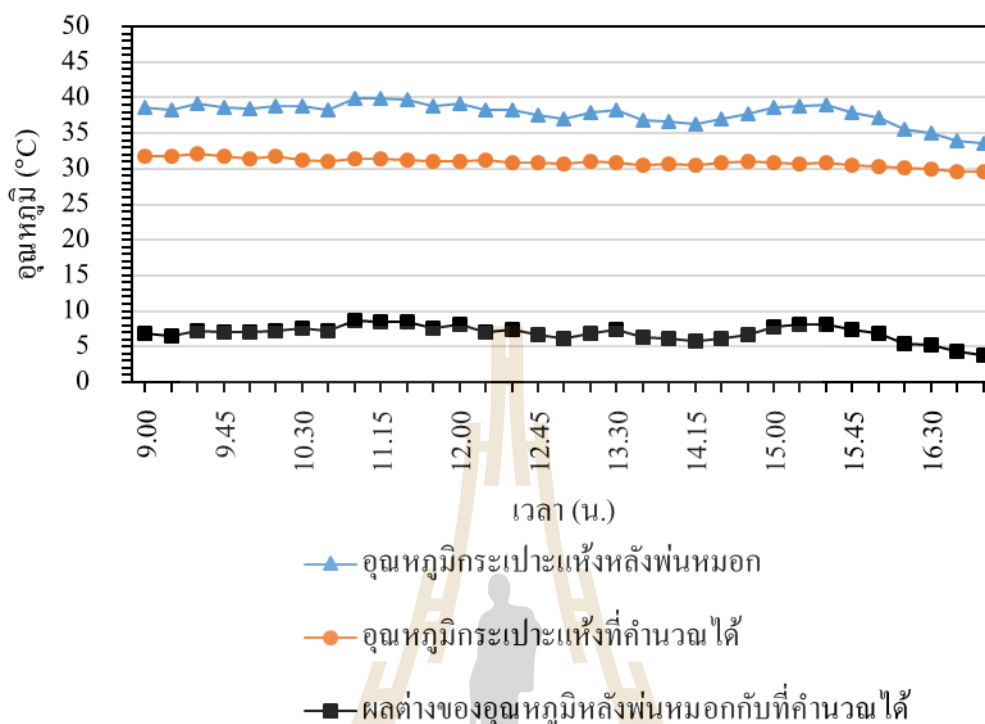
#### 4.4.2 ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา

จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่าความสามารถการระเหยมีค่าระหว่าง 93.58% – 101.25% มีค่าเฉลี่ย 97.59% เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นหลังการพ่นหมอกมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่สถานะควบคุมซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการคำนวณสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำได้อย่างแม่นยำและหัวพ่นหมอกในระบบพ่นหมอกสามารถทำให้ละอองน้ำระเหยได้เกือบหมด

#### 4.4.3 ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

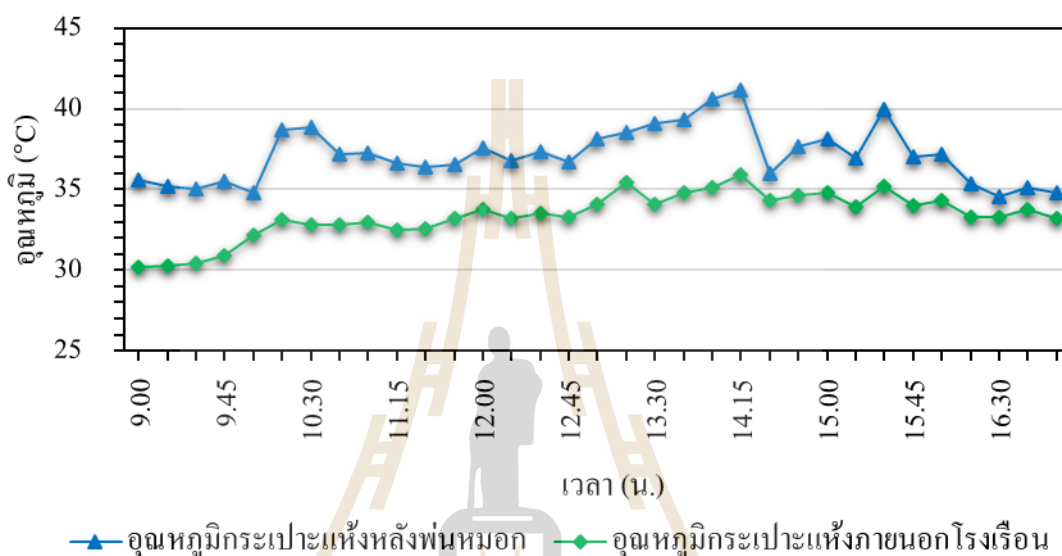
	อุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังพ่นหมอก	อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่คำนวณได้	ผลต่าง
ค่าต่ำสุด	33.50	29.64	3.81
ค่าสูงสุด	39.97	32.05	8.57
ค่าเฉลี่ย	37.83	30.95	6.89

จากรูปที่ 4.18 พบว่าถึงแม้ละอองหมอกที่พ่นสู่อากาศสามารถระเหยเป็นไอได้เฉลี่ยใกล้เคียง 100% (รูปที่ 4.17) แต่ไม่สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ใกล้เคียงกับกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ซึ่งแสดงค่าผลต่างในตารางที่ 4.11 เนื่องจากความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะสมภายในโรงเรือนไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างรวดเร็วเพียงพอ

#### 4.5 ทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในวันที่ 19 มิถุนายน 2561 ระหว่างเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

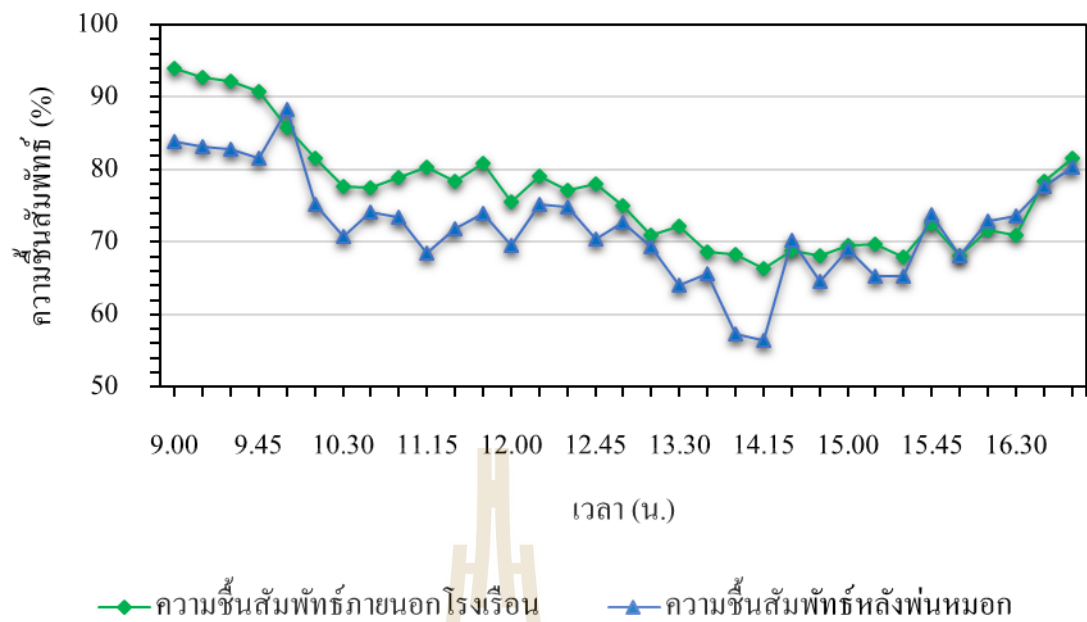
##### 4.5.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.12 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

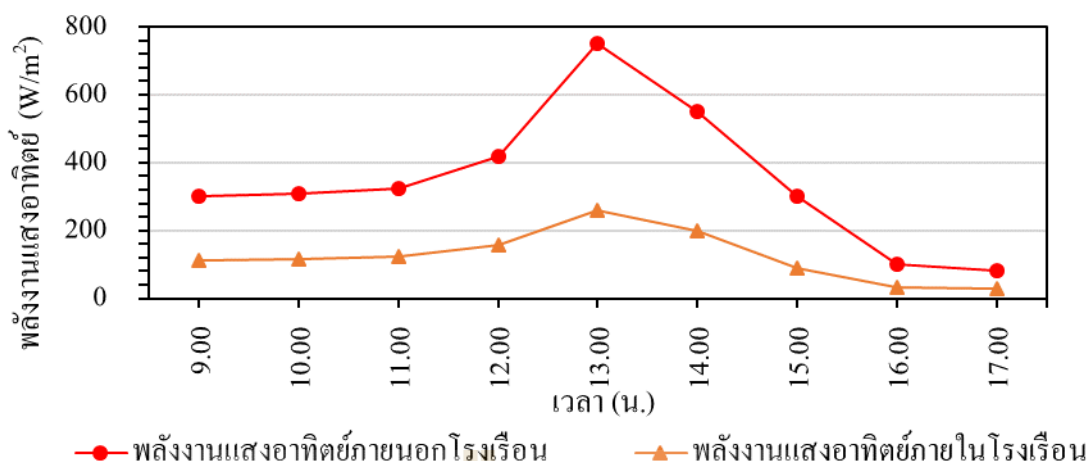
อุณหภูมิ	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรือน
ค่าต่ำสุด	34.77	30.20	34.53	33.20
ค่าสูงสุด	38.87	34.10	41.17	35.90
ค่าเฉลี่ย	36.72	32.46	37.58	34.38



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 4.13 ความชื้นสัมพัทธ์ของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรียนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

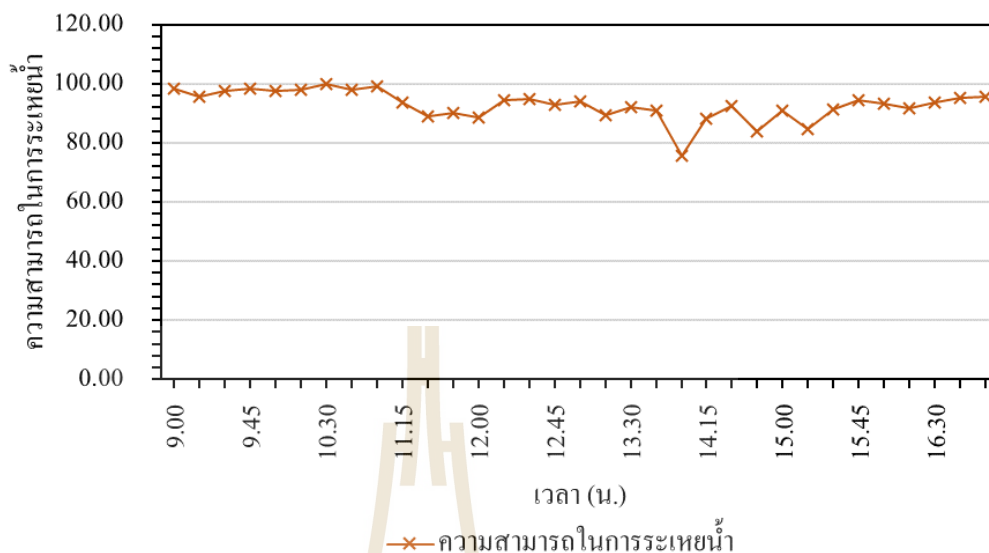
ความชื้นสัมพัทธ์	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน	หลังพ่นหมอก	ภายนอกโรงเรียน
ค่าต่ำสุด	68.50	75.10	56.37	66.30
ค่าสูงสุด	88.37	93.90	80.27	81.50
ค่าเฉลี่ย	75.88	82.09	68.30	70.87



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

จากรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.12 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-6.07^{\circ}\text{C}$  –  $-2.57^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-4.26^{\circ}\text{C}$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรียนกับหลังพ่นหมอกภายในโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-5.50^{\circ}\text{C}$  –  $-1.23^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $-3.20^{\circ}\text{C}$  และจากรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.13 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-11.90\%$  –  $-2.57\%$  ค่าเฉลี่ย  $-6.21\%$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์หลังพ่นหมอกกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-11.07\%$  –  $-2.63\%$  ค่าเฉลี่ย  $-2.57\%$  มีค่าผลต่างที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำและใกล้เคียงกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศภายนอกโรงเรียนยังมีค่าสูง (รูปที่ 4.20) ประกอบกับอากาศมีอุณหภูมิต่ำ เมื่ออากาศถูกนำเข้าสู่โรงเรียนจึงสามารถรับไอน้ำที่ระเหยจากละอองหมอกเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยและโรงเรียนเป็นระบบปิดทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4.21) ส่งผลให้เกิดสถานะเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศในโรงเรียนสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก จะเห็นว่าเมื่อมีตาข่ายพรางแสง พลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าไปภายในโรงเรียนจะมีค่าต่ำทำให้พลังงานความร้อนสะสมภายในโรงเรียนน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศสูงสุดไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$

#### 4.5.2 ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก

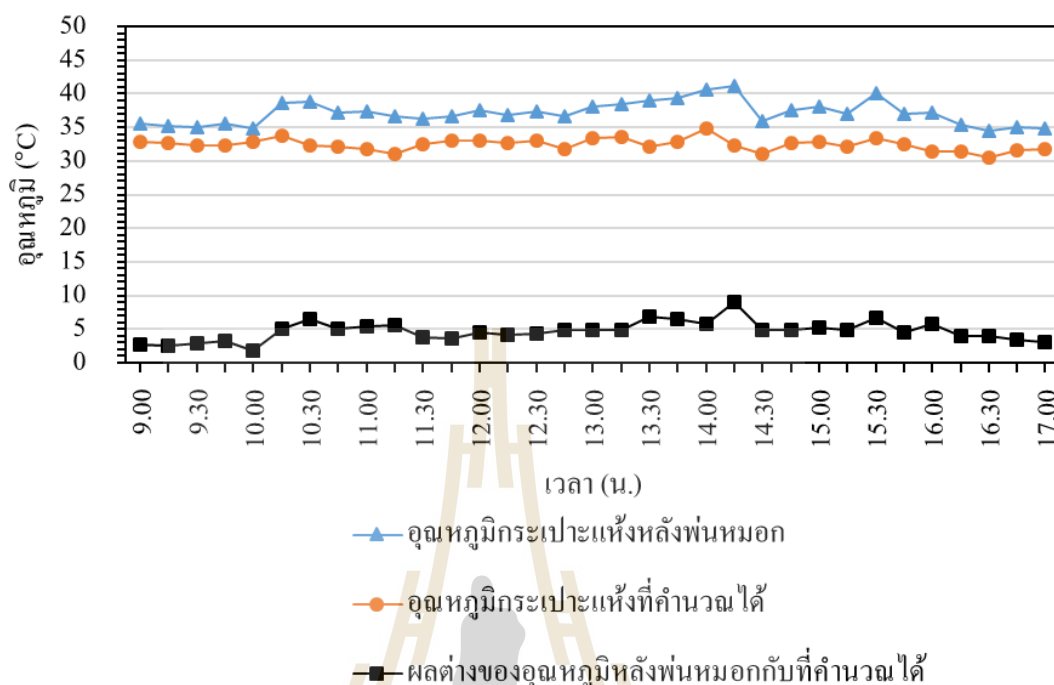


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการระเหยน้ำกับเวลา

จากรูปที่ 4.22 พบว่าค่าความสามารถการระเหยมีค่าระหว่าง 75.63% – 99.83% มีค่าเฉลี่ย 92.76% เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นหลังการพ่นหมอกมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนความชื้นที่สถานะควบคุมซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการคำนวณสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำได้อย่างแม่นยำและหัวพ่นหมอกในระบบพ่นหมอกสามารถทำให้ละอองน้ำระเหยได้เกือบหมด



### 4.5.3 ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิของผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

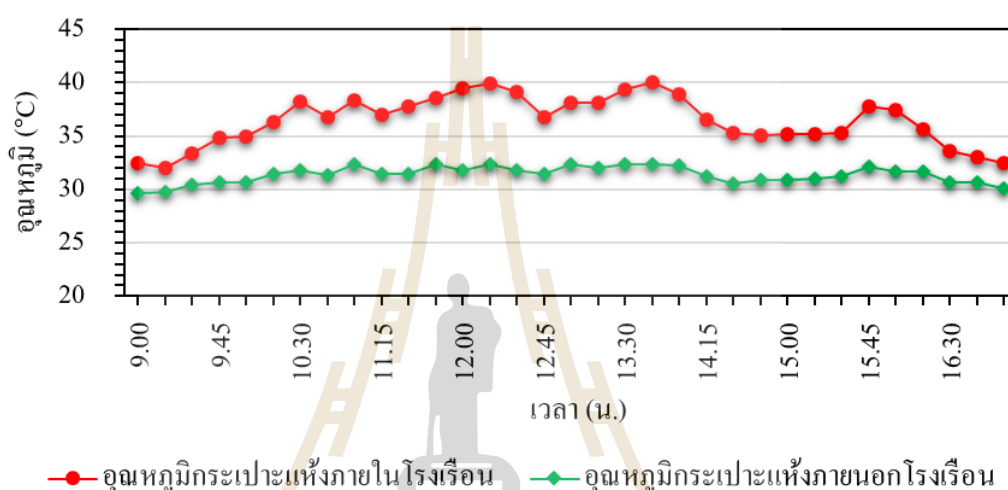
	อุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังพ่นหมอก	อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่คำนวณได้	ผลต่าง
ค่าต่ำสุด	34.53	30.53	1.83
ค่าสูงสุด	41.17	34.76	8.94
ค่าเฉลี่ย	37.14	32.44	4.70

จากรูปที่ 4.23 พบว่าถึงแม้ละอองหมอกที่พ่นสู่อากาศสามารถระเหยเป็นไอได้เฉลี่ยใกล้เคียง 100% (รูปที่ 4.22) แต่ไม่สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ใกล้เคียงกับกับอุณหภูมิที่คำนวณได้ซึ่งแสดงค่าผลต่างในตารางที่ 4.14 เนื่องจากความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะสมภายในโรงเรือนไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างรวดเร็วเพียงพอ

#### 4.6 ทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เป็นการทดสอบการทำงานของระบบในวันที่ 8 มิถุนายน 2561 ระหว่างเวลา 9.00 น. – 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

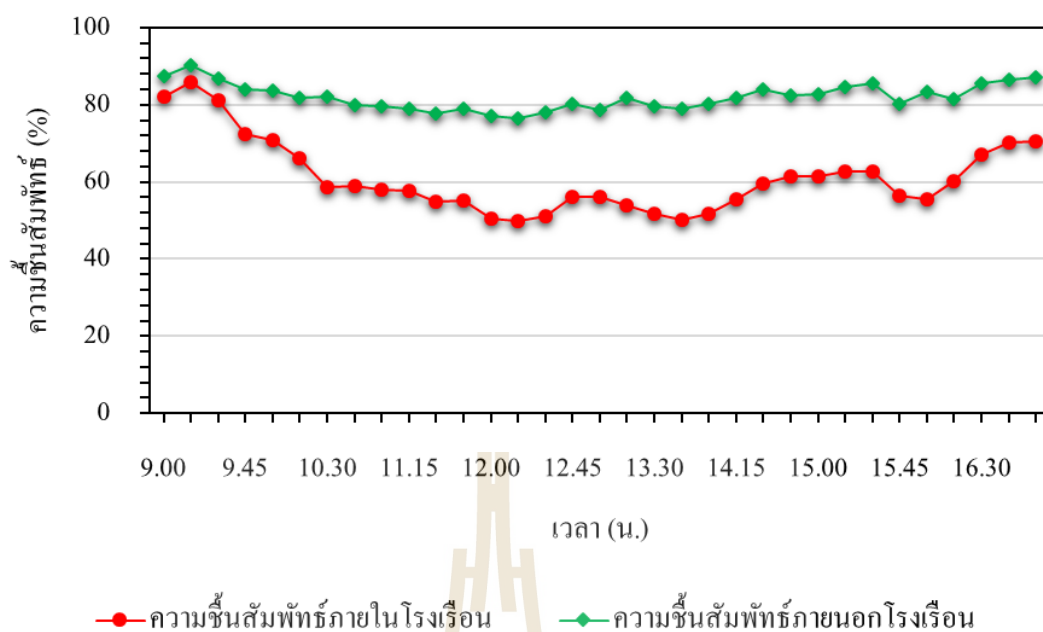
##### 4.6.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ตารางที่ 4.15 อุณหภูมิของผลการทดสอบ โดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

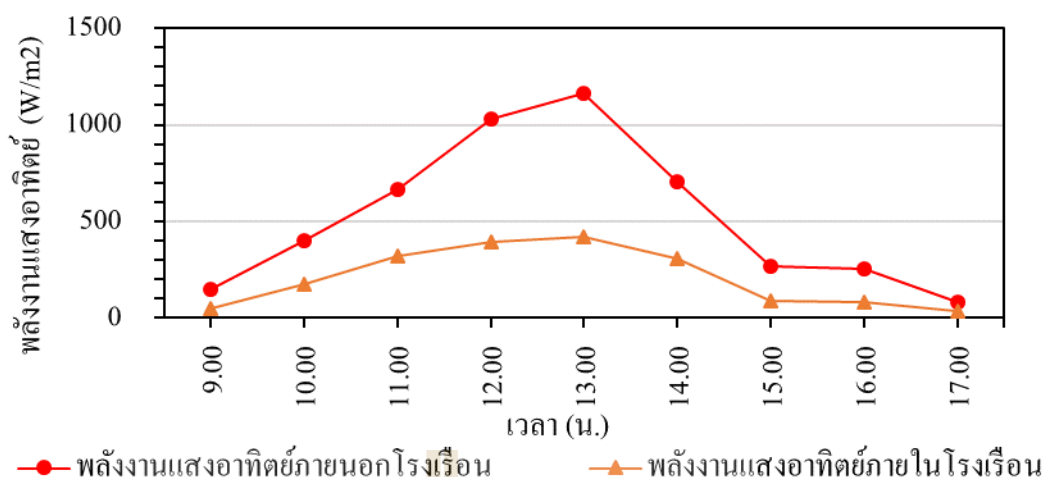
อุณหภูมิ	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	ภายในโรงเรือน	ภายนอกโรงเรือน	ภายในโรงเรือน	ภายนอกโรงเรือน
ค่าต่ำสุด	32.03	29.60	32.43	30.10
ค่าสูงสุด	39.90	32.40	40.10	32.40
ค่าเฉลี่ย	36.71	31.35	36.20	31.36



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ตารางที่ 4.16 ความชื้นของผลการทดสอบ โดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรียนไม่มีค้ำชายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

ความชื้นสัมพัทธ์	ช่วงเช้า เวลา 9.00 - 13.00		ช่วงบ่าย เวลา 13.15 - 17.00	
	ภายในโรงเรียน	ภายนอกโรงเรียน	ภายในโรงเรียน	ภายนอกโรงเรียน
ค่าต่ำสุด	49.73	76.50	50.13	78.90
ค่าสูงสุด	85.77	90.20	70.63	87.20
ค่าเฉลี่ย	62.69	81.28	59.45	82.90

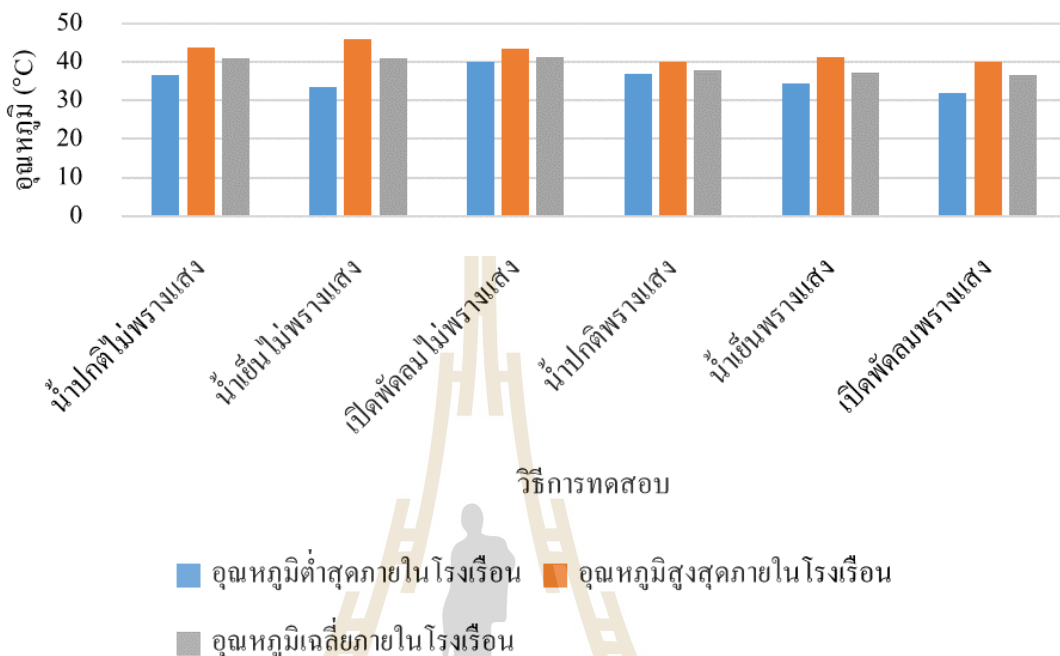


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

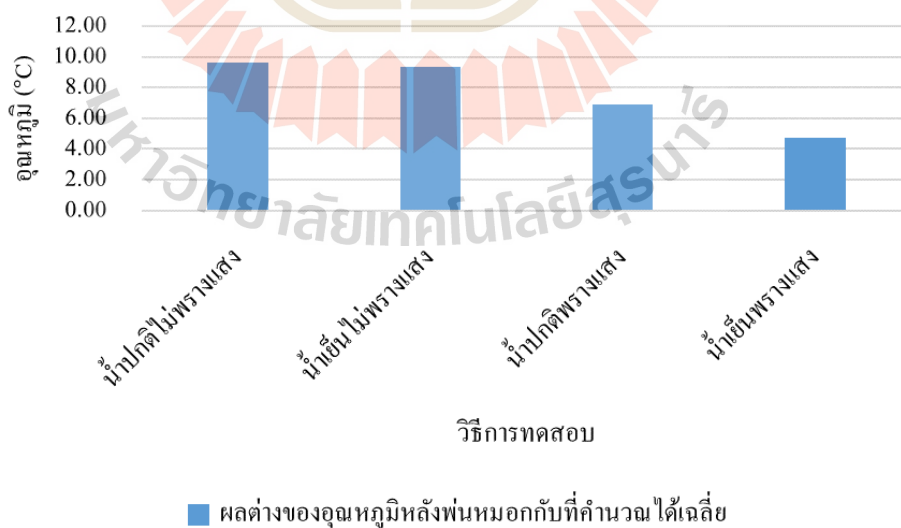
จากรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.15 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในและภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $2.33^{\circ}\text{C} - 7.63^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $5.37^{\circ}\text{C}$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในและภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $2.33^{\circ}\text{C} - 7.70^{\circ}\text{C}$  ค่าเฉลี่ย  $4.84^{\circ}\text{C}$  และจากรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.16 พบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. – 13.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-26.90\% - -4.43\%$  ค่าเฉลี่ย  $-18.59\%$  และในช่วงบ่าย 13.15 น. – 17.00 น. มีผลต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในกับภายนอกโรงเรียนมีค่าระหว่าง  $-28.77\% - -16.47\%$  ค่าเฉลี่ย  $-23.45\%$  จะเห็นว่าตลอดทั้งวัน อุณหภูมิภายในโรงเรียนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรียนและความชื้นภายในโรงเรียนมีค่าต่ำกว่าความชื้นภายนอกโรงเรียน เนื่องจากไม่มีระบบทำความเย็นให้กับระบบ อีกทั้งโรงเรียนเป็นระบบปิดทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4.26) และทำให้พลังงานความร้อนถูกสะสมภายในโรงเรียนจึงส่งผลให้อากาศภายในโรงเรียนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและความชื้นภายในโรงเรียนมีค่าลดลงอีกทั้งอากาศภายในโรงเรียนไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างอิสระเหมือนระบบเปิด จึงเกิดเป็นสภาวะเรือนกระจก

## 4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

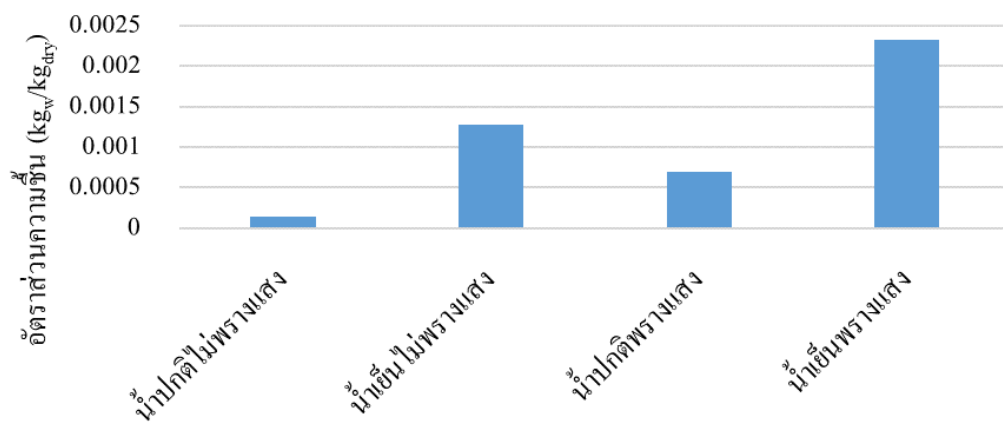
### 4.7.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



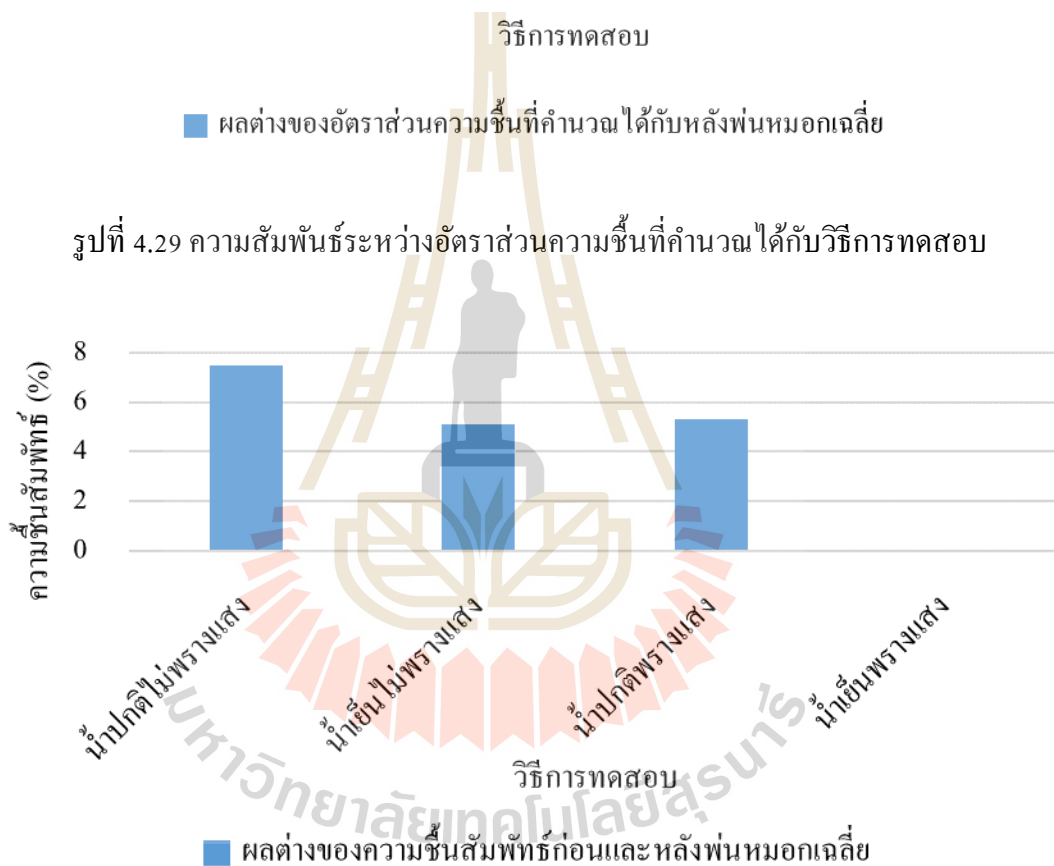
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับวิธีการทดสอบ



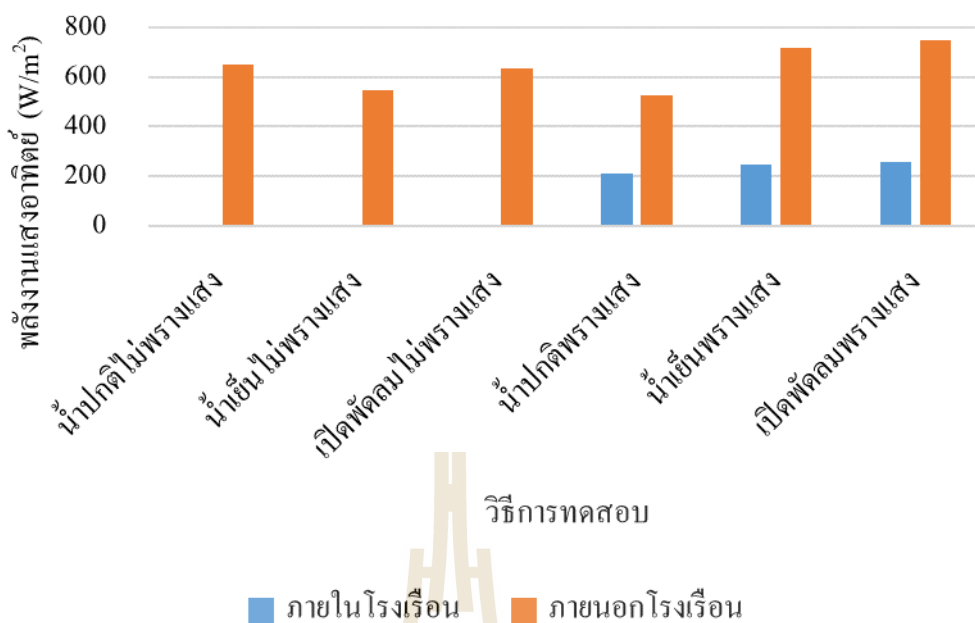
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับวิธีการทดสอบ



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้กับวิธีการทดสอบ



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับวิธีการทดสอบ



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยพลังงานแสงอาทิตย์กับวิธีการทดสอบ

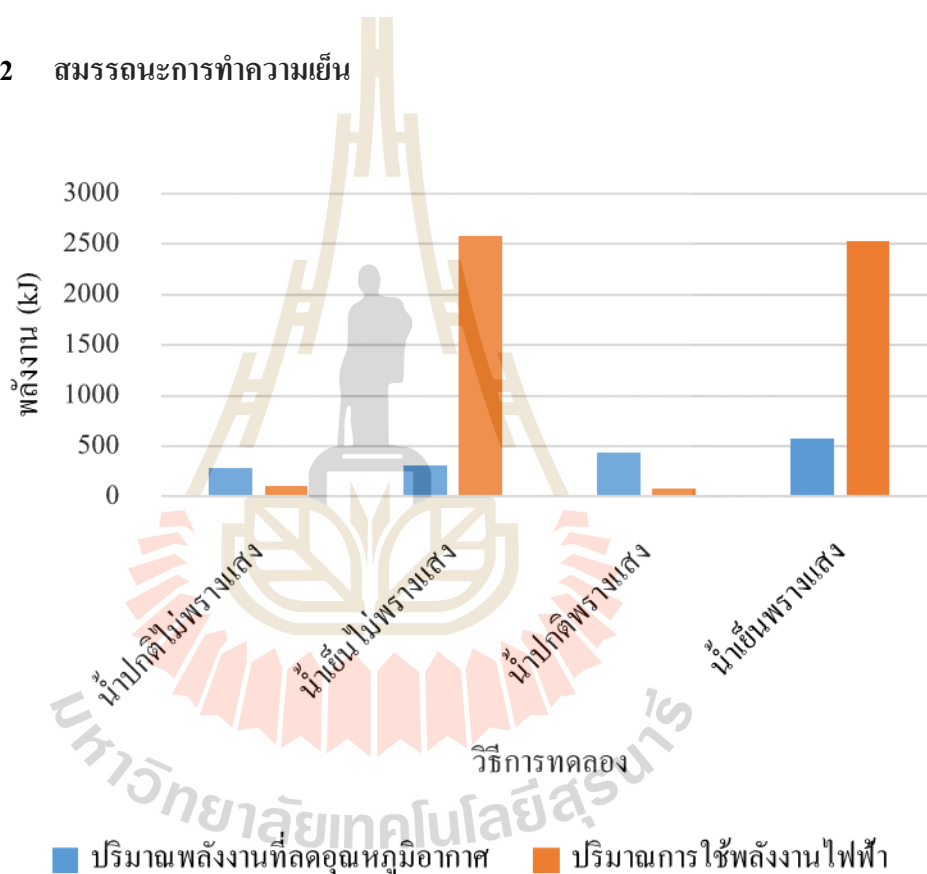
จากรูปที่ 4.27 พบว่าการทดสอบแบบไม่พรางแสงทั้ง 3 การทดสอบ มีอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยสูงเกิน  $40^{\circ}\text{C}$  และการทดสอบแบบน้ำเย็นไม่พรางแสงมีอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงสุดที่  $45.97^{\circ}\text{C}$  การทดสอบแบบพรางแสงทั้ง 3 การทดสอบ มีอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 การทดสอบที่  $40^{\circ}\text{C}$

จากรูปที่ 4.28 พบว่าผลต่างของอุณหภูมิหลังพ่นหมอกกับที่คำนวณได้เฉลี่ยในการทดสอบแบบไม่พรางแสงมีค่าที่สูงและผลต่างที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่โรงเรือนได้รับมีค่าสูง (รูปที่ 4.31) และพลังงานความร้อนถูกเก็บสะสมไว้ภายในโรงเรือนส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจกภายในโรงเรือน ทำให้เมื่อระบบพ่นหมอกทำงาน อุณหภูมิภายในโรงเรือนลดลงได้น้อยมาก (ระหว่างพ่นหมอกพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาในโรงเรือนเช่นเดียวกัน) จึงทำให้ผลต่างของอุณหภูมิหลังพ่นหมอกกับที่คำนวณได้ในการทดสอบแบบไม่พรางแสงมีค่าที่สูง และผลต่างของอุณหภูมิหลังพ่นหมอกกับที่คำนวณได้เฉลี่ยในการทดสอบแบบพรางแสงพบว่า มีแนวโน้มที่ต่ำลงเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่โรงเรือนได้รับมีค่าต่ำลง (รูปที่ 4.31) ทำให้พลังงานความร้อนถูกเก็บสะสมไว้ภายในโรงเรือนลดลง ทำให้เมื่อระบบพ่นหมอกทำงาน อุณหภูมิภายในโรงเรือนลดลงได้สูงขึ้น จึงทำให้ผลต่างของอุณหภูมิหลังพ่นหมอกกับที่คำนวณได้ในการทดสอบแบบไม่พรางแสงมีค่าที่ลดลง

จากรูปที่ 4.29 ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้กับหลังพ่นหมอกเฉลี่ยพบว่าผลการทดสอบของแบบใช้น้ำปกติไม่พรางแสงมีค่าผลต่างที่ต่ำที่สุดเนื่องจากพลังงาน

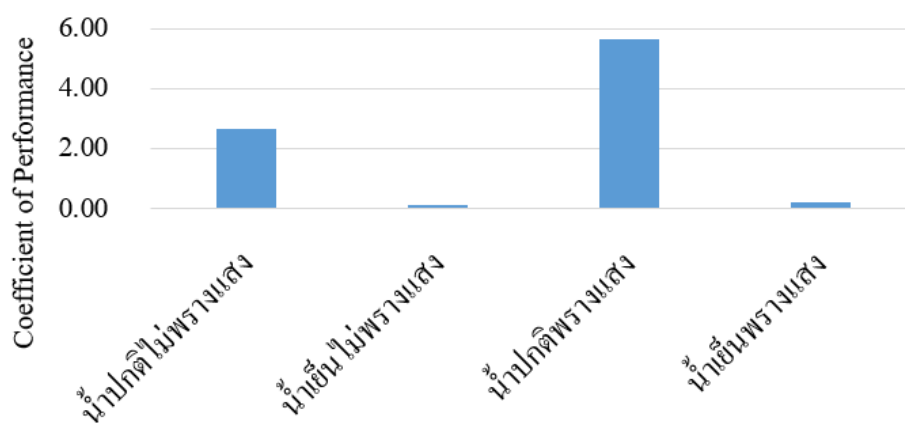
แสงอาทิตย์เข้าสู่โรงเรือนมีค่าสูงที่สุด ส่งผลให้เมื่อพ่นหมอกแล้วหมอกสามารถระเหยเป็นไอน้ำได้มาก สังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากรูปที่ 4.30 ผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังเฉลี่ย พบว่าการทดสอบแบบน้ำปกติไม่พรางแสงมีผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุด และผลการทดสอบของแบบใช้น้ำเย็นพรางแสงมีค่าผลต่างที่สูงที่สุดเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่โรงเรือนมีค่าต่ำที่สุด ส่งผลให้เมื่อพ่นหมอกแล้วหมอกสามารถระเหยเป็นไอน้ำได้น้อย สังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากรูปที่ 4.30 ผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังเฉลี่ย พบว่าการทดสอบแบบน้ำเย็นพรางแสงมีผลต่างของความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด

#### 4.7.2 สมรรถนะการทำความเย็น



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานกับวิธีการทดลอง





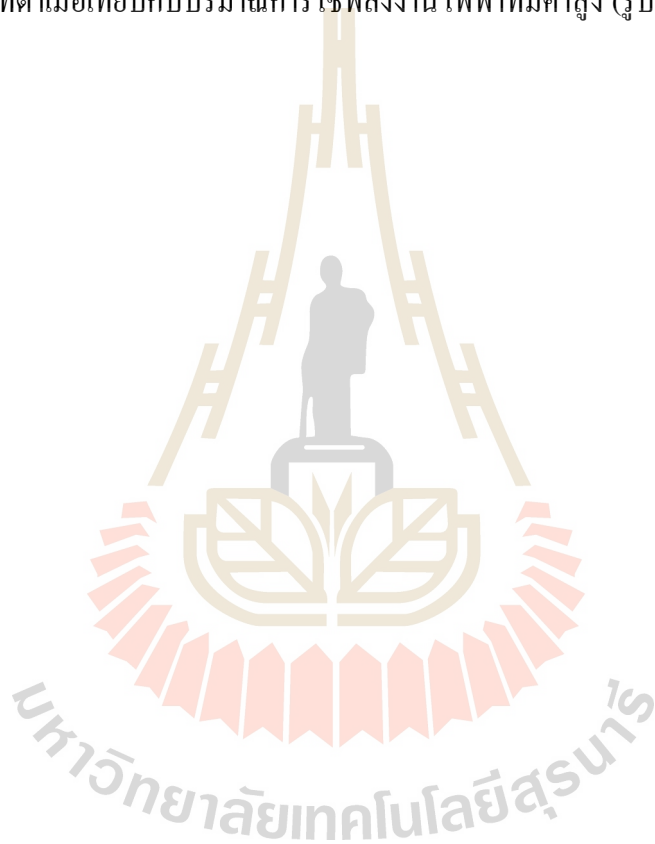
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการทำความเย็นกับวิธีการทดลอง



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh) กับวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 4.32 พบว่าปริมาณพลังงานที่ลดอุณหภูมิอากาศของทุกวิธีการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันแต่ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของการใช้น้ำปกติและน้ำเย็นมีค่าที่แตกต่างกันมากเนื่องจากแบบน้ำเย็นมีการใช้ตู้ทำน้ำเย็นทำให้ใช้พลังงานการไฟฟ้ามาซึ่งไม่คุ้มค่ากับการใช้งาน (รูปที่ 4.34)

จากรูปที่ 4.33 พบว่าค่า COP ของการทดสอบแบบใช้น้ำปกติมีค่าที่สูงเนื่องจากปริมาณพลังงานที่ลดอุณหภูมิได้มีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ (รูปที่ 4.32) และค่า COP ของการทดสอบแบบใช้น้ำเย็นมีค่าที่ต่ำเนื่องจากปริมาณพลังงานที่ลดอุณหภูมิได้มีค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีค่าสูง (รูปที่ 4.32)



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งได้จากการทำสมมูลมวลสารของระบบโรงเรือนพ่นหมอกพบว่า

- การทดสอบโดยใช้น้ำปกติและน้ำเย็นในการพ่นหมอกในโรงเรือนที่ไม่มีม่านพรางแสงมีอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า  $40^{\circ}\text{C}$  และเมื่อติดตั้งม่านพรางแสง อุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ยไม่เกิน  $40^{\circ}\text{C}$
- การลดอุณหภูมิภายในโรงเรือน โดยวิธีการพ่นหมอกแบบไม่พรางแสงสามารถลดอุณหภูมิได้น้อยแต่การลดอุณหภูมิภายในโรงเรือน โดยวิธีการพ่นหมอกร่วมกับการพรางแสงจะช่วยให้ลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้มากขึ้นเนื่องจากช่วยลดปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เข้าในโรงเรือนและส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ถูกสะสมไว้มีค่าน้อยลง
- ปริมาณพลังงานที่ลดอุณหภูมิอากาศของทุกวิธีการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันแต่ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของการใช้น้ำปกติและน้ำเย็นมีค่าที่แตกต่างกันมากเนื่องจากแบบน้ำเย็นมีการใช้ตู้ทำน้ำเย็นทำให้ใช้พลังงานการใช้ไฟฟ้ามกส่งผลให้ค่า COP ต่ำ
- ในการลดอุณหภูมิอากาศด้วยระบบพ่นหมอกควรใช้น้ำปกติเนื่องจากการใช้น้ำปกติและน้ำเย็นสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้ใกล้เคียงอีกทั้งน้ำปกติใช้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่น้อยกว่าน้ำเย็น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะพบว่าปัญหาหลักที่ไม่สามารถลดอุณหภูมิได้คือสภาวะเรือนกระจกและความร้อนสะสมภายในโรงเรือน ซึ่งในงานวิจัยที่ควรปรับปรุงแนะนำให้ลดปัญหาเหล่านี้โดยใช้แผ่นฉนวนความร้อนติดที่ผนังและหลังคาของโรงเรือนและใช้สปริงเกอร์รดน้ำบนหลังคาเพื่อคายพลังงานความร้อนที่สะสมภายในโรงเรือนอีกทั้งเพิ่มจำนวนพัดลมดูดอากาศเพื่อให้สามารถถ่ายเทอากาศร้อนออกจากโรงเรือนอีกด้วย

## รายการอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553). คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (อาคาร). บทที่ 4 ระบบปรับอากาศ และบทที่ 5 ระบบทำความเย็น.
- ดิเรก ทองอร่าม. (2550). การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน: หลักการจัดการการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย (ฉบับปรับปรุงใหม่พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดีการพิมพ์
- ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์. (2557). ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดินแบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกะแบบโปรแกรมได้. EAU HERITAGE JOURNAL Science and Technology vol.8.
- นภคธ เรียบเลิศหิรัญ. (2553). การปลูกพืชไร้ดิน (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: สุวีริยาสาส์น
- นิตินรงค์ พงษ์พานิช, วัชรพล ชยประเสริฐ, ภัทราพร สัตตชาติเจตน์, อธิเดช มูลมั่งมี และกฤษฎา แสงพีร์ส่อง. (2558). การพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนแบบ Evaporative cooling. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 16 ประจำปี 2558 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 8.
- บุญยฤทธิ์ เผือกสามัญญ, ถวัลย์ศักดิ์ เผ่าสังข์ และ บุญญติ เศรษฐจิติ. (2557). การประยุกต์ใช้หอทำน้ำเย็นในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตพืช. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 ระหว่างวันที่ 4 – 7 กุมภาพันธ์ 2557.
- บุญยัง สิงห์เจริญ และ สันติ สาแก้ว. (2559). ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะเห็ด, การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ครั้งที่ 1.
- ประพันธ์พงษ์ สมศิลา, อำไพศักดิ์ ทิบุญมา, ประทีป ตุ่มทอง, สุริยา อุดด้วง และ มานะ วิชางาม. (2555). ชนิดโครงสร้างของโรงเรือนที่มีผลต่อการไหลเวียนและอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนอบแห้งแสงอาทิตย์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. หน้า 212-215.
- พลศักดิ์ ทองดอนเถิง และ ช้อนนาง ยอดสง่า. (2546). การออกแบบและพัฒนาอาคารเรือนเพาะชำพลาสติก, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, หน้า 2-3

- วิไลภรณ์ ชนกล้าชัย และ ปฎิวัติ วงศ์รัตนธรรม. (2551). การปลูกผักปลอดภัยจากสารพิษ, ฝ่ายเอกสารคำแนะนำ, หน้า 2-3.
- วรากร สังข์กระเสร์, ธรรมชาติ กลิ่นเกษร และ เสกสรร มธุลาภรังสรรค์. (2558). ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการปลูกผักสลัดบนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT. ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วารีนี ธรรมชาติไพศาล. (2555). ปลูกพืชไร้ดิน Amazing Hydroponics. กรุงเทพมหานคร: ไทยควอลิตี้บุ๊กส์
- วันชัย คุปวานิชพงษ์. (2555). การออกแบบระบบให้น้ำผ่านท่อในงานวิจัยเกษตรวิศวกรรม, สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม, หน้า 6-7.
- ศุภวุฒิ ผลกา, สันติ วงศ์ใหญ่ และ อติสร ถมยา. (2557). การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดในโรงเพาะเห็ดบ้านทุ่งบ่อเป็น ตำบลปงยางคก อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง, วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2557.
- A. Arbel, O. Yekutieli and M. Barak. (1999). Performance of a Fog System for Cooling Greenhouses. Institute of Agricultural Engineering, Agricultural Research Organization, The Volcani Center, Israel. J. Agric Engng Res. (1999) 72, 129-136.
- ASHRAE, (2001). 2001 ASHRAE Handbook Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA.
- ASAE, (2002). Heating Ventilating Cooling Greenhouses. ASAE STANDARDS, ANSI/ASAE EP406.3 MAR98, American Society of Agricultural Engineers. 703-710.
- A.M. Abdel-Ghany and T.Kozai. (2006). Cooling Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses. Biosystems Engineering (2006) 94(1), 97-109
- J.I. Montero, A. Anton, C. Beil, and A. Franquet. (1994). Cooling of Greenhouse with Compressed air Fogging Nozzles. Acta Horticulturae, 281. 199-209.
- Llhan ceylan, Alper Ergun, Bahadir Acar, and Mustafa Aydin. (2016). Psychometric and thermodynamic analysis of new ground source evaporative cooling system. Karabuk University. Energy and Buildings 119(2016) 20-27.
- Roland Stull. (2011). Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. Journal of Applied Meteorology and Climatology Volume 50 November 2011. 2267-2269.



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดสอบ

ตารางผนวกที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
9.00	41.07	57.90	38.20	46.90	0.37	48.00	41.37	64.03	32.48
9.15	41.43	54.23	38.40	48.70	0.41	53.00	41.43	59.13	31.88
9.30	41.33	52.40	38.80	46.90	0.42	55.00	41.17	61.10	31.38
9.45	42.77	50.50	38.00	47.80	0.46	60.00	42.70	59.00	31.90
10.00	42.53	50.03	38.40	48.40	0.46	60.00	42.33	60.27	31.63
10.15	42.00	50.47	38.40	46.80	0.45	59.00	41.67	60.27	31.38
10.30	41.50	53.93	38.90	47.80	0.41	53.00	41.50	63.87	31.86
10.45	41.37	55.03	39.60	45.60	0.40	52.00	41.37	62.83	32.03
11.00	41.50	54.43	39.10	46.50	0.41	53.00	41.47	62.60	31.98
11.15	41.37	55.10	39.00	46.10	0.40	52.00	41.30	63.33	32.04
11.30	41.27	56.57	38.60	45.20	0.38	50.00	41.13	63.87	32.31
11.45	40.97	57.97	38.40	46.10	0.36	47.00	40.97	63.50	32.42

ตารางผนวกที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
12.00	43.67	54.63	39.60	42.40	0.43	56.00	43.27	60.10	33.54
12.15	39.07	56.67	37.10	45.10	0.36	47.00	38.20	66.40	30.74
12.30	39.80	59.67	39.40	40.60	0.34	44.00	39.90	69.00	31.94
12.45	41.93	51.13	39.60	40.20	0.44	58.00	41.90	62.23	31.49
13.00	38.73	58.90	39.10	41.80	0.33	43.00	39.03	66.37	30.98
13.15	40.67	60.23	40.40	39.10	0.34	44.00	40.83	65.47	32.72
13.30	41.03	57.00	41.10	34.70	0.37	49.00	41.17	62.23	32.25
13.45	41.33	56.10	42.80	32.40	0.39	50.00	41.43	62.93	32.25
14.00	43.67	48.23	43.50	28.40	0.50	65.00	43.50	59.73	31.93
14.15	43.20	50.43	42.50	31.00	0.47	61.00	43.13	59.80	32.18
14.30	42.93	44.40	42.70	28.70	0.53	69.00	43.00	56.67	30.51
14.45	43.40	43.93	42.30	28.80	0.54	70.00	43.43	53.27	30.68



ตารางผนวกที่ ก.1 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
15.00	43.50	41.87	39.10	37.00	0.56	73.00	43.23	49.93	30.23
15.15	43.13	41.40	37.50	40.90	0.56	73.00	43.07	49.40	29.89
15.30	41.17	45.93	36.10	44.90	0.49	64.00	40.27	53.47	29.74
15.45	38.13	53.70	34.20	52.80	0.38	49.00	37.40	59.50	29.41
16.00	36.47	56.83	32.50	57.10	0.33	43.00	36.70	60.73	28.85
16.15	36.97	55.70	32.50	57.70	0.35	45.00	37.13	58.93	28.99
16.30	37.30	54.67	32.40	58.60	0.36	47.00	37.40	59.40	29.02
16.45	37.43	56.47	32.50	58.40	0.34	45.00	37.47	59.00	29.49
17.00	37.43	55.10	32.50	59.70	0.36	46.00	37.40	60.33	29.21
ต่ำสุด	36.47	41.40	32.40	28.40	0.33	43.00	36.70	49.40	28.85
สูงสุด	43.67	60.23	43.50	59.70	0.56	73.00	43.50	69.00	33.54
เฉลี่ย	40.91	53.08	38.28	44.34	0.41	54.03	40.83	60.57	31.19

ตารางผนวกที่ ก.2 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือน ไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา	พลังงานแสงอาทิตย์ภายนอกโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )
9.00	500
10.00	788
11.00	856
12.00	937
13.00	796
14.00	637
15.00	663
16.00	345
17.00	315
ต่ำสุด	315
สูงสุด	937
เฉลี่ย	649

ตารางผนวกที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบ โดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
9.00	35.00	71.77	31.00	89.50	0.19	25.00	34.87	75.07	30.53
9.15	40.43	60.93	32.10	86.80	0.33	43.00	40.13	65.50	32.70
9.30	39.70	62.27	32.10	84.10	0.31	41.00	39.57	66.13	32.44
9.45	42.67	53.07	33.40	80.00	0.43	56.00	42.40	59.37	32.46
10.00	39.70	63.27	33.10	83.30	0.30	39.00	39.57	67.77	32.66
10.15	39.90	57.57	33.30	75.50	0.36	47.00	39.83	63.50	31.55
10.30	38.87	59.63	33.30	75.00	0.33	43.00	38.77	64.03	31.24
10.45	40.93	56.20	33.60	73.80	0.38	50.00	40.57	62.40	31.99
11.00	36.57	67.27	32.10	78.90	0.24	31.00	36.43	70.07	31.00
11.15	38.50	60.63	32.80	78.90	0.32	41.00	38.73	67.83	31.17

ตารางผนวกที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบ โดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
11.30	42.50	52.63	34.20	71.60	0.44	57.00	42.53	59.40	32.24
11.45	43.20	51.37	34.40	69.20	0.46	60.00	43.33	58.27	32.41
12.00	44.40	48.17	35.30	68.90	0.51	66.00	44.13	54.40	32.39
12.15	40.87	53.33	34.00	74.80	0.41	53.00	40.87	60.53	31.28
12.30	42.63	52.43	34.10	70.10	0.44	57.00	42.67	57.87	32.29
12.45	43.47	49.63	33.70	71.00	0.48	62.00	43.50	56.17	32.15
13.00	43.60	50.43	34.10	72.60	0.47	61.00	43.67	57.77	32.44
13.15	44.43	49.00	34.80	66.80	0.50	65.00	44.60	54.00	32.63
13.30	42.70	50.17	34.30	68.20	0.46	60.00	43.00	57.03	31.77
13.45	43.37	47.17	34.10	69.00	0.50	66.00	43.47	51.03	31.47

ตารางผนวกที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ปั๊มทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
14.00	45.23	39.53	34.30	67.10	0.61	80.00	45.20	41.27	30.69
14.15	45.97	40.43	34.40	66.50	0.61	80.00	45.37	49.13	31.35
14.30	44.30	44.77	34.30	66.60	0.54	71.00	44.17	50.60	31.46
14.45	44.30	44.77	34.30	66.60	0.54	71.00	44.17	50.60	31.46
15.00	40.83	50.43	33.90	67.00	0.44	57.00	40.40	56.43	30.57
15.15	41.27	51.67	34.30	67.60	0.43	56.00	41.17	52.73	31.16
15.30	42.50	46.03	34.80	64.70	0.50	66.00	42.47	53.60	30.63
15.45	41.90	48.20	34.80	65.10	0.47	62.00	41.70	54.07	30.76
16.00	38.87	55.60	34.00	66.30	0.37	48.00	38.60	58.87	30.36
16.15	36.27	61.40	33.50	67.90	0.29	38.00	36.23	63.83	29.62
16.30	35.63	63.93	33.60	70.50	0.26	34.00	35.53	68.53	29.61

ตารางผนวกที่ ก.3 แสดงผลการทดสอบ โดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ปั๊มทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
16.45	34.83	68.77	33.40	72.00	0.22	28.00	34.73	71.23	29.86
17.00	33.60	78.37	32.80	71.70	0.14	18.00	33.50	80.27	30.42
ต่ำสุด	33.60	39.53	31.00	64.70	0.14	18.00	33.50	41.27	29.61
สูงสุด	45.97	78.37	35.30	89.50	0.61	80.00	45.37	80.27	32.70
เฉลี่ย	40.88	54.87	33.70	72.35	0.40	52.48	40.78	59.98	31.42

ตารางผนวกที่ ก.4 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและ โรงเรือน ไม่มีตาข่าย  
พรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

เวลา	พลังงานแสงอาทิตย์ภายนอกโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )
9.00	156
10.00	228
11.00	609
12.00	1112
13.00	912
14.00	833
15.00	536
16.00	429
17.00	117
ต่ำสุด	117
สูงสุด	1112
เฉลี่ย	548

ตารางผนวกที่ ก.5 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือน ไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา (น.)	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน	ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอก	ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก
	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)
9.00	40.37	55.17	30.30	90.50
9.15	40.63	52.17	30.10	89.70
9.30	40.40	51.73	30.20	89.60
9.45	40.30	50.63	30.80	87.00
10.00	40.90	48.83	30.70	85.80
10.15	40.57	50.03	31.30	83.00
10.30	41.10	48.63	31.80	81.80
10.45	40.07	50.83	31.90	79.00
11.00	41.20	45.30	32.00	75.70
11.15	42.37	42.27	32.30	74.70
11.30	41.47	45.30	32.50	77.50
11.45	42.33	41.47	32.60	71.90



ตารางผนวกที่ ก.5 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน	ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอก	ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก
	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)
12.00	42.87	42.43	33.30	73.30
12.15	43.33	39.90	33.30	71.40
12.30	43.57	39.27	32.90	71.10
12.45	43.13	39.17	32.80	71.70
13.00	41.83	41.50	32.80	73.60
13.15	43.90	40.77	33.50	68.80
13.30	44.50	36.83	33.80	63.00
13.45	44.83	35.87	33.80	65.80
14.00	44.97	33.43	34.00	64.80
14.15	45.43	33.67	33.30	66.20
14.30	45.27	34.50	33.70	68.50
14.45	45.53	34.57	33.60	69.40

ตารางผนวกที่ ก.5 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน	ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก
	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)	ภายนอกโรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)
15.00	44.03	35.40	33.80	66.30
15.15	44.57	33.10	33.70	64.00
15.30	43.90	36.57	33.60	67.80
15.45	41.13	39.70	33.30	68.60
16.00	39.57	44.33	33.50	67.40
16.15	32.87	64.60	29.10	87.70
16.30	31.10	72.40	28.00	91.10
16.45	30.63	74.17	27.80	91.70
17.00	30.30	76.37	27.60	92.30
ต่ำสุด	30.30	33.10	27.60	63.00
สูงสุด	45.53	76.37	34.00	92.30
เฉลี่ย	41.18	45.79	32.05	76.08

ตารางผนวกที่ ก.6 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือน ไม่มีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา	พลังงานแสงอาทิตย์ภายนอกโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )
9.00	610
10.00	620
11.00	915
12.00	905
13.00	885
14.00	770
15.00	540
16.00	350
17.00	130
ต่ำสุด	130
สูงสุด	915
เฉลี่ย	636

ตารางผนวกที่ ก.7 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
9.00	38.73	62.70	31.80	83.10	0.30	39.00	38.63	67.30	31.79
9.15	38.50	63.70	32.00	82.70	0.29	37.00	38.27	70.90	31.82
9.30	39.30	61.90	33.00	77.40	0.31	40.00	39.27	66.00	32.05
9.45	38.87	61.83	32.90	78.10	0.31	40.00	38.73	69.00	31.71
10.00	38.80	60.73	32.90	75.00	0.32	41.00	38.53	67.50	31.42
10.15	38.97	61.37	33.50	75.50	0.31	41.00	38.87	65.77	31.69
10.30	39.00	59.30	33.60	73.30	0.33	43.00	38.77	67.23	31.26
10.45	38.53	59.87	33.50	73.30	0.32	42.00	38.27	65.57	31.04
11.00	40.07	56.37	33.90	69.40	0.37	48.00	39.97	61.90	31.40
11.15	40.03	56.50	33.90	69.70	0.37	48.00	39.97	63.63	31.41
11.30	39.90	56.50	34.10	71.00	0.37	48.00	39.80	63.53	31.31
11.45	38.80	59.30	34.30	69.30	0.33	43.00	38.77	64.43	31.11

ตารางผนวกที่ ก.7 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
12.00	39.27	57.60	34.10	68.90	0.35	46.00	39.20	65.63	31.09
12.15	38.60	60.50	34.40	70.40	0.32	41.00	38.33	67.10	31.22
12.30	38.53	59.50	34.90	67.30	0.33	42.00	38.30	65.70	30.96
12.45	37.87	61.33	33.50	71.20	0.30	39.00	37.57	67.07	30.84
13.00	36.97	64.30	33.90	69.70	0.27	35.00	36.93	67.30	30.74
13.15	37.90	62.47	34.60	67.70	0.29	38.00	37.90	68.47	31.10
13.30	38.60	59.27	34.30	69.10	0.33	43.00	38.27	65.67	30.96
13.45	36.80	63.67	34.20	69.70	0.27	36.00	36.80	68.93	30.48
14.00	36.83	64.33	34.00	70.00	0.27	35.00	36.73	68.63	30.64
14.15	36.50	64.97	33.90	70.10	0.26	34.00	36.27	69.80	30.50
14.30	37.27	63.97	33.90	69.50	0.27	36.00	37.07	67.77	30.91
14.45	37.70	62.73	33.90	69.70	0.29	38.00	37.67	67.97	31.00

ตารางผนวกที่ ก.7 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ พ่นทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
15.00	38.80	58.10	34.70	66.20	0.34	44.00	38.60	64.40	30.86
15.15	38.77	57.57	33.90	66.50	0.35	45.00	38.77	60.67	30.71
15.30	39.03	57.47	34.70	67.70	0.35	46.00	38.97	64.37	30.89
15.45	37.93	59.33	34.00	66.70	0.32	42.00	37.90	64.70	30.47
16.00	37.53	60.43	33.80	68.00	0.31	40.00	37.27	66.43	30.39
16.15	35.57	67.23	33.30	67.90	0.23	30.00	35.57	68.43	30.18
16.30	35.20	67.67	33.10	70.60	0.23	30.00	35.10	70.93	29.96
16.45	34.00	71.47	33.00	70.00	0.19	25.00	33.90	74.47	29.64
17.00	33.53	74.13	33.20	70.20	0.17	22.00	33.50	76.23	29.69
ต่ำสุด	33.53	56.37	31.80	66.20	0.17	22.00	33.50	60.67	29.64
สูงสุด	40.07	74.13	34.90	83.10	0.37	48.00	39.97	76.23	32.05
เฉลี่ย	37.96	61.76	33.72	71.06	0.30	39.30	37.83	67.07	30.95

ตารางผนวกที่ ก.8 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา	พลังงานแสงอาทิตย์ภายนอกโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )	พลังงานแสงอาทิตย์ภายในโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )
9.00	525	170
10.00	810	310
11.00	881	314
12.00	1138	392
13.00	1002	383
14.00	850	255
15.00	520	170
16.00	348	100
17.00	389	119
ต่ำสุด	348	100
สูงสุด	1138	392
เฉลี่ย	718	246

ตารางผนวกที่ ก.9 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ปั๊มทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
9.00	35.70	81.67	30.20	93.90	0.13	16.00	35.57	83.90	32.79
9.15	35.37	83.17	30.30	92.70	0.12	15.00	35.23	83.13	32.72
9.30	35.13	81.37	30.40	92.20	0.13	16.00	35.07	82.77	32.24
9.45	35.63	78.77	30.90	90.70	0.15	19.00	35.50	81.63	32.26
10.00	34.77	88.50	32.20	85.80	0.08	10.00	34.77	88.37	32.94
10.15	38.83	71.97	33.10	81.60	0.22	28.00	38.73	75.20	33.76
10.30	39.13	63.93	32.80	77.70	0.29	38.00	38.87	70.80	32.36
10.45	37.30	70.30	32.80	77.50	0.22	29.00	37.20	74.10	32.17
11.00	37.40	68.17	33.00	78.90	0.24	31.00	37.30	73.43	31.84
11.15	36.70	66.80	32.50	80.40	0.25	32.00	36.60	68.50	31.01
11.30	36.43	76.27	32.60	78.40	0.17	22.00	36.37	71.80	32.53



ตารางผนวกที่ ก.9 แสดงผลการทดสอบ โดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
11.45	36.63	77.73	33.20	80.90	0.16	21.00	36.57	73.93	32.96
12.00	37.60	73.80	33.80	75.60	0.20	25.00	37.57	69.53	33.08
12.15	37.00	74.17	33.20	79.10	0.19	25.00	36.80	75.13	32.64
12.30	37.43	74.10	33.50	77.10	0.19	25.00	37.33	74.80	32.99
12.45	36.67	70.77	33.30	78.00	0.21	28.00	36.67	70.37	31.74
13.00	38.17	72.63	34.10	75.10	0.21	27.00	38.17	72.63	33.33
13.15	39.00	70.57	35.40	71.00	0.23	30.00	38.50	69.30	33.62
13.30	39.07	63.43	34.10	72.20	0.29	38.00	39.07	64.00	32.20
13.45	40.10	62.83	34.80	68.60	0.31	40.00	39.30	65.60	32.87
14.00	40.80	69.03	35.10	68.30	0.26	34.00	40.60	57.23	34.76
14.15	41.23	56.30	35.90	66.30	0.38	50.00	41.17	56.37	32.23

ตารางผนวกที่ ก.9 แสดงผลการทดสอบ โดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
14.30	35.97	70.40	34.30	68.80	0.21	28.00	35.97	70.17	31.09
14.45	37.67	71.73	34.60	68.20	0.21	28.00	37.63	64.50	32.75
15.00	38.37	69.30	34.80	69.50	0.24	31.00	38.10	68.93	32.85
15.15	37.07	70.97	33.90	69.70	0.21	28.00	36.93	65.23	32.11
15.30	40.40	64.20	35.20	68.00	0.30	39.00	40.00	65.27	33.40
15.45	37.70	70.10	34.00	72.60	0.23	29.00	37.03	73.70	32.46
16.00	37.20	67.13	34.30	68.20	0.25	32.00	37.17	68.03	31.48
16.15	35.73	72.83	33.30	71.60	0.19	25.00	35.33	72.83	31.34
16.30	34.53	74.07	33.30	71.00	0.17	23.00	34.53	73.63	30.53
16.45	35.30	76.67	33.80	78.40	0.16	21.00	35.10	77.73	31.62
17.00	35.13	78.87	33.20	81.50	0.14	19.00	34.83	80.27	31.84

ตารางผนวกที่ ก.9 แสดงผลการทดสอบโดยใช้น้ำเย็นที่ได้จากการลดอุณหภูมิจากเครื่องทำน้ำเย็นในการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% กลุ่มบน  
หลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ก่อนพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ก่อน พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ภายนอก โรงเรือน (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ ภายนอก โรงเรือน (%)	ปริมาณน้ำที่ พ่นหมอก (kg)	ระยะเวลาที่ ป้อนทำงาน (s)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง หลังพ่น หมอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์หลัง พ่นหมอก (%)	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง ที่คำนวณได้ (°C)
ต่ำสุด	34.53	56.30	30.20	66.30	0.08	10.00	34.53	56.37	30.53
สูงสุด	41.23	88.50	35.90	93.90	0.38	50.00	41.17	88.37	34.76
เฉลี่ย	37.31	72.20	33.39	76.65	0.21	27.33	37.14	72.21	32.44



ตารางผนวกที่ ก.10 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา	พลังงานแสงอาทิตย์ภายนอกโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )	พลังงานแสงอาทิตย์ภายในโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )
9.00	300	110
10.00	310	115
11.00	324	123
12.00	420	159
13.00	750	258
14.00	550	200
15.00	300	90
16.00	100	34
17.00	80	27
ต่ำสุด	80	27
สูงสุด	750	258
เฉลี่ย	348	124

ตารางผนวกที่ ก.11 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและโรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา (น.)	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน		อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอก	
	โรงเรือน (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน โรงเรือน (%)	โรงเรือน (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก โรงเรือน (%)
9.00	32.50	82.20	29.60	87.50
9.15	32.03	85.77	29.70	90.20
9.30	33.43	81.20	30.40	86.90
9.45	34.87	72.27	30.70	84.00
10.00	34.97	70.90	30.70	83.70
10.15	36.30	66.20	31.40	81.70
10.30	38.23	58.77	31.80	82.00
10.45	36.73	59.07	31.30	80.00
11.00	38.33	58.00	32.40	79.70
11.15	37.03	57.70	31.50	79.10
11.30	37.77	55.00	31.40	77.80
11.45	38.60	55.27	32.30	78.90

ตารางผนวกที่ ก.11 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน	ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอก	ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก
	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)
12.00	39.43	50.40	31.80	77.00
12.15	39.90	49.73	32.30	76.50
12.30	39.13	51.00	31.80	77.90
12.45	36.80	56.13	31.40	80.10
13.00	38.10	56.10	32.40	78.80
13.15	38.17	53.93	32.00	81.80
13.30	39.37	51.87	32.40	79.60
13.45	40.10	50.13	32.40	78.90
14.00	38.97	51.83	32.20	80.10
14.15	36.57	55.47	31.20	81.90
14.30	35.33	59.57	30.60	84.00
14.45	35.03	61.43	30.90	82.40

ตารางผนวกที่ ก.11 แสดงผลการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา (ต่อ)

เวลา (น.)	อุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน	ความชื้นสัมพัทธ์ภายใน	อุณหภูมิกระเปาะแห้ง	ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอก
	โรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)	ภายนอกโรงเรือน (°C)	โรงเรือน (%)
15.00	35.20	61.30	30.90	82.70
15.15	35.20	62.67	31.00	84.70
15.30	35.33	62.70	31.20	85.50
15.45	37.77	56.57	32.10	80.40
16.00	37.40	55.40	31.70	83.50
16.15	35.63	60.27	31.70	81.50
16.30	33.63	67.23	30.70	85.60
16.45	33.07	70.13	30.70	86.60
17.00	32.43	70.63	30.10	87.20
ต่ำสุด	32.03	49.73	29.60	76.50
สูงสุด	40.10	85.77	32.40	90.20
เฉลี่ย	36.47	61.12	31.35	82.07

ตารางผนวกที่ ก.12 แสดงค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดสอบโดยเปิดพัดลมระบายอากาศตลอด ไม่มีการพ่นหมอกและ โรงเรือนมีตาข่ายพรางแสง 50% คลุมบนหลังคา

เวลา	พลังงานแสงอาทิตย์ภายนอกโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )	พลังงานแสงอาทิตย์ภายในโรงเรือน (W/m <sup>2</sup> )
9.00	300	110
10.00	310	115
11.00	324	123
12.00	420	159
13.00	750	258
14.00	550	200
15.00	300	90
16.00	100	34
17.00	80	27
ต่ำสุด	80	27
สูงสุด	750	258
เฉลี่ย	348	124





ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## แสดงวิธีการคำนวณของระบบ

### 1. หาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก

โดยใช้ข้อมูลของผลการทดลองโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือน ไม่มี ตาข่ายพรางแสงคลุม เวลา 9.00 น.

กำหนดให้อุณหภูมิอุณหภูมิกะเปาะแห้งก่อนพ่นหมอก  $T_u$  41.07°C ความชื้นสัมพัทธ์ก่อนพ่นหมอก RH<sub>u</sub> 57.9%

วิธีทำ กำหนดหาความดันไออิ่มตัวจากสมการที่ 1

$$\ln p_{ws} = C_1 / T_{dry} + C_2 + C_3 T_{dry} + C_4 T_{dry}^2 + C_5 T_{dry}^3 + C_6 \ln T_{dry}$$

แปลง  $T_{dry}$  เป็นหน่วย K จะได้  $T_{dry} = 41.07 + 273.15 = 314.22$  K

แทน  $T_u$  ลงใน  $T_{dry}$

แทนในสมการจะได้  $p_{ws} = 7.82$  Pa

กำหนดหาความดันไอน้ำจริงในอากาศจากสมการที่ 5

$$\phi = \frac{p_w}{p_{ws}}$$

จะได้  $p_w = (0.579)(7.82) = 4.52$  Pa

กำหนดหาอัตราส่วนความชื้นจากสมการที่ 3

$$x = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w}$$

ให้  $p$  มีค่า 101.325 Pa จะได้  $x_u = 0.029$  kg<sub>w</sub>/kg<sub>dry</sub>

กำหนดหาปริมาณเอนทาลปีจากสมการที่ 4

$$h = 1.006T_{dry} + x(2501 + 1.805T_{dry})$$

จะได้  $h_u = 116.2 \text{ kJ/kg}_{\text{dry}}$

คำนวณหาปริมาตรจำเพาะของอากาศจากสมการที่ 7

$$v = 0.2871(T_{\text{dry}} + 273.15)(1 + 1.6078x)/p$$

จะได้  $v_u = 0.932 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{dry}}$

คำนวณหาอุณหภูมิกระเปาะเปียกก่อนพ่นหมอกจากสมการที่ 2

$$T_{\text{wet}} = T_{\text{dry}} \tan[0.151977(\phi + 8.313659)^{1/2}] + \tan(T_{\text{dry}} + \phi) - \tan(\phi - 1.676331) + 0.00391838(\phi)^{3/2} \tan(0.023101\phi) - 4.686035$$

จะได้  $T_{\text{wi}} = 33.51^\circ\text{C}$

จากนั้นใช้อุณหภูมิ  $T_{\text{wi}}$  และความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH คำนวณหาอัตราส่วนความชื้น  $x_{\text{wi}}$  (ใช้สมการที่ 1 3 และ 5)

คำนวณหาความดันไออิ่มตัวจากสมการที่ 1

$$\ln p_{\text{ws}} = C_1/T_{\text{dry}} + C_2 + C_3 T_{\text{dry}} + C_4 T_{\text{dry}}^2 + C_5 T_{\text{dry}}^3 + C_6 \ln T_{\text{dry}}$$

แปลง  $T_{\text{wi}}$  เป็นหน่วย K จะได้  $T_{\text{wi}} = 33.51 + 273.15 = 306.66 \text{ K}$

แทน  $T_{\text{wi}}$  ลงใน  $T_{\text{dry}}$

แทนในสมการจะได้  $p_{\text{ws}} = 5.18 \text{ Pa}$

คำนวณหาความดันไอน้ำจริงในอากาศจากสมการที่ 5

$$\phi = \frac{p_w}{p_{\text{ws}}}$$

จะได้  $p_w = (1)(5.18) = 5.18 \text{ Pa}$

คำนวณหาอัตราส่วนความชื้นจากสมการที่ 3

$$x = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w}$$

ให้  $p$  มีค่า 101.325 Pa จะได้  $x_{wi} = 0.0335 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dry}$

กำหนดให้ระบบพ่นหมอกเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับอากาศจนถึงจุด I โดยเพิ่มปริมาณน้ำให้กับอากาศเป็น 80% ของปริมาณน้ำในอากาศเมื่ออิ่มตัวไปด้วยความชื้น (เท่ากับค่า  $x_{wi}$  ณ ขณะนั้น) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ  $x_i$  (รูปที่ 3.1)

$$x_i = x_u + 0.8(x_{wi} - x_u)$$

จะได้  $x_i = 0.03263 \text{ kg}_w/\text{kg}_{dry}$

จากโรงเรือนมีขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 8 เมตร สูง 3 เมตร ดังนั้นจึงมีปริมาตรอากาศภายในโรงเรือนมีค่าเท่ากับ 96 ลูกบาศก์เมตร

คำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอกจากสมการที่ 12

$$m_w = \frac{v_a (x_i - x_u)}{v_u}$$

จะได้  $m_w = 0.365 \text{ kg}_w$

ดังนั้นจะได้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก 0.365  $\text{kg}_w$

## 2. คำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมา

โดยใช้ข้อมูลของผลการทดลองโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือน ไม่มีตาข่ายพรางแสงคลุม เวลา 9.00 น.

กำหนดให้ค่าความจุความร้อนของอากาศมีค่า  $1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$  อุณหภูมิกระเปาะแห้งก่อนพ่นหมอกมีค่า  $T_u 41.07^\circ\text{C}$  อุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังพ่นหมอกมีค่า  $T_{di} 41.37^\circ\text{C}$

คำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมาจากสมการที่ 13

$$Q_{\text{cool}} = \frac{v_a c_{p,a} (T_u - T_{di})}{v_u}$$

จะได้  $Q_{\text{cool}} = -30.63 \text{ kJ}$

ดังนั้นจะได้ปริมาณพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมา  $-30.63 \text{ kJ}$

### 3. กำหนดหาสมรรถนะการทำความเย็นของระบบ

โดยใช้ข้อมูลตลอดทั้งวันของผลการทดลอง โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสงคลุม ซึ่งพลังงานความร้อนที่อากาศคายออกมาตลอดทั้งวันมีค่า  $286.95 \text{ kJ}$  และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า  $106.98 \text{ kJ}$

กำหนดหาสมรรถนะการทำความเย็นของระบบจากสมการที่ 14

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{cool}}}{W_{\text{Electrical}}}$$

จะได้  $\text{COP} = 2.68$

ดังนั้นจะได้สมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่า  $2.68$

### 4. ความสามารถการระเหยน้ำในระบบพ่นหมอก

โดยใช้ข้อมูลของผลการทดลอง โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิห้องในการพ่นหมอกและโรงเรือนไม่มีตาข่ายพรางแสงคลุม เวลา  $9.00 \text{ น.}$

กำหนดให้อัตราส่วนความชื้นหลังการพ่นหมอกมีค่า  $x_f 0.0329^\circ\text{C}$  อัตราส่วนความชื้นที่สถานะควบคุมีค่า  $x_i 0.0326^\circ\text{C}$

คำนวณประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบจากสมการที่ 2.16

$$\eta_{\text{evap}} = \frac{x_f}{x_i} \times 100$$

จะได้ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบมีค่า  $100.79\%$



ภาคผนวก ค

รูปขณะทำการทดสอบ



รูปที่ ก.1 ตู้ทำน้ำเย็นสำหรับลดอุณหภูมิน้ำและปั้มน้ำสำหรับพ่นหมอก



รูปที่ ก.2 กล่องควบคุมและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นภายนอกโรงเรือน





รูปที่ ค.3 โรงเรือนที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ ค.4 โรงเรือนแบบไม่มีม่านพรางแสง





รูปที่ ค.5 โรงเรือนแบบมีม่านพรางแสง



รูปที่ ค.6 การวางเซนเซอร์ภายในโรงเรือน



รูปที่ ค.7 การวางเซนเซอร์ภายในโรงเรือน



รูปที่ ค.8 หัวพ่นหมอกที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ ค.9 การวัดพลังงานแสงอาทิตย์





ภาคผนวก ง  
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

เฉลิมชาติ เสาวราช, มนัสชนก หวังพิทักษ์วงศ์, อัจฉรา จุ้ยหมื่นไวย, กระวี ตรีอำรรค, เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2560). การศึกษาการลดอุณหภูมิขั้นต้นขององุ่นสดด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเย็น. ในการประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 15. หน้าที่ 76 – 79. โรงแรมอวานี ขอนแก่น โอเทล จังหวัดขอนแก่น ระหว่างวันที่ 13 – 14 พฤศจิกายน 2560.

Agricultural Sci. J. 48 : 3 (Suppl.) : 76-79 (2017)

ว. วิทย. กษ. 48 : 3 (พิเศษ) : 76-79 (2560)

### การศึกษาการลดอุณหภูมิขั้นต้นขององุ่นสดด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเย็น Preliminary Study of Grapes Bunch Pre-Cooling by Use Cool Water Spraying

เฉลิมชาติ เสาวราช<sup>1</sup>, มนัสชนก หวังพิทักษ์วงศ์<sup>1</sup>, อัจฉรา จุ้ยหมื่นไวย<sup>1</sup>, กระวี ตรีอำรรค<sup>1</sup> และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค<sup>1</sup>  
Chalemchart Saowarat<sup>1</sup>, Manaschanok Wangphitakwong<sup>1</sup>, Adchara Juyrunwai<sup>1</sup>, Krawee Treeammuk<sup>1</sup> and Tawarat Treeammuk<sup>1</sup>

#### Abstract

This research objective was to preliminary study the performance of direct cool water sprayed in pre-cooling system. The grapes bunch was selected to be the sample in this study. The developed system consist of the insulated pre-cooling chamber with a 38 cm x 61 cm x 71 cm (W x H x L) and circulating water pump pressurize the cool water spraying for the sample temperature reduction. Testing the system by contain a 5 kg of grapes bunch in pre-cooling chamber and after that, spray the cooled water in 2 levels of temperature (room temperature 29°C and cooled water by ice mixing 1°C) and 3 levels of spraying rate (1.5, 2.2 and 3.2 liter/min). The results showed the cool water at spraying rate of 3.2 liter/min can reduces the grapes bunch rapidly in 3.2 minute of half-cooling time. The maximum of temperature reduction of grapes bunch in pre-cooling is 36°C and the system has a 1.637 kW of heat reducing performance when use the cool water in pre-cooling system.

Keywords: Pre-cooling, Water spray, Grapes bunch

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการลดอุณหภูมิของระบบลดอุณหภูมิขั้นต้นด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเย็นลงบนผลผลิตโดยตรง ใช้พองุ่นสดเป็นวัสดุทดสอบ ระบบที่พัฒนาขึ้นมีห้องลดอุณหภูมิที่มบรรจุองุ่นสดขนาด 38 cm x 61 cm x 71 cm (ก x ส x ย) ให้มีอุณหภูมิเย็นที่พ่นละอองลงบนตัวอย่างทดสอบภายในห้องลดอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบลดลง การทดสอบใช้อุณหภูมิของน้ำ 2 ระดับ คือ น้ำอุณหภูมิเฉลี่ย 29°C (อุณหภูมิห้อง) และน้ำเย็นที่ได้จากการละลายน้ำแข็งอุณหภูมิเฉลี่ย 1°C เตรียมพองุ่นน้ำหนัก 5 kg บรรจุในห้องลดอุณหภูมิ อุณหภูมิแกนกลางเริ่มต้น 40.5 ± 0.5°C ประสิทธิภาพการไหลของการพ่นละอองน้ำ 3 ค่า คือ 1.5 2.2 และ 3.2 liter/min ผลการทดสอบพบว่า เย็นสามารถลดอุณหภูมิของพองุ่นลงได้สูงสุด 36°C ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.2 liter/min โดยมีค่า Half-cooling time ต่ำสุด 3.5 min และมีสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.637 kW  
คำสำคัญ: การลดอุณหภูมิขั้นต้น การพ่นละอองน้ำ อุ่น

### คำนำ

คุณภาพและอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ โดยผลผลิตจะเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น (จึงแท้.2544; ทิวาและคณะ, 2559) ความร้อนที่ติดมาจากแปลง (Field heat) เป็นความร้อนส่วนใหญ่ที่ส่งผลให้ผลผลิตมีอุณหภูมิสูงขึ้นและจำเป็นต้องขจัดออกให้เร็วที่สุด (วรินธร.2559) วิธีการลดอุณหภูมิขั้นต้น (Pre-Cooling) ของผลผลิตสามารถช่วยขจัดความร้อนที่ติดมาจากแปลงได้ดี ทำให้เมื่อเกิดความร้อนจากระบบการหายใจ (Respiration heat) ในภายหลัง จะไม่เกิดความร้อนสะสมที่มากเกินไป (วรินธร.2559) สำหรับการลดอุณหภูมิผลผลิตด้วยอากาศมีความสะดวกและมีค่าใช้จ่ายต่ำและการใช้อากาศอุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของระบบสูงขึ้น (ทิวาและคณะ.2559) ได้ทดลองผลิตอากาศเย็นด้วยการระเหยน้ำอุณหภูมิ 0°C เพื่อลดอุณหภูมิของผลผลิตขนาดเล็กพบว่าระบบมีประสิทธิภาพ 41.60% และมีค่า half-cooling time ค่าสุด 23 min ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาการลดอุณหภูมิของผลผลิตขั้นต้นด้วยการพ่นละอองน้ำเย็นลงบนผลผลิตโดยตรง เพื่อลดความยุ่งยากของระบบผลิตอากาศเย็น โดยที่ยังมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งานได้อย่างเหมาะสม

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### อุปกรณ์

ห้องลดอุณหภูมิขนาด 38 ซม. x 61 ซม. x 71 ซม. (ก x ล x ย) ผนังทำด้วยแผ่นโพลีไธลาลดิกบุโพ้นหนา 1/2 นิ้ว ภายนอกหุ้มฉนวนกันความร้อนและภายในมีตะแกรงสำหรับวางอุ้งน

ระบบส่งน้ำ ประกอบด้วยปั๊มน้ำและหัวพ่นละอองน้ำ จำนวน 6 หัว

#### วิธีการ

ทำการออกแบบระบบพ่นละอองน้ำเย็นแบบพ่นละอองน้ำ โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรก คือ ห้องลดอุณหภูมิ มีลักษณะเป็นตู้หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด ขนาด 38 ซม. x 61 ซม. x 71 ซม. (ก x ล x ย) ผนังทำด้วยแผ่นโพลีไธลาลดิกบุโพ้นหนา 1/2 นิ้ว ภายนอกหุ้มฉนวนกันความร้อนและภายในมีตะแกรง 1 ชั้น สำหรับวางพวงอุ้งนน้ำหนัก 5 กิโลกรัม (Figure 1(a)) มีอุณหภูมิแกนกลางเริ่มต้นประมาณ  $40.5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  โดยก่อนการทดสอบ นำพวงอุ้งนแช่น้ำอุ้งน เพื่อจำลองสถานการณ์จริงขณะเก็บเกี่ยว ส่วนที่สอง คือ ระบบส่งน้ำ โดยมีการทำงานของระบบดังนี้ (Figure 1(b)) มีน้ำทำหน้าที่สูบน้ำส่งไปตามท่อส่งน้ำไปที่หัวพ่นละอองน้ำ เมื่อน้ำพ่นออกจากหัวพ่นละอองน้ำ จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างละอองน้ำกับอากาศ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลง และจะเกิดการพาความร้อนระหว่างอากาศกับพวงอุ้งน ส่งผลให้อุณหภูมิของพวงอุ้งนลดลง ทำการทดสอบเพื่อประเมินความสามารถในการลดอุณหภูมิของระบบระหว่างน้ำประปามีอุณหภูมิเฉลี่ย  $29^{\circ}\text{C}$  และน้ำเย็นที่ได้จากการละลายน้ำแข็งอุณหภูมิเฉลี่ย  $1^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราการไหลของการพ่นหมอก คือ 1.5, 2.2 และ  $3.2 \text{ liter/min}$  ทำการวัดอุณหภูมิแกนกลางของอุ้งน 3 จุด และอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก โดยพิจารณาว่า Half-cooling time และความสามารถในการดึงปริมาณความร้อนออกจากพวงอุ้งน ซึ่งสามารถหาได้จาก (1) และ (2)



Figure 1 (a) Arrangement of sample (b) Schematic diagram of precooling system

$$Q = mc_p \Delta T \quad (1)$$

เมื่อ  $Q$  คือปริมาณความร้อนที่ดึงออกจากพวงอุ้ง (kJ),  $m$  คือมวลของพวงอุ้งที่ใช้ในการทดลอง,  $C_p$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอุ้ง มีค่าเท่ากับ 3.6 kJ/kg °C,  $\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิพวงอุ้งที่เปลี่ยนแปลงไป °C

$$q = \frac{Q}{t} \quad (2)$$

เมื่อ  $q$  คือปริมาณความร้อนที่ดึงออกจากพวงอุ้งในหนึ่งหน่วยเวลา (kW),  $Q$  คือปริมาณความร้อนที่ดึงออกจากพวงอุ้ง (kJ),  $t$  คือเวลาที่ใช้ (s)

#### ผลและวิจารณ์

การลดลงของอุณหภูมิพวงอุ้ง พบว่ามีกระบวนการสองส่วนคือ ส่วนแรกเกิดจากกระบวนการ evaporative cooling ของการพ่นละอองน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นบนเส้นกระเปาะเปียกของอากาศที่ส่งผลให้อากาศในห้องทดลองมีอุณหภูมิลดลง ส่วนที่สองเกิดจากกระบวนการพาความร้อนระหว่างพวงอุ้งกับอากาศเย็นจากกระบวนการแรก ส่งผลให้อุณหภูมิของพวงอุ้งลดลง เมื่อพิจารณาถึงความอัตราการไหลของน้ำคือ Half-cooling time และปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างพวงอุ้งสดกับอากาศเย็นพบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นส่งผลให้ Half-cooling time ลดลง และส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่แลกเปลี่ยนสูงขึ้น (Table 1) ทั้งนี้เนื่องจากการที่อัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลของน้ำที่เข้าสู่ระบบมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดึงความร้อนมีค่าสูง เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลา Full-cooling time และ Half-cooling time ระหว่างการพ่นหมอกแบบใช้น้ำประปา กับน้ำจากการละลายน้ำแข็งพบว่า การพ่นละอองน้ำจากการละลายน้ำแข็งมี Full-cooling time และ Half-cooling time น้อยกว่าการพ่นหมอกแบบใช้น้ำประปา เนื่องจากเมื่อพ่นละอองน้ำจากการละลายน้ำแข็งส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศต่ำกว่าการพ่นหมอกแบบใช้น้ำประปา ทำให้อากาศแลกเปลี่ยนปริมาณความร้อนได้มาก จากการพ่นละอองน้ำประปาพบว่าสามารถลดอุณหภูมิของพวงอุ้งลงได้สูงสุด 10.1 °C ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.2 liter/min โดยมีค่า Half-cooling time ต่ำสุด 3.5 min และมีสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.586 kW และจากการพ่นละอองน้ำจากการละลายน้ำแข็งพบว่าสามารถลดอุณหภูมิของพวงอุ้งลงได้สูงสุด 36°C ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.2 liter/min โดยมีค่า Half-cooling time ต่ำสุด 3.5 min และมีสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.637 kW

Table 1 Effect of Volume flow rate on Half-cooling time and Quantity of heat

Volume flow rate (Liter/min)	Full-cooling time (min)		Half-cooling time (min)		Quantity of heat, Full-cooling time (kW)		Quantity of heat, Half-cooling time (kW)	
	Water supply	Ice melt	Water supply	Ice melt	Water supply	Ice melt	Water supply	Ice melt
1.5	30	60	8.5	7	0.093	0.295	0.236	0.843
2.2	16	22.5	3.5	4	0.169	0.432	0.577	1.515
3.2	16	27.5	3.5	3.5	0.161	0.400	0.586	1.637

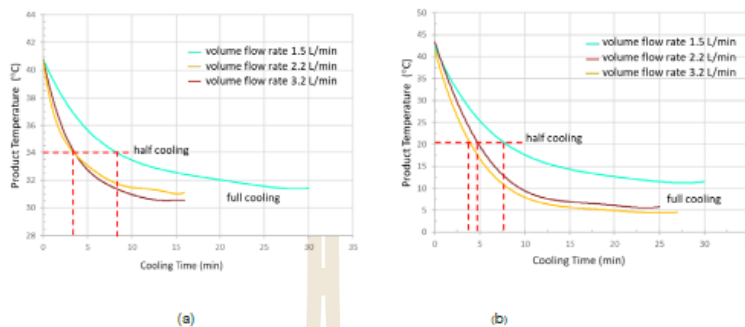


Figure 2 (a) The rate of cooling at various volume flow rate for water supply.  
 (b) The rate of cooling at various volume flow rate for ice melt.

**สรุป**

การลดอุณหภูมิของพวงอุ้งุ่นด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำ เมื่อเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของน้ำประปาและน้ำจากการละลายของน้ำแข็งที่อัตราการไหลเดียวกันพบว่า น้ำจากการละลายของน้ำแข็งสามารถลดอุณหภูมิของพวงอุ้งุ่นได้มากกว่าน้ำประปา ซึ่งน้ำจากการละลายน้ำแข็งสามารถลดอุณหภูมิของพวงอุ้งุ่นสูงสุดได้สูงสุด 36°C ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.2 liter/min โดยมีค่า Half-cooling time ต่ำสุด 3.5 min และมีสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.637 KW

**คำขอบคุณ**

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ และฟาร์มมหาวิทยาลัย สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**


จิ่งเม่ย์ สิริพานิช. 2544. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีสิ่งการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 396 น.  
 วรินทร์ ยิ้ม่อง. 2559. การลดอุณหภูมิเมล็ดผลการศึกษา (Pre-cooling). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://dwarinthon.files.wordpress.com/2014/08/e0b8a7e0b8b2e0b8b3e0b8aae0b8b2e0b8b32.doc>. (15 มิถุนายน 2560).  
 ทิวา สายประสิทธิ์ฐ, ณรงค์ฤทธิ์ บุญกล้า, กิ่งฟ้า พรานไพโร, ศิวรรักษ์ พงศ์บุณย, กระวี จีจักษ์จรรคนและเพียรรัตน์ สิริจันทรนค. 2559. การศึกษาการลดอุณหภูมิเมล็ดมันสำปะหลังด้วยระบบพ่นน้ำจากเครื่องระเหยน้ำ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 47(3 พิเศษ):451-454.





เฉลิมชาติ เสาวรัจ, กระวี ตรีอำนาจ, เทวรัตน์ ตรีอำนาจ. (2560). การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอก. ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4. หน้า 151 – 157. โรงแรมวีวิช จังหวัดขอนแก่น ระหว่างวันที่ 24 – 25 พฤศจิกายน 2560.

การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4  
24 - 25 พฤศจิกายน 2560 โรงแรมวีวิช อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น



**การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอก**  
**Numerical Analysis of Fogging Climate Control Greenhouse System**

เฉลิมชาติ เสาวรัจ<sup>1</sup>, กระวี ตรีอำนาจ<sup>1</sup> และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000  
<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 30000

**บทคัดย่อ**

ระบบโรงเรือนเพาะปลูกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปลูกพืช เนื่องจากสามารถควบคุมการให้น้ำและธาตุอาหาร ลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรค แมลงศัตรูพืช และประการสำคัญคือสามารถควบคุมปัจจัยสภาวะอากาศให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้ตามต้องการ ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นในโรงเรือนเพาะปลูกที่ควบคุมสภาวะอากาศด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำ โดยวิธีการคำนวณแบบแมนตรงด้วยหลักการอุณหพลศาสตร์ โดยวิเคราะห์จากสภาวะอากาศ ณ จังหวัดนครราชสีมา พบว่าที่สภาวะค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์  $185 \text{ W m}^{-2}$  และความชื้นของอากาศสูงสุดภายในโรงเรือนไม่เกิน 90%RH การลดอุณหภูมิด้วยการพ่นละอองน้ำในโรงเรือนสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดภายในโรงเรือนได้สูงสุด  $9.6^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอก อัตราการการพ่นละอองน้ำสูงสุดมีค่า  $2.2 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  ณ เวลา 14.15 น. และประสิทธิภาพของการทำความเย็นมีค่าระหว่าง 9% – 87% เฉลี่ย 75% โดยผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งกับกระเปาะเปียกมีอีกชื่อคือการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการทำความเย็น

**คำหลัก:** อัตราการระเหย; ระบบพ่นหมอก; การควบคุมสภาวะอากาศ; โรงเรือนเพาะปลูก

**Abstract**

The greenhouse system is an alternative in crops planting because this system have ability to control the water and fertilizer, reduce the risk of contamination with pathogens, insect and weed and the important advantage of this system is the capability in climate control to suit the plantings. The purpose of this research was to analyze the cooling efficiency of the climate control greenhouse used the fogging system (Evaporative system) by thermodynamics exact calculation method. The Analysis of Nakhon Ratchasima province atmosphere found that the average solar intensity was  $185 \text{ W m}^{-2}$  and relative humidity of air in the greenhouse is not over 90%RH. The maximum air temperature reducing in the greenhouse is  $9.60^{\circ}\text{C}$  compared with the outside air temperature. The maximum water flow rate of fogging is  $2.2 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  at 14.15 PM of the day. The cooling efficiency of the system is between 9% - 87% and the difference of dry bulb and the wet bulb temperature influences on the increasing of cooling efficiency.

**Keywords:** Evaporation rate, Fogging system, Climate control, Greenhouse

151



### 1. บทนำ

ระบบโรงเรียนเพาะปลูกเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการปลูกพืช ซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น สามารถควบคุมสารละลายธาตุอาหาร สามารถลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรค แมลง ศัตรูพืชและ อีกทั้งยังสามารถควบคุมสภาพอากาศให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชได้ สภาพอากาศภายในโรงเรียนได้รับอิทธิพลจากรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศส่งผลกับอัตราการเจริญเติบโตของพืช ปัจจัยที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืชคืออุณหภูมิแต่เพราะว่าพืชส่วนใหญ่ต้องการรังสีดวงอาทิตย์ความเข้มสูงในการเจริญเติบโต ดังนั้นการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการลดภาวะความร้อนภายในโรงเรียนโดยการระบายแสงจึงไม่จำเป็นเสมอไป ระบบลดอุณหภูมิโดยการระเหยของน้ำ (Evaporative cooling system) เป็นระบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในโรงเรียนเพาะปลูกในพื้นที่เขตร้อน ข้อดีของระบบนี้จะช่วยให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรียนลดลงจากการระเหยของน้ำและส่งผลให้พลังงานภายในโรงเรียนลดลงจากการลดลงของอุณหภูมิภายในโรงเรียนและส่งผลให้ความชื้นสูงขึ้นด้วยและมีความเป็นไปได้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบทำความเย็นเชิงกลอีกด้วย [1]

การทำงานของระบบทำความเย็นแบบพ่นหมอกอาศัยการพ่นหมอกขนาดเล็กผ่านหัวพ่นหมอกซึ่งหมอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 60 ไมโครเมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าสัมผัสกับอากาศ [2] โดยจะพ่นหมอกเหนือพื้นที่เพาะปลูก ให้ตกอย่างอิสระและสัมผัสกับอากาศภายในโรงเรียน สามารถสร้างได้หลายวิธี หมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 30 ไมโครเมตรสามารถสร้างได้จากการใช้ปั๊มที่มีแรงดันสูงกับหัวพ่นหมอก [3]

จากการทดลองที่ผ่านมา Arbel et al. [2] พบว่าระบบทำความเย็นแบบพ่นหมอกมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรียนได้สม่ำเสมอกว่าระบบแผงรังผึ้งและพัดลม A.M. Abdel-Ghany et al. [4] ได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบพ่นหมอกด้วยน้ำใน

โรงเรียนเพาะปลูกระบบปิด โดยทำการพ่นหมอกที่อัตราการไหล 10 กรัมต่อวินาที ที่ระยะเวลาพ่นหมอกแตกต่างกัน 30, 60 และ 90 วินาที ช่วงเวลา 90, 180 และ 270 วินาที พบว่ามีประสิทธิภาพการทำความเย็นประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ Khas et al. [5] ได้ทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรียน พบว่ามีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงถึง 80% และสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรียนได้สูงสุด 10°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอก Hasan [9] ได้ทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกพบว่าประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงเมื่ออัตราการไหลของระบบพ่นหมอกและผลต่างของอัตราส่วนความชื้นระหว่างอุณหภูมิภายในโรงเรียนและภายนอกโรงเรียนเพิ่มขึ้น

แต่การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในโรงเรียนที่ใช้การพ่นหมอก จำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรหลักสองตัว คือ อัตราการไหลของอากาศภายในโรงเรียนและอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอก ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้การควบคุมควบคุมเวลาการพ่นหมอกในโรงเรียนแบบระบบควบคุมแบบเปิดเนื่องจากทำได้ง่าย แต่พบว่ามีข้อเสียคือขาดความแม่นยำ และมีความสิ้นเปลืองน้ำสูงมาก

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้จากการทำสมดุลความร้อนและมวลสารของระบบโรงเรียนพ่นหมอกมาทดสอบใช้ควบคุมการพ่นหมอกในโรงเรียนและประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็นในเชิงตัวเลขของระบบพ่นหมอก เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้จริงต่อไปในอนาคต

### 2. วิธีการวิจัย

#### 2.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบ

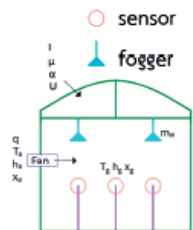
แบบจำลองโรงเรียนเพาะปลูกที่ศึกษา (รูปที่ 1) ประกอบด้วยระบบการวัด ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก โรงเรียนมีขนาด กว้าง 2 เมตร ยาว 4 เมตร สูง 2 เมตร คลุมด้วยพลาสติก Polyethylene โดยตัวแปรที่พิจารณาในแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบมีอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศ



ภายในและภายนอกโรงเรือน อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของระบบพ่นหมอกและพลังงานความร้อนของแสงอาทิตย์บนโรงเรือน

ในการทดลองนี้กำหนดให้  $T_a$  และ  $U$  มีค่า 0.5, 0.5 และ  $7.0 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ตามลำดับ

การคำนวณอัตราการไหลของการพ่นหมอกได้สมการที่ 2 [9]



รูปที่ 1 แสดงจำลองของระบบ

กำหนดให้การคำนวณอัตราการไหลของอากาศเป็นแบบสภาวะคงตัว (steady-state condition) โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยการคำนวณหน่วยอัตราการไหลของอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 [6]

$$q = \frac{I\alpha - U(T_g - T_a)}{h_g - h_a} \quad (1)$$

เมื่อ  $q$  คืออัตราการไหลของพัลลมุดอากาศ ( $\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ),  $I$  คือรังสีดวงอาทิตย์ ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $T_a$  คือสัมประสิทธิ์การทะลุของรังสีดวงอาทิตย์ผ่านโรงเรือน,  $\alpha$  คือสัดส่วนของรังสีดวงอาทิตย์เข้าโรงเรือนที่ใช้ในการเพิ่ม Enthalpy ของอากาศ ( $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $U$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนโดยรวมของโรงเรือน,  $T_g$  คืออุณหภูมิภายในโรงเรือน ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_a$  คืออุณหภูมิภายนอกโรงเรือน,  $h_g$  คือ Enthalpy ของอากาศภายในโรงเรือน ( $\text{J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ ),  $h_a$  คือ Enthalpy ของอากาศภายนอกโรงเรือน ( $\text{J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ )

ค่าของ  $\alpha$  ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพื้นที่ปกคลุมด้วยพืช โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง  $0.3 - 0.7$  [7] ค่า  $U$  สำหรับโรงเรือนพลาสติกอยู่ในช่วง  $6.0 - 8.0 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [8]

$$m_w = q(x_g - x_a) \quad (2)$$

เมื่อ  $m_w$  คืออัตราการไหลของการพ่นหมอก ( $\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ),  $x_g$  คือความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนและ  $x_a$  คือความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกโรงเรือน ( $\text{kg kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ )

กระบวนการ Adiabatic saturation เป็นการกระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้นโดยวิธีการระเหยของน้ำ เช่น ระบบพ่นหมอก ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้เมื่อหมอกพ่นลงโรงเรือน คุณสมบัติของอากาศจะขึ้นอยู่กับปริมาณการระเหยของน้ำจากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 บนเส้นกระเปาะเปียกคงที่ในแผนภูมิ Psychrometric (รูปที่ 2) [10]



รูปที่ 2 กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น

เพื่อให้การทำงานเข้าสู่กระบวนการ Adiabatic saturation จะมีเงื่อนไขในการทำงานดังสมการที่ 3 และ 4

$$h_g > h_a \quad (3)$$

Enthalpy ของอากาศภายในโรงเรือนจะต้องมากกว่า Enthalpy ของอากาศภายนอกโรงเรือนและ

$$x_g > x_a \quad (4)$$

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนจะต้องมากกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก



โรงเรือนจึงจะเป็นไปตามเงื่อนไขในกระบวนการ  
Adiabatic saturation

**2.2 ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอก**

ประสิทธิภาพของระบบการทำความเย็นแบบพ่นหมอกสามารถคำนวณได้จากผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังการพ่นหมอกหารกับผลต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกหลังการพ่นหมอก [9]

$$EFF = \frac{T_{dry,0} - T_{dry,ef}}{T_{dry,0} - T_{wet,ef}} \times 100 \quad (5)$$

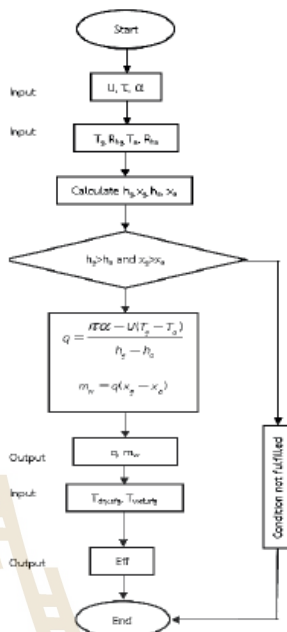
เมื่อ EFF คือประสิทธิภาพของระบบการทำความเย็นแบบพ่นหมอก,  $T_{dry,0}$  คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรือน,  $T_{dry,ef}$  คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือน,  $T_{wet,ef}$  คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือน

**2.3 การวัดข้อมูลคุณสมบัติอากาศ**

ระบบการวัดได้ติดตั้ง Sensor รุ่น DHT22 ของบริษัท Aosong Electronics สำหรับวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ ติดตั้งสูงจากพื้น 0.6 m เพื่อจำลองความสูงของโต๊ะเพาะปลูก โดยเก็บค่าทุกๆ 15 นาที และนำข้อมูลเก็บที่ไว้ Data logger ในเดือนสิงหาคม 2560 และใช้ค่าเฉลี่ยรังสีดวงอาทิตย์ในเดือนสิงหาคมมีค่า  $185 \text{ W m}^{-2}$  [11]

**2.4 กระบวนการคำนวณ**

การคำนวณอัตราการไหลอากาศและอัตราการไหลของระบบพ่นหมอกจะเป็นไปตามรูปที่ 3 ในส่วนของค่า U, T และ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่โดยกำหนดจากคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุโรงเรือน ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เป็นค่าที่ขึ้นกับเวลาและขึ้นอยู่กับคุณสมบัติอากาศภายในและภายนอกโรงเรือน



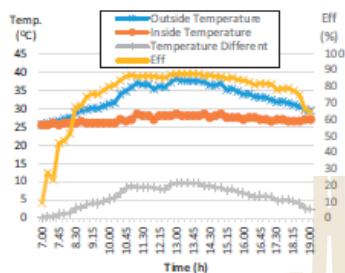
รูปที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณ

**3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล**

การทดสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์จากการเก็บข้อมูลสภาพอากาศจริงระหว่างเวลา 7.00 น. – 19.00 น. ภายใต้เงื่อนไขการคำนวณที่ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 90% ได้ผลการทดสอบดังนี้



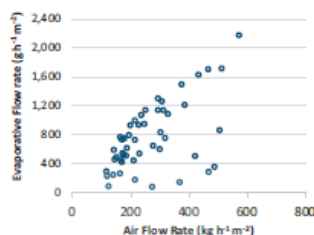
### 3.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

จากรูปที่ 4 พบว่าอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 25.5 °C – 28.5 °C มีค่าเฉลี่ย 27.03 °C และอุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าระหว่าง 26.0 °C – 38.13 °C มีค่าเฉลี่ย 32.95 °C ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนกับอุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าระหว่าง 0.13 °C – 9.63 °C มีค่าเฉลี่ย 5.92 °C ผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าต่ำในช่วงเช้าและช่วงเย็นเนื่องจากความชื้นในอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าที่สูงและอุณหภูมิที่ต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกมีค่าที่ต่ำด้วย ในช่วงบ่ายผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนกับอุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าที่สูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกมีค่าสูงขึ้นด้วย โดยอุณหภูมิภายในโรงเรือนมีค่าที่ลดลงเนื่องจากผลของการถ่ายเทความร้อนจากอากาศสู่น้ำในรูปของพลังงานความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง น้ำจะได้รับความร้อนจากอากาศ อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นและเปลี่ยนสถานะไอน้ำแล้วจึงถึงพัดออกจากโรงเรือนโดยพัดลม ภายในโรงเรือนได้ 9.63 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนและประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่าระหว่าง 9% – 87% เฉลี่ย 75%

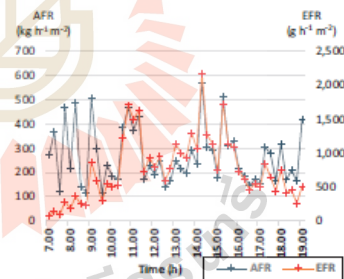
### 3.2 อัตราการไหลของระบบพ่นหมอก



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของระบบพ่นหมอกกับอัตราการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากอัตราส่วนความชื้นภายนอกโรงเรือนน้อยกว่าภายในโรงเรือนและอัตราการไหลของอากาศที่สูงส่งผลให้อัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่าที่สูงด้วย อัตราการไหลของระบบพ่นหมอกขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศกับผลต่างของอัตราส่วนความชื้นระหว่างภายในกับภายนอกโรงเรือน

### 3.3 ปริมาณของอากาศและน้ำที่ใช้

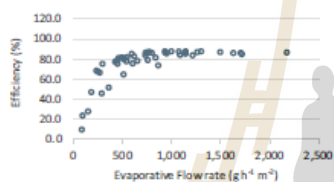


รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับอัตราการไหลของระบบพ่นหมอกเมื่อเทียบกับเวลา



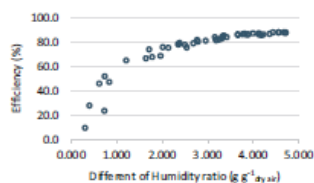
จากรูปที่ 6 พบว่าอัตราการไหลของอากาศมีค่าระหว่าง  $116 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  -  $572 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  อัตราการไหลของอากาศมีค่าต่ำสุด ณ เวลา 9.30 น. ในช่วงเช้า และมีค่าสูงสุด ณ เวลา 14.15 น. ในช่วงบ่าย เนื่องจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกโรงเรือนที่ต่ำสุดและสูงสุด อัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่าระหว่าง  $82 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  -  $2,177 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  อัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่าต่ำสุด ณ เวลา 7.00 น. และอัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่าสูงสุด ณ เวลา 14.15 น. ในช่วงบ่าย เนื่องจากอุณหภูมิภายนอก ณ เวลานั้นมีค่าต่ำสุดและสูงสุด โดยผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Arbel et. al. [6] และ Hasan [9]

3.4 ประสิทธิภาพการทำความเย็น



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการทำความเย็นกับอัตราการไหลของระบบพ่นหมอก

จากรูปที่ 7 พบว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบมีค่าสูงกว่า 80% เมื่ออัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่ามากกว่า  $516 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  ประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้นแบบ Exponential เมื่ออัตราการไหลของระบบสูงขึ้น



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการทำความเย็นกับผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในและภายนอกโรงเรือน

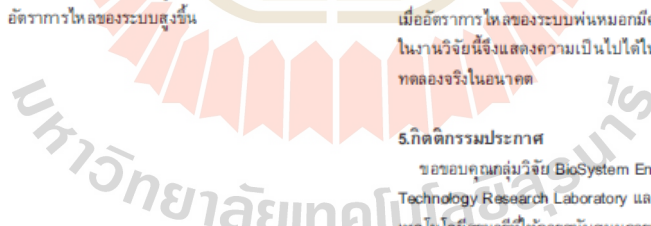
จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นกับผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศระหว่างภายในและภายนอกโรงเรือนพบว่าเมื่อผลต่างของอัตราส่วนความชื้นของอากาศสูงขึ้น ประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงขึ้นด้วย เนื่องจากที่ผลต่างของอัตราส่วนความชื้นมีค่าสูงส่งผลให้อากาศภายในโรงเรือนสามารถรับน้ำได้มากขึ้นจากระบบพ่นหมอก และมีแนวโน้มสูงขึ้นแบบ Exponential

4.สรุป

จากการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้จากการทำสมดุลความร้อนและมวลสารของระบบโรงเรือนพ่นหมอกมาคำนวณพบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้  $9.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 9% - 87% และประสิทธิภาพมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของระบบพ่นหมอกมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแสดงความเป็นไปได้ในการสร้างการทดลองจริงในอนาคต

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มวิจัย BioSystem Engineering and Technology Research Laboratory และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย







### 6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Hellickson M. A. and Walker J. N. (1983). Ventilation of agricultural structures. ASAE monograph No.6 American Society of Agricultural Engineers.
- [2] Arbel A., A. Shklyar and M. Barak. (2000). Bouyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system, *Acta Horticulturae* 534:327-334.
- [3] Ozturk H. H. and A. Bascetincelik. (2002). Seralarda Havalandirma Turkiye Ziraat Odalan Birliigi Yayinlari, No:227, Ankara.
- [4] A.M. Abdel-Ghany, T.Kozal. (2006). Cooling Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses, *Biosystems Engineering* 94(1), 97-109.
- [5] Kitas C., T. Bartzanas and A. Jaffrin. (2001) Greenhouse evaporative cooling: measurement and data analysis, *Transactions of the ASAE*, Vol.38(6): 683-689.
- [6] Arbel A., O. Yekutieli and M. Barak. (1999). Performance of a fog system for cooling greenhouses, *J. Agric. Engng. Res.* 72:129-136.
- [7] Ozturk H. H. and A. Bascetincelik. (1997). The nocturnal heat loss and internal temperatures in plastic tunnel greenhouses, *Acta Horticulturae* 443: 79 – 84.
- [8] Bascetincelik A. and H. H. Ozturk. (1997). The determination of the overall heat loss coefficient in plastic tunnel greenhouse with thermal screens, *J. Agric. Eng. Res.* 72(1):363-374.
- [9] Hasan Huseyin OZTURK. (2003). Evaporative Cooling Efficiency of a Fogging System for Greenhouses, *Turk. J. Agric Vol* 27:49-57.
- [10] W.F. Stoecker. (1982). Refrigeration and air conditioning 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill International Editions.
- [11] Solar Radiation and Ozone Observations Subdivision, "Monthly Global and Diffuse Solar Radiation", Retrieved September 17, 2017, from Thai Meteorological Department Web site: <http://ozone.tmd.go.th/solardata.htm>

Chalermchart Saowarat, Krawee Treeamnuak, Tawarat Treeamnuak. (2018). Mathematical Model For Exact Solution Method of Fogging Process Control in Climate Greenhouse System. **THE IRES 87th INTERNATIONAL CONFERENCE**. Vol. 6 Issue. 1 (pp 24 – 28). Tokyo, Japan 06-11-2017.

International Journal of Mechanical And Production Engineering, ISSN(p): 2320-2092, ISSN(e): 2321-2071  
Volume- 6, Issue-1, Jan.-2018, <http://iraj.in>

**MATHEMATICAL MODEL FOR EXACT SOLUTION METHOD OF  
FOGGING PROCESS CONTROL IN CLIMATE GREENHOUSE  
SYSTEM**

<sup>1</sup>CHALERMCHART SAOWARAT, <sup>2</sup>KRAWEE TREEAMNUK, <sup>3</sup>TAWARAT TREEAMNUK

<sup>1,2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand  
<sup>3</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand  
E-mail: <sup>1</sup>chalermchart.s@hotmail.com, <sup>2</sup>krawee@sut.ac.th, <sup>3</sup>tawarat@sut.ac.th

---

**Abstract** - A climate controlled greenhouse system is a best choice in planning because it has many advantages such as reducing the risk of contamination with pathogens, insect pests and also control the climate to suit the growth of plants. The purpose of this research was to study the mathematical model for use in the controlling of fogging climate control greenhouse and the cooling efficiency of fogging system was evaluated in terms of numerical calculation. The location in this study is Nakhon Ratchasima, North-East of Thailand. The results showed that the fogging system was able to reduce the inside temperature of greenhouse to lower than the outside temperature by 9.63oC and the increasing of intake air flow rate of greenhouse influences on the rising of cooling efficiency and the fogging rate in greenhouse.

---

**Keywords** - Evaporative Rate, Fogging system, Climate Control, Greenhouse

---

**I. INTRODUCTION**

A weather-controlled greenhouse system is the best opportunity for growing crops because it has many advantages, such as reducing the risk of contamination with pathogens, insect pests and also control the weather to suit the growth of plants. The weather inside greenhouse are influenced by the solar radiation, temperature and humidity of air that affected on the growing rate, yield and quality of plants production. Many plants are growing well in suit climate but they need enough sunlight too. Therefore, the solving of high temperature problem inside the greenhouse by shade the sunlight is not always necessary. Evaporative cooling greenhouse system was developed for use in tropical. The advantage of this system are it can reduced the inside greenhouse air temperatures by the water evaporation process, reduced the level of inside air energy and especially made the higher air humidity in the greenhouse. Possibly, it has a high cooling efficiency more than mechanical cooling systems [1].

The operation of the fogging cooling greenhouse system is based on the water spraying through the nozzle. The fog droplet was sprayed by a diameter around 2  $\mu\text{m}$  - 60  $\mu\text{m}$  for increase the contact area with air [2]. In the fogging process, it necessary to spray the fog over the plants bedding in the greenhouse because the fog should free-fall slowly and easily merge with the air inside the greenhouse. The fog droplets can be produced in several ways. A fog that have a diameter less than 30  $\mu\text{m}$  usually produces by using a high pressure pump and a fog nozzle [3].

In the past, many researchers reported about the fogging system, Arbel et al. [2] found that the fogging cooling system was more effective in uniformly distributing the temperature and humidity in the greenhouse than the cooling pad-fan system.

AM Abdel-Ghany et al [4] tested the cooling efficiency of the water fogging system in a closed system. The water were sprayed by a flow rate of 10  $\text{gs}^{-1}$  at 32-35oC with five difference fogging duration. They found that the system have a cooling efficiency around 30%. Kittas et al. [5] tested the indoor temperature and humidity control systems. Found the highest cooling efficiency is 80% and the system can reduces the indoor temperatures by 10oC of the difference compared to outside temperatures. Hasan [9] investigate the efficiency of fogging system, found that the fogging efficiency increased linearly with evaporative flow rate and absolute humidity difference between the inside and outside air.

However, the achieving of desired temperature and humidity of air in climate greenhouse system necessary to control a two important variables such as intake Air Flow Rate (AFR) and the water Evaporative Flow Rate (EFR) in the fogging process. In the present, the fogging time period control (open looped control type) was commonly used in commercial greenhouse because it is easy and practical operation but its weakness is a lack of precision and excessive in water consumption.

The purpose of this research is to apply a mathematical model of energy and mass balances in fogging greenhouse system for control the fogging process in the system. The model were tested and evaluated in term of numerical to determine the cooling efficiency of the system and to study the feasibility of the applying with the prototype in the future.

**II. MATERIALS AND METHODS**

**a. Mathematical Models of the System**  
The schematic of fogging greenhouse system in this study was shown in figure 1. It consists of

---

Mathematical Model for Exact Solution Method of Fogging Process Control in Climate Greenhouse System

24



greenhouse, measuring system, ventilation fan and fogging system. The size of greenhouse is 2 m x 2 m x 2 m (L x H x W) and it was covered by the translucent type of polyethylene plastic sheet. A temperature and humidity of air outside and inside a greenhouse, mass flow rate of air through the greenhouse, mass flow of water in fogging process and solar radiation heat on the greenhouse were investigated as a variables in mathematical model.

Where  $m_w$  is evaporation mass flow rate ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $x_g$  is the absolute humidity of the air inside the greenhouse ( $\text{kg kg}^{-1}$  dry air) and  $x_o$  is the absolute humidity of the air outside greenhouse ( $\text{kg kg}^{-1}$  dry air).

Adiabatic saturation process is a process for reducing the temperature and increasing the humidity of air in greenhouse by the fogging in greenhouse. When the fog was sprayed into the greenhouse, the final condition of the air that was depended on the amount of evaporation shifts from position 1 to position 2 by the constant wet bulb process in the Psychrometric chart (Figure 2).[10]

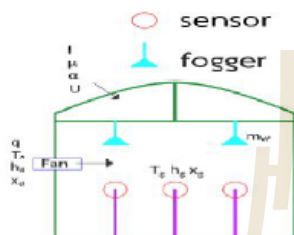


Figure 1: Schematic of fogging climate greenhouse

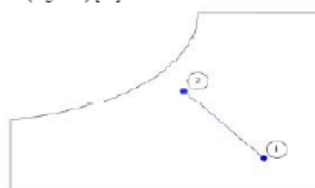


Figure 2: Adiabatic saturation process

Air flow rate equation is considered in term of a steady-state condition and depended with the temperature and relative humidity of air. It can be expressed by equation 1. [6]

$$q = \frac{I\tau\alpha - U(T_g - T_a)}{h_g - h_a} \quad (1)$$

Where  $q$  is the ventilation flow rate ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $I$  is the sunlight intensity ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\tau$  is the coefficient of radiation transmittance of the greenhouse,  $\alpha$  is the proportion of the solar radiation entering the greenhouse influences on the increasing of greenhouse air enthalpy,  $U$  is the overall heat loss coefficient of the greenhouse ( $\text{W m}^{-2} \text{C}^{-1}$ ),  $T_g$  is air temperature inside the greenhouse ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  is the air temperature outside the greenhouse ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $h_g$  is the enthalpy of air inside the greenhouse ( $\text{J kg}^{-1}$  dry air) and  $h_a$  is the enthalpy of air outside the greenhouse ( $\text{J kg}^{-1}$  dry air).

$\alpha$  is depended on the area ratio of glowing plants per bedding and its value is between 0.3 – 0.7[7]. The values of  $U$  for single cover plastic greenhouse is in the range of 6.0 – 8.0  $\text{W m}^{-2} \text{C}^{-1}$  [8]. In this study, the values of  $\alpha$ ,  $\tau$  and  $U$  were specify as 0.5, 0.5 and 7  $\text{W m}^{-2} \text{C}^{-1}$ , respectively. Evaporation flow rate can be expressed as equation 2.[9]

$$m_w = q(x_g - x_a) \quad (2)$$

The thermodynamics processes of this system are adiabatic cooling and humidification and the calculation conditions are controlled by equation 3. and 4.

$$h_g > h_a \quad (3)$$

The enthalpy of the air inside the greenhouse must be greater than the outside

$$x_g > x_a \quad (4)$$

The absolute humidity of the air inside the greenhouse must be greater than that outside the greenhouse.

**b. Efficiency of the Fogging System**

Efficiency of the fogging system can be expressed as equation 5 [9]

$$Eff = \frac{T_{dry,a} - T_{dry,afg}}{T_{dry,a} - T_{wet,afg}} \times 100 \quad (5)$$

Where  $Eff$  is efficiency of the fogging system (%),  $T_{dry,a}$  is the dry-bulb temperature outside the greenhouse ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{dry,afg}$  is the dry-bulb temperature after fogging inside the greenhouse ( $^{\circ}\text{C}$ ) and  $T_{wet,afg}$  is the wet-bulb temperature after fogging inside the greenhouse ( $^{\circ}\text{C}$ )

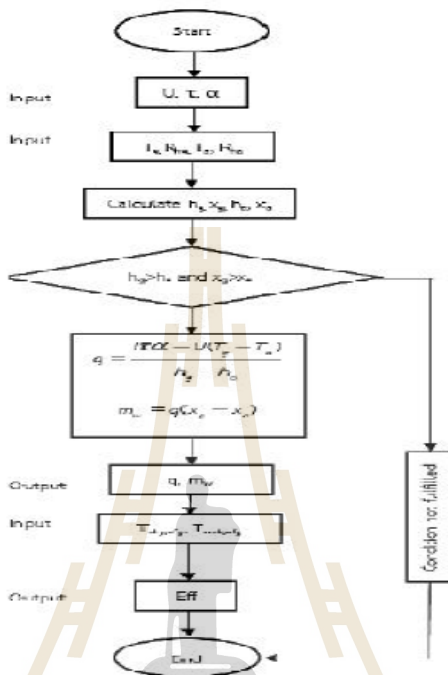


Figure 3: Mathematical model flow chart

c. Climate Data Measurement

The DHT22 sensor from Aosong Electronics was used in dry bulb temperature (Ta) and relative humidity (Rha) measuring system. The sensor is installed at 0.6 m high from ground equal to the height of planting bed in greenhouse (Figure 1). The data is recorded every 15 minutes during August 2017 and stores data by the data logger. The average sunlight intensity in Nakhon Ratchasima, Thailand, in August was 185 W m<sup>-2</sup>.

d. Calculations Process

The calculation of the air flow rate and evaporation flow rate is follow as a flow chart (Figure 3). In the input of the process, the value of U, τ and α was specified by the general properties of greenhouse material and planting. The all-day measured values of temperatures Ta and Relative humidity Rha is used in the time domain calculations and the desired climate in greenhouse (Ta, Rha) were set as the reference in calculations.

III. RESULT AND DISCUSSION

The results of the mathematical model test with real weather data during the period of 7.00 AM - 19.00 PM of the day, under the desired condition that the relative humidity within the house is not higher than 90%, the results are as follows.

a. Capability of Temperature Reduction

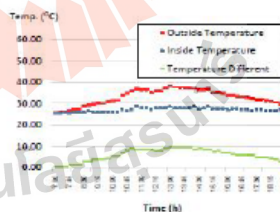


Figure 4: Outside and inside greenhouse temperature

From figure 4, the air temperature after fogging inside the greenhouse are between 25.5oC – 28.5 oC. The averaged value is 27.03 oC, while the air temperature outside the greenhouse was between 26.0 oC – 38.13 oC and the averaged value is 32.95 oC. The air temperature difference after fogging inside and outside the greenhouse are between 0.13 °C – 9.63 °C and the averaged value is 5.92 oC. The difference temperature between inside and outside greenhouse is low in the morning and evening because the ambient humidity is almost saturated and the temperature is low. Accordingly, it result the efficiency of the fogging system is low too. In the afternoon the increasing of difference temperature between inside and outside greenhouse result the rising of efficiency of the fogging system. The decreasing of air temperature inside the greenhouse was resulted by the heat transfer from air in the form of sensible and latent heat to the cloud of water droplet, after that it was moved out from the greenhouse by the ventilator. Under these calculations, it found that the fogging system had capability to reduce the inside air temperature of greenhouse to 9.63 oC when compared to outside temperature.

**b. Evaporative Flow Rate**

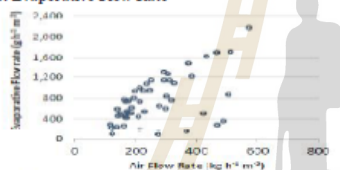


Figure 5: Air flow rate VS. Evaporative flow rate

From figure 5, it shows that when the air flow rate (AFR) increases, the flow rate of the mist system (EFR) is rising too. Due to the humidity of outside air is less than the air inside the greenhouse and the high rate of ventilation then the fogging system can be sprayed in the massive flow rate too. The evaporation flow rate is directly depended with the air flow rate and the difference of humidity ratio of air between inside and outside greenhouse.

**c. Air and Evaporative Water Consumption**

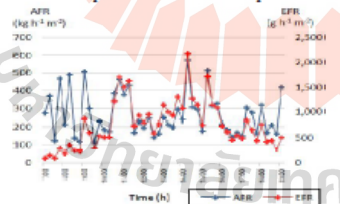


Figure 6: Air and evaporative water consumption during the day

Figure 6 shows that the air flow rate was between 116 kg m-2 h-1 – 572 kg m-2 h-1. The minimum of air flow rate was 116 kg m-2 h-1 at 9.30 AM in the morning and the maximum of air flow rate was 572 kg m-2 h-1 at 14.15 AM in the afternoon that was resulted of the difference between inside and outside temperatures. The evaporation flow rate was 82 g h-1 m-2 – 2,177 g h-1 m-2 and the minimum evaporation flow rate was 82 g h-1 m-2 at 7.00 AM in the morning. The maximum flow rate was 2,177 g h-1 m-2 at 14.15 AM in the afternoon because the air temperature outside the greenhouse is height in that time. This results is consistency with Arbel et al. [6] and Hasan [9] experiments.

**d. Cooling Efficiency**

Form figure 7, the cooling efficiency of fogging system is high over 80% when evaporation flow rate was higher than 516 g h-1 m-2. The tendency of cooling efficiency is increased and depended by the rising of evaporation flow rate with an exponential relation curve.

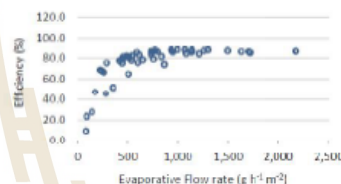


Figure 7: Cooling efficiency VS. Evaporative flow rate

The comparison cooling efficiency of the fogging system and the difference humidity ratio between air outside and inside the greenhouse found that the rising of humidity ratio influence on the increasing of cooling. Because at high humidity ratio the air inside the greenhouse can absorb more water from the fogging process. The consistent and trend line is similar to Figure 8.

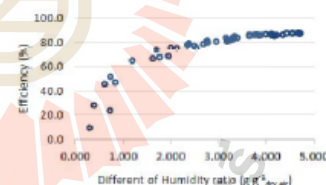


Figure 8: Cooling efficiency VS. Different of humidity ratio between outside and inside the greenhouse

**CONCLUSIONS**

The evaluation of fogging climate greenhouse control by mathematical model found that the maximum capability of fogging cooling system in temperature

International Journal of Mechanical And Production Engineering, ISSN(p): 2320-2092, ISSN(e): 2321-2071

Volume-6, Issue-1, Jan-2018, <http://ijmpe.in>

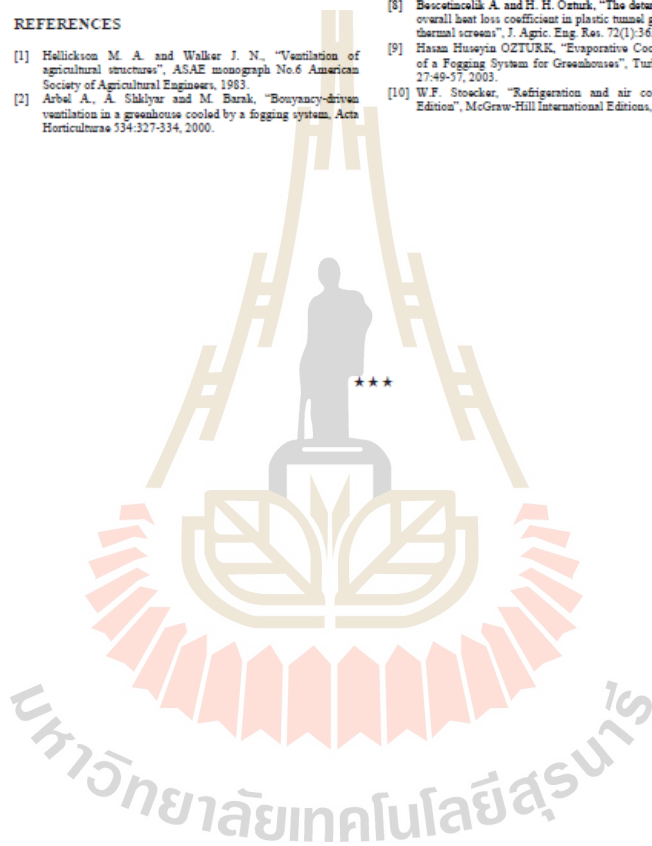
reduction is 9.63oC. The system cooling Efficiency (%) Different of Humidity ratio (g g-ldry air) efficiency is more than 80% and the tendency of cooling efficiency is increased and depended by the rising of evaporation flow rate.

#### ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank the BioSystem Engineering and Technology Research Laboratory and Suranaree University of Technology for support this research.

#### REFERENCES

- [1] Hellickson M. A. and Walker J. N., "Ventilation of agricultural structures", ASAE monograph No.6 American Society of Agricultural Engineers, 1983.
- [2] Arbel A., A. Shklyar and M. Barak, "Buoyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. Acta Horticulturae 534:327-334, 2000.
- [3] Ozurk H. H. and A. Bascetinçelik, "Seralarda Havalandirma Turkiye Ziraat Odasi Birliđi Yayinlari" No.227, Ankara, 2002.
- [4] A.M. Abdel-Ghany, T.Kozai, "Cooling Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses", Biosystems Engineering (2006) 94(1), 97-109, 2006.
- [5] Kittas C., T. Bartzanas and A. Jaffrin, "Greenhouse evaporative cooling: measurement and data analysis", Transactions of the ASAE, Vol.38(6): 683-689, 2001.
- [6] Arbel A., O. Yekutieli and M. Barak, "Performance of a fog system for cooling greenhouses. J. Agric. Engng. Res. 72:129-136, 1999.
- [7] Ozurk H. H. and A. Bascetinçelik, "The nocturnal heat loss and internal temperatures in plastic tunnel greenhouses", Acta Horticulturae 443: 79 - 84, 1997.
- [8] Bascetinçelik A. and H. H. Ozurk, "The determination of the overall heat loss coefficient in plastic tunnel greenhouse with thermal screens", J. Agric. Eng. Res. 72(1):363-374, 1997.
- [9] Hasan Huseyin OZTURK, "Evaporative Cooling Efficiency of a Fogging System for Greenhouses", Turk. J. Agric Vol 27:49-57, 2003.
- [10] W.F. Stoewker, "Refrigeration and air conditioning 2nd Edition", McGraw-Hill International Editions, 1982.



เฉลิมชาติ เสาวรัง, กระวี ศรีอำรรค, เทวรัตน์ ศรีอำรรค. (2561). สมรรถนะการทำงานของโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกกับระบบระบายอากาศที่ควบคุมด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. ปีที่ 24 ฉบับที่ 2: 63 – 69.



วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 (2561), 63-69

วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย      บทความวิจัย  
ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 (2561) 63-69      ISSN 1685-408X

Available online at [www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ](http://www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ)

**สมรรถนะการทำงานของโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกกับระบบระบายอากาศที่ควบคุมด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศ**  
Performance of Fogging Greenhouse with Ventilation System by Using Equilibrium Humidity Equation Control

เฉลิมชาติ เสาวรัง<sup>1\*</sup>, กระวี ศรีอำรรค<sup>1</sup>, เทวรัตน์ ศรีอำรรค<sup>2</sup>  
Chalermchart Saowarat<sup>1\*</sup>, Krawee Treeamnuk<sup>1</sup>, Tawarat Treeamnuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000  
<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000  
<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000  
<sup>4</sup>School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000  
<sup>\*</sup>Corresponding author: Tel: +66-8-8719-0797, E-mail: chalermchart.s@hotmail.com

**บทคัดย่อ**  
บทความวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะการลดอุณหภูมิของโรงเรือนระบบพ่นหมอกซึ่งควบคุมการทำงานด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศที่พัฒนาขึ้น การทำงานของระบบใช้การพ่นหมอกภายในโรงเรือนร่วมกับการระบายอากาศเพื่อดึงความร้อนออกจากอากาศในรูปความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ ควบคุมการทำงานของหัวพ่นหมอกและพัดลมระบายอากาศด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้โปรแกรมซึ่งสร้างขึ้นจากการทำสมดุลความชื้นอากาศภายในโรงเรือน ทดสอบระบบพ่นหมอกกับโรงเรือนขนาดกว้าง 2 m ยาว 4 m และสูง 2 m ติดตั้งปั๊มน้ำความดันสูงขนาด 12 Bar และหัวพ่นหมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 mm จำนวน 4 หัว และพัดลมระบายอากาศ 2 ตัว พบว่าระบบสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 4.60°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอก ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิมีค่าระหว่าง 2.70% – 25.00% มีค่าเฉลี่ย 11.61% และสมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 2.72 – 19.00 มีค่าเฉลี่ย 9.27 โดยสิ้นเปลืองไฟฟ้าและน้ำเฉลี่ย 0.012 kWh day<sup>-1</sup> และ 1.88 kg<sub>water</sub> day<sup>-1</sup> ตามลำดับ  
คำสำคัญ: โรงเรือนเพาะปลูก, ระบบพ่นหมอก, สมดุลความชื้นอากาศ

**Abstract**  
This research objective was to test the air cooling performance of greenhouse fogging system controlled by the developed equilibrium humidity equation. The cooperation of fogging and ventilating system in cooling process was used to remove the heat from the air in latent heat form by the evaporative cooling process. Fogging water pump and electric fan were controlled by microcontroller board used the developed mathematical models. The models were written by applying the equilibrium humidity equation for the prototype greenhouse system. The greenhouse size W x L x H is 2 m x 4 m x 2 m installs the 12 bar of high pressure water pump, 4 foggers of 0.1 mm in hole diameter and 2 ventilating fans. The test results showed that the system can reduce 4.60°C of the maximum difference temperature between outside and inside air of greenhouse. The cooling efficiency was between 2.70% - 25.00% and 11.61% in average. The coefficient of performance (COP) was between 2.72 - 19.00 and 9.27 in average. The system consumes an electric energy and water at 0.012 kWh day<sup>-1</sup> and 1.88 kg<sub>water</sub> day<sup>-1</sup> respectively.  
Keywords: Greenhouse, Fogging System, Equilibrium Humidity Equation

**1 บทนำ**  
โรงเรือนเพาะปลูกเป็นระบบเพาะปลูกที่มีข้อได้เปรียบกว่าการเพาะปลูกแบบปกติหลายประการ อาทิ สามารถควบคุมสภาพอาหารได้เหมาะสมกับพืชได้ดี ลดโอกาสเสี่ยงในการปนเปื้อนเชื้อโรค แมลงศัตรูพืช และสามารถควบคุมสภาพอากาศให้เหมาะสมกับ

การเจริญเติบโตของพืชได้ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการทำเกษตรกรรม ปัจจุบันที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชในโรงเรือนคือรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในโรงเรือนซึ่งจำเป็นต้องควบคุมให้เหมาะสมกับความต้องการของพืช ระบบหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในโรงเรือนเพาะปลูกในพื้นที่เขตร้อน คือระบบการลดอุณหภูมิโดยการ



ระเหยของน้ำ (Evaporative cooling system) โดยข้อดีของระบบนี้คือช่วยให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนลดลงจากการระเหยของน้ำ ส่งผลให้พลังงานภายในโรงเรือนลดลง และทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงขึ้นด้วย โดยมีความเป็นไปได้ว่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบทำความเย็นเชิงกลอีกด้วย (Hellickson and Walker, 1983)

การทำงานของระบบลดอุณหภูมิแบบพ่นหมอกซึ่งเป็นการระเหยน้ำแบบหนึ่ง อาศัยการพ่นหมอกขนาดเล็กผ่านหัวพ่นหมอก หมอกที่ได้นี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 60  $\mu\text{m}$  เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ (Arbel et al., 2000) โดยจะพ่นหมอกเหนือพื้นที่เพาะปลูก ให้ตกลงอย่างอิสระและสัมผัสกับอากาศภายในโรงเรือน สามารถสร้างได้หลายวิธี หมอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 30  $\mu\text{m}$  สามารถสร้างได้จากการใช้ปั๊มที่มีแรงดันสูงกับหัวพ่นหมอก (Ozturk and Bascetincelik, 2002)

บทความวิจัยที่ผ่านมา (Arbel et al., 2000) พบว่าระบบทำความเย็นแบบพ่นหมอกมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนได้ดีกว่าระบบแผงรังผึ้งและพัดลม (Abdel-Ghany et al., 2006) ได้ทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบพ่นหมอกด้วยน้ำในโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิดโดยคำนวณจากกรรมผลพลังงานและสมมูลมวล ทำการพ่นหมอกที่อัตราการไหล 10  $\text{g s}^{-1}$  เป็นเวลา 30 60 และ 90 s ในคาบเวลา 90 180 และ 270 s พบว่าการพ่นหมอกเป็นเวลา 60 s ในคาบเวลา 180 s ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดประมาณ 30% (Gittas et al., 2001) ได้ทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนพบว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงถึง 80% และสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 10°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน (Ozturk, 2003) ได้ทดสอบเกี่ยวกับประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกพบว่าประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เมื่ออัตราการไหลของระบบพ่นหมอกและผลต่างของอัตราส่วนความชื้นระหว่างอุณหภูมิภายในโรงเรือนและภายนอกโรงเรือนเพิ่มขึ้น (Saowarat et al., 2018) ได้คำนวณเชิงตัวเลขของระบบลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกพบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 9.63°C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือน

แต่การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศในโรงเรือนที่ใช้การพ่นหมอก จำเป็นจะต้องควบคุมตัวแปรที่สองตัว คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการพ่นหมอกและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้การควบคุมคาบเวลาการพ่นหมอกในโรงเรือนแบบระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop control) เนื่องจากทำได้ง่าย แต่พบว่าเมื่อข้อเสียคือขาดความแม่นยำ และมีความสิ้นเปลืองน้ำสูงมากที่อิงพึ่งสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนสูงกว่าที่พืชต้องการ วิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหา ระบบควบคุมดังกล่าวได้คือการให้ระบบควบคุมแบบปิด (Close loop control) ที่อาศัยการป้อนกลับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอกมาร่วม

ควบคุมการพ่นหมอกด้วย โดยใช้การคำนวณตามสมการสมดุลความชื้นช่วยในการกำหนดอัตราการพ่นหมอก ซึ่งจะช่วยให้เกิดความแม่นยำและลดปัญหาน้ำส่วนเกินในระบบ

ในงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมสภาพอากาศในโรงเรือนพ่นหมอกด้วยสมการควบคุมที่ได้จากสมดุลความชื้นอากาศและทดสอบสมรรถนะการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอก

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 โรงเรือนเพาะปลูกในภาวทดลอง

โรงเรือนเพาะปลูกมีขนาดกว้าง 2 m ยาว 4 m สูง 2 m โดยใช้ท่อ PVC เป็นโครงร่างและคลุมด้วยพลาสติก Polyethylene ประกอบด้วยระบบควบคุมและการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศภายในโรงเรือน โดยวางตำแหน่งเซนเซอร์ระยะห่างเท่ากันเพื่อให้สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ทั่วถึง ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก โดยวางตำแหน่งของหัวพ่นหมอกเป็นระยะห่างที่เท่ากันเพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิได้อย่างทั่วถึง โดยตัวแปรที่พิจารณาในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นคืออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกโรงเรือน เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในระบบพ่นหมอก ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และระยะในหน่วย m แสดงดัง Fig. 1 และโรงเรือนจริงที่สร้างขึ้นแสดงดัง Fig. 2

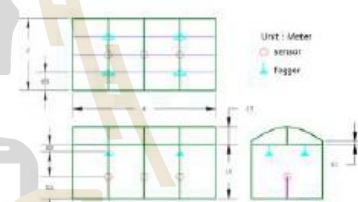


Figure 1. Greenhouse layout.



Figure 2. Experimental greenhouse.

2.2 ระบบควบคุม การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอก

ระบบควบคุมใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 (บอร์ดและอุปกรณ์ควบคุมแสดงใน Fig. 3) ในการควบคุมระบบเนื่องจากมีข้อดีคือมีพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตเพียงพอในการต่อใช้งาน ติดตั้งเซนเซอร์ รุ่น DHT22 ของบริษัท Aosong Electronics สำหรับวัดค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนโดยติดตั้งสูงจากพื้น 0.6 m จำนวน 3 จุด ซึ่งเท่ากับความสูงของโต๊ะเพาะปลูกทั่วไป และติดตั้งโมดูลนาฬิกา Real Time Clock รุ่น DS3231 จำนวน 1 ตัว ใช้สำหรับบอกเวลาให้กับ Arduino และโมดูล Micro SD card จำนวน 1 ตัว สำหรับเป็น Data logger ในการเก็บข้อมูล และโมดูล Relay จำนวน 3 ตัว เพื่อควบคุมพัดลมและปั๊ม ของบริษัท Arduinoall ระบบระบายอากาศใช้พัดลมดูดอากาศรุ่น APC20-3 25 W ขนาด 8 นิ้ว อัตราการไหล 7 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> ของบริษัท LONB จำนวน 2 ตัว ซึ่งสามารถระบายอากาศได้ 1 Air change rate (Henllickson and Walker, 1983) และระบบพ่นหมอกใช้ปั๊มความดัน 12 Bar และหัวพ่นหมอกความดันสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 mm ชนิด 1 รู ของบริษัท Fogeasy ทำการพ่นสลับในวันที่ 17 เดือนธันวาคมปี 2561 ตั้งแต่เวลา 9.30 น. - 17.30 น. โดยบันทึกค่าทุกค่าเวลา 15 min และนำข้อมูลบันทึกไว้ที่ Data logger ของระบบควบคุม



Figure 3. Control box.

2.3 สมการสมดุลความชื้นอากาศ

2.3.1 กระบวนการลดอุณหภูมิและเพิ่มความชื้น

จาก Fig. 4 Psychrometric chart แสดงให้เห็นถึงกระบวนการพ่นหมอกและเพิ่มความชื้นของระบบเมื่อใช้วิธีการพ่นหมอก โดยจุด U คืออากาศภายในโรงเรือนก่อนทำการพ่นหมอก จุด I คืออากาศภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอกตามสภาวะที่ต้องการควบคุม ที่จุด W คือจุดที่อากาศอิ่มตัวไปด้วยความชื้น กระบวนการลดอุณหภูมิจะดำเนินจากจุด U ไปตามเส้น

กระเปาะเปียกจนถึงเส้นความชื้นอิ่มตัวที่จุด W ซึ่งเราอาจหยุดกระบวนการก่อนถึงจุด W ไว้ที่จุด I ตามสภาวะอากาศที่ต้องการควบคุมในโรงเรือน T<sub>in</sub> คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายใน

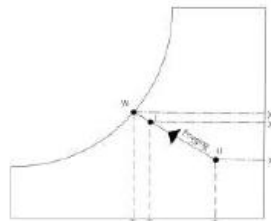


Figure 4. Process on psychrometric chart.

โรงเรือนก่อนการพ่นหมอก (°C) T<sub>db</sub> คืออุณหภูมิกระเปาะแห้งภายในโรงเรือนหลังการพ่นหมอก (°C) T<sub>db</sub> คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก (°C) x<sub>u</sub>, x<sub>in</sub>, x<sub>i</sub> คืออัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก หลังการพ่นหมอกที่สภาวะอากาศอิ่มตัวและหลังการพ่นหมอกตามสภาวะควบคุมในหน่วย kg<sub>v</sub>, kg<sub>v</sub><sup>-1</sup> dry air ตามลำดับ

2.4.1 สมการการคำนวณของระบบ

การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นของอากาศหลังการพ่นหมอกจำเป็นต้องหาความดันไอน้ำอิ่มตัว ความดันไอและเอนทัลปี โดยความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จาก eq. 1 (ASHRAE, 2001)

$$\ln p_{sa} = C_1/T + C_2 + C_3/T + C_4/T^2 + C_5/T^3 + C_6 \ln T \quad (1)$$

- โดยที่ p<sub>sa</sub> - ความดันไอน้ำอิ่มตัว (Pa)
- T - อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°C)
- C<sub>1</sub> - -5.8002206e+03
- C<sub>2</sub> - 1.3914993e+00
- C<sub>3</sub> - -4.8640239e-02
- C<sub>4</sub> - 4.1764768e-05
- C<sub>5</sub> - -1.4452093e-08
- C<sub>6</sub> - 6.5459673e+00

ความดันไอสามารถคำนวณได้จาก eq. 2 (ASHRAE, 2001)

$$p_w = p_{sa} \phi \quad (2)$$

- โดยที่ p<sub>w</sub> - ความดันไอน้ำจริงในอากาศ (Pa)
- φ - ความชื้นสัมพัทธ์
- อัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จาก eq. 3 (ASHRAE, 2001)

$$X = 0.62198 \frac{p_w}{p - p_w} \quad (3)$$

โดยที่ X - อัตราส่วนความชื้น (kg<sub>w</sub> kg<sup>-1</sup> dry air)  
p - ความดันอากาศมีค่า 101.325 kPa

เอนทัลปีสามารถคำนวณได้จาก eq. 4 (ASHRAE, 2001)

$$h = 1.006T + X(2501 + 1.805T) \quad (4)$$

โดยที่ h - เอนทัลปี (kJ kg<sup>-1</sup> dry air)

ปริมาตรจำเพาะของอากาศสามารถคำนวณได้จาก eq. 5 (ASHRAE, 2001)

$$v = 0.2871(T + 273.15)(1 + 1.6078X) / p \quad (5)$$

โดยที่ v - ปริมาตรจำเพาะของอากาศ (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> dry air)

อุณหภูมิอุณหภูมิกะเปาะเปียกสามารถคำนวณได้จาก eq. 6 (Stull, 2011)

$$T_w = T \text{atan}[0.151977(RH\% + 8.313659)^{1/2}] + \text{atan}(T + RH\%) - \text{atan}(RH\% - 1.676331) + 0.00391838(RH\%)^{3/2} \text{atan}(0.023101RH\%) - 4.686035 \quad (6)$$

โดยที่ T<sub>w</sub> - อุณหภูมิกระเปาะเปียก (°C)  
RH% - ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)

กำหนดให้การคำนวณปริมาณน้ำพ่นหมอกเป็นแบบภาวะคงตัว (Steady-state condition) โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์และเป็นไปตามกฎทรงมวล โดยการคำนวณหาได้จาก eq. 7

$$m_w = \frac{m_a(x_1 - x_2)}{v_u} \quad (7)$$

โดยที่ m<sub>w</sub> - ปริมาณน้ำพ่นหมอก (kg<sub>w</sub>)  
m<sub>a</sub> - ปริมาตรอากาศในโรงเรือน (m<sup>3</sup>)  
v<sub>u</sub> - ปริมาตรจำเพาะของอากาศในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอก (m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> dry air)

ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอกคือสัดส่วนของผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ภายนอกโรงเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะแห้งหลังการพ่นหมอกกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกโรงเรือนกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกหลังการพ่นหมอก และสามารถคำนวณได้ eq. 8 (Ozturk, 2003)

$$\eta_{cool} = \frac{T_w - T_d}{T_u - T_w} \times 100 \quad (8)$$

โดยที่ η<sub>cool</sub> - ประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอก

สมรรถนะการลดอุณหภูมิของระบบพ่นหมอก (Coefficient of Performance) สามารถคำนวณได้จาก eq. 9

$$COP = \frac{m_a c_{p,air} (T_d - T_u)}{W_{pump} t_{pump}} \quad (9)$$

โดยที่ COP - สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ  
c<sub>p,air</sub> - ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ °C<sup>-1</sup>)  
W<sub>pump</sub> - กำลังไฟฟ้าของปั๊ม (kJ s<sup>-1</sup>)  
t<sub>pump</sub> - ระยะเวลาที่ปั๊มทำงาน (s)

และจาก Fig. 4 ที่จุด 1 สามารถคำนวณหาอุณหภูมิอากาศที่คาดการณ์ระบบจะสามารถลดอุณหภูมิลงได้ (T<sub>d</sub>) ด้วย eq. 4

### 2.4.2 ขั้นตอนการคำนวณและการควบคุม

การคำนวณอัตราการไหลของระบบพ่นหมอกเริ่มคำนวณเมื่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนแล้วส่งค่ามาที่บอร์ดควบคุมเพื่อทำการคำนวณหาความดันไอน้ำอิ่มตัวจาก eq. 1 ความดันไอจาก eq. 2 อัตราส่วนความชื้น x<sub>2</sub> จาก eq. 3 เอนทัลปีจาก eq. 4 ปริมาตรจำเพาะของอากาศ v<sub>u</sub> จาก eq. 5 และอุณหภูมิกระเปาะเปียก T<sub>w</sub> จาก eq. 6

จากนั้นใช้อุณหภูมิ T<sub>w</sub> และความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH คำนวณค่าจาก eq. 1 - 3 เพื่อหาอัตราส่วนความชื้น x<sub>w</sub> กำหนดให้ระบบพ่นหมอกเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับอากาศจนถึงจุด 1 โดยเพิ่มปริมาณน้ำให้กับอากาศเป็น 80% ของปริมาณน้ำในอากาศเมื่ออิ่มตัวไปด้วยความชื้น (เท่ากับค่า x<sub>w</sub> ณ ขณะนั้น) ซึ่งจะทำได้ค่าอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ x<sub>1</sub>

ทั้งนี้มีการกำหนดตำแหน่งของจุด 1 ที่ 80% ของ x<sub>w</sub> ทำเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นในโรงเรือนเพิ่มขึ้นจนใกล้จุดอิ่มตัวมากเกินไป (100%) เพราะระลอกน้ำจากการพ่นหมอกอาจจะเหนยเป็นไอน้ำไม่หมดกลายเป็นหยดน้ำสะสมในระบบซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองน้ำและอาจทำให้ที่ซึ่งบางชนิดได้รับความชื้นมากเกินไปจนเกิดความเสียหายได้

จากนั้น คำนวณหาปริมาณน้ำพ่นหมอกจาก eq. 7 และใช้ค่าอัตราการไหลของปั๊มน้ำที่ทราบค่าช่วยไขกุญแจคำนวณหาระยะเวลาการทำงานของปั๊มได้

สมการและขั้นตอนการคำนวณทั้งหมดถูกโปรแกรมไว้ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ กำหนดให้หนึ่งรอบการทำงานของโปรแกรมใช้เวลา 90 s โดยปั๊มจะถูกเปิดตอนเริ่มต้นการทำงาน จากนั้นระบบควบคุมการพ่นหมอกจะสั่งเปิดปั๊มน้ำความดันสูงตามระยะเวลาการทำงานของปั๊มที่คำนวณได้ เมื่อเสร็จสิ้นการพ่นหมอกแล้ว ปั๊มจึงถูกสั่งให้เปิดการทำงานเท่ากับเวลาที่เหลือ



จากการพ่นหมอกจนถึงเวลา 90 s ที่กำหนด ก่อนเริ่มกระบวนการทำงานในรอบถัดไป Flow Chart ของระบบควบคุมแสดงใน Fig. 5

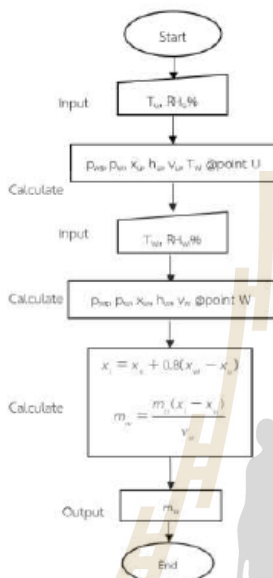


Figure 5. Flow chart process.

3 ผลและวิจารณ์

การทดสอบการทำงานของโรงเรือนในเดือนกุมภาพันธ์ 2561 ระหว่างเวลา 9.30 น. - 17.00 น. ได้ผลการทดสอบดังนี้

3.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิ

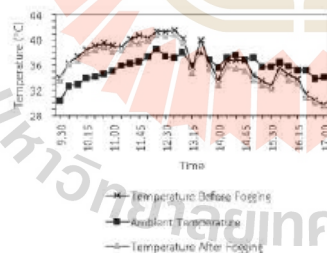


Figure 6. Temperature in greenhouse and ambient during the day.

จาก Fig. 6 ความสามารถในการลดอุณหภูมิพบว่าในช่วงเช้า 9.00 น. - 13.00 น. อุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าระหว่าง 30.30°C - 37.30°C มีค่าเฉลี่ย 34.52°C อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอกมีค่าระหว่าง 33.93°C - 40.77°C มีค่าเฉลี่ย 38.54°C เมื่อระบบพ่นหมอกแล้วพบว่าในช่วงเช้าอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 33.60°C - 39.90°C มีค่าเฉลี่ย 37.92°C ซึ่งผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 0.23°C - 1.27°C โดยมีค่าเฉลี่ย 0.62°C

ในช่วงบ่าย 13.00 น. - 17.00 น. อุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าระหว่าง 33.80°C - 38.60°C มีค่าเฉลี่ย 36.43 °C อุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนก่อนการพ่นหมอกมีค่าระหว่าง 29.60°C - 41.57°C มีค่าเฉลี่ย 35.82°C และหลังการพ่นหมอกอุณหภูมิอากาศมีค่าระหว่าง 29.50°C - 40.90°C มีค่าเฉลี่ย 35.05°C โดยที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าระหว่าง 0.10°C - 1.60°C และมีค่าเฉลี่ย 0.77°C

อุณหภูมิภายในโรงเรือนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกเนื่องจากโรงเรือนซึ่งเป็นระบบปิดได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ทำให้อากาศภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้นและไม่สามารถถ่ายเทออกได้อย่างอิสระเหมือนระบบเปิด จึงเกิดเป็นสภาวะเรือนกระจกขึ้น

ในช่วงเช้าผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่าน้อยเนื่องจากความชื้นในอากาศภายนอกโรงเรือนยังมีค่าสูง (Fig. 7) ประกอบกับอากาศมีอุณหภูมิต่ำ เมื่ออากาศอุ่นนำเข้าสู่โรงเรือนจึงสามารถรับไอน้ำที่ระเหยจากกล่องหมอกเพิ่มขึ้นได้อีกเพียงเล็กน้อยโดยที่อัตราการของสภาวะเรือนกระจกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของอากาศในโรงเรือนสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ผลกระทบนี้ทำให้ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกมีค่าต่ำไปด้วย (Fig. 8)

ในช่วงเวลา 13.00 - 14.00 พบว่าท้องฟ้ามีเมฆมากและอากาศเย็นส่งผลให้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์เข้าโรงเรือนได้น้อยลงและทำให้อุณหภูมิในช่วงเวลาดังกล่าวมีความแปรปรวนดังแสดงใน Fig.6

ในช่วงบ่ายผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนมีค่านับไม่สูงชัน เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศภายนอกโรงเรือนมีค่าสูงชันและค่อนข้างคงที่ตลอดช่วง (Fig. 6) ประกอบกับความชื้นที่อุณหภูมิค่าต่ำลง (Fig. 7) ส่งผลให้

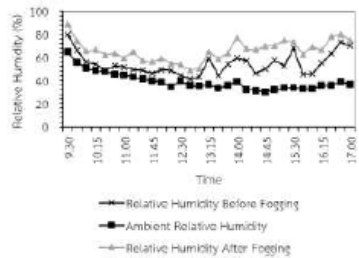


Figure 7. Relative Humidity during the day.

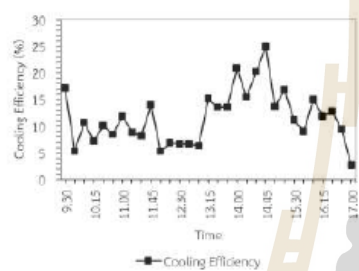


Figure 8. Cooling Efficiency during the day.

ประสิทธิภาพของระบบพ่นหมอกมีค่าสูงขึ้นด้วย (Fig. 8) โดยอุณหภูมิภายในโรงเรือนมีค่าที่ลดลงเนื่องจากผลของการถ่ายเทความร้อนจากอากาศอุ่นในรูปของพลังงานความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง น้ำจะได้รับความร้อนจากอากาศและเปลี่ยนสถานะเป็นไอแล้วจึงถูกดูดออกจากโรงเรือนโดยพัดลมระบายอากาศ ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 4.60 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนและประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่าระหว่าง 2.70% - 25.00% โดยมีค่าเฉลี่ย 11.61% การพ่นหมอกในช่วงบ่ายยังสามารถลดอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนให้ต่ำกว่าอากาศภายนอกได้อีกด้วย

ผลการทดสอบพบว่า การใช้ระบบพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงควรทำร่วมกับระบบระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ โดยในช่วงเช้าการระบายอากาศออกจากโรงเรือนเพื่อลดอิทธิพลของสภาวะเรือนกระจกลงให้น้อยที่สุดมีผลต่อการลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ดีกว่าการพ่นหมอก และในช่วงบ่ายการใช้ระบบพ่นหมอกเพื่อลดอุณหภูมิร่วมกับการระบายอากาศจะทำให้โรงเรือนมีความสามารถในการลดอุณหภูมิได้สูงสุดตลอดทั้งวัน

3.2 ความสามารถในการลดอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้

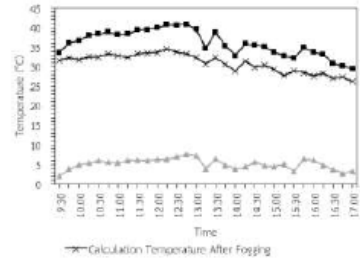


Figure 9. Relative Temperature during the day.

จาก Fig. 9 พบว่าอุณหภูมิของอากาศภายในโรงเรือนที่คำนวณได้จากสมการควบคุมมีผลของหมอกสามารถระเหยเป็นไอได้ทั้งหมด จะมีค่าระหว่าง 26.20°C - 34.49°C และมีค่าเฉลี่ย 30.92°C ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศหลังพ่นหมอกในโรงเรือนที่ได้จากการทดสอบมีค่าระหว่าง 29.50°C - 40.90°C และมีค่าเฉลี่ย 36.07°C ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศหลังการพ่นหมอกภายในโรงเรือนกับอากาศที่คำนวณได้นี้มีค่าระหว่าง 1.98°C - 7.60°C มีค่าเฉลี่ย 5.51°C ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากผลของหมอกที่พ่นสู่อากาศไม่สามารถระเหยเป็นไอได้หมด 100% เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นอากาศที่เข้าสู่โรงเรือน ซึ่ง แนวโน้มของความแตกต่างสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการพ่นหมอกใน Fig. 8

ในการประยุกต์ใช้ระบบนี้กับโรงเรือนเพาะปลูกจึงควรติดตั้งพัดลมภายในโรงเรือนเพื่อช่วยเพิ่มการหมุนเวียนอากาศให้ดีขึ้น เพื่อให้การระเหยของหมอกเป็นไอเกิดได้ดีและทำให้ค่าประสิทธิภาพการพ่นหมอกสูงขึ้น อุณหภูมิหลังการพ่นหมอกจึงจะมีค่าลงได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณยิ่งขึ้น

3.3 สมรรถนะการทำความเย็นของระบบ

จาก Fig. 10 พบว่าสมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 2.72 - 19.00 มีค่าเฉลี่ย 9.27 โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าประสิทธิภาพการพ่นหมอก (Fig. 9) โดยที่ในช่วงเช้าเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิภายในโรงเรือนก่อนและหลังพ่นหมอกมีค่าที่ต่ำส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นมีค่าต่ำ และในช่วงบ่ายเมื่อผลต่างของอุณหภูมิภายในโรงเรือนก่อนและหลังพ่นหมอกมีค่าที่สูงขึ้นและส่งผลให้สมรรถนะการทำความเย็นมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

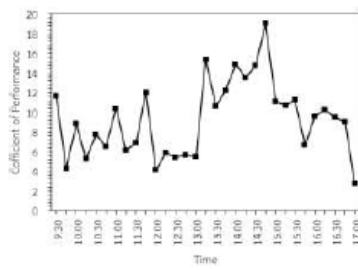


Figure 10. Coefficient of Performance during the day.

4 สรุป

การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งได้จากการทำสมดุลมวลสารของระบบโรงเรือนพ่นหมอกพบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้สูงสุด 4.60 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนและประสิทธิภาพการทำความเย็นมีค่าระหว่าง 2.70% - 25.00% โดยมีค่าเฉลี่ย 11.61% และสมรรถนะการทำความเย็นของระบบมีค่าระหว่าง 2.72 - 19.00 มีค่าเฉลี่ย 9.27 โดยมีค่าสิ้นเปลืองไฟฟ้าและน้ำเฉลี่ย 0.012 kWh day<sup>-1</sup> และ 1.88 kg<sub>water</sub> day<sup>-1</sup> ตามลำดับ ในการพัฒนาระบบในอนาคตควรติดตั้งแผงแสงเพื่อลดปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าโรงเรือนให้น้อยลงและใช้น้ำเย็นในการพ่นหมอกเพื่อให้สามารถลดอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนได้มากขึ้น และอาจปรับปรุงโปรแกรมให้สามารถตั้งค่าความชื้น (X) ได้ตามความต้องการของพืชได้ต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัย BioSystem Engineering and Technology Research Laboratory และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีให้การสนับสนุนการวิจัยนี้

6 เอกสารอ้างอิง

Abdel-Ghany, A.M., Kozai, T. 2006. Cooling Efficiency of Fogging Systems for Greenhouses. *Biosystems Engineering*, 94(1), 97-109.

Arbel A., A. Shklyar and M. Barak. 2000. Bouyancy-driven ventilation in a greenhouse cooled by a fogging system. *Acta Horticulturae*, 534, 327-334.

ASHRAE. 2001. *ASHRAE Fundamentals Handbook* (5). American Society of Heating Refrigerating & A-C Engineers.

Hellickson M. A., Walker J. N. 1983. Ventilation of agricultural structures. ASAE monograph No. 6 American Society of Agricultural Engineers.

Kittas C., Bartzanas, T., Jaffrin, A. 2001. Greenhouse evaporative cooling: measurement and data analysis. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 683-689.

Ozturk, H.H. 2003. Evaporative Cooling Efficiency of a Fogging System for Greenhouses. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27, 49-57.

Ozturk H. H., Bascetincelik, A. 2002. Seralarda Havalandırma Türkiye Ziraat Odaları Birliği Yayınları. Ankara No: 227.

Saowarat, C., Treeamnuk, K., Treeamnun, T. 2018. Mathematical model for exact solution method of fogging process control in climate greenhouse system. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 6(1), 24 - 28.

Stull, R. 2011. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. *American Meteorological Society*.

## ประวัติผู้เขียน

นายเฉลิมชาติ เสาวรัง เกิดเมื่อวันที่ 27 มกราคม พ.ศ. 2537 เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสุรวิทยาคาร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2558 ปี พ.ศ.2559 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติครั้งที่ 15 ปี 2560 เรื่องการศึกษาการลดอุณหภูมิขั้นต้นพวงงุ่นสดด้วยวิธีการพ่นละอองน้ำเย็น

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 4 ปี 2560 เรื่องการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของระบบควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอก

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ THE IRES 87th INTERNATIONAL CONFERENCE. Conference Place & Date: Tokyo, Japan 06-11-2017. เรื่อง Mathematical Model For Exact Solution Method of Fogging Process Control in Climate Greenhouse System.

ได้เสนอความดีพิมพ์เผยแพร่วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 (2561) : 63 – 69. เรื่อง สมรรถนะการทำงานร่วมของโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกกับระบบระบายอากาศที่ควบคุมด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศ.